

发电-电动机转子不同磁极引线的应力分布与疲劳特性对比研究

王梓琪¹, 赵峰¹, 林秉武², 刘福³

[1. 华东桐柏抽水蓄能发电责任有限公司, 杭州 浙江 310004;

2. 安德里茨(中国)有限公司, 北京 100004;

3. 国网新源控股有限公司, 北京 100053]

摘要: 磁极极间连接线是发电-电动机转子的关键部件, 合理的引线方式可有效避免大型发电-电动机运行过程中由于工况频繁切换引起的磁极连接线熔断等故障。针对该问题, 采用有限元法对 3 种典型磁极引线连接方式进行了分析, 详细计算额定转速为 300 r/min 和 500 r/min 的 2 台电机的 3 种磁极连接结构的应力和疲劳情况。结合疲劳分析结果, 指出适用于高转速发电-电动机磁极连接线典型结构, 并给出发电-电动机磁极连接线设计方面的建议。研究成果可为抽水蓄能电站发电-电动机极间连接线选型及运行维护提供支持。

关键词: 抽水蓄能电站; 发电-电动机; 磁极引线; 有限元

中图分类号: TM 921.41; TV 743 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)12-0088-05

Comparison of Stress and Fatigue Characteristics of Pole Connection of Large Generator-Motor Synchronous Machines

WANG Ziqi¹, ZHAO Feng¹, LIN Bingwu², LIU Fu³

[1. Eastern China Tong Bai Pumped Storage Power Generation Co., Ltd., Hangzhou 31004, China;

2. Andritz (China) Co., Ltd., Beijing 100004, China;

3. State Grid Xinyuan Co., Ltd., Beijing 100053, China]

Abstract: Pole connection was the key component of the rotor of generator-motor synchronous machines. Reasonable connection structure could effectively avoid the pole connection fusing fault caused by the frequent switch of operation conditions of generator-motor synchronous machines. For this purpose, three typical pole connection structures were analyzed by finite element method. And the stress and fatigue data of the three structures under the conditions of rated speed 300 r/min and 500 r/min were also calculated precisely. Combined with fatigue analysis result, the typical structure of pole connection of high-speed generator-motor synchronous machines was proposed, and the suggestion of design scheme was also presented. The research results could provide an important technique support for the selection of pole connection and operation maintenance of pumped-storage power stations.

Key words: pumped storage power station; generator-motor synchronous machine; pole connection; finite element

0 引言

发电-电动机磁极极间连接线是发电-电动

机转子的关键部件。由于抽水蓄能机组运行工况复杂、工况转换频繁, 极间连接线承受变载荷, 多个电站发电-电动机接连发生了磁极连接线熔断

作者简介: 王梓琪(1987—), 男, 工程师, 研究方向为抽水蓄能电站运维管理。

赵峰(1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为抽水蓄能电站运维检修管理。

林秉武(1977—), 男, 工程师, 研究方向为抽水蓄能电站发电-电动机设计理论。

事件及线圈问题。为防止类似事件再次发生,有必要研究发电-电动机极间连接线的接线方式。

已有文献开展了电机结构件应力及强度计算方面的研究。在电动机方面,文献[1]对盘式绕组旋转式音圈电机的热应力与热变形进行了分析。文献[2-3]对电动汽车用高速异步电机进行了多物理场分析并计算了轴承疲劳特性。文献[4]研究了铜屏蔽层对永磁无刷直流电机转子涡流损耗和应力的影响。在发电机方面,文献[5]采用数值方法模拟了水泵水轮机导叶卡门涡现象。文献[6]研究了混流式水轮机叶片经正火+回火热处理后的应变场分布情况。文献[7]建立了水轮发电机转子悬挂结构计算模型,分析了发电和抽水两种工况下的温度场和动应力情况。文献[8]采用有限元方法,计算了转子绕组匝间短路情况下的磁极热应力分布。

在水轮机转子磁极引线研究方面,文献[9]分析了发电机转子磁极引线损坏的原因,并提出处理方法。文献[10]利用有限元法分析了抽水蓄能电站发电-电动机转子磁极引线的疲劳特性。在此基础上,本文以额定转速 300 r/min 和 500 r/min 的 2 台电机为例,采用有限元法对 3 种有代表性的磁极连接方式进行了仿真分析,详细计算了 3 种类型引线的内侧连接和外侧连接的应力分布和疲劳强度情况,进一步提出适用于高转速发电-电动机磁极连接线的接线方式,有效避免转子运行故障的发生。

1 不同磁极引线接线方案及疲劳有限元分析

1.1 不同磁极引线接线方案

由文献[10]可知,国内常见的 3 种磁极引线方案如图 1 所示。其中,方案 1 极间连接片为整体铜板结构,极间连接片与磁极引出部位采用螺栓连接,并固定在磁轭拉杆上;方案 2 极间连接片为 Ω 型柔性结构,材料为 0.5 mm 薄铜板叠成,与磁极引出部位连接处整体压焊成一体,采用螺栓连接, Ω 型部位的薄铜板间有 0.1 mm 间隙,如图 1(b) 中阴影部分所示,具有一定的可缩性,并通过拉杆固定在磁轭上;方案 3 的极间连接片为分体铜板连接结构,材料为铜板,极间连接片与磁极引出部位采用螺栓连接,并固定在磁轭拉杆上。

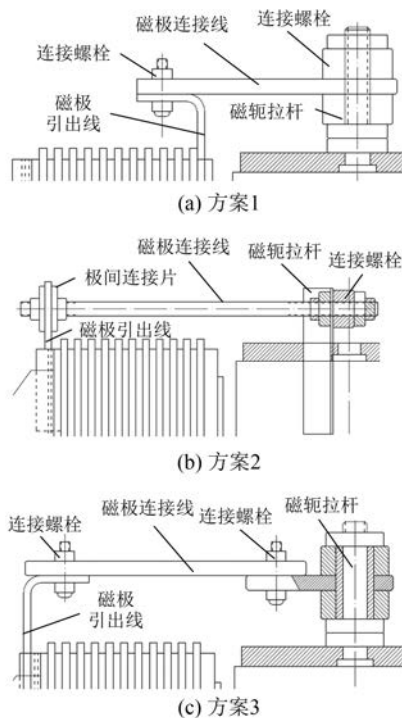


图 1 不同的极间连接结构

1.2 不同接线方式的疲劳有限元模型

利用 ANSYS 软件,针对不同类型的引线方案,分别建立内侧连接和外侧连接 2 种结构模型。基于有限元法,通过发电-电动机的主要设计参数来计算各个部件的许用应力,进而分析不同接线方式的疲劳损耗程度,依据不同方案建立极间连接线、磁极线圈及把合螺钉或固定块及螺杆的整体模型。各部件均采用实体建模,使用 SOLID185 单元划分网格,部件连接使用接触单元模拟。

(1) 方案 1 模型。方案 1 为整体铜板结构极间连接片的接线方式。建立极间连接线、磁极线圈及把合螺钉的整体模型,各部件均采用实体建模,整体施加相应的工作转速模拟离心力(额定转速、甩负荷转速、飞逸转速);把合螺钉上施加预紧力。图 2 所示为方案 1 的内侧和外侧连接的有限元模型^[10]。

(2) 方案 2 模型。方案 2 为 Ω 型柔性结构极间连接片的接线方式。建立极间连接线、磁极线圈、固定块、固定板及螺杆的整体模型,各部件均采用实体建模,整体施加相应的工作转速模拟离心力(额定转速、甩负荷转速、飞逸转速);把合螺



图2 方案1的有限元模型

钉上施加预紧力。图3所示为方案2的内侧和外侧连接的有限元模型^[10]。



图3 方案2的有限元模型

3) 方案3模型。方案3为分体铜板连接结构极间连接片的接线方式。建立极间连接线、磁极线圈及把合螺钉的整体模型,各部件均采用实体建模,整体施加相应的工作转速模拟离心力(额定转速、甩负荷转速、飞逸转速);把合螺钉上施加预紧力。图4所示为方案3的内侧和外侧连接的有限元模型^[10]。



图4 方案3的有限元模型

2 计算结果分析

为了对比不同方案的情况,对3种方案的应力分布、强度和疲劳损耗进行分析,同时也对3种方案所采用的单层和多层铜排的应力和变形情况进行分析,最后对计算结果进行归纳总结并提出适用的方案。

2.1 分析方案

主要研究的内容为:静止到额定转速、额定转速到甩负荷到静止、额定转速到飞逸转速到静止等不同工况及工况频繁转换下磁极连接线应力变化和疲劳情况。

针对相同结构形式,计算了额定转速为300 r/min(转子线速度为156.0 m/s)以及500 r/min(转子线速度为183.7 m/s)的磁极连接

结构的应力和疲劳。研究部位主要为磁极引出线位置和磁极极间连接片本体。3种方案中,方案1和方案3的磁极引线为单层铜排,方案2由0.5 mm薄铜板叠成的多层铜排引出。

2.2 总体应力分布与疲劳特性分析结果对比

通过对比计算结果可知,3种方案中,无论额定转速是300 r/min还是500 r/min,方案2均存在应力分布超过要求的情况。受篇幅限制,文中很难将所有计算结果一一列出,但为了说明计算结果,给出了额定转速为300 r/min电机磁极引线采用方案2时,在额定工况、甩负荷工况以及飞逸工况下的磁极连接线外侧的总体应力分布情况,结果如图5~图7所示。

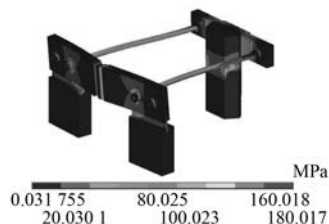


图5 额定工况总体应力分布

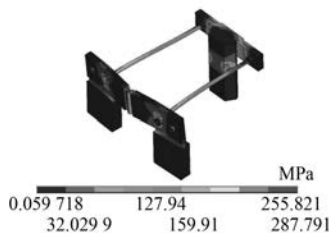


图6 甩负荷工况总体应力分布

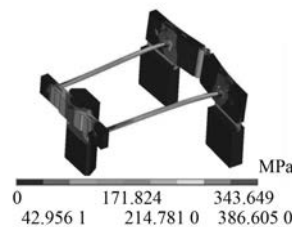


图7 飞逸工况总体应力分布

对于额定转速为500 r/min的电机,将利用有限元计算得到的3种方案内外侧连接线、磁极线圈以及连接螺杆应力分布情况进行归纳总结,如表1所示。不同部件的疲劳损耗计算结果如表2所示。

表 1 额定转速 500 r/min 机组静强度计算结果汇总 MPa

部件	工况	外侧连接			内侧连接			许用应力
		方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	
磁极连接线	额定	59	135	72	51	152	68	80
	甩负荷	112	264	133	101	308	127	195
	飞逸	148	357	169	135	464	163	195
磁极线圈	额定	27	97	36	55	112	32	80
	甩负荷	51	167	63	61	209	59	195
	飞逸	67	198	89	80	234	82	195
连接螺杆	额定	190	331	190	187	391	180	427
	甩负荷	193	547	215	190	733	207	640
	飞逸	196	735	229	190	927	221	640

表 2 额定转速 500 r/min 机组疲劳损耗计算结果

部件	外侧连接疲劳损耗			内侧连接疲劳损耗			疲劳损耗 保证值
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	
磁极连接线	0.127 9	>1	0.218 9	0.095 0	>1	0.184 0	1.0
磁极线圈	0.042 7	>1	0.053 6	0.103 4	>1	0.049 8	1.0
连接螺栓	<10 ⁻⁷	>1	0.000 6	>1×10 ⁷	>1	0.000 6	1.0

进一步根据实际情况建立单层和多层铜排引线模型,对其应力进行分析,分析时单层铜排厚度为 3.0 mm,多层铜排每层厚度为 0.3 mm,共 10 层,确保铜排尺寸相同,仅保持层数有差异。分别计算两种情况下的最大应力与变形情况,结果如表 3 所示。

表 3 多层和单层铜排引线模型计算结果对比

引线铜排	最大应力/MPa	最大变形/mm
多层铜排	92	0.407
单层铜排	87	0.225

2.3 疲劳特性结果分析

从上述计算结果可以看出,2 台机组在采用方案 2 时的强度和疲劳分析结果均远高于其他方案,因此,得出如下结论。

(1) 对于所计算的两种机组,方案 2 的极间连接线和磁极线圈应力在静强度考核时均超过许用应力,其主要原因在于极间连接线折弯位置出现高应力点,导致在高转速状态下静强度安全系数和疲劳安全系数均超过要求。方案 1、方案 3 在计算中静强度考核和疲劳考核均能满足运行的要求。

(2) 单层和多层铜排引线的应力计算结果基本相当,单层铜排引线应力略小于多层铜排引线。但单层铜排的变形明显小于多层铜排。原因是多层铜排虽然与单层铜排厚度相当,但多层铜排的整体弯曲、扭转刚度却比单层铜排的弱一些,因此,选用单层铜排的可靠性稍高。

3 磁极引线接线方式的设计建议

结合上述分析,对大型水轮发电-电动机转子磁极引线接线方式的建议如下。

(1) 设计时极间连接接触面须镀银处理,保证导电性能。

(2) 极间连接用螺栓必须把紧和用机械锁定的方式防松,并尽量采用螺纹锁固胶双层保护。

(3) 磁极极间连接引出部位尽量采用单片硬铜板引出。

(4) 高转速磁极线圈采用向心磁极,尽量减少磁极线圈侧向力。

4 结 语

针对高转速发电-电动机的不同磁极连接引线方式,采用结构有限元分析软件 ANSYS,对 3

种磁极连接线的典型设计结构进行了不同工况下的疲劳寿命分析,并基于疲劳分析结果,提出了适用于高转速发电-电动机磁极连接线的典型结构。另外,针对发电-电动机磁极连接线设计,提出了一些建议。本文研究成果可为抽水蓄能电站发电-电动机极间连接线选型及运行维护提供重要的技术支持。

【参考文献】

- [1] 李勇,王亮,张波,等.航空用盘式绕组旋转式音圈电机的热应力与热变形分析[J].电工技术学报,2015,30(12): 181-185.
- [2] 王小飞,代颖,罗建,等.电动汽车牵引用水冷异步电机耦合场分析[J].电机控制与应用,2018,45(4): 110-116.
- [3] 孙雪,代颖,王小飞,等.高速异步电动机转轴的疲劳特性分析[J].电机控制与应用,2018,45(3): 97-103.
- [4] 张忠明,邓智泉,孙权贵,等.铜屏蔽层对高速永磁

无刷直流电机转子涡流损耗和应力的影响分析[J].中国电机工程学报,2018,38(8): 2476-2485.

- [5] 刘晶石,姜铁良,庞立军,等.水泵水轮机导叶卡门涡数值模拟研究[J].大电机技术,2018,48(1): 71-74.
- [6] 戚彩梦,葛光男,郑吉伟,等.混流式水轮机叶片性能热处理变形的数值模拟预测[J].大电机技术,2018,48(3): 33-36.
- [7] 刘娅娟,张伟,洪玉萍,等.水轮发电机转子磁极悬挂动应力研究[J].大电机技术,2012,42(4): 1-5.
- [8] 李俊卿,王罗,李永刚,等.水轮发电机励磁绕组匝间短路转子热应力计算与分析[J].电机与控制应用,2018,45(8): 116-123.
- [9] 杨斌,柳洪水.电站发电机转子磁极引线损坏的原因分析及处理[J].华中电力,2010,23(4): 53-54.
- [10] 兰波,刘福,王建刚,等.高转速发电电动机极间连接线疲劳寿命分析[J].大电机技术,2015,45(2): 10-13.

收稿日期: 2018-07-08

(上接第 59 页)

- [11] BRETON C, BARTOLOME J, BENITO J A, et al. Influence of machine symmetry on reduction of cogging torque in permanent magnet brushless motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5): 3819-3823.
- [12] 李节宝,章跃进.永磁无刷电机转矩脉动分析及削弱方法[J].电机与控制应用,2011,38(4): 6-12.
- [13] 杨玉波,王秀和,张鑫,等.磁极偏移削弱永磁电机齿槽转矩方法[J].电工技术学报,2006,21(10):

22-25.

- [14] UMANS S D. 电机学[M].北京:电子工业出版社,2013.
- [15] 谭建成.永磁无刷直流电机技术[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [16] 王秀和.永磁电机[M].北京:中国电力出版社,2017.

收稿日期: 2018-07-06

(上接第 65 页)

- [11] 张冉,王秀和,杨玉波,等.基于等效剩磁法的永磁电动机转子偏心磁场解析计算[J].电工技术学报,2009,24(5): 7-12.
- [12] 赵安东,杨期,钟志贤.永磁无刷直流电机转子偏心的有限元分析[J].装备制造技术,2017(6): 8-10.

- [13] GUO D, CHU F, CHEN D. The unbalanced magnetic pull and its effects on vibration in a three-phase generator with eccentric rotor[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 254(2): 297-312.

收稿日期: 2018-07-15