

泵用直驱永磁同步电机连续运行温升的原因分析

姜延国¹, 李典基¹, 黄雪梅²

(1. 南水北调东线山东干线有限责任公司, 山东 济南 250100; 2. 济南市水文中心, 山东 济南 250014)

【摘要】南水北调东线某泵站采用的大型贯流泵低速直驱永磁同步电动机为水利行业首次应用, 在长时间的运行过程中发现, 电机连续运行时会出现机组温度升高、电流增大、损耗增加、效率下降等现象。本文分析了该泵站机组电机永磁体产生可逆退磁的原因, 并通过现场实验法对永磁体在连续运行中出现的可逆退磁进行验证, 同时从电磁设计、变频器供电和机组冷却三个方面给出了对应的措施, 为后续相关大型永磁同步电机的制造和维护提供了经验。

【关键词】永磁同步电机; 永磁体; 可逆退磁; 涡流损耗; 电机温升

【中图分类号】TV675

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2025)-02-0032-03

Analysis on the Temperature Rise Causes in Continuous Operation of Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Motor

JIANG Yanguo¹, LI Dianji¹, HUANG Xuemei²

(1. Shandong Main Line Co., LTD., East Line of South-to-North Water Diversion Project, Jinan, Shandong 250109, China;

2. Hydrology Center of Jinan Municipality, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: The large-scale cross-flow pump low-speed direct drive permanent magnet synchronous motor used in a pump station of the east line of South-to-North Water Diversion Project is the first application in the water industry. During the long operation, it is found that the unit temperature, the current and the loss increase, while the efficiency decreases when the motor runs continuously. In this paper, the cause of reversible demagnetization of permanent magnet of the unit motor in this pumping station is analyzed, and the reversible demagnetization of permanent magnet in continuous operation is verified by field experiments. At the same time, the corresponding measures are given from the aspects of electromagnetic design, inverter power supply and unit cooling, which provides experience for the subsequent manufacture and maintenance of large permanent magnet synchronous motors.

Key words: Permanent magnet synchronous motor; Permanent magnet; Reversible demagnetization; Eddy current loss; Machine temperature rise

1 基本概况

南水北调山东干线某泵站调水机组目前安装提水水泵机组 5 台(4 用 1 备), 总装机容量 9 000 kW, 输水流量 125 m³/s(单机流量 31.25 m³/s), 设计扬程 4.15 m, 机组采用永磁同步电机与水泵一体化设计, 机组体积小、重量仅约 55 t、综合效率可达到 82%。

永磁同步电机与目前通用的感应电机、电励磁同步电机相比不但体积小、重量轻, 而且在额定负载和轻载时都具有更好的性能, 这对于具有

复杂多变的流量调控要求的大型水泵驱动来说有着十分重要的意义^[1]。对于南水北调东线工程这类低扬程、大流量的低速泵驱动系统, 采用永磁电机的优势更加明显。

传统的异步电机在低速时功率因数和效率较低, 因此需要搭配减速器系统进行传动, 而永磁直驱则免去了减速机这一传统部件, 可以提高效率、增大系统功率因数、降低振动噪音。系统结构的精简也使得机组的监控、控制和维护工作更

收稿日期: 2024-12-19

作者简介: 姜延国(1968—), 男, 正高级工程师

易于开展。正是基于低速大转矩直驱永磁同步电机上述的诸多优势,其在水利水电工程中得到了越来越多的应用。

2 存在问题及原因分析

2.1 存在的问题

泵站自 2013 年安装并正式启动运行低速永磁直驱的水泵一体式机组,迄今为止虽然已高效运行了 9 年的时间,但同时也存在着一些问题。

如在较长时间连续的调水过程中,机组经过一段时间的运行,在环境温度、流量、水位、水温等不发生变化情况下,会出现机组电流增大、机组各部分温度升高、有功功率增大的现象。出现此种现象后将机组进行停机半小时,再次开启机组,机组电流及有功功率等各项指标恢复到其初次开机时的正常数值。

基于长期的运行经验和安全考虑,目前水泵负荷最高只能达到额定负荷的 75%,随着连续运行时间的增长,电机的输入电流会逐渐增大至额定电流。显然,在负荷保持不变的情况下,增加的这部分有功功率全部转换为电机的损耗和热量,使机组的工作效率极大降低,发热所导致的较大的温升也会折损系统的工作寿命。

2.2 原因分析

根据永磁同步电机运行理论,电机的电磁转矩是由其电负荷和磁负荷共同产生的。电负荷代表电机的输入电流,而磁负荷代表磁路中的磁通密度,它是由转子上装配的永磁体提供的。当电机负荷恒定时,其电磁负荷的乘积亦恒定。倘若电机的输入电流(电负荷)随着设备连续运行时间的延长而不断变大,则说明磁负荷在这个过程中是不断下降的,体现为永磁体向外提供磁通的能力逐渐降低,即永磁体发生了一定程度的退磁。

导致永磁体退磁的原因可以分为^[2-4]:电流冲击退磁、化学退磁和温升退磁。在机组电机运行流程规范、永磁体定期返厂维护的前提下,由温升所导致的永磁体退磁是唯一合理的原因。泵站机组永磁同步电机采用的永磁体材料是 UH 型号的钕铁硼,剩磁约为 1.23 T,由于其退磁曲线近似为直线,因此永磁体发生不可逆退磁的可能性较低。而钕铁硼磁性材料温度系数较大,易受温

度影响,其剩磁密度随温度升高会有明显下降,具有显著的可逆退磁特性,如图 1 所示。

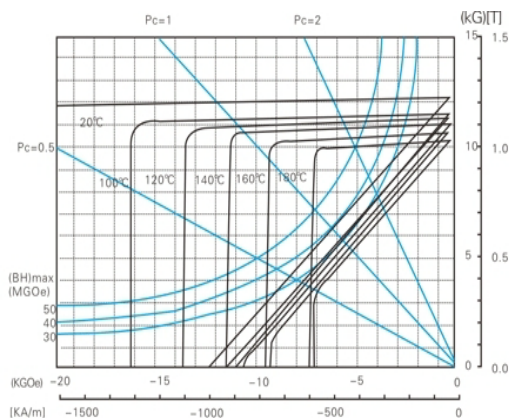


图 1 钕铁硼永磁体在不同温度下的退磁曲线

这种磁性能的下降在不超过永磁体最大工作温度的情况下是可逆的,一旦机组停机冷却,电机的温度恢复到正常的区间,永磁体磁钢的磁性会回归到原始状态。

泵站所采用的永磁同步电机在设计时仅对绕组的温升进行了计算,并未考虑内部风冷的效果和永磁体的损耗和温升,正是由于没有充分评估转子的损耗和发热所造成的影响,使得电机在实际工作中产生了超出预期的永磁体温升和可逆退磁,这也是导致上述问题产生的根本原因。

2.3 退磁实验验证

为了验证泵站所用永磁同步电动机在连续带载运行的过程中会出现永磁体可逆退磁的现象,笔者和泵站机组的运维团队对泵站的 2 号机组进行了电机的反电动势测试实验。

根据永磁电机的相关理论可知,当电机转速一定时,其空载反电动势的有效值正比于绕组磁链,由式(1)表示。

$$E_0 = p\omega_0\psi_0 \quad (1)$$

式中, E_0 为永磁同步电机空载反电动势; p 为电机的磁极对数; ω_0 为机械旋转角速度; ψ_0 为穿过绕组的磁链,当电机空载运行时,该磁链为永磁体所产生的磁链。从式(1)中可以看出反电动势与永磁磁链之间的对应关系。因此,通过对永磁电机进行空载实验就可以确定永磁体是否发生了退磁。

验证实验一共设置两组,电机的空载反电动势采用测试仪在线测量而非传统对拖实验的方法。在线采集能够充分考虑电机温升对反电动势

造成的影响,同时结合反电动势的波形等效算法能够确保测试结果与传统对拖实验的一致性^[5]。

两组实验中,第一组在机组冷却的情况下进行,第二组在泵站机组连续运行 7 日停机的时候进行。经测量,该电机在运行 7 日后,额定转速下的反电动势从 6341.39 V 下降至 6056 V,两次测量之间的反电动势差值为 285.39 V。 E_0 的下降表明了运行期间,永磁体发生了磁性能的衰退,下降了约 4.5%。

3 对策措施

针对泵站直驱永磁同步电机在连续运行中产生永磁体的温升和退磁问题,笔者从以下三个方面提出其应对措施^[6-7]。

3.1 电机电磁结构设计优化

当永磁体置于交变磁场中时,变化的磁场在永磁体中感应出涡流,特定频率的交变磁场所产生的涡流损耗的数值可由式(2)确定:

$$P_e = k_e f^2 B_m^2 V \quad (2)$$

式中, P_e 为涡流损耗的功率, k_e 为涡流损耗系数, f 为交变磁场的频率, B_m 为磁场的幅值, V 代表永磁体的体积。

由式(2)可知,永磁体的涡流损耗正比于永磁体的体积 V ,交变磁场频率 f 和幅值 B_m 的平方。

减小永磁体涡流损耗的第一种方法是采用永磁体分块,切断涡流损耗的路径,该项措施已在当前的电机设计中考虑。第二种方法是减小气隙中与气隙磁场基波不同速的磁场谐波的幅值,对于大型永磁电机而言,定子因嵌线工艺的需要,往往将槽型设计成直槽,但这也使得气隙磁密产生了具有较大幅值的齿谐波分量,齿谐波磁场的次数可由式(3)确定

$$v = Q/p \pm 1 = 2mq \pm 1 \quad (3)$$

式中, Q 表示电机的总槽数, p 表示电机的极对数, m 表示电机的相数, q 表示每极每相槽数。

通过引入磁性槽楔降低齿谐波的幅值,使得电机气隙磁密的波形更接近于正弦,进而可以使电机因齿谐波所导致的永磁体涡流损耗大大下降。

3.2 降低变频器输出电流的谐波畸变率

从式(2)中可以看到,永磁体涡流损耗的大小与磁密谐波频率的平方成正比。泵用永磁同步

电机基于调速的需要,一般都采用变频器供电,变频器输出的典型电流波形如图 2 所示。

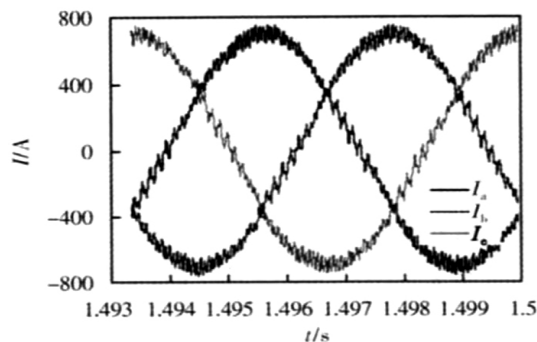


图 2 变频器输出的典型电流波形

因此采用输出电流波形正弦性更好、谐波畸变率较低的变频器作为电机的供电设备,可以大大降低电机的发热和退磁可能性。

3.3 提高电机的冷却散热能力

某泵站机组电机的主要散热方式对流散热,体现为定子外水冷,气隙内风冷。

电机中所发生的对流散热过程可以概略的由式(4)表示。

$$q = h(t_w - t_f) \quad (4)$$

式中, t_w 表示固体壁表面温度, t_f 表示流体温度, h 表示对流换热表面的传热系数。

从对流散热的公式(4)来看,提高转子及永磁体散热能力仍然有以下两种途径:

1)增大气隙的对流散热系数,通过增大散热风机的空气流量,提高用于气隙散热的气流风速。

2)降低通风道内散热气流的初始温度,通过增大散热空气和永磁体之间的温差($t_w - t_f$)来增加对流换热的热通量。

4 结 语

直驱永磁电机因其优良的综合性能在大型泵站中有很好的应用前景,但在设计制造时应注意永磁体的可逆退磁问题。

本文分析了在电机连续运行工况下永磁体可逆退磁的原因,并设计了相关实验验证了这一现象。

针对存在的永磁体可逆退磁问题,从电机电磁设计优化,变频器驱动和机组配套冷却系统三个角度给出了可应用于实际的解决方案,为后续同类型泵用低速大型直驱永磁同步电机的设计及运行维护提供了可借鉴的理论(下转第 42 页)

必须按规定穿戴好防护用品和必要的安全防护用具;作业时设专人指挥,禁止斜吊,禁止任何人站在吊运物品上或者在下面停留和行走。物件悬空时,驾驶人员不能离开操作岗位。

6 效益分析

6.1 防浪作用增强

墙体顶部上游侧,增加倾向上游的斜坡段,使得水浪在风的作用下沿坝坡爬升,遇到墙体时,大部分水体反射回去,沿坝坡回到水库中。

6.2 增加容纳功能

防浪墙墙体内部增设内部空间,使得防浪墙内部形成具有一定断面形状、沿坝轴线方向通行的廊道,成为电缆线、信号线等电器线路的布置、容纳空间,全长顶部设有活动盖板,方便打开,因此线缆更换、维修、检查更加方便。

6.3 保证墙体质量

防浪墙为预制装配式,在工厂内制造,不受环境变化的影响,混凝土质量精确可控,蒸汽养护,保证了防浪墙预制质量。

6.4 加快现场施工进度

由于采用预制装配工艺,大部分预制时间提早在预制厂内进行,现场只进行安装,节约了大量的现场施工时间,节省现场工期约 2/3 以上。

6.5 外观美观

防浪墙的下游侧采用仿石毛鼓面,整体预

制,和周围环境融合在一起,装饰效果好,提高了观赏性。

6.6 降低造价

预制装配式可以实现工厂化、标准化流水线制造,混凝土浇筑模具化,大大加快制造进度,节约现场浇筑时间,因而比传统现浇钢筋混凝土节约工期及人工费,使得造价降低;同时,省去坝肩下游的电缆沟等造价。

7 结语

综上所述,装配式防浪墙在山东省惠民县利民水库建设设计及运用中,具有施工效率高、经济合理、环保节能、外观美观等优点,对平原水库类似工程建设具有借鉴意义。

参考文献

- [1] 王虹坤.装配式混凝土结构关键技术的优化分析[J].四川水泥,2024,(5):94-96.
- [2] 邓席军.基于预制装配式混凝土结构的施工工艺[J].中国建筑金属结构,2024,23(4):91-93.
- [3] 严凯.装配式混凝土结构建筑施工技术研究[J].建筑与预算,2024,(4):43-45.
- [4] 范轴.可拆卸装配式防浪墙研发与应用[J].水利技术监督,2022(7):256-260.
- [5] 马亮亮.装配式混凝土防浪墙的应用[J].珠江水运,2022(2):78-81.

(责任编辑 崔春梅)

(上接第 34 页)和经验。

参考文献

- [1] 唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [2] 师蔚,贡俊,黄苏融.永磁电动机永磁体防退磁技术研究综述[J].微特电机,2012(4):23-27.
- [3] 周寿增,董清飞.超强永磁体-稀土铁系永磁材料[M].北京:冶金工业出版社,2004.
- [4] 师蔚.高密度永磁电机永磁体防退磁技术的研究[D].上海大学,2013.
- [5] 周鹏,徐衍亮,陈国伟等.一种基于波形等效原则的永磁电机空载反电动势在线测量方法研究[J].微电机,2022(8):

42-47.

- [6] Jung J W, Lee S H, Hong J P, et al. Optimum design for eddy current reduction in permanent magnet to prevent irreversible demagnetization[J]. Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2007, 2007: 949-954.
- [7] Kim K C, Kim K, Kim H J, et al. Demagnetization Analysis of Permanent Magnets According to Rotor Types of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(6): 2799-2802.

(责任编辑 赵其芬)