

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2010.04.022

混合磁悬浮水轮发电机组转子承重系统可行性分析

马宏忠,王 斌,鞠 平

(河海大学能源与电气学院,江苏 南京 210098)

摘要 为了验证混合磁悬浮水轮发电机组转子承重系统设计的可行性和模型的正确性,利用陕西安康水电站水轮发电机组的实际数据以及永磁悬浮装置和电磁悬浮装置数学模型对混合磁悬浮承重系统进行计算分析,并建立了混合磁悬浮承重系统参数计算优化的 Excel 计算表,利用该表动态地分析了数学模型各参数变化对磁悬浮力计算结果的影响,实现了结构参数的整体优化.该优化计算数据与传统推力轴承支承方式的比较分析结果表明,混合磁悬浮承重系统可大大减小水轮发电机组轴承的摩擦和损耗,提高水轮发电机组的效率,有效地延长水轮发电机组转子承重系统的使用寿命.

关键词 永磁悬浮 电磁悬浮 水轮发电机组 支承

中图分类号 TM312 **文献标志码** A **文章编号** 1000-1980(2010)04-0467-05

理论分析结果^[1]表明,针对立式水轮机组转子轴向负荷所设计的混合磁悬浮承重系统可以实现下列基本目标:(a)承担水轮发电机组的大部分自重和轴向水推力,即承担机组大部分的轴向负荷(减载);(b)与推力轴承和导轴承相结合,能可靠稳定地完成机组整体承重的任务;(c)若永磁悬浮装置的材料有良好的物理学性能指标和技术参数,则可以提供可靠的永磁悬浮推力,该推力主要承担部分固定轴向负荷;(d)电磁悬浮装置的电磁推力可以根据机组轴向负荷的大小进行调节,但电磁装置的尺寸需要满足布线要求和线圈散热条件;(e)降低损耗、减少摩擦、容易维护等.为了验证该理论分析结果的正确性,本文利用陕西安康水电站水轮发电机组的转子承重数据以及文献^[1]所建立的永磁悬浮装置和电磁悬浮装置数学模型进行计算分析,并利用自建的混合磁悬浮承重系统参数计算优化的 Excel 计算表,动态地分析了数学模型各参数变化对磁浮力计算结果的影响.

1 安康水电站简介

安康水电站位于陕西省安康市上游 18 km 的汉江上^[2],安装了 4 台型号为 SF-200-56/12800、额定功率为 200 MW 的水轮发电机组(额定电压 13.8 kV,额定电流 9560 A,额定转速 107.1 r/min),总装机容量 800 MW.发电机组为装有上导轴承的半伞式结构,顶部装有直径达 5.4 m 的大型同轴交流励磁发电机,额定容量 2.5 MV·A.水轮机型号为 HL-220-LT-550,转轮直径 5.5 m,平均水头 76.2 m.

该水电站转子系统采用推力轴承支承方式,其推力总负荷为 16 MN,计算损耗 300 kW 左右,搅拌损耗 60 kW,总损耗 360 kW.整个发电机组的承重包括转轮、主轴、发电机转子以及蜗壳上部部分混凝土的重量,还有随水流量变化的轴向水推力,计划利用混合磁悬浮装置提供约占承重总负荷 80% 的磁浮力(12.8 MN 左右)^[3-4].

2 混合磁悬浮系统结构参数的计算

混合磁悬浮系统结构参数计算涉及机电 2 个方面的内容,其一般步骤为:(a)系统工作方式及结构形式选择;(b)系统承载力及所需最大电磁吸力估计;(c)工作点处磁感应强度的确定;(d)线圈安匝数,线圈发热

收稿日期:2009-05-01

基金项目:中国水利水电科学研究院开放研究基金(200954211) 国家自然科学基金(50477010)

作者简介:马宏忠(1962—),江苏如皋人,教授,博士,主要从事电气设备故障诊断、新能源发电技术、电机运行与控制研究. E-mail: mahzhz

及温升的校核等.本文分别对永磁悬浮装置和电磁悬浮装置进行参数设计,按照设计先后顺序给出永磁悬浮装置和电磁悬浮装置的设计数据,并建立联合各项装置参数的 Excel 数据计算优化表格.

2.1 永磁悬浮装置参数计算

2.1.1 结构尺寸设计

以水轮机组转轮直径为参照,永磁悬浮装置的外径初选为 5 m,内径选为 2 m(略大于主轴直径 d).通过对永磁材料的选择以及磁体和气隙厚度的设计,使永磁体间气隙的平均磁感应强度为 0.9 T 左右.利用文献 [1] 式(3)计算得永磁悬浮力

$$F_1 = \frac{(0.9 \text{ T})^2 \pi}{8 \times 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}} [(5 \text{ m})^2 - (2 \text{ m})^2] = 5.32 \text{ MN} \quad (1)$$

即永磁悬浮部分承担 5.32 MN 的重量.

永磁悬浮装置所能提供的悬浮推力在设计安装后将不能进行调节,其稳定性主要取决于永磁材料的稳定性、物理力学性能指标和各种磁性能指标.除此之外,用于固定永磁体的机械结构对整个系统也至关重要.

2.1.2 永磁材料物理力学性能指标验证

永磁材料的物理力学性能指标包括密度、硬度、电阻率和抗压强度等,这些指标都与永磁体的材料、形状和制备工艺有关,其中抗压强度指标在永磁悬浮支承装置中显得尤为重要.烧结 NdFeB 永磁材料的主要物理力学性能指标如下^[5] 密度 7.45 g/cm³,硬度 570 HV,电阻率 150 μΩ·cm,抗压强度 780 MPa.

根据实例计算数据,永磁悬浮装置承担 5 MN 左右的总承重重量,即提供的悬浮推力约为 5 MN.根据设计尺寸,可得永磁体磁极的面积

$$S_0 = \frac{\pi}{4} (d_{01}^2 - d_{02}^2) = 16.5 \text{ m}^2 \quad (2)$$

式中: d_{01} ——永磁体外径, m; d_{02} ——永磁体内径, m. 作用在永磁体磁极上的平均压强为

$$P = \frac{F_1}{S_0} = 3.03 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 0.3 \text{ MPa} \quad (3)$$

远小于烧结钕铁硼永磁材料的抗压强度(780 MPa),符合设计要求^[6-7].

由于永磁悬浮推力是不可调的,永磁悬浮装置承担的力主要是水轮机转轮、发电机转子和主轴重量的一部分,属于不变的重量,而变化幅度大的机组轴向水推力由悬浮推力可调的电磁悬浮装置提供.

2.2 电磁悬浮装置参数计算

2.2.1 结构尺寸设计

本实例混合磁悬浮承重系统的设计总承重重量为 12.80 MN,永磁悬浮装置分担约 5.42 MN 的总承重重量,则电磁悬浮装置应该分担的总承重重量 F_2 约为 7.38 MN.设计调整电磁悬浮装置的静态工作点,使其可以提供最大的悬浮力,磁感应强度 B 的设计值为 1.2 T,则电磁装置磁极的有效受力面积为

$$S = \frac{2 \mu_0 F_2}{B_0^2} = \frac{2 \times 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \times 7.38 \times 10^6 \text{ N}}{(1.2 \text{ T})^2} = 12.62 \text{ m}^2 \quad (4)$$

式中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$.

电磁装置磁极采用环形结构,为保证内、外环通过的磁通量相等,设定内、外磁环的面积相等,即 $S_1 = S_2$,取每个磁环的面积为 6.31 m², $d_1 = 2 \text{ m}$,则 $d_2 = \sqrt{\frac{2S}{\pi} + d_1^2} = 3.469 \text{ m}$,实际取 $d_2 = 3.5 \text{ m}$.

取内外环之间的距离 $l = 0.6 \text{ m}$,则 $d_3 = d_2 + 2l = 4.7 \text{ m}$, $d_4 = \sqrt{\frac{2S}{\pi} + d_3^2} = 5.488 \text{ m}$,实际取 $d_4 = 5.5 \text{ m}$.

实际内环面积

$$S_1 = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2) = 6.5 \text{ m}^2$$

实际外环面积

$$S_2 = \frac{\pi}{4} (d_4^2 - d_3^2) = 6.4 \text{ m}^2$$

实际磁极总面积

$$S = S_1 + S_2 = 12.9 \text{ m}^2$$

实际最大磁感应强度

$$\sqrt{\frac{2 \mu_0 F_2}{S}} = 1.18 \text{ T}$$

2.2.2 电气参数计算

根据设定的尺寸计算磁路的磁阻和总磁压,进而确定励磁线圈的安匝数。
气隙的磁阻(气隙宽度 δ_0 取 5 mm) 根据文献[1] 式(5)有 $R_m = 2.47 \times 10^3 \text{H}^{-1}$ 。
铁心部分的磁阻 暂取 $h_1 = h_3 = 80 \text{mm}$, $h_2 = 120 \text{mm}$,根据文献[1] 式(6)有 $R'_m = 1.95 \times 10^3 \text{H}^{-1}$ 。
磁路总磁阻为

$$R_{m0} = R_m + R'_m = 4.42 \times 10^3 \text{H}^{-1}$$

根据文献[1] 式(8),磁路总磁压为

$$U_m = \sqrt{\frac{2 \mu_0 F_2 R_{m0}^2}{\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}}} = 33.81 \text{kA} \tag{5}$$

实际取 $U'_m = kU_m = 40.58 \text{kA}$. 式中 k 为考虑磁漏后磁动势放大系数,一般取 $k = 1.2$. 为了减少励磁损耗,可以利用较小的电流来实现电磁悬浮,在线圈窗口高度容许和散热条件满足的情况下可以适当增加电磁铁绕组的线圈匝数[8-9]。

2.2.3 结构尺寸设定值的合理性分析

电磁推力支承装置温升参数是一个极其重要的设计参数,电磁装置就必须根据实际散热条件和允许温升进行设计。

在有效磁极面积及励磁安匝数一定的条件下,线圈温升主要与激磁电流、线圈匝数和线圈窗口高度等参数有关,并且励磁窗口的高度应该满足布线要求且留有一定的裕度. 这些参数间的关系为相互制约关系,必须综合考虑这些参数的影响,才能设计出最佳温升指标。

受线圈散热条件及通过的最大电流限制,电流密度只能在一定范围内取值. 对励磁绕组来说,其电流密度 j 的取值范围为 $3 \sim 5 \text{A/mm}^2$. 导线直径与最大电流 I 的关系为

$$\frac{\pi}{4} d_0^2 j \geq I \tag{6}$$

式中 d_0 为线圈导线的直径,mm.

由式(6)可得 $d_0 \geq 1.69 \text{mm}$,实际取导线标称直径为 1.784 mm,则该导线的最大电阻率为 $0.0075 \Omega/\text{m}$ 。

励磁线圈窗口高度 h_2 的选取既要满足线圈绕组的布线要求,还要满足散热要求. 一般根据绕组体积要求确定线圈窗口高度 h_2 . 若要满足布线要求,必须

$$h_2 l \geq \frac{\pi d_0^2 k_y N}{4 k_t} \tag{7}$$

式中 k_y ——裕度系数,一般取 $k_y = 1.2$; k_t ——线圈下线的填充系数,一般取 $k_t = 0.5$; N ——线圈匝数; l ——线圈窗口宽度. 由式(7)可得 $h_2 \geq 60 \text{mm}$,实际取 $h_2 = 120 \text{mm} (> 60 \text{mm})$,故不存在布线问题,窗口较大线圈容易散热。

2.3 混合磁悬浮承重系统参数计算

混合磁悬浮承重系统的各项参数和尺寸之间相互影响、关系复杂,尤其是电磁悬浮装置,还需要考虑布线空间、激磁线圈允许通过最大电流密度和装置散热性等问题. 在装置设计计算时可以充分利用 Excel 表格计算中公式嵌入的特点,将各项参数之间的关系引入. 结合本实例的设计方法和过程,建立了系统装置的参数计算优化表格,其主要参数计算结果见表 1.

表 1 混合磁悬浮承重装置主要参数计算结果

Table 1 Calculated results of parameters for mixed magnetic-levitation weight support device												
参数名称	推力总负荷/MN	悬浮力所承受的总重量/MN	永磁体的外直径/mm	永磁体气隙间平均磁感应强度/T	F_1/MN	F_2/MN	d_1/m	d_2/m	l/m	d_3/m	d_4/m	δ_0/mm
数值	16.00	12.80	5.00	0.90	5.42	7.38	2.00	3.50	0.60	4.70	5.50	5.00
参数名称	h_2/mm	h_3/mm	R_{m0}/H^{-1}	U_m/A	考虑漏磁后实际所取总磁压/A	$N/\text{匝}$	励磁电流/A	励磁绕组电流密度范围/($\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$)	d_0/mm	励磁绕组电阻/ Ω	励磁电压/V	励磁损耗/W
数值	120.00	80.00	4420.23	33817.96	40581.56	6000	6.76	3~5	1.78	579.62	3920.34	26515.58

3 混合磁悬浮承重系统的损耗与传统轴承推力损耗的比较

混合磁悬浮承重系统的损耗主要是电磁悬浮装置部分的励磁损耗.励磁线圈的电阻为

$$R = L\rho = \pi d_{23}N\rho = 579.62\Omega$$

式中: L ——励磁线圈总长度; d_{23} ——绕组区域中心线处的直径; N ——线圈匝数; ρ ——导线的电阻率.
所需要的励磁直流电压为

$$U = IR = 3.92\text{ kV}$$

励磁损耗为

$$P = I^2R = 26.51\text{ kW}$$

从表1可以看出,如果采用传统的推力轴承作支承,则总损耗为360 kW,而采用电磁悬浮和永磁悬浮相结合的方式,励磁损耗不超过30 kW,不到传统损耗的10%,体现出了本文所提出的混合磁悬浮支承的优势.上述安康水电站的1台水轮发电机组的额定装机容量为200 MW,其励磁损耗与之相比非常小,不到0.015%.再考虑本系统设计磁悬浮承重为总垂直负荷的80%,还有20%的轴向负荷,近似取对应的损耗约为360×20%=72 kW,随着控制水平的提高,磁悬浮承重的比例可进一步提高,这部分损耗将更小.因此,从功率损耗方面看,磁悬浮支承方式是合理可靠的^[10].

必须指出,如果所取励磁线圈匝数不同(符合绕组要求),励磁电流大小和功率损耗也会发生变化,如表2所示.

从表2可以看出,适当增加励磁线圈的匝数,可以减小励磁电流和励磁损耗,但会增大系统结构尺寸^[11-12].

4 结 论

本文利用安康水电站水轮发电机组承重系统的实际数据进行了混合磁悬浮水轮发电机组转子承重系统的分析计算,并与该发电机组所用的推力轴承支承系统的各项指标进行了比较.结果表明,水轮发电机组的重量可以由磁悬浮力来分担,磁悬浮承重系统可减小轴承摩擦,降低损耗,减少发热,降低机组对承重轴承的要求,解决传统水轮发电机组推力支承系统存在的老化、摩擦和机械维护问题,有效延长发电机组转子承重系统的寿命.

参考文献:

[1] 马宏忠,王斌,鞠平.混合磁悬浮水轮发电机组转子承重系统设计与建模[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(3):342-346. (MA Hong-zhong, WANG Bin, JU Ping. Design and modeling of mixed magnetic-levitation weight support system of hydroelectric generating set[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(3): 342-346. (in Chinese))

[2] 江大川,刘淑琴,虞烈,等.电磁推力支承系统结构参数设计的研究[J].西安交通大学学报,1997,31(12):17-22. (JIANG Da-chuan, LIU Shu-qin, YU Lie, et al. Study for designing the constructional parameters of electromagnetic thrust supporting systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1997, 31(12): 17-22. (in Chinese))

[3] 刘汉城,王彬,崔健光,等.安康水电站发电机推力轴承综合性能试验[J].水电站机电技术,1995(3):18-27. (LIU Han-cheng, WANG Bin, CUI Jian-guang, et al. Comprehensive performance test for generator thrust bearing of Ankang hydropower station[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 1995(3): 18-27. (in Chinese))

[4] 李维晖,张宏.磁悬浮装置的设计与研究[J].大学物理实验,2001,14(2):5-8. (LI Wei-hui, ZHANG Hong. The design and research of magnetic-suspension device[J]. Physical Experiment of College, 2001, 14(2): 5-8. (in Chinese))

[5] 严密,彭晓领.磁学基础与磁性材料[M].杭州:浙江大学出版社,2006.

[6] 石富.稀土永磁材料制备技术[M].北京:冶金工业出版社,2007.

[7] 张玉民,戚伯云.电磁学[M].北京:科学出版社,2006.

[8] 闫颖鑫,董宏林,段广仁.轴向磁悬浮轴承的结构设计[J].轴承,2006(7):8-10. (YAN Ying-xin, DONG Hong-lin, DUAN Guang-ren. Structure design of axial magnetis suspension bearing[J]. Bearing, 2006(7): 8-10. (in Chinese))

表2 励磁线圈匝数变化对各项数值影响的比较
Table 2 Values of influences of exciting coil circles on various parameters

励磁线圈匝数/匝	励磁电流/A	励磁损耗/kW	窗口高度最小值/mm	导线直径最小值/mm
5 000	8.11	31.818	49.99	1.855
6 000	6.76	26.515	59.99	1.690
8 000	5.07	19.886	79.98	1.467
10 000	4.05	15.909	99.98	1.312
12 000	3.38	13.257	119.98	1.198

- [9] 赵凯华,陈熙谋. 电磁学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社,2006.
- [10] 汪希平,张直明,于良,等. 轴向磁悬浮轴承的力学特性分析[J]. 应用力学学报,2000,17(3): 29-34. (WANG Xi-ping,ZHANG Zhi-ming,YU Liang, et al. Analysis on dynamic performances of magnetic levitated thrust bearing [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2000,17(3): 29-34. (in Chinese))
- [11] 武建军,郑晓静,周又和. 磁悬浮车体-单跨弹性轨道耦合控制系统的动力稳定性分析[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2003,39(3): 22-26. (WU Jian-jun,ZHENG Xiao-jing,ZHOU You-he. Analyses on the dynamical stability of the coupling control system for maglev vehicle travelling on a single-span flexible guideway[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Science Edition,2003,39(3): 22-26. (in Chinese))
- [12] 邓智泉,仇志坚,王晓琳,等. 无轴承永磁同步电机的转子磁场定向控制研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(1): 104-108. (DENG Zhi-quan,QIU Zhi-jian,WANG Xiao-lin, et al. Study on rotor flux orientation control of permanent magnet bearingless synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(1): 104-108. (in Chinese))

Feasibility of mixed magnetic-levitation weight support system of hydroelectric generating set

MA Hong-zhong, WANG Bin, JU Ping

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : In order to verify the design feasibility and model rationality of the mixed magnetic-levitation weight support system of hydroelectric generating set, the relevant calculations and analyses were performed based on the actual data of hydroelectric generating sets of Ankang Hydropower Station and the mathematical models for electromagnetic and permanent magnetic levitation support devices. An optimized Excel table of parameters for the mixed magnetic-levitation weight support system was established. The influences of variation of model parameters on the calculated magnetic levitation forces were dynamically analyzed, and the integral optimization of the structural parameters was realized. A comparison between the optimized data and the traditional thrust bearing support ways indicates that the mixed magnetic-levitation weight support system can greatly reduce the friction and the waste of the bearings of hydroelectric generating sets and improve the efficiency and the service life of the weight support system of hydroelectric generating sets.

Key words : magnetic levitation ; electromagnetic levitation ; hydroelectric generating set ; support system