

水轮发电机定子铁心磁化现场试验方法及实例

张海云

甘肃电投九甸峡水电开发有限责任公司, 甘肃 临洮

收稿日期: 2023年3月28日; 录用日期: 2023年6月9日; 发布日期: 2023年6月19日

摘要

本文结合水电站水轮发电机定子铁心磁化试验现场实例, 列举了试验准备、测验方法、试验数据、计算过程及结果判断, 通过铁心磁化试验对定子铁心的安装水平、硅钢片质量进行检验, 确保水轮发电机定子铁心的制造和装配质量。

关键词

水轮发电机, 定子铁心磁化现场试验

Field Test Methods and Examples of Core Magnetization of Hydrogenerator Stators

Haiyun Zhang

Gansu Power Investment Jiudianxia Hydropower Development Co., Ltd., Lintao Gansu

Received: Mar. 28th, 2023; accepted: Jun. 9th, 2023; published: Jun. 19th, 2023

Abstract

This article combines the on-site example of the magnetization test of the stator core of a hydroelectric generator in a hydropower station, and lists the test preparation, testing methods, test data, calculation process, and result judgment. Through the magnetization test of the stator core, the installation level and quality of the silicon steel sheet of the stator core are inspected to ensure the manufacturing and assembly quality of the stator core of the hydroelectric generator.

Keywords

Hydrogenerator, Field Test of Stator Core Magnetization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

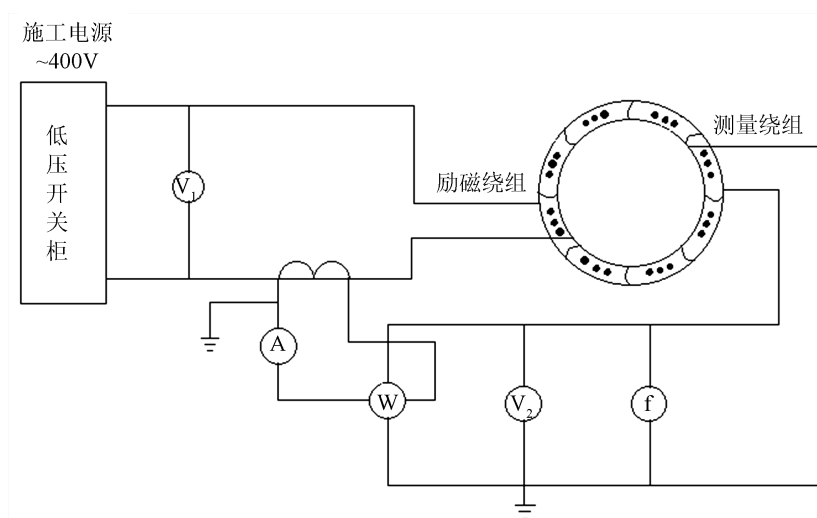
1. 引言

定子铁心是水轮发电机组的重要部件之一，也是发电机磁路的主要组成部分，在水轮发电机组的能量转换过程中起着至关重要的作用，随着大容量水轮发电机组的生产、安装、投运，因定子铁心故障导致的问题越来越多，且定子铁心故障造成的损失和修复的难度很大。磁化试验是定子铁心硅钢片叠装完成后必须进行的一项重要试验，需要通过测定温升及单位损耗等必要的检验方法检查定子铁心制造、现场安装的整体质量及绝缘情况，及时发现定子铁心缺陷、有效处理可避免高成本损失，并结合定子铁心磁化试验数据与发电机定子铁心温度、铁心损耗等技术规范标准值的比对，综合判断、评价定子铁心的性能水平，确保下道工序的开展。

2. 试验原理

定子铁心磁化试验的原理是在叠装完成的发电机定子铁心外部缠绕若干匝数的励磁绕组和测量绕组，励磁线圈通电，从而产生磁场，测量定子铁心总的有功损耗及铁心、机座等各部位的温度，计算铁心的单位损耗及温升，与规定的允许值相比较，发现可能存在的局部缺陷，判断定子铁心的制造、安装质量是否符合要求。

在励磁绕组中通入交流电源，使铁心内部产生接近饱和状态的交变磁场，产生铁心损耗，铁心中的绝缘劣化部分将产生较大的涡流使铁心发热、温度升高快，铁心中的松动部分将产生较大的磁噪声，用红外线点温计、埋设的温度计测量铁心、上、下压板及定子机座的温度，计算定子铁心的整体温升和定子铁心相同部位不同测点的温差。利用电气仪表测量感应电压、励磁功率损耗，计算铁心单位重量损耗的功率。试验接线见图 1。



V_1 ——励磁电压测量交流电压表； V_2 ——感应电压测量交流电压表；A——励磁电流测量交流电流表；W——低功率因数瓦特表；f——频率表。

Figure 1. Test wiring diagram

图 1. 试验接线图

3. 测试实例

定子铁心磁化试验前需根据发电机定子基本参数计算试验变压器容量、励磁绕组匝数、试验励磁电流等。某水轮发电机(型号 SF20-44/6500)定子分瓣运输至水电站[1], 在安装间完成机座组圆、合缝焊接及铁心叠装[2]。

3.1. 试验参数计算

3.1.1. 定子铁心轭部截面

1) 定子铁心有效高度 $L = k(L_{fe} - nb)$

定子铁心长度 L_{fe} 80 cm, 通风槽数量 n 18 个, 通风沟高度 b 0.6 cm, 定子铁心叠压系数 k 取值 0.95, 则定子铁心有效高度 $L = 0.95 \times (80 - 18 \times 0.6) = 65.74$ cm ;

2) 定子铁心轭部高度 $h_a = \frac{D_1 - D_2}{2} - h_c$

定子铁心外径 D_1 650 cm, 定子铁心内径 D_2 595 cm, 定子铁心齿高 h_c 14.5 cm, 定子铁心轭部高度 $h_a = \frac{650 - 595}{2} - 14.5 = 13$ cm ;

3) 定子铁心轭部截面 $S_z = L \times h_a = 854$ cm²。

3.1.2. 励磁绕组匝数

电源参数频率 f 50 Hz, 电压 V 400 V, 相对导磁率取 1.0 T 时, 则励磁绕组匝数

$$W_1 = \frac{U_1}{4.44 f S_z B} = \frac{400 \times 10^4}{4.44 \times 50 \times 854 \times 1} = 21 \text{ 匝}。$$

3.1.3. 励磁绕组电流及试验电源容量

定子铁轭平均直径 D_{av} 637.1 cm, 轭部磁密 B 取 1.0 T 时, H_0 推荐值 2.15~2.3 安匝/cm, 取 2.3 安匝/cm, 则励磁绕组电流 $I_e = \frac{\pi D_{av} H_0}{W_1} = \frac{3.14 \times 637.1 \times 2.3}{21} = 219.10$ (A), 励磁绕组选择截面每平方毫米不大于 3 A 电流密度的铜芯电缆。

测量绕组取 2 匝, 电源参数电压 V 400 V, 测量电压为 $V = \frac{2U_1}{W_1} = \frac{2 \times 400}{21} = 38.10$ (V), K_s 一般取 1.1,

则试验电源容量 $S = K_s U_1 I_e \times 10^3 = 1.1 \times 400 \times 10^3 \times 219.10 = 96.40$ (kVA), 试验电源容量选择大于 96.4 kVA 的变压器。

3.2. 试验要点

1) 定子铁心磁化试验设备、仪表有电源变压器、电流互感器、酒精温度计、红外线点温计、兆欧表、噪声声压计、交流接触器、交流电压表、频率表、低功率因数瓦特表等, 橡皮绝缘铜芯软电缆、导线若干。

2) 定子铁心紧压结束[3], 具备磁化试验条件后, 励磁绕组采用 50 mm² 铜芯橡皮电缆缠绕, 电缆应拉紧并贴在铁心齿表面, 不得放在线槽内。定子圆周四等分, 每隔 90° 缠绕, 4 个励磁支路并联均匀分布于定子铁心上。4 个支路一端全部穿过电流互感器, 接至变压器低压侧开关一相, 另一端接至变压器低压开关另一相。

3) 测量绕组采用 4 mm² 导线缠绕定子有效铁心, 不包绕机座, 电缆应拉紧放在线槽内并贴紧槽底, 缠绕部位在任两个励磁绕组中间。

4) 沿定子铁心圆周上、下轭部和齿部均匀布置 24 个温度计, 用橡皮泥固定, 用于监视铁心温度, 并用红外线点温计测量机座和铁心各部位温度。测温点位置布置见表 1, 测温点位置象限如图 2 所示。

Table 1. Layout of temperature measurement points

表 1. 测温点位置布置表

测温点位置	铁心			齿部		
	上	中	下	上	中	下
第四象限	13	14	15	1	2	3
第一象限	17	16, 18		5	4, 6	
第二象限	21	20	19	9	8	7
第三象限		22, 24	23		10, 12	11

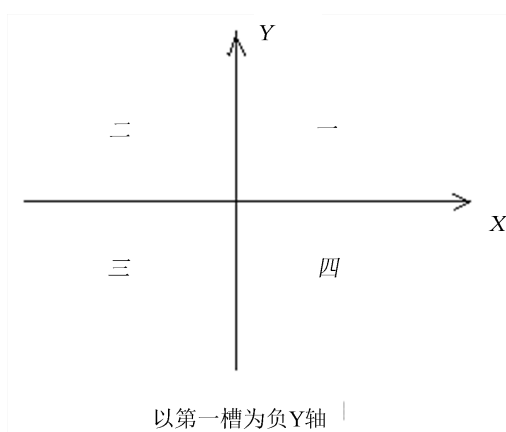


Figure 2. Quadrant diagram of temperature measurement point positions

图 2. 测温点位置象限图

5) 连接各仪表连线, 用兆欧表测量励磁线圈对地绝缘应良好[4]; 缠绕励磁绕组和测量绕组, 在棱角处用橡胶垫护, 防止电缆因铁心震动的磨损漏电; 检查所有铁心螺栓均在特定的力矩下紧固, 定子内、通风沟内、上下端处无铁磁物质遗留; 清理定子铁心通风沟内、定子机架、定子铁心顶部及附近的杂物、金属颗粒、灰尘等; 定子外壳可靠接地。

3.3. 试验方法

1) 合上电源开关开始试验, 测量定子铁心各部位温度, 记录初始温度。每隔 10 分钟记录一次温度计读数、测量电流、测量电压、测量功率及环境温度等表计读数。

2) 试验中密切监视电源、电缆、测量表计等运行情况, 发现冒烟、火花、严重声响、震动加剧、温差大等异常情况应立即停止试验, 查明原因妥善处理后再重新试验。

3) 试验正常进行 90 分钟后断开电源开关, 铁心自然冷却至环境温度, 检查定子机座与定位筋各焊缝应无裂纹, 螺杆应无松动等问题, 按照叠片压紧工艺对铁心进行紧固并测量铁心高度。

4) 整理试验数据, 得出试验结果后拆除试验接线、测量表计、温度计等, 清理试验现场。

3.4. 试验记录

电气参数、铁心温度、铁心齿部温度试验记录分别见表 2~4。

Table 2. Electrical parameter record table**表 2.** 电气参数记录表

序号	时间	频率 (Hz)	测量电流 (A)	测量电压 (V)	测量功率 (W)	环境温度 (°C)
1	11:55	50	78.0	320	12,800	11.4
2	12:05	50	78.4	320	12,800	11.7
3	12:15	50	80.0	320	12,800	11.7
4	12:25	50	80.8	320	12,800	11.6
5	12:35	50	82.0	320	12,800	11.7
6	12:45	50	84.0	319	12,800	11.6
7	12:55	50	84.0	317	12,800	11.6
8	13:05	50	84.8	313	13,200	11.5
9	13:15	50	86.0	313	13,200	11.4
10	13:25	50	87.2	313	13,200	11.4

Table 3. Iron core temperature record table**表 3.** 铁心温度记录表

序号	时间										温升 (°C)
	11:55 (°C)	12:05 (°C)	12:15 (°C)	12:25 (°C)	12:35 (°C)	12:45 (°C)	12:55 (°C)	13:05 (°C)	13:15 (°C)	13:25 (°C)	
1	14.2	17.2	17.8	18.2	18.4	18.4	18.8	19.2	19.8	20.6	6.4
2	13.6	16.8	17.6	17.8	18.2	18.2	18.6	19.2	19.8	20.6	7.0
3	13.6	16.4	17.0	17.8	17.8	17.8	18.0	18.4	19.2	19.8	6.2
4	13.4	17.0	17.6	18.2	18.4	18.4	18.6	19.2	20.2	20.6	7.2
5	13.6	17.0	17.4	18.6	18.8	18.8	18.8	19.6	20.4	21.2	7.6
6	13.6	16.8	17.2	18.0	18.2	18.2	18.6	19.2	20.2	20.8	7.2
7	14.0	17.2	17.4	18.0	18.0	18.2	18.2	18.6	19.6	20.2	6.2
8	14.2	17.2	17.6	18.0	18.2	18.6	19.0	19.6	20.4	20.8	6.6
9	14.6	17.4	17.8	18.2	18.2	18.4	18.6	19.4	20.2	20.4	5.8
10	14.4	17.6	18.0	18.4	18.4	18.4	19.0	19.8	20.6	20.8	6.4
11	14.6	17.6	18.0	18.2	18.2	18.2	18.4	19.0	19.2	19.2	4.6
12	14.6	17.8	18.2	18.4	18.4	18.6	19.2	19.8	20.6	20.8	6.2

Table 4. Temperature record of iron core teeth**表 4.** 铁心齿部温度记录表

序号	时间										温升 (°C)
	11:55 (°C)	12:05 (°C)	12:15 (°C)	12:25 (°C)	12:35 (°C)	12:45 (°C)	12:55 (°C)	13:05 (°C)	13:15 (°C)	13:25 (°C)	
1	14.2	17.2	17.4	18.0	18.2	18.2	18.4	18.6	18.6	19.4	5.2
2	13.8	16.8	17.4	17.8	17.8	18.0	18.4	18.6	18.8	19.2	5.4
3	13.6	16.6	17.2	17.6	17.6	17.6	17.8	17.8	18.4	18.8	5.2
4	13.6	17.0	17.4	17.8	17.8	17.8	18.0	18.2	18.6	19.2	5.6

Continued

5	13.8	17.2	17.6	18.2	18.2	18.2	18.2	18.6	19.0	19.8	6.0
6	13.8	17.0	17.6	18.2	18.2	18.2	18.2	18.4	19.2	19.6	5.8
7	14.0	17.2	17.6	18.0	18.0	18.0	18.2	18.2	18.4	18.6	4.6
8	14.2	17.2	17.6	17.8	18.0	18.2	18.2	18.4	18.2	19.4	5.2
9	14.8	17.4	17.8	18.2	18.2	18.2	18.4	18.6	18.8	18.8	4.0
10	14.6	17.4	17.6	17.8	17.8	18.0	18.4	18.6	19.2	19.4	4.8
11	14.8	17.4	17.6	17.8	17.8	17.8	17.8	18.2	18.4	18.4	3.6
12	15.2	17.8	17.8	18.2	18.2	18.2	18.6	18.8	19.2	19.4	4.2

4. 数据对比分析[5]

4.1. 实际磁通密度 $B' = \frac{V_{PT} \times 10^4}{4.44 f W_c S_z} (T)$

V_{PT} —— 测量绕组感应电压值, W_c —— 测量绕组匝数。

S_z —— 定子铁心轭部截面。

将所测数据进行计算, 得出各测点对应的磁通密度, 最大值为 $B' = 0.8265 T$ 。

4.2. 单位铁损 $\Delta P = \frac{P}{G} \times \left(\frac{1}{B'}\right)^2 (W/kg)$

P —— 实测总铁损(功率表读数乘以变比)。

铁心硅钢片密度 r 取 $7.654 g/cm^3$ 。

铁轭重量 $G = \pi D_{av} S_z r = 13076.26(kg)$ 。

定子铁心总铁损应小于标准总铁损 $22.2 kW$ 。

将所测数据进行计算, 得出各测点对应的总铁损, 最大值 $13.200 kW$, 再将单位铁损换算至 $10,000$ 高斯, 最大值 $19.323 kW$ 。各测点对应换算见表 5。

Table 5. Conversion table
表 5. 换算表

时间	磁通密度 (高斯)	总铁损 kW (折算前)	总铁损 kW (折算后)
11:55	8368	12.800	18.279
12:05	8368	12.800	18.279
12:15	8368	12.800	18.279
12:25	8368	12.800	18.279
12:35	8368	12.800	18.279
12:45	8368	12.800	18.279
12:55	8317	12.800	18.504
13:05	8265	13.200	19.323
13:15	8265	13.200	19.323
13:25	8265	13.200	19.323

结果：定子铁心总铁损小于 22.2 kW。

4.3. 铁心最高温升 $t_1 = (t_3 - t_0) \times \left(\frac{1}{B'}\right)^2$ (°C)

t_3 ——铁心最高温度， t_0 ——铁心初始温度。

依据铁心圆周上、下轭部和齿部 24 个位置测量温度结果，逐一计算 24 个位置铁心最高温升，按标准规定， Δt_1 不得大于 25°C。

铁心的最高温升为 7.6°C，换算至 10,000 高斯时为：

$$7.6 \times \left(\frac{10000}{8265}\right)^2 = 11.13(^\circ\text{C})$$

结果：定子铁心的最高温升小于 25°C。

4.4. 铁心最高温差 $t_2 = (t_1 - t_2) \times \left(\frac{1}{B'}\right)^2$ (°C)

t_1 ——铁心最高温度， t_2 ——铁心最低温度(90 分钟时)。

按标准规定， Δt_2 不得大于 15°C。

铁心的最高温差为 6.0°C，换算至 10,000 高斯时为：

$$6.0 \times \left(\frac{10000}{8265}\right)^2 = 8.78(^\circ\text{C})$$

结果：定子铁心的最高温差小于 15°C。

通过数据可以看出，把铁心总损耗、最高温升、最高温差试验结果与有关标准的规定值相比较，3 项指标均符合要求规定，水轮发电机定子铁心磁化试验结果合格；自该台水轮发电机组 2006 年投运以来，定子铁心无松动、变形等故障发生，机组运行正常。试验数据说明，定子铁心磁化试验数据能反映定子铁心制造、叠装质量的实际状况。

5. 结语

定子铁心磁化试验是评价发电机定子铁心质量优劣、绝缘状况的重要手段和工序，是准确检测定子铁心有无局部短路、有无绝缘损坏的直接对策和方法，试验人员根据设备结构、参数计算相关指标做好试验准备并采取正确试验方法，以采集到真实、准确、有效的试验数据，综合判断设备健康状况，一次性通过定子铁心磁化试验将为定子线圈下线施工等后续工作创造有利的条件。

参考文献

- [1] 中华人民共和国机械工业部. JB/T 8660 水轮发电机组包装、运输和保管规范[S]. 北京：机械科学研究院，1997.
- [2] 中华人民共和国能源部. SD 287 水轮发电机定子现场装配工艺导则[S]. 北京：水利电力出版社，1988.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 8564 水轮发电机组安装技术规范[S]. 北京：中国标准出版社，2003.
- [4] 中华人民共和国建设部. GB 50150 电气装置安装工程电气设备交接试验标准[S]. 北京：中国标准出版社，2006.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 7064 透平型同步电机技术要求[S]. 北京：中国标准出版社，2002.