

渔子溪电站发电机组转子线圈温升试验研究

刘 彬,余 波,刘 育,卿 彪,庞 煜

(西华大学 能源与动力工程学院,四川 成都 610039)

摘要:利用 3 种方法,即双臂电桥电阻法、实时励磁电流电压电阻法和红外热成像仪测温法,在额定出力及超额定出力工况下,对渔子溪水电站 4 号水轮发电机组转子线圈开展了现场温升试验研究。研究表明:在既定参数工况下运行,4 号机组转子线圈温升有很大的富裕度;在额定励磁电流下,转子线圈温升在 70℃~80℃ 之间。但是,要准确确定 4 号机组转子线圈在低功率工况下的温升情况,则有待于在本次测试的基础上,改善现场测试条件并开展下一步专题研究。

关 键 词:水轮发电机组;温升;电阻法;红外热成像仪;渔子溪水电站

中图法分类号:TV731

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.12.019

1 工程概述

1996 年以来,渔子溪水电站完成了机组的部分过流部件改造工作,通过改造,水轮机转轮由原来的 HLA45-LJ-210 改为 HLA542-LJ-215,改造后的水轮机增容达 10%,机组运行情况非常好^[1-2]。2013 年 7 月,渔子溪水电站开展了为期 10 d 的超出力至 42 MW 试运行,从运行日志各监控数据来看,发电机励磁电压、电流、发电机定子绕组及铁芯温度均在合格范围内,但是发电机转子线圈温升数据缺乏^[3]。因此,项目组针对渔子溪水电站 4 号机组开展了转子线圈温升现场试验,通过试验来分析机组在额定出力及超额定出力运行工况下,水轮发电机转子线圈温升的变化情况,以便为确定渔子溪水电站各台水轮发电机组安全运行极限和超出力能力提供参考。

2 试验对象

渔子溪水电站是一径流引水式电站,安装有 4 台单机容量为 40 MW 的混流式水轮发电机组。发电机

设计水头为 290 m,额定转速为 500 r/min,飞逸转速为 820 r/min,设计流量为 17.5 m³/s^[4]。4 号水轮发电机组的型号为 TS425/125-12,其各项技术参数如下。

容量	47 100 kVA
额定功率	40 000 kW
电流	1 970 A
电压	13 800 V
频率	50 Hz
功率因数	0.85
励磁电流	1 333 A
励磁电压	115 V
额定转速	500 r/min
最大调容容量	30 000 kVA
定子接线	1 Y
飞逸转速	839 r/min
冷却方式	密闭风冷却
转子绝缘	F 级

收稿日期:2015-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51379179);西华大学学术成果培育项目(SBZDPY116);西华大学省部级学科平台开放课题(SZJJ2014-046);西华大学研究生创新基金项目(YCJJ2015159)

作者简介:刘 彬,男,硕士研究生,主要从事动力系统优化与节能技术方面的研究。E-mail:lb1187138354@163.com

通讯作者:余 波,男,教授,硕士生导师,主要从事水利水电工程及自动化、计算机监控和仿真技术等领域的研究。E-mail: cgyubo@163.com

3 试验方案

4 号机组转子线圈温升测试所选择的工况有 2 种,即水轮发电机的有功功率分别为 40 MW 和 42 MW 左右。由于受电网及其他电气设备的限制,很难将其功率因数调节到设计值(0.85),所以测试时只能保证有功功率基本上为定值,功率因数基本维持在0.969左右。拟定的此次 4 号机组转子线圈温升测试方案如下。

(1) 基于双臂电桥电阻法测温^[5-6]。该方案数据的采集是待机组在规定出力工况下运行 2 h,机组正常停机且做好安全措施以后,在发电机集电环处利用双臂电桥立即进行转子线圈热态电阻测量。

(2) 基于实时励磁电流、励磁电压电阻法测温。该方案为待机组在规定出力工况下运行 1 h 后,每隔 20 min 左右,通过励磁柜可视化界面直接读取励磁电流和励磁电压。

(3) 红外热成像仪测温^[7-8]。该方案选取在上机架底部对转子线圈正上方进行拍摄,记录转子表面温度,拍摄时间基本上与基于双臂电桥电阻法测温同步进行。在进行图像分析时,依据辐射传热原理和材料的特性^[9],分别选取 4 号机组的转子线圈表面发射率和大气透光率为 0.95% 和 100%。

4 试验结果及分析

4.1 双臂电桥电阻法测温结果

通过采用双臂电桥电阻法测量(方法 1),4 号机组的转子线圈测温结果如表 1 所示。

表 1 4 号机组转子线圈温升测量结果(方法 1)

有功 P / MW	转子线圈冷态 电阻 R ₁ /Ω	转子线圈热态 电阻 R ₂ /Ω	冷态电阻环境 温度 θ ₁ /℃	热态电阻环境 温度 θ ₀ /℃	转子线圈/ 温升 θ _f /℃
40	0.06520	0.07445	12.00	24.00	22.05
42	0.06520	0.07610	12.00	24.00	28.12

4.2 实时励磁电流、电压测温结果

通过采用实时励磁电流、励磁电压电阻法测量(方法 2),4 号机组转子线圈的测温结果如表 2 所示。

表 2 4 号机组转子线圈温升测量结果(方法 2)

励磁电流/ A	励磁电压/ V	有功/ MW	功率因数	热态电阻/ Ω	温升/ ℃	励磁电流 均方根值/A	平均温升/ ℃
1075.0	88.1	40.1	0.966	0.081953	48.90		
1081.6	90.1	40.4	0.966	0.083303	53.80	1073.89	51.47
1065.0	88.1	40.0	0.966	0.082723	51.70		
1117.4	91.9	42.1	0.962	0.082244	49.96		
1111.4	92.4	41.9	0.963	0.083138	53.21	1114.64	52.01
1115.1	92.6	42.2	0.962	0.083042	52.85		

4.3 红外热成像仪测温结果

利用 Ti50FT 型红外热成像仪进行拍摄(方法 3),从拍摄影片上可以观察到 4 号机组转子线圈温度的分布情况,见图 1 和图 2。

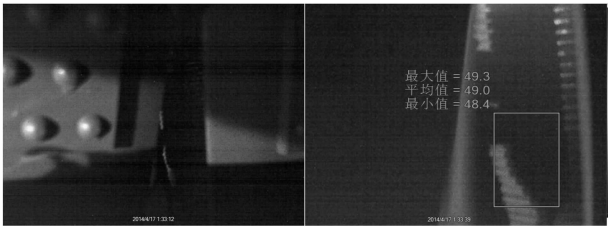


图 1 有功功率达到 41MW 后,4 号机组转子线圈端部位置与表面的温度分布

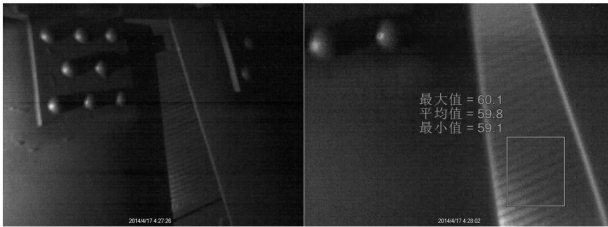


图 2 有功功率达到 42MW 后,4 号机组转子线圈端部位置与表面的温度分布

利用红外热成像仪测试 4 号机组转子线圈的温升结果示于表 3 中。

表 3 4 号机组转子线圈温升测量结果(方法 3)

有功 P / MW	环境温度 θ ₀ / ℃	转子线圈温度 θ / ℃	转子线圈温升 θ _f / ℃
40	24.0	49.0	25.0
42	24.0	59.8	35.8

由表 1 和表 3 可知,基于双臂电桥电阻法与红外热成像仪测温法测得的 4 号机组转子线圈的温升误差在工程允许的范围内。因此,测试结果证明了这 2 种方法测试的正确性。

由表 1~3 和 GB/T 7894-2009《水轮发电机基本技术条件》可知^[10],对于 4 号机组转子线圈温升的测试,采用第 1 种和第 3 种测温方案所测出的温升结果明显偏低,而采用第 2 种测温方案所得到的测温结果更贴近实际。原因在于第 1、3 种方案均要求在机组停机以后才能进行,但机组正常停机、做安全措施所需的时间较长,从而导致转子线圈温度下降较多,因此,这 2 种测温方案的测温结果偏低。本次对 4 号机组转子线圈温升的测试,是以第 2 种方案,即基于实时励磁电流和励磁电压电阻法测温结果为主要参考。

5 转子线圈温升结果修正

由于受电网及其他电气设备的限制,本次在对 4 号机组转子线圈温升进行现场测试时,很难将转子电流调节到额定值。为了解转子励磁电流达到额定值后的转子线圈温升情况,就需要将测试获取的转子线圈温升结果修正到转子额定励磁电流下的温升。

5.1 修正原理

转子线圈的发热是由励磁电流 I_f 在线圈中产生的铜耗(电阻损耗)所引起的^[11]。由于水轮发电机组的磁极线圈系裸线绕制而且是旋转的,因此其表面散热主要以铜线侧面与气流的对流换热方式进行,且主要与下列因素有关。① 气流的运动速度;② 流体的物理性质;③ 铜线的形状、尺寸及极间空间大小等。

水轮发电机组的冷却介质是空气,其物理性质稳定。电机在运转时,线圈侧表面不同区域的空气流动速度不同,且难以精确计算,一般以转子表面圆周速度为参数,通过试验获得曲线或近似公式。在 20 世纪 40 年代,前苏联电力企业根据经验提出了计算水轮发电机组转子线圈温升的公式(见公式(1)),经过长期实践检验,该公式被证明是准确的^[12-13],即

$$\theta_f = \frac{b_f J_f^2}{390} \cdot \frac{1.6 + \sqrt{V}}{117(2.8 + \xi)} \quad (1)$$

式中, ξ 为定子长度与极距之比值, $\xi = L_f/\tau$; V 为转子圆周速度, m/s; $V = \frac{\pi D_2}{60} n_N$, r/min; D_2 为转子外径, m; n_N 为额定转速, r/min; b_f 为铜线宽度, cm; J_f 为转子电流密度, A/mm², $J_f = \frac{I_f}{a_f \times b_f}$, a_f 为磁极铜线的厚度, cm; I_f 为额定励磁电流。

通过式(1)和 GB/T1029-2005《三相同步电机试验方法》中的相关规定可知^[14],应按照电流的平方修正公式来修正转子线圈的温升,即

$$\theta_{fN} = \theta_f \left(\frac{I_{fN}}{I_f} \right)^2 \quad (2)$$

公式(2)表明,对于既定的水轮发电机组,转子线圈的温升仅与励磁电流的平方成正比。对于铝绕组,式(2)也同样适用。

5.2 修正结果

利用表 2 中 4 号机组的转子线圈在拟定工况下的平均温升、励磁电流均方根值以及运用公式(2),将 4 号机组转子线圈的温升修正到额定励磁电流下,则结果为:

(1) 以有功为 41 MW 时的温升为基准,修正后的

温升为 79.3℃。

(2) 以有功为 42 MW 时的温升为基准,修正后的温升为 74.38℃。

据此推算,当转子励磁电流达到额定值 1 333 A 时,转子线圈的温升在 70℃~80℃ 范围内。

6 结论

在拟定的额定出力和超额定出力 5% 工况下,综合此次对 4 号机组转子线圈的温升测试所采用的 3 种测温方案和测温条件,得出如下结论。

(1) 本次对 4 号机组转子线圈温升的测试,是利用的双臂电桥电阻法和红外热成像仪测温方法,其测温结果得到了相互印证,表明这 2 种测温方法均具有较高的准确性。然而,基于这 2 种方法的测温方案均需要在机组停机后进行,在这各种情况下,由于正常停机、做足安全措施所需要的时间较长,此期间转子线圈的温度会下降较大,因此测温结果并不能真实地反映机组运行时的转子线圈温升情况。若能克服功率因素过大以及停机时间过长等缺陷,这 2 种水轮发电机组转子线圈测温方案即可推广运用于实际工程项目中。

(2) 相比另外 2 种方法而言,基于实时励磁电流、励磁电压电阻法所测得的 4 号机组转子线圈的温升明显较高。依据 GB/T 7894-2009《水轮发电机基本技术条件》可知,该方法所测得的结果更贴近实际值。所以,本次对 4 号机组转子线圈温升的测试,主要是以实时励磁电流和励磁电压电阻法的测温结果为参考。

(3) 采用基于实时励磁电流和励磁电压电阻法的测温方案结果,按照 GB/T1029-2005《三相同步电机试验方法》中的相关规定,将 4 号机组的转子线圈温升修正到额定励磁电流下,则 4 号机组转子线圈温升在 70℃~80℃ 之间。鉴于 4 号机组转子线圈为 F 级绝缘,依据 GB/T7894-2009《水轮发电机基本技术条件》,其允许温升不得超过 110℃。因此,4 号机组在额定励磁电流下运行是允许的,并且有一定的温升裕度。

(4) 实际上,按照 GB/T1029-2005《三相同步电机试验方法》,本文中的式(2)仅适用于励磁电流试验值与额定励磁电流偏差在 ±5% 的情况。然而,本次在对 4 号机组现场测试时,励磁电流试验值与额定励磁相差较大,如果采用该方法修正,就会存在较大的误差。因此,为了准确确定 4 号机组转子线圈在额定出力和超额定出力运行工况下的温升情况,建议在此基础上开展专门的现场测试研究工作。

参考文献:

- [1] 林映雄,张洪斌.渔子溪电站水轮机的更新改造[J].大电机技术,2004,(2):52-56.

[2] 聂华江,张仁福,韩玉林. 渔子溪电站水轮机改造与运行工况[J]. 水力发电,1999,(9):17-19.

[3] 宋琚,杨豆思. 葛洲坝自备电源电站发电机通风系统改造[J]. 人民长江,2013,(4):69-72.

[4] 张惟斌,赖喜德,余波,等. 映秀湾水轮发电机组转动轴系的振动特性分析[J]. 大电机技术,2011,(6):13-16.

[5] 温智慧,周惟,李辉. QJ44 型双臂电桥测量变压器直流电阻[J]. 大众用电,2014,(7):41-42.

[6] 王佑明,张志利,龙勇. 直流双臂电桥测量低电阻的误差分析[J]. 电子测量技术,2007,30(1):154-156.

[7] 晏敏,颜永红,曾云,等. 非接触式红外测温原理及误差分析[J]. 计量技术,2005,(1):23-25.

[8] 田理达,毕纯辉,梁彬. 红外光纤式辐射测温技术在发电设备中的应用[J]. 自动化技术与应用,2003,(2):58-60.

[9] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2005.

[10] GB/T 7894-2009 水轮发电机基本技术条件[S].

[11] 傅自清. 水轮发电机转子温升的计算及试验[J]. 东方电机,2002,31(1):47-57.

[12] 白延年. 水轮发电机设计与计算[M]. 北京:机械工业出版社,1990.

[13] 刘育,余波,刘彬,等. 水轮发电机转子线圈温升试验方案可靠性分析[J]. 黑龙江大学工程学报,2014,5(4):14-18.

[14] GB/T1209-2005 三相同步电机试验方法[S].

(编辑:赵秋云)

Experimental study on temperature rise of rotor coil of hydro – generator unit in Yuzixi Hydropower Station

LIU Bin, YU Bo, LIU Yu, QING Biao, PANG Yu

(School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: Using the measurement of double bridge resistance, the measurement of the real – time excitation current, voltage, and resistance, and the measurement of infrared thermal imager, the temperature rise of the rotor coil of No. 4 hydro – generator unit in Yuzixi Hydropower Station was measured in field when the unit is in operating conditions of rated output and extra rated output. The results show that the rotor coil of No. 4 unit makes substantial allowance for temperature rise at a given output; the temperature rise hovers between 70℃ ~ 80℃ under rated excitation current. On the basis of this experimental study, a further research is necessary to accurately identify the rotor coil’s temperature rise of No. 4 unit at a low output after the in – situ testing conditions are improved.

Key words: hydro – generator; temperature rise; resistance measurement; infrared thermal imager; Yuzixi Hydropower Station

(上接第 56 页)

[12] 凌复华. 突变理论入门[M]. 上海:上海科学技术文献出版社, 1983.

[13] 谢应齐,曹杰. 非线性动力学数学方法[M]. 北京:气象出版社, 2001.

[14] 潘岳,李爱武,戚云松. 对“突变级数法在边坡稳定综合评判中的应用”的讨论[J]. 岩土力学,2009,30(1):285-288.

(编辑:郑毅)

Research on stability of soil slope based on swallowtail catastrophe model

FENG Cheng¹, SONG Xinhua²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China; 2. School of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The catastrophe theory is an effective methodology to study the discontinuous phenomenon in nature world, so it is feasible to the stability research of soil slope. A swallowtail catastrophe model is established based on a practical soil slope. Three important influential factors of cohesion force, frictional angle and slope angle are selected to calculate the catastrophe ratio of the soil slope by swallowtail catastrophe formula. The calculated results are used to analyze the slope stability and are compared with traditional method, and the model is verified. The application of the presented model in practical engineering shows that it is convenient, reasonable and applicable.

Key words: slope stability; swallowtail catastrophe; bifurcation set; catastrophe progression