

海外工程中水轮发电机介损和电容测量试验

陈伟, 王志浩, 周庆科, 孙二文, 李锡平

(中国华电工程(集团)有限公司, 北京市 100035)

摘要: 在大型汽轮、水轮发电机等大电容设备的测量和检修过程中, 常因测量仪器容量不够, 而无法适应海外工程特点和满足国内外标准要求。针对此问题, 首先分析了串联谐振装置和介质损耗(介损)测量装置的应用原理, 然后根据其测量特性, 提出了组合应用串联谐振装置和介损测试仪进行水轮发电机介损和电容测量。将该方法应用到印度尼西亚总承包工程的测量试验中, 根据国内外标准分析了试验结果。试验研究表明, 该方法测量准确、方便, 并且试验结果达到了国内外标准, 对其他海外项目有借鉴意义。

关键词: 海外工程; 水轮发电机; 串联谐振; 介损测试仪; 介损测量; 电容测量

0 引言

大型水轮发电机定子常采用波绕组的接线形式^[1], 每相绕组由若干个绕组元件串联形成。由于大型水轮发电机定子自身的电磁结构特点(气隙较大、定子槽较深), 与对地电容相比, 定子绕组的线棒互感、线棒间电容与线棒的自感可忽略不计。但发电机介质损耗(介损)和电容测量是建设和检修阶段必做的试验项目^[2], 此试验关系到发电机的绝缘性能, 因此显得尤为重要。

海外工程经常遇到的问题是由于其采用的标准与国内标准有差异, 并且试验设备条件受各种因素的制约, 试验往往难以成功。在海外工程环境下进行水轮发电机介损和电容测量实验, 其难点在于水轮发电机的电容通常是火力发电机的几十倍, 即使在国内都很难找到如此大容量的试验设备。工程现场曾试图用美国 Doble 公司的介损测试仪试验, 但该介损测试仪只能测量 50 nF 的电容量, 而发电机电容量约为 530 nF, 仪器容量远远不够, 导致试验失败。

本文针对海外工程在现场无外部标准电容等仪器, 仅有串联谐振装置和介损测试仪的情况, 探索按照国外标准和电网要求实施发电机介损和电容测量试验的方法, 用有限的试验设备来测量大容量发电机的介损和电容^[3-4]。根据印度尼西亚(以下简称“印尼”)总承包工程中水轮发电机介损和电容测量试验情况, 分析提出的组合测量方法的可行性。

1 介损测量原理

绝缘体在电场作用下的等效模型^[5]如图 1(a)所示, 介损测量试验中交流电压作用下的试验电路和绝缘等值电路分别如图 1(b)和(c)所示。

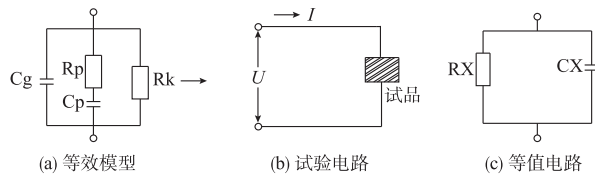


图 1 试验物理模型

流过介质的电流由 2 部分组成, 即通过 CX 的电容电流分量 I_{CX} 和通过 RX 的有功电流分量 I_{RX} , 通常 I_{CX} 远远大于 I_{RX} 。电容电流与流过介质的总电流形成夹角, 即介质损耗角 δ , $\tan \delta$ 为其正切值。通过测量 $\tan \delta$ 可反映绝缘的一系列缺陷如受潮、脏污或劣化变质, 绝缘中气隙发生放电等。绝缘检查方法的选择是根据绝缘材料特性和应用场合等多种因素决定的, 而对于多电容元件来说, 介损测量是较为有效的方法之一。

在交流电压作用下, 电介质消耗部分电能, 这部分电能将转变为热能产生损耗, 这种能量损耗称为电介质损耗。 $\tan \delta$ 值是用来衡量电介质损耗的参数^[6]。测量电容值和 $\tan \delta$ 的仪器测量线路包括标准回路(CN)和被试回路(CX), 其测量原理如图 2 所示。

图 2 中, 测量电路包含傅里叶变换、复数运算等全部计算, 以及量程切换, 变频电源控制等环节。升压变压器将变频电源输出升到测量电压。内部 CN 为标准电容器, CN 电流检测用于检测内标准电容

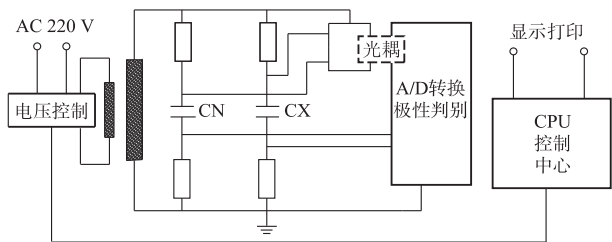


图2 电容值和 $\tan \delta$ 测量原理

器电流。CX 正接线电流检测只用于正接线测量，CX 反接线电流检测只用于反接线测量。

2 串联谐振装置

2.1 物理模型和谐振点的判定

串联谐振(电压谐振)装置由电感(感性试品)、电容(容性试品)及中压电源串联组成^[7]，其谐振电路如图3所示。

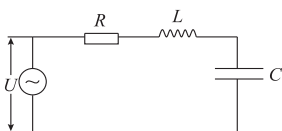


图3 串联谐振电路

串联谐振的谐振点判定如下。

- 1) 回路谐振时，回路阻抗最小且呈阻性，当偏离谐振点时，回路阻抗远远大于谐振时的回路阻抗。
- 2) 电源输出为开关电路，源阻抗很大。
- 3) 当电源默认频率不是系统谐振点时，变频电源负载很轻^[8]，此时给谐振回路一个很小的激励电流，通过调节变频电源输出频率来寻找谐振点，即变频电源输出频率满足 $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ ，系统谐振^[9]。

4) 在寻找谐振点时，有时也会出现假谐振点，而找到真正谐振点时的变频电源输出电压均小于 30 V。

2.2 装置应用原理

串联谐振装置试验接线如图4所示。

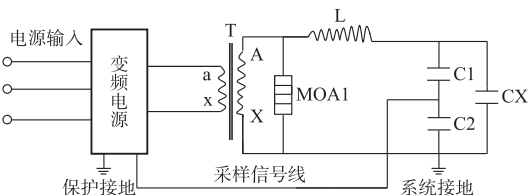


图4 串联谐振装置试验接线

图4中，变频电源由变频控制器、滤波器^[10]和峰值电压表组成，其原理见附录A图A1。励磁变压器将变频电源输出电压升到试验电压，满足电抗

器、负载在一定品质因数下的电压要求。励磁变压器接线见附录A图A2。测量信号从C2上引出，作为高压测量和保护信号。谐振电容器的作用是在容量较小试品试验时，把频率控制在一定范围内。避雷器MOA1的作用是防止试品击穿或电源突然掉电时，电抗器低压端电位抬高对励磁变压器和电抗器造成冲击。

主交流电送入变频电源，经整流转换为幅值恒定的直流电压，经变频电源逆变器调制为频率脉宽可调的方波。方波电压经滤波环节等处理后由变频电源变频输出，输出电压送励磁变压器T低压侧，经T升压后送到由试验电抗器L、试品电容CX和分压器(高压臂C1，低压臂C2)构成的串联谐振回路，谐振频率由电抗器电感、CX和分压器的电容共同决定。

3 介损测试仪

介损测试仪是根据正/反接线设置和试验电流选择输入并切换量程，测量电路用傅里叶变换滤掉干扰，分离出信号基波，对标准电流和试品电流矢量进行运算，其幅值用于计算电容量，角差用于计算 $\tan \delta$ 。介损测试仪结构如图5所示。

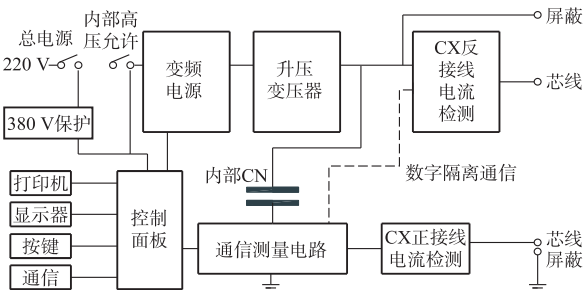


图5 介损测试仪结构

对大电容设备进行介损测量时，例如测试电压为 10 kV 时，介损测试仪测量范围较小，一般为 3 pF~60 nF，限制了介损测试对象。一般需借助外部电源能量配合测量，用外高压测量可将原来几十纳法的测量上限增至几微法，从而使测量范围增加几十甚至上百倍。对大中型发电机进行介损测量时，因电容一端已经接地，很难采用正接法测量，故一般采用外高压反接法测量，介损测试仪外加高压反接法试验接线如图6所示。

介损测试仪使用中，直接影响介损测量的因素有：温度、湿度、试验电压、使用频率及被试品局部缺陷^[11]。

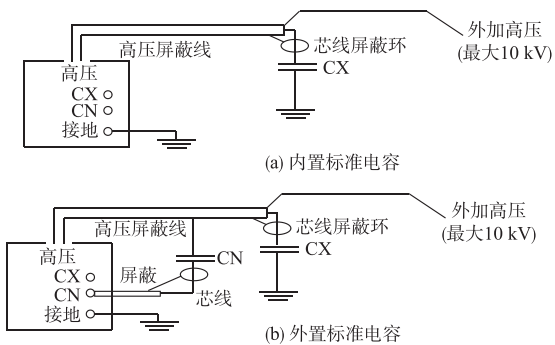


图 6 介损测试仪外加高压反接法试验接线

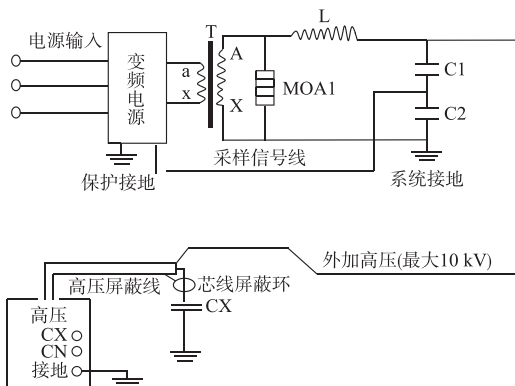


图 7 发电机介损测量试验接线

4 海外工程中组合装置测量试验

4.1 发电机定子的介损测量

发电机定子绕组的介损测量试验是鉴定其绝缘强度较直接的方法,该试验在绝缘电阻、吸收比或极化指数试验合格后进行^[12],主要检查发电机主绝缘和受潮情况。试验中常用双重巡视高压法测量,具体内容如下。

1) 高压电压直接测量法:通过峰值电压表直接测量高压电压值。

2) 高压电流测量监视法:用钳形电流表在接地端监测高压电流,当谐振点找到后得到试验频率,试验高压电抗值为已知,通过感抗(或试品容抗)乘以高压电流计算得到高压电压值,将其与峰值电压对比,两者应基本一致。

4.2 测量试验方法

水轮发电机属大电容设备,单独使用介损测试仪很难测量发电机介损。因为发电机电容量都在几百纳法以上,而介损测试仪在没有外接电源且电压为 10 kV 的情况下最大只能进行几十纳法的电容介损测量,故大电容介损测量时需借助外接电源。

印尼总承包工程中水轮发电机介损和电容测量试验方法采用外加高压、内置标准电容、反接线法,试验过程中交流耐压输出的电压直接与介损测试仪屏蔽线连接(黑夹子),介损测试仪的芯线(红夹子)直接与发电机被测部位相连接进行测量。

由串联谐振装置提供所需要的高压,经过介损测试仪内部标准电容进行标准电容电流测量,同时经高压内部采样装置,再通过电流互感器变成低压信号传到介损测试仪内部桥体进行计算,通过比较流过标准电容的电流与流过发电机的电流,得到 δ ^[13],从而计算出介损值。由介损测试仪芯线把电压引至发电机定子上形成完整的闭合回路,从而测量发电机介损,具体接线如图 7 所示。

为发电机定子选择一套提供 10 kV 以上电压

(U)的交流耐压设备和能够承受 $2\pi fCU$ 电流(I)的介损测试仪,其中C为被试品电容值。本试验选用 AI-6000 介损测试仪进行测量。AI-6000 介损测试仪的内部试验设计为 10 kV/200 mA,内部标准电容器容量 50 pF,则 $I=2\pi fCU=1.884$ A,C 为水轮发电机电容,C=600 nF。故 $I=1.884$ A 超过 AI-6000 介损测试仪内部试验设计(0.2 A),但不超过最大量程 5 A。所以试验选用外高压、正接线时,高压不限制,试验电流 <5 A;选用外高压、反接线时,高压不要超过 12 kV,试验电流 <5 A。

5 试验结果分析

5.1 国内外相关标准

国外标准^[14]关于测量 $\tan \delta$ 的发电机介损试验接线见附录 A 图 A3,其验收判别公式(发电机介损最大范围)如下。

$$\tan \delta_{0.2U_N} < 0.04 \quad (1)$$

$$\frac{\tan \delta_{0.6U_N} - \tan \delta_{0.2U_N}}{2} < 0.025 \quad (2)$$

式中: U_N 为发电机额定电压; $\tan \delta_{0.2U_N}$ 和 $\tan \delta_{0.6U_N}$ 分别为试验电压为 $0.2U_N$ 和 $0.6U_N$ 时的介损角正切值。

国内水利行业标准^[15]关于定子线棒(线圈)常态下的 $\tan \delta$ 及 $\Delta \tan \delta$ 限值规定如下。

当试验电压为 $0.2U_N$ 时,则

$$\tan \delta_{0.2U_N} \leq 0.02 \quad (3)$$

当试验电压为 $(0.2 \sim 0.6)U_N$ 时,则

$$\Delta \tan \delta = \tan \delta_{0.6U_N} - \tan \delta_{0.2U_N} \leq 0.01 \quad (4)$$

式中: $\Delta \tan \delta$ 为定子线棒(线圈)常态介损角正切值增量。

非常态情况下的 $\tan \delta$ 可用温度来换算,温度换算系数如表 2 所示。

表 2 $\tan \delta (\times 10^{-2})$ 计算中的温度换算系数

温度差 $K/^\circ\text{C}$	换算系数 A
5	1.15
10	1.30
15	1.50
20	1.70
25	1.90
30	2.20
35	2.50
40	2.90
45	3.30

注: K 为实测温度减去 20°C 的绝对值。

当测量时温度差不是表中所列数值时,其换算系数 A 可用线性插入法确定,也可按 $A = 1.3^{K/10}$ 计算。校正到 20°C 时 $\tan \delta$ 的计算为:当测量温度在 20°C 以上时, $\tan \delta_{20} = \tan \delta_r / A$;当测量温度在 20°C 以下时, $\tan \delta_{20} = A \tan \delta_r$,其中, $\tan \delta_{20}$ 为校正到 20°C 时的介损角正切值, $\tan \delta_r$ 为在测量温度下的介损角正切值。

5.2 发电机介损和电容测量试验的结果分析

印尼总承包工程中,发电机介损和电容测量试验结果如表 1 所示。

表 1 发电机介损和电容试验结果

试验接线	试验电压/kV	$\tan \delta / \times 10^{-2}$	C/nF
A/B,C,E	2.820	2.414	532.5
B/A,C,E	2.845	2.417	531.0
C/B,A,E	2.954	2.459	531.3
A/B,C,E	8.413	3.557	542.1
B/A,C,E	8.273	3.511	540.2
C/B,A,E	8.495	3.533	540.5

对于印尼电网标准(参照国外标准):

$$\tan \delta_{0.2U_N} = 2.414 \times 10^{-2} < 0.04 \quad (5)$$

$$\frac{\tan \delta_{0.6U_N} - \tan \delta_{0.2U_N}}{2} = 5.72 \times 10^{-3} < 0.025 \quad (6)$$

对于国内标准,由于式(3)是常态下的限值,因试验温度为 30°C ,故需进行温度修正,则 $K = 10$, $A = 1.3$, $\tan \delta_{30} = A \tan \delta_{20} = 2 \times 1.3 \times 10^{-2} = 2.6 \times 10^{-2}$,则

$$\tan \delta_{0.2U_N} = 2.414 \times 10^{-2} < \tan \delta_{30} \quad (7)$$

再由式(4)可得:

$$\begin{aligned} \Delta \tan \delta &= 1.143 \times 10^{-2} < 0.01A = \\ &1.3 \times 10^{-2} < 0.01 \end{aligned} \quad (8)$$

由以上分析可知,应用串联谐振装置和介损测试仪组合测量水轮发电机的介损和电容,其试验结果同时满足国内外标准^[16]的要求,实验方法可行。

6 结语

海外工程业主和总承包合同的要求相对国内要求侧重点不同,国内注重发电机耐压试验,海外较注重发电机介损测量试验来衡量发电机绝缘性能。故对大容量水轮发电机进行介损和电容测量在国内无参照方法,必须创造性探索外接法,因地制宜组合有限试验设备,满足国内外相关标准。本文通过对印尼总承包工程中水轮发电机介损和电容测量试验的研究,将试验结果与国内外标准进行了对比分析。实践证明,中方试验方法和结果完全符合海外电网公司技术标准的要求,对其他海外项目有借鉴意义。

在本文试验中,串联谐振装置和介损测试仪在试品击穿时,破坏了谐振条件,短路电流小,保护了设备安全。谐振设备对被试品提供 10 kV 电压时,不能完成交流耐压要求,却能与介损测试仪共同完成被试品介损测量试验。用同种类型的小容量介损仪和串联谐振装置,可以测量最大电容为 1 592 nF 的大电容设备的电容与介损值,为设备安全运行提供一定依据,并解决大中型发电机测量介损难的问题^[17-21]。但需注意的是介损作为安全运行判断的指标之一,可以为发电机安全运行提供依据,但需考虑发电机运行工况和运行环境,并需在发电机运行前进行其他试验综合判断为宜。

参考文献

- [1] 夏勇军. 水轮发电机定子内部故障仿真计算研究进展[J]. 水电自动化与大坝监测, 2008, 32(4): 39-41.
- [2] 周代红, 田力, 杜焕章, 等. 三峡电厂发电机组常规检修流程[J]. 水电自动化与大坝监测, 2008, 32(6): 29-30.
- [3] DL 507—1993 水轮发电机起动试验规程[S]. 1993.
- [4] 杨艳, 江诗宏. 三峡电源电站机组发电机转子绝缘降低故障及其处理[J]. 水电自动化与大坝监测, 2011, 35(2): 29-31, 39.
- [5] 黎剑源, 丘东元, 张波. n 阶谐振开关电容变换器潜电路图论分析法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 53-59.
- [6] GB 50150—2006 电气装置安装工程: 电气设备交接试验标准[S]. 2006.
- [7] 周辉, 吴耀武, 娄素华, 等. 基于模态分析和虚拟支路法的串联谐波谐振分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 84-89.
- [8] 李圣清, 何伟华, 罗飞, 等. 串联混合型有源电力滤波器对三相负载谐波源补偿特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 115-119.
- [9] 董纪清, 陈为, 卢增艺, 等. 开关电源高频变压器电容效

- 应建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 121-126.
- [10] 罗安, 汤赐, 唐杰, 等. 一种基波串联谐振式混合型有源滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 12-22.
- [11] 杨丽君, 廖瑞金, 孙才新, 等. 油纸绝缘的局部放电特征量分析及危险等级评估方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 123-130.
- [12] IEEE Std 43—2000 IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery [S]. 2000.
- [13] 李建明, 朱康. 高压电气设备试验方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [14] IEEE Std 115—1995 IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines, Part I—Acceptance and Performance Testing, Part II—Test Procedures and Parameter Determination for Dynamic Analysis. 1995.
- [15] SL 321—2005 大中型水轮发电机基本技术条件 [S]. 2005.
- [16] IEEE Std 1248—1998 IEEE Guide for the Commissioning of Electrical Systems in Hydroelectric Power Plants. 1998.
- [17] 杜文忠. 水力机组测试技术[M]. 北京: 水利水电出版社, 1994.
- [18] Rotating electrical machines—Part 1: Rating and performance (IEC 60034-1, Ed. 11 (2004) MOD) [S]. Australian Standard, 1996.
- [19] 姚骏, 廖勇. 基于全模糊控制器的交流励磁发电机励磁控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(33): 36-41.
- [20] 姜胜, 陈启卷, 蔡维由. 水轮机调速器参数仿真寻优策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(3): 102-106.
- [21] ANSI/IEEE Std 120—1989 IEEE Master Test Guide for Electrical Measurements in Power Circuits [S]. 1993.
-
- 陈伟(1977—), 男, 通信作者, 工程师, 主要研究方向: 水火电建设和系统调试. E-mail: cwcw420@gmail.com

Dielectric Loss and Capacitance Measurement Test of Hydraulic Generator for Overseas Projects

CHEN Wei, WANG Zhihao, ZHOU Qingke, SUN Erwen, LI Xiping
(China Huadian Engineering (Group) Co. Ltd., Beijing 100035)

Abstract: In the measurement and maintenance of equipment with large capacitance, such as large steam turbine and hydraulic turbine driven generators, the capacity of measuring instruments is usually not big enough. So it is unable to fit the characteristics of overseas projects and meet the requirements of domestic and international standards. According to this problem, operation principles of the series resonant device and the dielectric loss tester are first analyzed. Then dielectric loss and capacitance measurement method is put forward based on the measurement characteristics of both combination of series resonance device and dielectric loss tester. Finally, this method is applied to the measurement test of Indonesia packaged deal project, and the testing results are analyzed in accordance with domestic and international standards. Experimental studies show that this method is accuracy and convenience, and the test results meet international standards and can be a reference for other overseas projects.

Key words: overseas project; hydraulic generator; series resonance; dielectric loss measurement; capacitance measurement