发电机定子绕组高压介质损耗及电容增量试验研究

杨世强，何信林，程 帅，雷 阳，刘 冲

（西安热工研究院有限公司，陕西 西安，710054）

摘要：高压介质损耗及电容增量试验可认为是一种间接的局部放电试验，用于发现定子绕组绝缘是否存在缺陷。尤其运行年久的机组应该进行绝缘老化鉴定试验，以便对定子绝缘状态作出正确的判断。针对某厂已运行22年机组进行定子绕组介质损耗及电容增量试验分析研究。采用串联谐振试验装置与精密介质损耗电桥配合测量发电机介质损耗和电容，对比分析试验数据，结果表明该发电机组整体绝缘状态正常，可继续投入运行。

关键词：介质损耗；电容增量；发电机定子绕组

Experimental study on high voltage dielectric loss and capacitance increment of generator stator winding

YANG Shiqiang, HE Xinlin, CHENG Shuai, LEI Yang, LIU Chong

(Xi'an Thermal Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: High voltage dielectric loss and capacitance increment test can be considered as an indirect partial discharge test, which can be used to find out whether there are defects in generator stator winding. Especially for the long-running units, insulation aging test should be carried out in order to make a correct judgment of the stator insulation state. The dielectric loss and capacitance increment of stator windings of a 22-year-old unit in a factory are analyzed and studied Dielectric loss and capacitance of generator are measured by using series resonance test device and precision dielectric loss bridge. By comparing and analyzing the test data, the results show that the overall insulation condition of the generator unit is normal and it can continue to operate.

Keywords: dielectric loss; capacitance increment; generator stator winding

0 引言

定子绕组是发电机的核心部件，定子绕组主绝缘状况直接影响着发电机的安全运行。发电机在运行时，定子绕组会受到电、热和机械振动等各种因素的联合作用。随着发电机运行时间的增加，定子绕组的主绝缘会逐渐老化。所以，发电机的使用寿命主要取决于定子绕组的绝缘老化情况。发电机运行时定子绕组中有大电流通过，并承受着较大的电压。大电流会

引起绕组发热，并在高电压的长期作用下，会对发电机定子绕组的绝缘性能造成一定局部破坏。介质损耗因数是反映绝缘品质的一项重要指标，如果发电机定子绕组绝缘性能降低，介质损耗因数将会明显增大[1]。

研究发现，当绝缘介质出现气隙放电、油浸渍物污染、受潮或劣化变质等缺陷时，流过绝缘介质的阻性电流分量会有所增加，介质损耗因数也会随之变大。阻性电流分量增加的明显特征是介损值会随着施加电压发生明显的变化，同时会降低绝缘介质起始放电电压，通常用tan δ和Δtan δ表征绝缘介质的平均老化水平。因此将发电机的介质损耗（以下简称介损）及电容增量作为绝缘老化鉴定的重要依据[2]。

当发现绝缘中存在气隙放电缺陷时，需要通过tan δ与外加电压的关系曲线进行判别[3]。

1 介质损耗测量原理

测量介质损耗因数tan δ是判断电气设备的绝缘状况一种十分有效的方法。它能有效反映出绝缘的缺陷，当绝缘有缺陷时，流过绝缘的电流中有功分量I_{rx}会增大，进而引起tan δ变大。原理接线如图1所示。

高压西林电桥由交流阻抗器、转换开关、检流计和高压标准电容器等组成。调节R_3、C_4使电桥平衡，此时a、b两点电压幅值相位完全相等，即R_3、C_4两端电压相等。

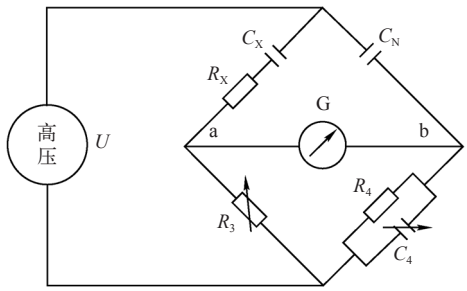

图1 高压西林电桥

Fig. 1 High voltage schering bridge

现场使用QS1电桥时，需要先将升压装置、标准电容器和电桥等进行连线，然后调节R_3和C_4，使检流计指示为零，这时电桥平衡。C_4值即为tan δ值，R_3值经过计算可得出被试品电容值。

电流比较仪电桥的工作原理是采用安匝平衡的原理[4]。平衡过程如图2所示。在铁心上分别绕制5组线圈。其中N_1～N_4组线圈匝数可调，N_3和N_4为平衡绕组，接入经过处理得到平衡电流I_3和I_4，N_i绕组为检零绕组，用于检测电桥的平衡状态。当电桥平衡时铁心内磁通为零，流过检流计中的电流I_i为零。电流互感器在电桥一次侧和二次侧之间建立电气隔离，电流电压转换器将输入电流按一定比例转换二次侧输入电压，转换比例由电阻R决定。电桥通过调节I_N与I_3所在绕组匝数N_2以及乘法器模块β值，同时检测检零绕组N_i回路的电流判定电桥是否平衡。当电桥平衡时，检零器绕组的电流为零，进而可计算出电容值与介质损耗因数。由于电流比较仪电桥操作烦琐，对试验人员要求较高，现场较少使用。

数字高压介损测试仪基本测量原理是基于传统西林电桥的原理基础上，测量系统通过标准侧R_4和被试侧R_3分别将流过标准电容器和被试品的电流信号进行高速同步采样，经模数（A－D）转换装置测量得到两组信号波形数据，再经计算处理中心分析系统，分别得出标准侧和被试侧正弦信号的幅值、相位关系，从而计算出被试品的电容量及介损值。原理接线如图3所示。

数字高压电桥的测量回路还是一个桥体。R_3、R_4两端的电压经过A－D采样送到计算机，进而求得试品介损和电容量。由于其测量操作简单，准确度高，目前试验单位上多采用数字高压电桥。

2 串联谐振加压装置

调频式串联谐振高压试验设备的工作原理接线如图4所示。交流380 V电源由变频器转换成频率、电压可调的电源，经励磁变压器送入由电抗器L和被试电缆C_X构成的高压串联谐振回路，分压器是纯电容式结构，用于测量试验电

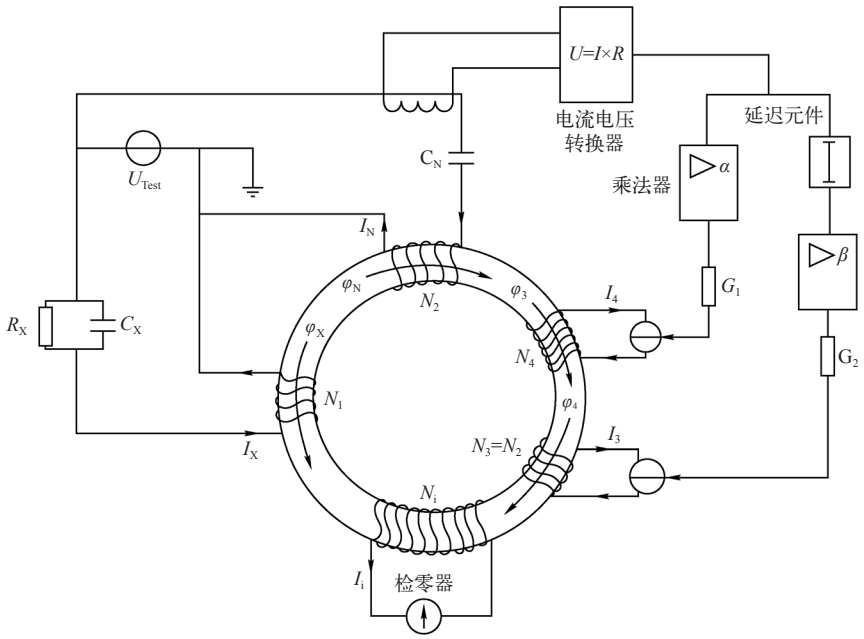

图2 数字高压介损

Fig. 3 Digital high voltage dielectric loss

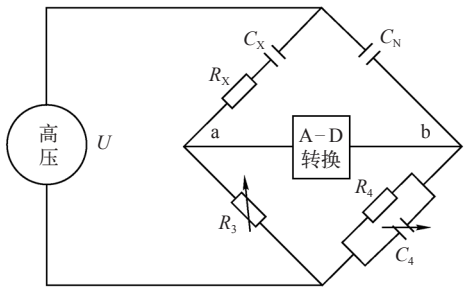

图3 电流比较仪电桥

Fig. 2 Current comparator bridge

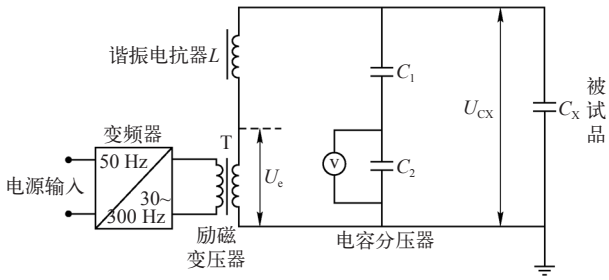

图4 串联谐振原理接线

Fig. 4 Series resonance principle wiring

压。变频器经励磁变压器T向主谐振电路送入一个较低的电压U_e，调节变频器的输出频率，当频率满足条件$f=1/(2\pi\sqrt{LC_X})$时，电路即达到谐振状态。此时有

$$U_{CX}=QU_e \tag{1}$$

式中，Q为品质因数，通常Q值在几十至上百之间；U_e为励磁电压。

在较小的励磁电压U_e下，使被试品C_X上产生几十倍于U_e的的电压U_{CX}。通过被试品的电流为

$$I=2\pi fC_XU_{CX} \tag{2}$$

本次试验对象是单相定子绕组对地电容为0.4 μF的全氢冷机组，加压时采用4节电抗器，两串两并进行加压，谐振频率调整为50 Hz。

3 定子绕组介损及电容测量

发电机定子绕组的介损测量试验要在绕组绝缘电阻测量合格后进行，主要用于检测发电机定子绕组主绝缘整体情况。介损及电容测量原理接线如图5所示。本次绕组介损测量选用的仪器是AI6000精密电桥介损测试仪，采用反接法，电流量程为0～7 A。采用外标准，标准电容为100 pF。试验电压为串联谐振装置输出电压，通过测量流经介损仪标准电容的电流与电流传感器的发电机绕组对地电容的电流，得到两电流夹角δ，从而计算出介损值。电抗器高压端与电容分压器高压端相连，并与标准电容器

高压端相连，串入电流传感器再与被试绕组相连。测量单相介损时，不接受测量的两相定子绕组应可靠接地。试验现场如图6所示。

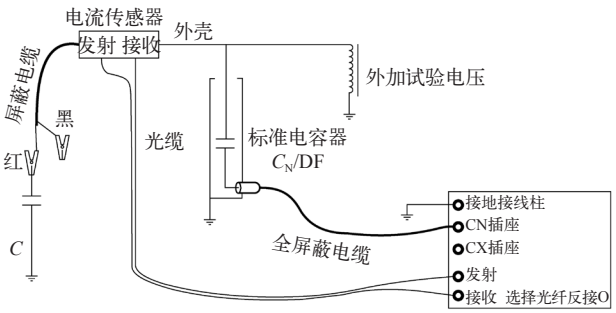

图5 介损及电容测量原理接线

Fig. 5 Principle wiring of dielectric loss and capacitance measurement

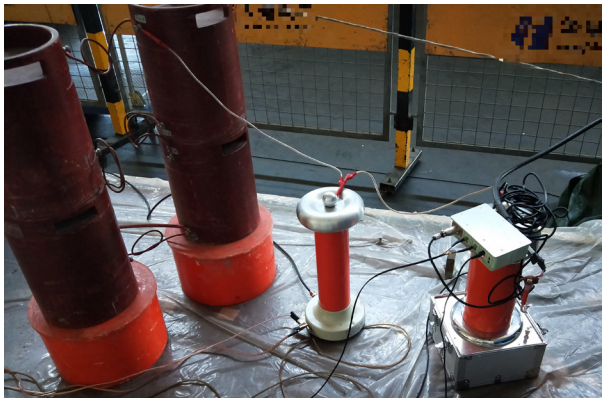

图6 试验现场

Fig. 6 Test site

本次试验数据如表1所示。根据DL/T 492—2009《发电机环氧云母定子绕组绝缘老化鉴定导则》[5]，发电机定子电压为10.5～24 kV等级的整相绕组试验数据是否合格的判别标准如表2所示。

当绝缘中出现气隙缺陷时，可通过tan $\delta=f(U)$关系曲线来发现。对于发电机线棒，如果绝缘老化，气隙较多，则tan $\delta=f(U)$)曲线将呈现明显的转折。从tan δ的陡度可反映出老化的程度。本次试验数据曲线如图7所示。可见三相介损相差很小，且波形平缓。

4 结束语

数据表明定子绕组的介损和电容值随试验电压的升高而平稳增大，这是因为电容量C与介电常数ε成正比，随着试验电压的升高，绝缘材料的性能会部分减弱，使得介电常数ε增大，故电容量也会随之增大。发电机定子三相绕组

表1 发电机介损及电容

Tab. 1 Dielectric loss and capacitance of generator

A相				
电压/kV	tan δ(%)	Δtan δ(%)	C/nF	ΔC(%)
4	0.808		361.9	
8	0.988		362.7	
12	1.338	1.099	365.2	1.96
16	1.630		367.0	
20	1.907		369.0	
B相				
电压/kV	tan δ(%)	Δtan δ(%)	C/nF	ΔC(%)
4	0.763		359.3	
8	0.986		360.2	
12	1.329	1.099	362.8	2.09
16	1.621		364.7	
20	1.913		366.8	
C相				
电压/kV	tan δ(%)	Δtan δ(%)	C/nF	ΔC(%)
4	0.823		360.3	
8	1.027		361.1	
12	1.359	1.082	363.6	1.97
16	1.634		365.4	
20	1.905		367.4	

表2 发电机介损及电容判别标准

Tab. 2 Criteria for discrimination of dielectric loss and capacitance of generators

项目	Δtan δ(%)	tan δ(%)	ΔC(%)
限值	4	6	8
所测数值小于限值为合格			

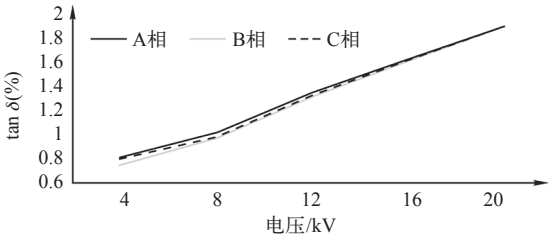

图7 tan δ与外加电压的关系

Fig. 7 The relationship between tan δ and applied voltage

在相同电压下测得的定子绕组介损值基本相同。介损最大值为1.913，介损增加率最大值为1.150，电容增加率最大为2.09，远小于规程要求值。表明该发电机组整机绝缘状况较好。

试验数据反映了该台发电机绝缘整体的性能情况，随着发电机运行若干年，定子绕组的介损值还将增大。可通过比较介损值的增大量来判断发电机定子绕组的绝缘性能老化情况，估算发电机的使用寿命。当运行若干年后，若测得该台发电机定子绕组介损值增大明显，则需增加相关检测，如直流泄漏试验、端部动态特性、交流耐压试验及发电机局部放电等试验进行综合判断。所以，发电机定子绕组介损的测试是发电机绝缘状态检测的重要手段之一，也是发电机安全运行的重要指标之一。

目前国内较多机组在出厂或者交接时未做介损及其电容增量试验，建议电厂业主可在大修期间有机会安排此试验，留下初始数据，以便在后期进行绝缘老化鉴定时进行趋势参考分析。

参考文献

[1] 李建明．高压电气设备试验方法[M]．北京：中国电力出版社，2001．

[2] 赵扬帆．介质损耗因数试验中正接线和反接线的比较分析[J]．山东工业技术，2018(7)：169-187．

[3] 方城君．1 100 MW发电机定子绕组介质损耗的测定研究[J]．上海大中型电机，2012(4)：41-43．

[4] 程龙．电流比较仪式电桥自动代码技术[D]．上海：上海交通大学，2015．

[5] DL/T 492—2009 发电机环氧云母定子绕组绝缘老化鉴定导则[S]．北京：中国电力出版社，2009．

作者简介

杨世强

杨世强，男，硕士研究生，工程师，主要从事高压电气设备特殊性试验研究工作。

(收稿日期：2019－07－23)EA