

# 基于 ELCID 的发电机定子铁芯损耗试验

解 兵

(江苏省电力试验研究院有限公司,江苏 南京 211103)

**摘 要:**铁芯是发电机的重要组成部分,其片间绝缘故障将影响发电机的安全运行,并可能造成严重的设备损伤,铁芯试验能较快地发现铁芯的故障点,避免故障扩大。文中介绍了 ELCID(Electro-magnetic Core Imperfection Detector)铁芯试验的原理、方法,并通过实例详细介绍了 ELCID 在大型发电机铁芯试验中的试验情况及相关注意事项。结果表明,ELCID 铁芯试验能够有效地对发电机铁芯状况作出判断。

**关键词:**发电机;铁芯;ELCID 铁芯试验

**中图分类号:**TM 835

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2010)05-0033-04

铁芯是发电机的重要组成部分,由相互绝缘的硅钢片叠压而成。发电机运行时,主磁通随着转子旋转,这种交变磁场在铁芯中产生磁滞损耗和涡流损耗,使铁芯温度升高。如果铁芯的片间绝缘损坏,就会造成铁芯故障部位局部过热,使得片间绝缘的进一步损坏,如此恶性循环导致故障范围的进一步扩大。因此,在发电机交接试验、局部或全部更换定子绕组前后以及在发现定子铁芯有损伤等缺陷时,必须对定子进行铁芯损耗试验,发现并处理铁芯缺陷部位,避免故障扩大化<sup>[1]</sup>。

随着发电机容量越来越大,发电机铁损试验所需的励磁电源也越来越大,而且励磁电缆的要求也越来越高,使得传统的铁芯损耗试验变得更加困难和难以实现。20世纪70年代末,英国中央发电局研发了一种新的发电机定子铁芯故障测试技术,即 ELCID 铁芯试验,通过这些年来研究,ELCID 铁芯试验已经在试验中不断地完善<sup>[2]</sup>。目前,ELCID 试验在发达国家一些大的电力生产和制造行业已得到较为广泛的应用;我国的发电机生产厂家及部分电力试验单位也开始利用 ELCID 设备开展发电机铁芯检测工作,并取得了一些成绩<sup>[3,4]</sup>。

## 1 ELCID 铁芯试验原理

ELCID 使用常规的方法在发电机铁芯中产生磁通,为了使铁芯中的磁通尽量均匀,要求励磁线圈从铁芯中心沿轴向布置产生励磁。ELCID 的探头采用 Chattock 电位计,Chattock 电位计的工作原理如图 1 所示。

根据全电流定律,磁场强度  $H$  沿任一闭合回路的线积分,等于这个闭合回路所包围的电流。即:

$$\oint H dl = \sum I \quad (1)$$

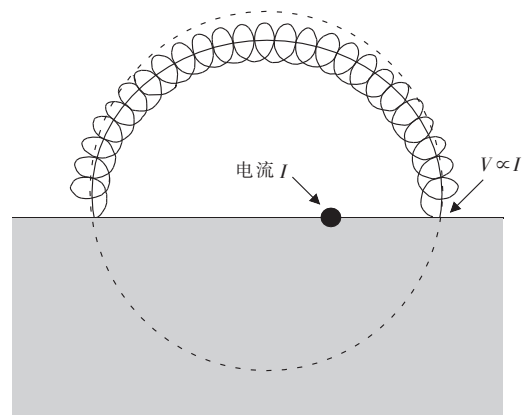


图 1 Chattock 电位计工作原理

闭合回路由铁芯和空气 2 部分组成,则:

$$\oint H dl = \int H_{\text{air}} dl + \int H_{\text{Fe}} dl = \sum I \quad (2)$$

由于铁芯的相对磁导率是空气的几千倍,式(2)可写为:

$$\int H_{\text{air}} dl \approx \sum I \quad (3)$$

用 Chattock 电位计探测铁芯故障时,可测量出电位计测量端之间的感应电势,感应电势和电流的关系:

$$U = \mu_0 \omega n A I = k \sum I \quad (4)$$

式(4)中: $\mu_0$ 为空气中磁导率; $\omega$ 为电流的角频率; $n$ 为电位计单位长度上的绕组匝数; $A$ 为电位计绕组的横截面积; $k$ 为电位计参数相关的系数。

由于式(4)中的 $\mu_0$ 为常数, $n, A, \omega$ 是与电位计有关的常数, $k$ 只与电位计参数有关,因此 Chattock 电位计的感应电压只与电流的大小成正比。当铁芯片间绝缘损伤后,交变的磁通就会感应出故障电流,如图 2 所示。

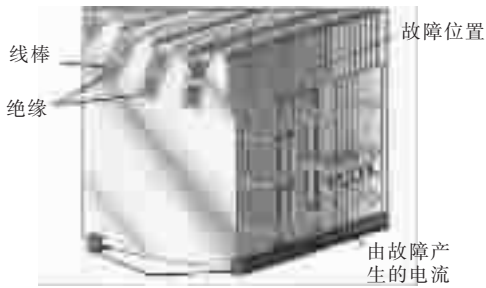
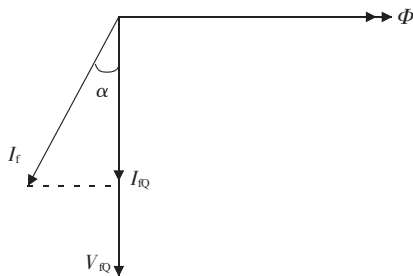


图2 故障电流产生原理

由于铁芯片间短路产生的故障电流要远小于产生磁通的励磁电流,因此,ELCID 测试仪将 Chattock 电位计的感应电势中励磁电流产生的分量作为主要分量,称为直轴量。故障电流、励磁电流产生的磁通以及故障电流产生的感应电势交轴量的相位关系如图 3 所示。故障电流与直轴量之间有一定角度,将故障电流产生的感应电势分成交轴量和直轴量 2 个部分,通过比较分析感应电势的交轴分量的大小,可以确定是否存在片间短路。



$\Phi$  为励磁电流产生的磁通;  $V_Q$  为故障电流感应电势交轴分量;  $I_f$  为感应的故障电流;  $I_Q$  为故障电流交轴分量

图3 故障电流与主磁通的向量关系

ELCID 测试仪中 Chattock 电位计测试的感应电势以电流的形式表示,并且规定,当施加 4% 额定磁通时,如果感应电势的交轴分量的绝对值超过 100 mA,则可能存在片间绝缘故障。

## 2 ELCID 铁芯试验方法

### 2.1 ELCID 铁芯测试系统励磁电源的确定

根据 ELCID 测试仪的要求<sup>[5]</sup>,试验时,需要给铁芯施加的励磁磁通为其额定磁通的 4%,所以 ELCID 铁芯试验所需的励磁电压、励磁电流要比常规的铁损试验小得多。发电机铁芯的额定励磁每圈所需的励磁电压计算公式为:

$$U_r = \frac{U_i}{2\sqrt{3} K t_p} \quad (5)$$

式(5)中:  $U_i$  为发电机额定线电压;  $t_p$  为每相串联匝数,  $2t_p$  则为每相导体根数;  $K$  为绕组系数,通常取  $K=0.92$ 。

励磁电流是由定子铁芯磁导率决定的。经验显

示,铁芯周长上每米需要 3~10 A 的励磁电流,就能获得 4% 的额定励磁电压,极端情况需要 2~15 A。因此,ELCID 铁芯试验系统所需要的励磁电源容量应为:

$$S = 0.04 U_r I \quad (6)$$

式(6)中:  $I$  为试验时通过铁芯的总安匝数。

### 2.2 ELCID 铁芯试验接线

ELCID 铁芯试验接线如图 4 所示。

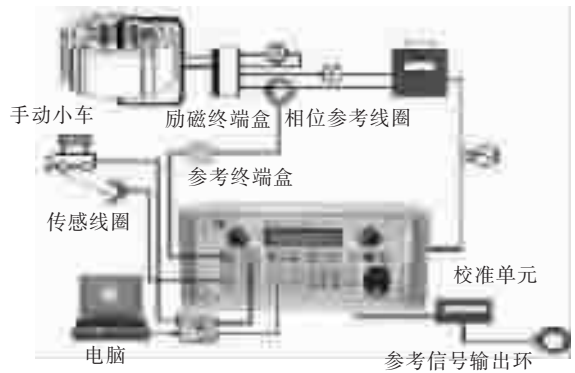


图4 ELCID 铁芯试验接线

### 2.3 试验步骤

首先根据图 4 连接设备,试验前利用校准单元进行 Y 轴校准,即利用校准单元的标准铁芯,使得测量的直轴量跟实际直轴量相位一致。由于标准铁芯是绝缘良好的,此时显示测量的交轴量为 0 mA;接着在铁芯内部用卷尺测量一段距离,将小车通过此长度来进行 X 轴校准(距离校准),使得仪器测量的距离跟实际距离一致。施加较小的励磁电压,调节小车两臂宽度及曲度,使之能很好放置于槽两侧的铁芯,并与之充分接触,同时观察检测的直轴量,若直轴量与预算值(总安匝数除以槽数)偏差较大,则继续施加励磁电压,直至 4% 的电压;在定子铁芯内标好槽号,根据槽号逐槽进行测试,当探测小车沿定子铁芯齿部探测时,通过笔记本电脑同时记录电流的交轴分量、直轴分量和距离信号,以便出现故障时进一步判断故障的大概位置。

## 3 实例分析

国电泰州发电有限公司 2 号发电机是哈尔滨汽轮机有限公司引用日本东芝技术生产的 TAKS 型 1 000 MW 发电机,大修期间对其铁芯进行 ELCID 试验。

### 3.1 试验前准备

试验前,首先确定所需的励磁电源。该型号发电机的铁芯为 42 槽,共三相,接线方式为 Y-Y,  $t_p = 7$ ,则额定励磁下需要励磁电压  $U_r = 1 210$  V。ELCID 铁芯试验实际每圈导线需加的励磁为 0.04 倍额定

励磁,则  $U_r' = 48.4 \text{ V}$ 。

该型号发电机,外径为 2.95 m,内径为 1.48 m,齿高为 0.194 m,则铁芯平均直径为 2.409 m,周长约为 7.6 m,最后所需的励磁电流为 23~76 A,极限情况为 15.2~114 A。在试验中,使用 ELCID 专用励磁电缆,匝数可以选择 1~6 匝,一般选择 6 匝,则所需每匝励磁电流  $I_N = I/N \leq 19 \text{ A}$ ,实际所加励磁电压  $U_N = N \times U_r' = 290.4 \text{ V}$ ,所以,试验前要选择一台额定电压大于 290 V,额定电流为 19 A 的调压器。实际试验时一般选择 380 V 的调压器,电流值为 19 A,则实际需要的调压器容量为 7.22 kV·A。本次试验选择的是 380 V 的 15 kV·A 的调压器,满足试验要求。

### 3.2 试验结果及分析

图 5 为被测发电机定子槽号分布图。根据图 5 的槽编号逐项进行铁芯检测,每一槽铁芯测量后数据均保存为一个波形。第 4 槽和第 42 槽的测试波形如图 6 所示。

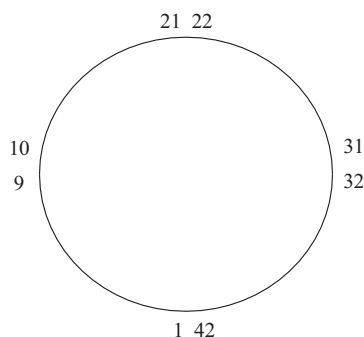


图 5 发电机定子槽号分布图(从励侧看)

图 6 中,纵坐标为测量的交轴分量,横坐标为距离轴,本次试验中“0”代表汽测处铁芯,“7”代表励侧处铁芯。试验波形中,其交轴分量的绝对值如果超过 100 mA,则表示该部分铁芯存在片间绝缘故障。试验后各槽试验波形中交轴量绝对值最大值数据如表 1 所示。

从表 1 可知,本次试验中所有槽的交轴量最大绝对值均小于 100 mA,其中最大的交轴量绝对值出现在第 42 槽,为 60 mA;其次为第 4 槽,交轴量最大

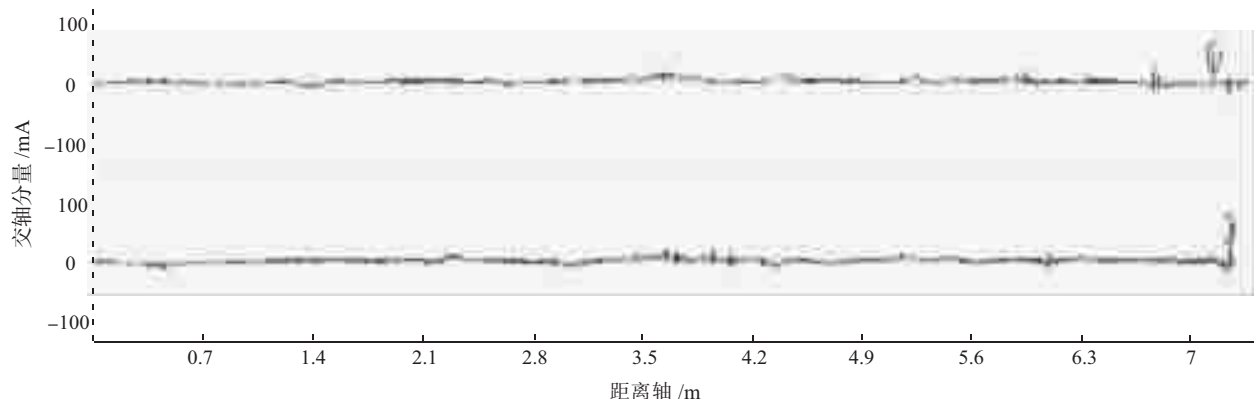


图 6 第 4 槽和第 42 槽的交轴分量波形

表 1 各槽铁芯交轴量绝对值最大值 mA

槽编号	交轴量绝对值最大值	槽编号	交轴量绝对值最大值	槽编号	交轴量绝对值最大值
1	27	15	22	29	16
2	32	16	15	30	18
3	28	17	13	31	16
4	48	18	13	32	14
5	13	19	13	33	21
6	41	20	16	34	20
7	17	21	17	35	15
8	13	22	38	36	17
9	16	23	20	37	16
10	23	24	18	38	19
11	23	25	18	39	23
12	18	26	35	40	16
13	20	27	18	41	17
14	20	28	26	42	60

为 48 mA。

从图 6 中可以看出,交轴分量绝对值最大值出现在波形末端画黑圈的部分,为 2 个毛刺,位于铁芯励端端部阶梯状部位。出现毛刺的主要原因是当 Chattock 电位计在阶梯状铁芯测试时由一个台阶滑动到下一个台阶时引起的数据突变,而且经现场多次测量后发现,此现象不具有重复性。因此,排除这 2 个毛刺后,所测试铁芯所有交轴分量绝对值均小于 45 mA,远低于 100 mA 的标准。由此可见,本次试验的铁芯片间绝缘状态良好,可以投入运行。目前该发电机已检修完毕并投入运行,运行中各铁芯温度测点的温度均正常。

### 3.3 铁芯试验的条件及注意事项

(1)发电机转子需抽出膛外,定子绕组出线与外部连接母线以及其他设备断开,且相互隔离,中性点三相短路接地,试验时不得安排其他接触到发电机铁芯和绕组的试验;

(2)汽、励两侧搭建脚手架,脚手架高度略高于铁芯中心位置,以便将励磁电缆绑扎、固定在铁芯

中心部位;

(3)试验过程时需穿连体服、布鞋,使用橡胶手电筒,铁芯内使用螺丝刀要登记,避免将金属物件遗留在发电机膛内;

(4)试验过程中 Chattock 电位计移动速度符合 ELCID 操作要求,且 Chattock 电位计尽量避免离开铁芯。

#### 4 结束语

(1)ELCID 铁芯试验只需提供 4%的额定磁通量即可完成对故障铁芯的诊断,所需的励磁电源容量较小,容易配备和携带;

(2)励磁绕组使用的是 ELCID 专用励磁电缆,电缆本身已将 6 匝绕组集合在一起,接线时实际只需要绕一圈,接线简单;

(3)由于施加的电压较低,铁芯磁密较低,试验

操作安全方便,且不会使得故障点扩大;

(4)ELCID 铁芯试验灵敏度较高,且能够参考 ELCID 典型故障波形对铁芯深处故障点判断分析。

参考文献:

- [1] GB 50150—2006,电气装置安装工程电气设备交接试验标准[S].
- [2]NAMARA B M, ENG P. A Collection of Case Studies of ELCID Test [C]. Presented at Latin America Power 2000, 2000.
- [3]关建军,于庆斌,钟浩文.发电机定子铁芯 ELCID 试验分析与探讨[J].大电机技术,2005(5):13-17.
- [4]王劲松,吴宇辉.发电机定子铁芯片间短路故障诊断系统[J].华北电力技术,2004(2):34-37.

作者简介:

解兵(1979-),男,江苏张家港人,工程师,从事发电机、高压等试验研究方面的工作。

## Generator Stator Iron-loss Tests Based on ELCID

XIE Bing

( Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China )

**Abstract:**The insulation fault occurred between different slices of the iron cores will seriously affect the operation of the generators since the iron core is one of the most important components. With the experiments carried out on the iron cores, the faults can be detected more early to avoid the deterioration of the issues. The fundamental and specific operation methods of ELCID (Electro-magnetic Core Imperfection Detector) are introduced in the paper, and the detailed precautions analyzed with several examples are also proposed. The iron-loss tests are proved to be feasible for the judgment of the condition of the iron cores.

**Key words:**generator; iron core; ELCID iron-loss tests

(上接第 32 页)

南京:河海大学硕士学位论文,2009.

- [11] LUIS F O,ANOTONIO P F,GARETH P H. Evaluating Distributed Generation Impacts with a Multiobjective Index [J]. IEEE Transaction on Power Delivery,2006,21 (3):1452-1458.
- [12] 高军彦.含分布式发电的配电网规划研究[D].北京:华北电力大学硕士学位论文,2009.

作者简介:

李伟伦(1977-),男,江苏南通人,工程师,研究方向为电网规划;桂淑华(1987-),女,江西南昌人,硕士研究生,研究方向为电网规划;孙志刚(1977-),男,江苏南通人,工程师,研究方向为电网规划;卫志农(1962-),男,江苏江阴人,博士生导师,研究方向为电力系统运行、分析与控制和输配电自动化等。

## Itribution Network Optimal Planning Considering Distributed Generators

LI Wei-lun<sup>1</sup>, GUI Shu-hua<sup>2</sup>, SUN Zhi-gang<sup>1</sup>,WEI Zhi-nong<sup>2</sup>

(1.Nantong Power Supply company, Nantong 226006, China; 2.Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:**With the development of distributed generation (DG), planning of electric distribution system are confronted with new challenges. Considering of the increase of loads, an optimal planning model of distribution network is proposed to achieve multi-objectives which are consisted of minimum investment of DGs and transmission lines, and the minimum power loss of distribution network. Heuristic method is adapted to solve the problem by taking full advantage of distribution network's radial characteristics. And the impact on power system of DG is analyzed by the fuzzy evaluation algorithm. The objective function is optimized by introducing coordination coefficient. The results of test example prove the validity of the proposed model and algorithm.

**Key words:**distributed generation; distribution network planning; heuristic method; coordination coefficient