



中华人民共和国国家标准

GB/T 25092—2010

高压直流输电用干式空心平波电抗器

Dry-type air-core smoothing reactors for HVDC applications

2010-09-02 发布

2011-02-01 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言 I

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号及名称 3

5 使用条件 3

6 有关设计、试验、偏差和应用的一般要求 4

7 额定值 4

8 允许偏差 5

9 绝缘水平 5

10 电晕电压与无线电干扰电压..... 6

11 温升..... 6

12 声级..... 7

13 试验..... 7

14 铭牌 14

15 起吊、标志、包装、运输和储存..... 14

附录 A（资料性附录） 平波电抗器的有关性能参数实例 16

附录 B（资料性附录） 声级测定的试验原理和方法 17

B.1 等效试验电流的计算原理 17

B.2 试验电流的确定 18

B.3 试验条件 18

B.4 线圈本体声级测定方法 19

B.5 声罩衰减特性测量 21

B.6 电流折算与声罩衰减效果的处理 21

B.7 声功率级的计算 21

B.8 总声功率级和总声压级的计算 21

前 言

本标准的附录 A 和附录 B 为资料性附录。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国变压器标准化技术委员会(SAC/TC 44)归口。

本标准起草单位：南方电网技术研究中心、沈阳变压器研究院、北京电力设备总厂、机械工业北京电工技术经济研究所、特变电工沈阳变压器集团有限公司、北京网联直流工程技术有限公司、西安西电变压器有限责任公司、国网电力科学研究院、中国电力科学研究院、保定天威保变电气股份有限公司、西安中扬电气股份有限公司、上海 MWB 互感器有限公司。

本标准主要起草人：郭香福、郭振岩、饶宏、章忠国、郭丽平、王健、马为民、宓传龙、吕金壮、伍志荣、李光范、汪德华、黄莹、李大芬、李文平、唐春晖。

高压直流输电用干式空心平波电抗器

1 范围

本标准规定了±800 kV 及以下直流输电系统用干式空心平波电抗器的术语和定义、符号及名称、使用条件、有关设计、试验、偏差和应用的一般要求、额定值、允许偏差、绝缘水平、电晕电压与无线电干扰电压、温升、声级、试验、铭牌、起吊、标志、包装、运输和储存等，并在附录 A 中给出了一些具体产品的相关性能参数实例。

本标准适用于±800 kV 及以下直流输电系统用干式空心平波电抗器(以下简称平波电抗器)。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 775.2 绝缘子试验方法 第2部分：电气试验方法

GB 1094.1 电力变压器 第1部分：总则(GB 1094.1—1996,eqv IEC 60076-1:1993)

GB 1094.2 电力变压器 第2部分：温升(GB 1094.2—1996,eqv IEC 60076-2:1993)

GB/T 1094.4 电力变压器 第4部分：电力变压器和电抗器雷电冲击和操作冲击试验导则(GB/T 1094.4—2005,IEC 60076-4:2002,MOD)

GB/T 1094.10 电力变压器 第10部分：声级测定(GB/T 1094.10—2003,IEC 60076-10:2001,MOD)

GB 1094.11 电力变压器 第11部分：干式变压器(GB 1094.11—2007,IEC 60076-11:2004,MOD)

GB/T 11604 高压电器设备无线电干扰测量方法(eqv CISPR 18-1:1982,CISPR-2:1986)

GB 50260 电力设施抗震设计规范

JB/T 5895 污秽地区绝缘子 使用导则(JB/T 5895—1991,neq IEC 60815:1986)

IEC 60076-6:2007 电力变压器 第6部分：电抗器

3 术语和定义

除下列术语和定义外，GB 1094.1 和 IEC 60076-6:2007 中的术语和定义亦适用于本标准。

3.1

额定电感 rated inductance

电感的规定值。

注：因受各种条件限制而将系统所需要的大容量平波电抗器设计成多台串联或并联运行时，额定电感是指单台平波电抗器的电感规定值。

3.2

额定直流电压 rated d. c. voltage

U_d

施加于平波电抗器线路侧端子与地之间的直流电压规定值。

3.3

最大工作电压 maximum operating voltage

U_{dm}

平波电抗器线路侧端子与地之间的最高连续直流电压规定值。

3.4

额定直流电流 rated d. c. current

I_{dr}

直流系统在额定直流电压下输送额定功率时,通过平波电抗器的直流电流。

注:额定直流电流不计入任何交流电流分量。

3.5

最大连续直流电流 maximum continuous d. c. current

I_{dm}

平波电抗器使用寿命和温升限值所允许的长时间直流工作电流,是指直流系统经常性出现或连续多日出现的过载电流。

3.6

暂态故障电流 transient fault current

规定的系统故障电流峰值和波形。

3.7

短时过载直流电流 short-time overload d. c. current

在短时过载电流持续时间或负载周期内平波电抗器所承受的短时直流电流规定值。

3.8

短时过载电流持续时间或负载周期 short-time overload current duration or duty-cycle

短时过载电流持续时间规定值。负载周期指短时过载电流每次的持续时间、两次之间的时间间隔和发生次数等规定值。

3.9

额定谐波电流频谱 rated harmonic current spectrum

用于确定谐波损耗的直流电流以外各频率电流方均根值的规定值。

3.10

最大谐波电流频谱 maximum harmonic current spectrum

用于确定温升的直流电流以外各频率电流方均根值的规定值。

3.11

直流损耗 d. c. power loss

P_{dc}

额定直流电流通过平波电抗器时产生的功率损耗。

3.12

谐波损耗 harmonic power loss

P_h

额定谐波电流通过平波电抗器时产生的功率损耗的总合,在直流电流以外对平波电抗器的温升产生附加影响。

3.13

交流等效电阻 a. c. equivalent resistance

R_h

平波电抗器在指定的频率下产生交流功率损耗的电阻。

3.14

并联避雷器 shunt surge arrestor

连接在平波电抗器两个端子之间,与平波电抗器线圈并联,用以限制平波电抗器线圈两端子之间冲击过电压的避雷器。

4 符号及名称

本标准中各种变量的符号及名称如下:

I_{dr} —额定直流电流;

I_{dm} —最大连续直流电流;

I_{2h} —持续时间为 2 h 的短时过载直流电流;

I_1 —与平波电抗器最大连续直流电流对应的等效直流试验电流;

I_{α} —与平波电抗器短时过载电流对应的等效直流试验电流;

I_h —第 h 次谐波的电流(方均根值);

h —谐波次数;

P_{dc} —直流损耗;

P_h —谐波损耗;

R_{dc} —绕组直流电阻;

R_h — h 次谐波频率下的交流等效电阻;

U_{dc} —外施直流试验电压;

U_{dm} —最大工作电压;

U_{dr} —额定直流电压。

注:其他变量的符号及名称见本标准的各相应条款。

5 使用条件

5.1 概述

平波电抗器的正常使用条件和特殊使用条件按 GB 1094.11 的规定。

用户应在询价或订货时列出未被 GB 1094.11 规定的正常使用条件包括在内的任何使用条件。

注:例如下述这些条件:

- 最高或最低环境温度超过 GB 1094.11 规定的限值;
- 海拔超过 1 000 m;
- 最大覆冰厚度;
- 最大风速;
- 最大日照强度;
- 需要对平波电抗器外绝缘或平波电抗器自身的污秽等级(见 JB/T 5895)特别考虑的环境因素,例如:
 - 有害的烟雾和蒸气;
 - 过量的或有腐蚀性的灰尘;
 - 工业污染;
 - 盐雾;
 - 湿热性气候。

这些因素与平波电抗器的设计和运行特别有关系。制造方应阐述其满足这些污染要求所采取的措施(特殊的涂层、棚罩等)以及对这些措施的维护要求等。

5.2 地震条件

在地震条件下运行的平波电抗器,经供需双方协商,应按 GB 50260 的规定,用计算的方法验证其抗震能力。

6 有关设计、试验、偏差和应用的一般要求

平波电抗器通常设计为自然空气冷却,无磁屏蔽,无金属外壳,具有理想的线性特征,电感量与电流的大小无关。平波电抗器主要由电抗线圈本体与由绝缘子构成的绝缘支架组成,可用于户内或户外安装方式。某些平波电抗器设计带有气候防护罩,防止极端气象条件如雨水、雪、冰雹等对平波电抗器性能的影响。对于谐波电流比较大的平波电抗器,一般配有具有气候防护和消声降噪功能的声罩。

平波电抗器试验的实施,一般遵从 GB 1094 对变压器及 GB 775.2 对绝缘子所作出的相应规则,但还有些特殊因素需要在本标准中列出,它们可能会使试验水平受到限制。任何对试验水平的限制应该由制造方向用户说明。

只要类似产品已进行了型式试验或特殊试验,用户可以要求用计算和(或)用与额定值相类似产品对比的方法来代替平波电抗器的这些试验。

平波电抗器通常不是置于封闭的钢箱或钢外壳内,故平波电抗器总装配体各个部件均应看成是带电体。因此,当平波电抗器在运行时应考虑如何避免人身与平波电抗器发生偶然的接触。像设置栅栏等一类的安全防护装置是十分必要的,且应看成是变电站设计的一部分。当用户规定了磁场强度的限值时,制造方应提供一张平波电抗器周围区域的磁场强度分布图。空心平波电抗器附近的磁场强度,可能达到很高的数值,以至于使位于该处的金属体明显发热或者受到一定的磁场作用力。制造方应提出一个关于离开平波电抗器的合适的磁空间距离的指导原则。

各额定值和保证值的偏差,见第 7 章和第 8 章的规定。

注:其他偏差,可在询价或订货时规定。

7 额定值

7.1 概述

平波电抗器的额定直流电流、最大工作电压、额定谐波电流频谱、最大谐波电流频谱和额定电感均应由用户规定。

7.2 额定直流电压

额定直流电压值由用户予以规定。

7.3 最大工作电压

最大工作电压值由用户予以规定,它不应低于运行中施加在平波电抗器绕组与地之间的最大直流电压。

7.4 额定直流电流

额定直流电流值由用户予以规定。

7.5 最大连续直流电流

最大连续直流电流值由用户予以规定。

7.6 暂态故障电流

暂态故障电流由用户予以规定。除峰值外,用户还应当准确说明对平波电抗器温升有影响的暂态故障电流波形。

7.7 额定谐波电流频谱

各交流电流频率值及相应频率下的额定谐波电流应由用户予以规定。确定此电流频谱的系统条件和工况应当与确定直流损耗的额定直流电流一致。

7.8 最大谐波电流频谱

各交流电流频率值及相应频率下的最大谐波电流应由用户予以规定。确定此电流频谱的系统条件和工况应当与确定温升的最大连续直流电流一致。

7.9 额定电感

额定电感的具体值由用户规定。

7.10 并联避雷器的额定电压

并联避雷器的额定电压和最大工作电压应由用户规定。该避雷器的额定电压应保证短时电流通过平波电抗器时所产生的电阻性压降以及电流变化所产生的感应电动势不会引起避雷器放电。

8 允许偏差

8.1 电感值允许偏差

如无其他特殊要求,平波电抗器在任何频率下的电感对额定值的偏差应不超出 $\pm 5\%$ 的范围。

8.2 损耗允许偏差

直流损耗的偏差不应超过其规定值的 $+2.5\%$,谐波损耗的偏差不应超过其规定值的 $+15\%$ 。

9 绝缘水平

9.1 雷电冲击耐受电压

平波电抗器绕组端子对地的雷电冲击耐受电压由用户规定。

平波电抗器绕组两个端子之间的雷电冲击耐受电压应根据并联避雷器冲击保护水平来确定。如果没有其他特殊要求,两个端子之间的雷电全波冲击耐受电压应不小于并联避雷器雷电冲击保护水平的1.2倍,雷电截波冲击耐受电压应不小于雷电全波冲击耐受电压的1.1倍。

注:当单台平波电抗器由两节或多节线圈叠装组成时,两节或多节线圈应视为一个整台平波电抗器,可只规定叠装后整台平波电抗器的雷电冲击耐受电压。

当平波电抗器拆分成两台或多台串联,相互串联的各台平波电抗器分别配备并联避雷器时,单台平波电抗器绕组端子之间的雷电冲击耐受电压可按串联的台数分配总体的雷电冲击耐受电压值,并在此基础上适当考虑并联避雷器冲击保护水平的制造偏差而稍微提高一个不均匀系数,如1.1倍。

当平波电抗器拆分成独立安装的两台或多台但并不分别配备并联避雷器时,单台平波电抗器绕组首末端之间的冲击耐受电压应当由用户与制造方研究确定。

9.2 操作冲击耐受电压

平波电抗器绕组端子对地的操作冲击耐受电压由用户规定。对于户外用平波电抗器,绕组端子对地的操作冲击耐受电压是指绝缘支架的湿耐受电压。

平波电抗器绕组端子之间的操作冲击耐受电压应当根据并联避雷器操作冲击保护水平来确定。如果没有其他特殊要求,两个端子之间的操作冲击耐受电压应不小于并联避雷器操作冲击保护水平的1.15倍。

注:当单台平波电抗器由两节或多节线圈叠装组成时,两节或多节线圈应视为一个整台平波电抗器,可只规定叠装后整台平波电抗器的操作冲击耐受电压。

当平波电抗器拆分成两台或多台串联,相互串联的各台平波电抗器分别配备并联避雷器时,单台平波电抗器绕组端子之间的操作冲击耐受电压可按串联的台数分配总体的操作冲击耐受电压值,并在此基础上适当考虑并联避雷器冲击保护水平的制造偏差而稍微提高一个不均匀系数,如1.1倍。

当平波电抗器拆分成独立安装的两台或多台但并不分别配备并联避雷器时,单台平波电抗器绕组首末端之间的冲击耐受电压应当由用户与制造方研究确定。

平波电抗器阻抗往往较小,冲击电压发生器往往不能在两个端子之间对绕组纵绝缘施加标准波形的操作冲击电压。端子之间的操作冲击耐受电压可以理解为设计保证值。

9.3 外施直流耐受电压

如无其他规定,外施直流耐受电压(U_{dc})应为 $1.5U_{dc}$ 。对于户外用平波电抗器,外施直流耐受电压是指绝缘支架的湿耐受电压。

10 电晕电压与无线电干扰电压

平波电抗器在 $1.3U_{dr}$ 下应无可见电晕,在该电压下无线电干扰电压应不超过 $2\,500\,\mu\text{V}$ 。

11 温升

11.1 正常温升限值

下列温升限值只适合于标准环境条件。

在最大连续直流电流与最大谐波电流共同作用下,绕组热点温升与绕组平均温升均应不超过表 1 规定的限值,端子温升应不超过表 2 规定的限值。

在短时过载电流作用下,绕组热点温升不宜超过表 3 所规定的限值。

表 1 绕组温升限值

| 绝缘系统温度及耐热等级代表字母 ℃ | 热点温升限值 K | 平均温升限值 K |
|----------------------|-------------|-------------|
| 130(B) | 80 | 60 |
| 155(F) | 105 | 80 |

表 2 端子温升限值

| 端子板材质种类 | 温升限值 K |
|----------|-----------|
| 裸铜或裸铝 | 50 |
| 接触面镀锡 | 65 |
| 接触面镀银或镀镍 | 75 |

表 3 短时过载电流下的绕组热点温升限值

| 绝缘系统温度及耐热等级代表字母 ℃ | 热点温升限值 K |
|----------------------|-------------|
| 130(B) | 90 |
| 155(F) | 115 |

11.2 较高环境温度条件下的温升降低

当平波电抗器运行地点的空气温度超过 GB 1094.11 所规定的各最大值中的某一个时,表 1、表 2 和表 3 中所列的平波电抗器温升限值均应按超过部分的数值降低,并应修约到最接近的整数(单位为 K)。

11.3 高海拔条件下的温升修正

当平波电抗器试验场所海拔低于 $1\,000\,\text{m}$ 而运行地点海拔高于 $1\,000\,\text{m}$ 时,按海拔超过 $1\,000\,\text{m}$ 的部分,以 $500\,\text{m}$ 为一级,每增加一级,表 1、表 2 和表 3 中所列的平波电抗器温升限值均应降低 2.5% ,并应修约到最接近的整数(单位为 K)。如果情况相反,则应进行相应的逆修正。

11.4 太阳辐射的影响

对于不带声罩的平波电抗器,最外一层线圈的设计应充分考虑太阳辐射对温升的不利影响,在温升控制指标上应留出必要的裕度,在最大连续电流和用户规定的太阳辐射强度同时作用下,保证热点温升不超过技术要求规定值的上限。

12 声级

12.1 声压级

声压级应是 GB/T 1094.10 所规定的测量位置处的任意一点的 A 计权声压级。应注意,由于受试验设备和方法的限制,可能难以提供 1/3 倍频程或 1/8 倍频程的声压频谱和频谱中声压级很低的频谱成分。制造方可根据线谱法提供与基波频率和各次谐波频率相对应的单频声压级和合成总声压级。

12.2 声功率级

声功率级应以声压级为基础,按 GB/T 1094.10 规定的方法进行折算。

保证的声功率级应以订货时规定的额定直流电流以及规定的谐波电流频谱为基准。噪声计算用谐波电流频谱由用户根据系统条件来确定。

注:应注意,噪声计算用谐波电流频谱往往不同于确定温升和损耗的谐波电流频谱。

13 试验

13.1 试验项目

13.1.1 例行试验

下列试验应在所有的平波电抗器上进行,但不必依次遵循下述顺序:

- 直流电阻与直流损耗测量(按 13.2);
- 电感测量(按 13.3);
- 交流等效电阻(R_s)与谐波损耗测量(按 13.4);
- 主要谐波频率下的电抗和品质因数测量(按 13.5);
- 端对端雷电全波冲击试验(按 13.6);
- 直流负载试验(按 13.7)。

13.1.2 型式试验

除 13.1.1 中的各项例行试验外,对于同一型式的同一台产品还应增加以下项目,但不必依次遵循下述顺序:

- 端对端雷电截波冲击试验(按 13.8);
- 端对端中频振荡电容器放电试验(按 13.9);
- 端对地雷电全波冲击试验(按 13.10);
- 端对地操作冲击试验(按 13.11);
- 端对地外施直流电压耐受试验(按 13.12);
- 温升试验(按 13.13);
- 无线电干扰电压(RIV)试验(按 13.14);
- 高频阻抗与杂散电容测量(按 13.15);
- 声级测定(按 13.16)。

13.1.3 特殊试验

下列前两项试验可能难以进行,根据用户与制造方协议,可以通过理论计算或计算结合某些可行的试验来验证。

- 暂态故障电流试验;
- 抗震性能试验;
- 热时间常数测量。

13.2 直流电阻与直流损耗测量

测量直流电阻前,应将试品在温度相对稳定并且是无风的室内环境下放置 15 h(或试品热时间常数的 5 倍)以上,以使试品温度与环境温度相同或接近。试验时,试品应免受日光照射的影响。

直流电阻宜使用基于伏安法的数字式微欧计测量。无论使用那种仪表,其精度均不能低于0.2级。测量时施加给试品的直流电流不宜小于10 A。冷态下的测量结果应换算到80℃参考温度,对于铝导线绕组,换算公式如下:

$$R_{80} = \frac{225 + 80}{225 + T_{\text{room}}} \times R_{\text{room}}$$

式中:

R_{80} ——换算到80℃参考温度下的试品直流电阻;

T_{room} ——测量电阻时试品绕组的温度(接近但不一定等于室温);

R_{room} ——在绕组温度为 T_{room} 时所测得的试品直流电阻。

测定参考温度下的直流电阻后,根据 $P_{dc} = I_{dc}^2 \times R_{80}$ 和用户给定的额定直流电流计算出直流损耗。

13.3 电感测量

试验时,试品与地面之间的距离应不小于试品绕组的半径,支撑物应由绝缘材料制作。地面下应不存在钢筋网等金属回路以及尺寸可以和试品绕组直径相比拟的大型金属件。

对试品施加50 Hz~2 500 Hz范围内指定频率交流电流,用误差不超过0.2%的仪表测量出电抗并换算出各频率下的电感。测量频率除了包括技术规范中明确的谐波电流的频率外,至少还应包括50 Hz、600 Hz、1 200 Hz和2 500 Hz。判断电感量是否符合额定值及偏差范围要求,应以电流最大的特征谐波频率下的电感测量结果为准。其他频率下的电感允许超过偏差范围,但50 Hz与2 500 Hz两者间电感量的相对偏差应不超过5%。

空间电磁场和地网电位的波动可能会对大电感空心线圈的电感测量产生不确定的干扰,使某些测量结果出现较大的测量偏差。当电感测量值超过预期偏差极限时,可重复测量三次,并取三次测量结果的平均值作为测量结果,以最大限度地排除偶然性电磁干扰的影响。

13.4 交流等效电阻(R_k)与谐波损耗测量

对环境温度的要求见13.2,对地距离与地面的要求见13.3。

测量交流等效电阻(R_k)前,应按13.2的规定完成直流电阻测量和试品温度的测量。如果测量交流等效电阻(R_k)期间或测量之前环境温度不能保持稳定,使试品温度难以达到环境温度或达到稳定,则可以用13.2所测量的直流电阻和当前环境下所测量的直流电阻值 R_{dcob} 以及铝绕组直流电阻与温度的关系来推算此时试品的温度 T_{ob} ,公式如下:

$$T_{ob} = \frac{(225 + 20) \times R_{dcob}}{R_{20}} - 225$$

对试品施加50 Hz~2 500 Hz范围内指定频率交流电流,用误差不超过0.2%的高精度数字功率计测量出试验电流下的损耗并算出当前温度下的交流等效电阻。测量频率除了包括技术规范中明确的谐波电流的频率外,至少还应包括50 Hz、600 Hz、1 200 Hz和2 500 Hz。

根据试品温度 T_{ob} 和该温度下的交流等效电阻 R_{kob} 以及直流电阻 R_{dcob} 来换算出在80℃参考温度下的各频率交流等效电阻 R_{k80} ,对于铝导线绕组,计算公式如下:

$$R_{k80} = \frac{(R_{kob} - R_{dcob}) \times (225 + T_{ob})}{225 + 80} + \frac{R_{dcob} \times (225 + 80)}{225 + T_{ob}}$$

当空间电磁场干扰使测量结果出现较大的偏差时,可重复测量三次,并取三次测量结果的平均值作为测量结果,以最大限度地排除偶然性电磁干扰的影响。

测量各谐波频率在80℃参考温度下的交流等效电阻 R_{k80} 后,根据公式 $P_k = I_k^2 \times R_{k80}$ 和用户指定的谐波电流计算出各频率谐波损耗并求出各次谐波损耗的总和。

13.5 主要谐波频率下的电抗和品质因数测量

本试验应在所有绝缘试验和直流负载试验(或温升试验)之后进行。应注意,绝缘试验前后进行谐波频率下的交流等效电阻和电抗测量时应使用同一块仪表、同样的量程、同样的试验电流及同样长度的引线,甚至引线方向及仪表与试品的相对位置也应当保持不变。

按 13.3 和 13.4 规定的方法测量出 600 Hz 及 1 200 Hz 下的电感、交流等效电阻 R_{iso} 后,应用公式 $Q = \frac{\omega L}{R_{\text{iso}}}$ 计算出平波电抗器在 80 °C 下的品质因数 Q ,并与绝缘试验前的 Q 值进行比较。

绝缘试验前后,600 Hz 和 1 200 Hz 下的 Q 值变化量应不超过 $\pm 15\%$ 。当变化范围超过上述限值时,应重新测量或补充测量其他两个谐波频率的 Q 值,进行绝缘试验前后的进一步比较,以充分判定 Q 值的变化是由测试系统不确定度引起还是因绝缘试验造成了试品真正的损伤。

13.6 端对端雷电全波冲击试验

试验时,将平波电抗器安装在绝缘平台上。试验时可不装配平波电抗器上、下两端与线圈两端等电位的声罩或防雨帽,但线圈侧面的筒型声罩(如果有)以及对线圈电压分布有影响的均压环应当装配。

首先施加一次降低的雷电全波冲击耐受电压,然后施加三次额定雷电全波冲击耐受电压。电压的极性应为负极性。额定雷电全波冲击耐受电压应为用户规定的端对端雷电全波冲击耐受电压。降低的雷电全波冲击耐受电压应为额定雷电全波冲击耐受电压的 50%~75%。

应对平波电抗器绕组的每个端子进行试验,一端加压时,另一端经分流器接地。试验时应记录电压和电流波形图。每个端子的试验顺序如下:

- 一次降低电压的负极性雷电全波冲击;
- 三次负极性额定雷电全波冲击。

冲击电压波形应是标准雷电冲击波。如果平波电抗器电感较小,有时难以得到标准冲击波形,此时,经双方协商,可允许有较大的偏差(见 GB/T 1094.4)。但原则上,试品从冲击电压发生器所获取的能量应不小于 50 kJ。

将平波电抗器非被试端子通过波尾支撑电阻接地可能简化这一问题。此电阻值的选择,应保证在非被试端子上所出现的对地电压不超过额定雷电冲击耐受电压的 75%。

与降低的雷电全波冲击耐受电压相比,额定雷电全波冲击耐受电压下的电流、电压波形应稳定不变,试品内部应无烟雾、异常放电声响出现,试品绝缘表面应无沿面闪络现象发生。

对于需要进行雷电截波冲击试验的首台试品,全波冲击试验与截波冲击试验需结合起来进行,试验加压程序见 13.8。

13.7 直流负载试验

对于需要进行温升试验的产品,不必进行本试验。本试验作为例行试验只是用来检查平波电抗器绕组内部是否存在容易产生火花放电的虚焊或焊口开断现象。为便于观察和判断试品是否正常,进行本试验时不应装配妨碍观察的防雨帽、声罩等附件。

试验时,对试品施加不小于最大连续直流电流 1.2 倍的直流电流,持续 2 h。在这一试验电流作用下,试品应不出现烟雾、异常放电声响。

13.8 端对端雷电截波冲击试验

试验时,试品的安装要求与 13.6 的规定相同。

首先施加一次降低的负极性雷电全波和截波冲击耐受电压,然后施加两次 100% 幅值的负极性截波冲击耐受电压。100% 幅值的截波冲击耐受电压应为用户规定的端对端雷电全波冲击耐受电压的 1.1 倍。降低的雷电截波冲击试验电压应为 100% 幅值的截波冲击耐受电压的 50%~75%。

应对平波电抗器绕组的每个端子进行试验,一端加压时,另一端应经分流器接地。试验时应记录电压和电流波形图。

雷电截波冲击试验可以与 13.6 规定的雷电全波冲击试验(例行试验)结合起来进行,试验顺序应调整为:

- 一次降低电压的雷电全波冲击;
- 一次额定雷电全波冲击;
- 一次或多次降低电压的雷电截波冲击;

——两次 100% 幅值的雷电截波冲击；

——两次额定雷电全波冲击。

冲击电压应为负极性，冲击电压波形应是标准雷电冲击波。

与降低的雷电截波冲击耐受电压相比，100% 幅值的截波冲击耐受电压下的电流、电压波形应稳定不变，试品内部应无烟雾、异常声响出现，试品绝缘表面应无沿面闪络现象发生。

13.9 端对端中频振荡电容器放电试验

试验时，试品的安装要求与 13.6 的规定相同。

用脉冲电容器通过球隙或断路器对平波电抗器放电，在平波电抗器上形成振荡频率数量级大约为 300 Hz~900 Hz、持续时间不小于 10 ms 的中频振荡电压。中频振荡电压的第一个幅值应由用户规定。应注意，该幅值最大不能超过平波电抗器端对端操作冲击耐受电压。

电容器放电时的实际振荡频率和持续时间取决于脉冲电容器的容量、试品电感以及试品的中频特性。受脉冲电容器容量制约，试品电感较小或较大时，振荡频率可能难以符合上述数量级。这种情况下，制造方应与用户协商可接受的振荡频率。

杂散电容、引线电感引起的波前上升沿过冲电压峰值不应被认为是中频振荡的幅值。如果过冲峰值过高，可用高频阻波器等串联滤波装置对波前寄生振荡提供阻尼，抑制上升沿的过冲峰值。为抑制过冲峰值并保护脉冲电容器，允许采用适当阻值的波头电阻与脉冲电容器串联，但波头电阻的选择应确保振荡持续时间不小于 10 ms。

脉冲电容器充电电压极性为负极性，半电压进行一次，全电压进行三次。每两次之间的间隔视冲击电容器的性能而定。本试验的目的在于检查平波电抗器绕组匝间绝缘，只对上端子进行，另一端子通过分流器接地。

试验期间，各次放电的振荡频率和波形应稳定不变，线圈内部应无放电声响和烟雾出现。

13.10 端对地雷电全波冲击试验

本试验本质上是对平波电抗器的绝缘支架进行的试验。试验应遵循 GB/T 775.2 的规定。

试验时，按运行方式将平波电抗器安装在由支柱绝缘子构成的绝缘支架上。但如果受试验设备、场地和起重能力的限制而不能实施合同产品的安装，可用外型尺寸相同的模型（如带有平波电抗器金属端架的声罩等）代替平波电抗器，均压环以及其他金属附件应按运行方式装配。

在绝缘支架上端与地之间的雷电全波冲击试验顺序如下：

——一次正极性降低电压（50%~75%）的雷电全波冲击；

——三次正极性额定雷电全波冲击；

——三次负极性额定雷电全波冲击。

冲击电压波形应是标准雷电冲击波。

在上述七次冲击下，应不出现一次以上沿面闪络或其他异常现象。如果出现一次沿面闪络现象，则应另追加九次该极性的冲击，且不应再次出现闪络现象。

13.11 端对地操作冲击试验

本试验本质上是对平波电抗器的绝缘支架进行的试验。试验应遵循 GB/T 775.2 的规定。

试验时，试品的安装要求与 13.10 相同。对于户外运行的平波电抗器，试验应在湿态下进行。湿态试验时至少对绝缘支架中的一柱绝缘子实施人工淋雨。

冲击电压波形应是标准操作冲击波。

在七次正极性和八次负极性操作冲击下，应不出现两次以上的沿面闪络现象。

13.12 端对地外施直流电压耐受试验

本试验本质上是对平波电抗器的绝缘支架进行的试验。试验电压持续时间应不少于 60 min。试验应遵循 GB/T 775.2 的规定。

试验时，试品的安装要求与 13.10 相同。对于户外运行的平波电抗器，试验应在湿态下进行。湿态

试验时至少对绝缘支架中的一柱绝缘子实施人工淋雨。

试验过程中,绝缘应无击穿和闪络现象发生。

13.13 温升试验

13.13.1 概述

温升试验为型式试验。如果平波电抗器设计有声罩或防雨帽,温升试验时应按实际运行的方式装配声罩或防雨帽。

试验前,应先完成冷态直流电阻的测量。

试验时,为了不影响空气对流和绕组内冷风的补充,试品与地面之间的距离不宜小于平波电抗器绕组厚度的 2.5 倍,否则温升试验结果可能偏高。

试验时,试品应避免日光照射的影响,试品周围风速应不大于 0.5 m/s。

13.13.2 试验电流的施加

作为型式试验的温升试验,应当与最大连续直流电流的温升试验和短时过载电流的温升试验结合起来进行。首先对试品施加与最大连续直流电流对应的等效温升试验电流 I_1 ,使热点温升达到稳定,以不大于 0.5 h 的时间间隔读取热点温升数值并绘制热点温升变化曲线,用以确定热点温升的热时间常数。热点温升稳定后,将试验电流迅速增加到与短时过载电流对应的等效试验电流 I_2 ,保持用户规定的过载时间(一般为 2 h)后,测取热点温升数值,然后将试验电流降低到与最大连续直流电流对应的等效试验电流 I_1 ,直到温升稳定,断开试验电流,按 GB 1094.2 规定的电阻法测取平均温升。

I_1 由 80 °C 下的直流电阻 R_{dc80} 、80 °C 下各次谐波频率的交流等效电阻 R_{h80} 、最大连续直流电流 I_{dm} 以及对应条件下的各次谐波电流 I_h 确定:

$$I_1 = \sqrt{\frac{I_{dm}^2 \times R_{dc80} + \sum_{h=1}^{50} I_h^2 \times R_{h80}}{R_{dc80}}}$$

I_2 由 80 °C 下的直流电阻 R_{dc80} 、短时过载电流 I_{2h} 、短时过载条件下的谐波电流 I_h 及 80 °C 下各次谐波频率的交流等效电阻 R_{h80} 确定:

$$I_2 = \sqrt{\frac{I_{2h}^2 \times R_{dc80} + \sum_{h=1}^{50} I_h^2 \times R_{h80}}{R_{dc80}}}$$

如果 I_2 小于最大连续直流电流的 1.2 倍,在读取短时过载电流下的热点温升后,应当将试验电流提高到最大连续直流电流的 1.2 倍,继续保持 0.5 h,而后再将试验电流降低到试验电流 I_1 ,直到温升稳定,测取平均温升和热点温升。

当温升值趋于稳定,即温升的变化率小于每小时 1 K,并维持 3 h 时,则认为温升已经达到最终值。

在最大连续直流电流和 1.2 倍过载状态下,试品应不出现烟雾、局部温升异常偏高和异常放电声响。

13.13.3 热点温升测量

在平波电抗器每个绕组包上部至少布置两个测温点。所有绕组包的测温点应布置在风道内。

应采取可靠的方法将测温元件贴在绕组包表面,确保温升试验全过程中,测温元件与绕组包表面保持紧密接触。除了与试品表面直接接触的测温元件外,某些暴露的金属件(如接线端子)的温升也可用红外测温仪测量。

应将每个绕组包各个测温点中最高读值计为该绕组包的热点温升。所有测温点中最高读值计为平波电抗器整台线圈的热点温升。

13.13.4 冷却空气温度的测量

周围环境冷却空气的温度变化应尽量小,特别是在试验后期接近稳态时,更应注意冷却空气的变化。应采取适当的措施,防止由空气湍流而引起剧烈的温度变化(如:为温度传感器配备时间常数适当

的吸热容器等)。试验中至少应有三个温度传感器监测空气温度,以它们的平均值对试验结果进行评估。每隔一段时间记录读数,或者采用自动连续记录。

温度传感器应沿平波电抗器周围均匀分布,距平波电抗器表面约 2 m,避免直接受试品热辐射的影响。温度传感器的高度应与试品中心高度相同。

13.13.5 平均温升测量

平波电抗器平均温升测量应按 GB 1094.2 的规定。切断试验电流后,在降温过程中至少测量四次以上的热态电阻值。对于需要测试热时间常数的产品,应测量更多次热态电阻值,总的测量时间应延长到 1 h 以上,以便从尽可能长的降温过程中准确推测平波电抗器整体的热时间常数。降温过程中第一次测量热态电阻值应在断电后的 4 min 以内进行。

根据 GB 1094.2 给出的曲线外推法,推算出断电瞬间试品的热态电阻值,并以该电阻值来计算试品在该试验电流下的平均温升,对于铝绕组,计算公式如下:

$$\theta_r = \frac{R_{hot} \times (225 + T_0)}{R_0} - 225 - T_r$$

式中:

θ_r ——切断电源瞬间的绕组平均温升,K;

T_r ——切断电源瞬间的环境温度,℃;

R_{hot} ——切断电源瞬间的绕组热态直流电阻,Ω;

R_0 ——常温状态下的绕组直流电阻,Ω;

T_0 ——测量常温状态下绕组直流电阻时的绕组温度,℃。

如果温升试验时试验室的环境温度不等于 30 ℃,应利用下式将绕组平均温升和热点温升折算到 30 ℃下:

$$\theta_{30} = \frac{\theta_r \times (225 + 30)}{225 + T_r}$$

13.13.6 热时间常数测量

热时间常数测量为特殊试验,应在首台产品温升试验时进行。

线圈整体平均温升的热时间常数反映线圈整体的热惯性,而热点温升上升速度主要由单个绕组包的热时间常数决定。应在施加电流的升温过程中和断电的降温过程中分别测量热点温升的热时间常数和整体平均温升的热时间常数。在施加 I_t 时,以不大于 0.5 h 的时间间隔读取各包封层中最高的热点温升,并绘制热点温升变化曲线,如图 1 所示。以温升最高绕组包从开始通电到热点温升达到该电流下稳定温升 63.2% 的时间作为热点升温过程中的热时间常数值。

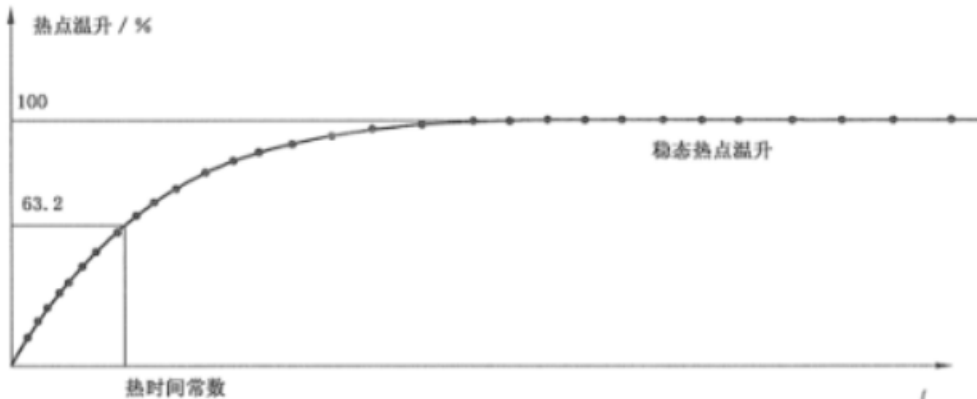


图 1 热点温升的热时间常数确定

在温升试验结束后的自然降温过程中,取 T_1 、 T_2 、 T_3 三个时刻的电阻并换算出三个时刻的温升,其中 T_1 应为断电后 4 min 以内, T_2 应为断电后 30 min 左右, T_3 应为断电后 60 min 左右。时间的记录必须精确到秒,并统一将秒换算为分。换算出三个时刻的平均温升后,按下式计算两个时间段的热时间常数 C_{h12} 和 C_{h23} ,最后取两个值的算术平均值作为整台平波电抗器平均温升的热时间常数 C_h 。

$$C_{h12} = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)}$$

$$C_{h23} = \frac{T_3 - T_2}{\ln\left(\frac{\theta_2}{\theta_3}\right)}$$

$$C_k = \frac{C_{h12} + C_{h23}}{2}$$

式中： θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别为 T_1 、 T_2 、 T_3 三个时刻的平均温升。

温升试验报告应分别给出平波电抗器热点温升的热时间常数和平均温升变化过程的热时间常数。

13.14 无线电干扰电压(RIV)试验

本试验只适用于直流电压较大的平波电抗器。安装在换流站中性母线侧的平波电抗器，最高工作电压通常不超过 125 kV，当配备均压环等对尖端电场有屏蔽作用的装置时，不必进行本试验。如果最高工作电压不超过 60 kV，无论是否配备电场屏蔽装置，都不需要进行本试验。

试验时，试品的安装要求与 13.10 相同。如果平波电抗器的外围设计带有均压环、声罩等金属件，试验时可用声罩代替平波电抗器。此种情况下，平波电抗器线圈两端的星形金属端架、过渡支座等应模拟实际产品与声罩装配起来，声罩本体的连接件以及均压环等也应与真实产品一致。

试验期间，空气相对湿度应不超过 75%，试品温度与试验场所的环境温度应达到热平衡，以防止试品表面出现凝露。

试验时，应先后对试品施加正极性和负极性直流试验电压并测量无线电干扰电压(RIV)。试验电压的施加过程应按下列程序进行：

首先，对试品施加比试验电压规定值高 10% 的电压，并维持 5 min，然后将电压缓慢下降到试验电压规定值的 30%，再缓慢上升到初始值，并停留 1 min。然后按每级约 10% 的试验电压逐级下降到试验电压规定值的 30%。同时，按 GB/T 11604 规定的方法，在每级电压下对试品进行无线电干扰电压测量。所得到的无线电干扰电压电平对应于施加电压的曲线，即为无线电干扰电压特性。

在 $1.3U_n$ 试验电压下，平波电抗器的无线电干扰电压应不超过 $2\,500\,\mu\text{V}$ ，且应无可见电晕。

13.15 高频阻抗与杂散电容测量

试验时，试品的安装要求与 13.10 相同。

可用高频阻抗测试仪直接测量试品绕组端对端高频阻抗。仪表引线分别连接试品绕组的上下端子。试验引线应尽可能短。测试频率的范围为 30 kHz~1 MHz。在频率扫描时，扫描步长应不大于 10 kHz。此外，在平波电抗器自谐振频率附近，应额外缩小测试步长，以准确找到试品的自谐振频率（阻抗达到其最大值的频率）。高频阻抗测试报告中应给出自谐振频率的数值以及自谐振阻抗。

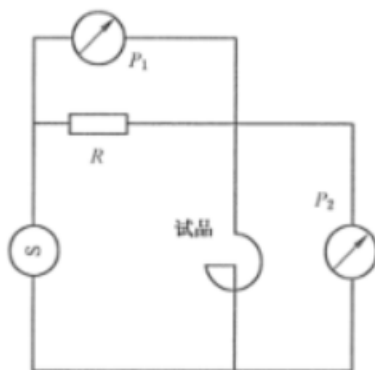


图 2 高频阻抗测量的电平比较法

如果空间电磁干扰过强，无法使用高频阻抗测试仪或其他弱小电流的网络分析仪直接测量，可用高频振荡器向试品逐一施加指定频率的高频电流，用窄带选频电平表测量试品的电压电平 P_2 以及与试

品串联的标准电阻 R 的电压电平 P_1 , 见图 2, 并用下式换算出试品在该频率下的阻抗:

$$Z = R \cdot 10^{0.05(P_2 - P_1)}$$

式中: P_1 、 P_2 的单位为 dB。

用选频电平表测量时, 应在事先测试出空间电磁干扰的主要频率。在选择阻抗测量频率时, 注意规避那些干扰较强的频率。这种频率的选择和规避可能使测试无法实现固定的频率步长。

可用上述高频阻抗测试仪或电压电平比较法测量试品对地杂散电容。考虑到特高压平波电抗器与地面之间的测试引线较长, 引线电感和所感应的无线电干扰信号在较高频率下会形成不容忽视的影响, 测量杂散电容的频率应尽可能低些。

13.16 声级测定

准确的噪声应当以现场试验为主。在试验室只能对噪声预测报告进行验证性试验, 对试品施加主要频率的电流, 产生主要的声谱, 然后将试验结果与噪声预测报告进行比较。当主要声谱试验结果与预测报告相比正偏差不超过 5 dB、负偏差不超过 6 dB 时, 可以认为声级不会明显超过预测报告给出的计算值。

原则上, 进行噪声试验时, 应对试品同时施加规定的直流电流与谐波电流, 但事实上这种方法往往难以实现。这种条件下, 可以只对试品施加在电磁力上等效的单频交流电流。用增大交流试验电流的办法计入直流电流对电磁振动的放大作用, 试验原理和方法参见附录 B。

14 铭牌

每台平波电抗器均应设有铭牌。铭牌的材料应不受气候影响, 并应固定在明显可见的位置。铭牌上所标志的项目内容应清晰、牢固(可采用蚀刻、雕刻、打印或光化学处理等方式)。下述项目应标志在铭牌上。

- 平波电抗器型号及名称;
- 户内/户外用;
- 标准代号;
- 制造单位名称(包括国名);
- 出厂序号;
- 制造日期;
- 绝缘水平;
- 最大工作电压;
- 额定直流电流;
- 最大连续直流电流;
- 暂态故障电流;
- 额定电感;
- 绝缘耐热等级;
- 线圈质量;
- 总质量。

15 起吊、标志、包装、运输和储存

15.1 如果平波电抗器自身质量和吊孔的设计不允许直接起吊, 制造方应提供专用的起吊装置, 用于运输路途和现场安装过程。

15.2 如果平波电抗器因总体尺寸较大而难于运输, 允许线圈以外的附件(如声罩、气候防护罩等)分开包装和运输。对于不具有互换性而需要与线圈本体一一对应的附件, 附件的序号应当与线圈本体一致, 并标注在包装标志与装箱单上。

- 15.3 包装标志至少应包含产品序号、型号、净质量和带包装时的质量等。当两种或两个及以上附件混装于一个附件箱时,装箱单应注明附件名称、代号(或型号)和数量。
- 15.4 装箱单最少应提供两份,一份寄交用户,一份贴在箱外。装箱单应当用塑料带密封,保证不能进入雨水、潮气。贴于箱外的装箱单应当用妥善、可靠的方法固定,不允许被钢钉损坏。
- 15.5 对于需要以试装方式来确定安装孔位置因而不具有互换性的组件,应有明显的装配标记,用以指导安装部门确定各组件的准确位置和角度。
- 15.6 对于吸水性较强、需要严防淋雨的附件(如含有吸声棉的声罩组件等),包装箱设计上不仅要有严格的防雨措施,而且包装箱内的产品也要覆盖雨布、塑料膜等,供现场安装期间随时遮盖、防雨之用。
- 15.7 同一包装内带有表面涂层的附件,应采取周到严密的固定措施,附件之间不允许相互移动和磨擦。
- 15.8 带有涂层的附件的包装,应保证经过运输、长期贮存而不损坏、不受潮。
- 15.9 运输尺寸较大的产品主体,可以采用简易包装而不装箱,但应保证在运输期间不进水。
- 15.10 对于需要长期贮存而又无法装箱运输的备件,应设法存放于厂房内或大棚下,防止日光、雨水等对产品的可靠性和使用寿命形成不利影响。

附录 A
(资料性附录)

平波电抗器的有关性能参数实例

平波电抗器的有关性能参数实例见表 A.1。

表 A.1 干式平波电抗器的有关性能参数

| 参数名称和单位 | 工程 1 | 工程 2 |
|-------------------|-------|-------|
| 额定直流电压/kV | ±800 | ±800 |
| 最大工作电压/kV | ±816 | ±816 |
| 额定电感/mH | 75 | 75 |
| 电感值允许偏差/% | ±3 | 0~+5 |
| 额定直流电流/A | 3 125 | 4 000 |
| 最大连续直流电流/A | 3 461 | 4 497 |
| 短时(2 h)过载直流电流/A | 3 795 | 4 731 |
| 暂态故障电流(峰值)/kA | 20 | 30 |
| 直流损耗/kW | 220 | 225 |
| 谐波损耗/kW | 10 | 10 |
| 匝间绝缘耐热等级 | H | H |
| 整体绝缘耐热等级 | F | F |
| 最大连续电流下的平均温升/K | 70 | 80 |
| 最大连续电流下的热点温升/K | 90 | 105 |
| 端对端雷电冲击耐受电压/kV | 1 260 | 1 155 |
| 端对端操作冲击耐受电压/kV | 950 | 838 |
| 端对地雷电冲击耐受电压/kV | 1 950 | 1 950 |
| 端对地操作冲击耐受电压/kV | 1 600 | 1 600 |
| 端对地湿态直流耐受电压/kV | 1 200 | 1 200 |
| 额定直流电流下的声压级/dB(A) | 80 | 70 |

附 录 B
(资料性附录)
声级测定的试验原理和方法

B.1 等效试验电流的计算原理

在平波电抗器运行时,工作电流由若干谐波电流和直流电流组成,它们产生多种频率的振动磁场力和稳定不变的静态磁场力。前者产生电磁噪声,后者对噪声没有贡献。由于受试验电源方面的限制,有时只能对试品逐一施加单一频率的交流电流而不能同时叠加直流电流。这种条件下交流试验电流产生的磁场力与平波电抗器运行时谐波电流和直流电流共同产生的磁场力应当等效(包括振动力幅值和振动频率)。

B.1.1 单频电流产生的振动磁场力

当平波电抗器绕组通过电流时,流经绕组的电流会在平波电抗器内部、外部产生磁场,磁场反过来作用于载流的绕组,对绕组产生磁场力。当通过的电流随时间交变时,磁场的大小和方向随之变化,于是绕组导线所受的磁场力发生变化,引起绕组振动。对于筒式空心线圈,虽然由于磁场强度和磁感应强度在平波电抗器绕组上的分布不均匀,使得各个绕组层以及各线匝所受的磁场力不同,但各点受力大小总是与该点的电流以及该处的磁感应强度呈正比关系。而磁感应强度与产生该磁场的电流 i 成正比关系,于是对于任意的单一频率的电流 i ,作用于各匝绕组的磁场力,可用下面时域函数式表示:

$$F = k_h \times i^2 \quad \text{.....(B.1)}$$

式中的 k_h 表示由几何尺寸及导磁系数所确定的综合系数,与电流 i 的大小和频率无关。

利用半角公式对上式展开,可以得出,频率为 f 的单频正弦电流所形成的磁场力 F_i 为:

$$F_i = k_h \times A(I) \times [1 - \cos(2\pi \times 2f \times t)] \quad \text{.....(B.2)}$$

其中振动分量为:

$$F_v = k_h \times A(I) \times \cos(2\pi \times V \times t) \quad \text{.....(B.3)}$$

$$A(I) = -I_p^2/2 \quad V = 2f \quad \text{.....(B.4)}$$

式中:

$A(I)$ ——电流幅值的函数;

I_p ——电流的幅值,即方均根值的 1.414 倍;

V ——振动磁场力的频率;

f ——电流的频率。

公式表明,频率为 f 的单一电流 i 产生一个相当于预先施加的静态的磁场力($V=0$)和一个主振频率 V 为 $2f$ 的振动力 F_v 。决定磁场力 F_i 的函数 $A(I)$ 在单频电流时为 $-I_p^2/2$ 。

B.1.2 多频电流产生的磁场力

当平波电抗器中有两个以上频率的交流电流时,各频率电流分别产生由式(B.2)所决定的磁场力,同时,任意两个电流 i_1 、 i_2 通过所产生的磁场还相互作用,形成其他频率的磁场力。

i_1 (或 i_2)产生的磁感应强度 B_1 (或 B_2),不仅作用于导体中的电流 i_1 (或 i_2),还同时作用于频率为 f_2 (或 f_1)的电流 i_2 (或 i_1),形成式(B.5)或(B.6)所确定的磁场力。

$$F_{12} = k_h \times i_1 \times i_2 \quad \text{.....(B.5)}$$

$$F_{21} = k_h \times i_2 \times i_1 \quad \text{.....(B.6)}$$

两个不同频率的电流之间相互作用所产生的磁场力可归纳为 F_m :

$$F_m = 2k_h \times i_1 \times i_2 \quad \text{.....(B.7)}$$

i_1 、 i_2 为不同频率的正弦函数,展开后为:

$$F_m = k_h \times I_{1p} \times I_{2p} \times \{ \cos[2\pi \times t \times (f_2 - f_1)] - \cos[2\pi \times t \times (f_1 + f_2)] \} \dots\dots (B.8)$$

由此式可以看出,两个不同频率的电流相互作用的结果是产生两个不同频率的振动,其中一个振动磁场力为:

$$F_{2-1} = k_h \times A(I) \times \cos[2\pi \times t \times (f_2 - f_1)] \dots\dots\dots (B.9)$$

式中:

$$A(I) = I_{1p} \times I_{2p} \dots\dots\dots (B.10)$$

另一个振动磁场力为:

$$F_{2+1} = k_h \times A(I) \times \cos[2\pi \times t \times (f_1 + f_2)] \dots\dots\dots (B.11)$$

式中:

$$A(I) = -I_{1p} \times I_{2p} \dots\dots\dots (B.12)$$

两个振动磁场力的幅值相同,但频率不同。

B.1.3 单频交流电流与直流电流共同形成的磁场力

平波电抗器中所有谐波电流分别与直流电流交互作用,形成与谐波电流频率相同的振动磁场力,由式(B.7)可知,该磁场力为:

$$F_{\text{acdc}} = 2k_h \times I_{dr} \times I_p \sin(2\pi \times f \times t) \dots\dots\dots (B.13)$$

式中:

I_p ——谐波电流的幅值,即方均根值的 1.414 倍;

I_{dr} ——额定直流电流;

f ——电流的频率。

平波电抗器各次谐波电流幅值一般不超过直流电流的 5% 甚至 1% 以下。因此任意两个谐波电流之间相互作用所产生的振动磁场力幅值远远小于谐波电流与直流电流相互作用所产生的磁场力,平波电抗器主要电磁噪声的频谱是由谐波电流与直流电流相互作用的结果,其余成分一般可以忽略。

B.2 试验电流的确定

根据平波电抗器技术规范所提出的主要谐波电流,逐一施加单频试验电流时,所产生的磁场力幅值及频率应当与该谐波电流与直流电流相互作用时相等。对比式(B.3)与(B.12)可以看出,试验电流的频率应取噪声计算用谐波电流频率的 1/2,而试验电流的方均根值 I_s 应按式计算:

$$I_s = \sqrt{2\sqrt{2} \times I_{dr} \times I_n} \dots\dots\dots (B.14)$$

式中:

I_n ——噪声计算用谐波电流方均根值;

I_{dr} ——额定直流电流。

当实际试验电流小于上式确定的试验电流时,应按 B.6 中提出的方法对试验结果进行修正计算,换算到指定的电流下。

B.3 试验条件

试品用绝缘子和底架支撑,试品下侧距离地面为 1 m 左右。

对于设计带声罩的平波电抗器,如果因噪声级较低而难以获得有效的测试数据,试验时可将平波电抗器本体的噪声级与声罩的声学衰减特性分开进行试验,然后从线圈本体的试验结果中减掉消声装置相应频率下的衰减值,将其差值作为平波电抗器整体的声级。

试验时,环境背景噪声的声压级应比试品产生的声压级与背景噪声声压级合成的声级小 5 dB(A) 以上,并且应从测试结果中扣除背景噪声的干扰。当背景噪声比表计读数低 8 dB(A) 以上时,背景噪声的影响可以忽略。

当场地周围存在反射时,应设法测量反射系数,在测试结果中排除反射的影响。麦克风应离开试品

表面 3 m 远,以免受到磁场的干扰。附近反射墙面距离微音计至少应在 3 m 以上。

在有回响的室内进行试验时,应按 GB/T 1094.10 提出的方法考虑墙壁、屋顶的反射影响,并且在试品安装就位以前用标准声源测定可听噪声频段的环境反射系数 K (即标准声源的声级与试验场地的视在声级之间的差值)。该标准声源的功率级应事先在位于反射面上的自由场中进行校正。测定环境反射系数时,标准声源应布置在试品声源的中心位置(即对四面墙壁以及地面的距离应当与试品一致)。因试验场地四周反射面的不对称或堆积设备物品较多而造成各方向反射不同时,应在不同方向上测试环境反射系数 K_i ,并取它们的平均值作为计算使用的修正系数 K 。 K 的最大值应不超过 7 dB(A),否则应改造或更换试验场所。

B.4 线圈本体声级测定方法

B.4.1 试品充电和电流测量

用大功率变频电源对试品逐一施加指定的试验电流。当试品无功功率超过变频电源的负荷极限时,可用电容器组进行串联或并联补偿。电流测量用传感器的适用频率应覆盖所有试验电流的频率范围。

B.4.2 声级测量和平均声压级的计算

由于试验环境的背景噪声往往较高,致使测量结果无效,因此应采用线谱法进行声级测量,以便排除背景噪声的信号,减少背景的干扰。在试品施加单一频率交流电流时,平波电抗器噪声的音调特征是其频率为电流频率的 2 倍(即声波能量主要集中在 2 倍电流频率的声波上)。因此可以主要关注 2 倍于电流频率的声谱。

当各种不同频率的电流在线圈内部产生电磁振动时,磁场力不仅激励出振动频率与磁场力频率相同的主频率振动,同时还在这个特征频率附近带动出整数倍于主频率的其他多阶附加振动,但振动幅值较低。每一个频率的主振动都会产生这样的多阶附加振动,如果在调整交流试验电流频率时,重复测量各次试验中主频率以外的附加频率的电磁噪声并累加计入最终结果中,将导致最后的各频率声功率总合成值大于实际值(因为某一个频率的电流所产生的附加振动虽然与另一个试验电流下的附加振动频率相同,但他们的相位不一定相同,甚至有可能相位相差 180° 而相互削弱。这样,如果将各种试验电流下的附加振动产生的声功率作算术叠加,势必失去最终结果的准确性)。为尽可能减小这种偏差,在各种频率的试验电流下进行测量时,一方面应当用线谱法获得各电流下的主频率声压值,同时测试主频率附近的其整数倍频率的声压值,最后对各频率试验电流激励下的磁场力频率以外的附加振动噪声(折算到规定电流下的数值)进行比较,取他们在不同试验当中的较大值作为几个主频率以外的声谱测试结果。

为了使测量结果尽可能准确,防止电磁场对微音计的干扰,声级测试点最少应离开线圈外表面 3 m 远,见图 B.1。对于线圈本体高度在 2.4 m 以上的试品,微音计应布置在线圈本体高度的 $1/3$ 和 $2/3$ 处,如图 B.1 中 a) 所演示。对于线圈本体高度不超过 2.4 m 的试品,微音计应布置在线圈本体高度的 $1/2$ 处,如图 B.1 中 b) 所演示。在上述不同高度处,应围绕试品各布置 10 个均匀分布的测试点,测量出各场点的未经环境修正的 A 计权声压值 L_{pAi} 。当试验场地比较开阔、声波反射物的影响可以忽略,以致于不同方向上的声压级相同或接近时,可以适当减小各高度处沿圆周分布的测试点数目。

按下式计算各测试点未经修正的平均 A 计权声压级:

$$\overline{L_{pA0}} = 10 \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1 L_{pAi}} \right) \quad \dots\dots\dots (B.15)$$

式中:

N ——测点总数。

注:当各 L_{pAi} 值间的差别不大于 5 dB(A) 时,可用简单的算术平均值来计算,此平均值与按式(B.15)计算出的值之差应不大于 0.7 dB(A)。

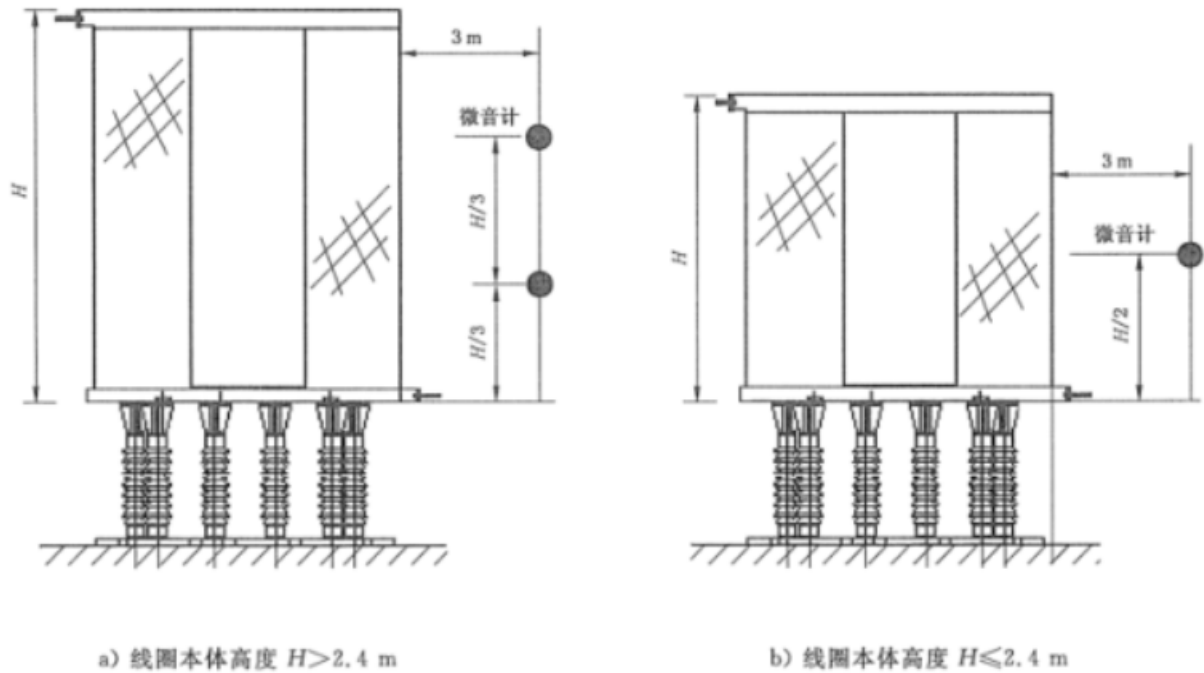


图 B.1 线圈本体声级测试点的布置示意图

B.4.3 背景噪声的测量与计算

应按 B.4.2 规定的测量点布置方式测量环境背景噪声。如果背景噪声的声级明显低于试品和背景噪声的合成声级(差值大于 8 dB),则可以仅在一个测量点进行背景噪声的测量。

当测量多点背景噪声时,按下式计算各测试点背景噪声平均 A 计权声压级:

$$\overline{L_{bgA}} = 10 \lg \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M 10^{0.1 L_{bgAi}} \right) \quad \dots\dots\dots (B.16)$$

式中:

M ——测点总数。

如果背景噪声平均 A 计权声压级($\overline{L_{bgA}}$)与试品未经修正的平均 A 计权声压级($\overline{L_{pA0}}$)相差在 5 dB(A)以下,则测量无效;相差在 5 dB(A)~8 dB(A)时,可以按式(B.17)进行修正。当试品未经修正的平均 A 计权声压级($\overline{L_{pA0}}$)比背景噪声($\overline{L_{bgA}}$)大 8 dB(A)以上时,可以忽略背景噪声的叠加影响。

试品在每一个电流下的测量完毕后,应立即重复测量背景噪声。

B.4.4 背景噪声与环境反射的修正

某一主要频率的经过修正的平均 A 计权声压级 $\overline{L_{pA}}$ 应按下式计算:

$$\overline{L_{pA}} = 10 \lg (10^{0.1 \overline{L_{pA0}}} - 10^{0.1 \overline{L_{bgA}}}) - K \quad \dots\dots\dots (B.17)$$

式中:

$\overline{L_{pA0}}$ ——该频率下含有背景噪声和环境反射影响的平均 A 计权声压级测量结果;

$\overline{L_{bgA}}$ ——试品未通电时的背景噪声平均 A 计权声压级;

K ——环境修正值,见 GB/T 1094.10。

为避免周围环境反射对测试结果产生影响,可以用声强计代替声压计进行测量。

B.4.5 试验记录

试验报告应以表格的形式记录各主要频率的进行各种修正的声压级,同时记录对应的电流值。表格还应注明试验条件(如相对应的试验电流等)。

B.5 声罩衰减特性测量

将标准声源设备安装在声罩内部中心位置,通过声罩向外辐射噪声。微音计距中心的距离应当与平波电抗器本体噪声测量时相等。

测量时,应当用线谱法测量 50 Hz~5 000 Hz 频段内 50 Hz 整数倍频率的 A 计权声压级,并将测量结果以表格的形式予以记录。记录的数据应是对背景噪声和环境反射进行修正后的数据。

将声罩摘除,标准声源位置以及测量点的位置保持不变,用线谱法重复测量上述 50 Hz 整数倍频率的声压级。

在衰减特性测量报告中,将以上两个条件下的测量结果进行比较,求出声罩在 50 Hz~5 000 Hz 频段内的声学衰减特性。以表格的形式记录声罩衰减的频响特性。试验报告表格中的数据应是对背景噪声和环境反射进行修正后的数据。

B.6 电流折算与声罩衰减效果的处理

受试验设备的限制,某些频率的试验电流可能难以达到所要求的值。此外,对于幅值较低的谐波电流,按理论要求充电时可能难以形成能够准确测量的声压级。在这种情况下,试验时可根据设备的能力和背景噪声的大小来适当调整试验电流。无论哪方面的原因,当实际试验电流不符合所要求的值时,需要根据噪声与电流的关系将试验结果修正到理论计算指定的试验电流下。

根据噪声辐射功率与振动幅值、电流幅值的关系,当实际试验电流为 I_1 而理论计算指定的试验电流为 I_2 时,电流 I_2 下的声功率级 L_2 可按下式计算:

$$L_2 = L_1 + 40 \lg \frac{I_2}{I_1} \quad \dots\dots\dots (B.18)$$

式中:

L_1 ——电流 I_1 下的声功率级。

声功率级测量结果按实际试验电流与要求的试验电流进行折算后,从中减去该频率下声罩的衰减值,得出平波电抗器带声罩条件下的声功率级。

B.7 声功率级的计算

在测量各频率声压级后,各主要频率下的 A 计权声功率级 L_{WAf} 按下式计算:

$$L_{WAf} = \overline{L_{pA}} + 10 \lg \frac{S}{S_0} \quad \dots\dots\dots (B.19)$$

式中:

$\overline{L_{pA}}$ ——经过修正的平均 A 计权声压级;

S_0 ——基准参考面积(1 m²);

S ——测量表面面积, m²。干式空心平波电抗器可以看作半球体声源,测量表面面积按下式确定:

$$S = 2\pi \times R_m^2 \quad \dots\dots\dots (B.20)$$

式中:

R_m ——测量轮廓面的半径, m。

B.8 总声功率级和总声压级的计算

通过逐一改变试验电流频率的方法测量各电流下的声压级和声功率级频谱特性后,按下式分别计算 A 计权总声功率级 L_{Wtot} 和平均 A 计权总声压级 $\overline{L_{ptot}}$ 。

$$L_{Wtot} = 10\lg \sum 10^{0.1L_{WAi}} \dots\dots\dots (B, 21)$$

式中：
 L_{WAi} ——各相关频率下的 A 计权声功率级。

$$\overline{L_{ptot}} = 10\lg \sum 10^{0.1\overline{L_{pAi}}} \dots\dots\dots (B, 22)$$

式中：
 $\overline{L_{pAi}}$ ——各相关频率下的经过修正的平均 A 计权声压级。

在试验报告中,应给出带声罩和不带声罩两种条件下的总声功率级和总声压级。

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
高压直流输电用干式空心平波电抗器
GB/T 25092—2010

*

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街16号
邮政编码:100045

网址 www.spc.net.cn

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 1.75 字数 43 千字
2010年11月第一版 2010年11月第一次印刷

*

书号: 155066 · 1-40523



GB/T 25092—2010

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68533533

