

中华人民共和国国家标准

GB/T 1094.6—2011
代替 GB/T 10229—1988

电力变压器 第6部分：电抗器

Power transformers—Part 6: Reactors

(IEC 60076-6:2007, MOD)

2011-07-29 发布

2011-12-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 V

引言 VII

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

 3.1 电抗器的类型 2

 3.2 其他定义 3

4 符号与缩写 5

5 使用条件 6

 5.1 概述 6

 5.2 地震条件 7

6 设计、试验、偏差和应用 7

7 并联电抗器 8

 7.1 概述 8

 7.2 设计 8

 7.3 术语和定义 8

 7.4 额定值 9

 7.5 温升..... 10

 7.6 绝缘水平..... 10

 7.7 铭牌..... 10

 7.8 试验..... 11

 7.9 偏差..... 18

8 限流电抗器和中性点接地电抗器..... 19

 8.1 概述..... 19

 8.2 设计..... 19

 8.3 术语和定义..... 20

 8.4 额定值..... 21

 8.5 承受额定热短路电流和机械短路电流的能力..... 24

 8.6 温升..... 24

 8.7 绝缘水平..... 24

 8.8 铭牌..... 24

 8.9 试验..... 25

 8.10 偏差 31

9 与电容器连接的滤波电抗器、阻尼电抗器和放电电抗器 32

 9.1 概述..... 32

 9.2 设计..... 32

9.3	术语和定义	33
9.4	额定值	34
9.5	耐受额定热短路电流和额定机械短路电流的能力	36
9.6	承受涌入或放电电流的能力	36
9.7	温升	37
9.8	绝缘水平	37
9.9	铭牌	37
9.10	试验	38
9.11	偏差	42
10	接地变压器(中性点耦合器)	42
10.1	概述	42
10.2	设计	43
10.3	术语和定义	43
10.4	额定值	44
10.5	耐受额定短时中性点电流的能力	45
10.6	温升	46
10.7	绝缘水平	46
10.8	铭牌	46
10.9	试验	47
10.10	偏差	51
11	消弧线圈	51
11.1	概述	51
11.2	设计	51
11.3	术语和定义	51
11.4	额定值	52
11.5	温升	53
11.6	绝缘水平	54
11.7	铭牌	54
11.8	试验	54
11.9	偏差	57
12	平波电抗器	57
12.1	概述	57
12.2	设计	57
12.3	术语和定义	58
12.4	额定值	59
12.5	温升	60
12.6	绝缘水平	60
12.7	铭牌	60
12.8	试验	61
12.9	偏差	67
附录 A (资料性附录)	本部分章条编号与 IEC 60076-6:2007 章条编号对照	68
附录 B (资料性附录)	本部分与 IEC 60076-6:2007 的技术性差异及其原因	70

附录 C (资料性附录) 电抗器磁化特性 73

附录 D (资料性附录) 并联电抗器操作及特殊应用的资料 79

附录 E (资料性附录) 三相电抗器的互电抗、耦合系数和有效阻抗 81

附录 F (资料性附录) 间隙铁心和磁屏蔽空心电抗器损耗的温度校正 86

附录 G (规范性附录) 干式电抗器匝间过电压试验 87

附录 H (资料性附录) 短路试验 88

附录 I (资料性附录) 电阻器——性能、参数和试验 89

参考文献 91

前 言

GB 1094《电力变压器》目前包含了下列几个部分：

- 第 1 部分：总则；
- 第 2 部分：温升；
- 第 3 部分：绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙；
- 第 4 部分：电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则；
- 第 5 部分：承受短路的能力；
- 第 6 部分：电抗器；
- 第 7 部分：油浸式电力变压器负载导则；
- 第 10 部分：声级测定；
- 第 101 部分：声级测定 应用导则；
- 第 11 部分：干式变压器。

本部分为 GB 1094 系列标准的第 6 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则编写。

本部分的前版标准代号为 GB/T 10229，对应的 IEC 标准代号为 IEC 60289。由于 IEC 有关电力变压器的标准代号现均调整为 IEC 60076 系列，为了与 IEC 的标准代号相协调且使用方便，本次修订也将标准代号按新 IEC 标准系列进行调整。

本部分代替 GB/T 10229—1988《电抗器》。

本部分与 GB/T 10229—1988 相比主要变化如下：

- a) 编写格式按 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》和 GB/T 20000.2—2009《标准化工作指南 第 2 部分：采用国际标准》的规定进行了修改；
- b) 标准名称由《电抗器》改为《电力变压器 第 6 部分：电抗器》；
- c) 增加了规范性引用文件；
- d) 扩大了电抗器的范围；
- e) 增加了各类电抗器的术语和定义的条款；
- f) 增加了符号与缩写；
- g) 补充了干式电抗器的使用条件，增加了其他特殊使用条件；
- h) 增加了设计、试验、偏差和应用；
- i) 增加了放电电抗器和高压直流输电用平波电抗器的有关技术内容，并对原标准中已有的各类电抗器的技术内容进行了调整；
- j) 原标准各篇中的“定义”改为“术语和定义”；
- k) 增加了附录。

本部分使用重新起草法修改采用 IEC 60076-6:2007《电力变压器 第 6 部分：电抗器》(英文版)。在附录 A 中列出了本部分章条编号与 IEC 60076-6:2007 章条编号的对照一览表。

考虑到我国国情，在采用 IEC 60076-6:2007 时，本部分做了一些修改。有关技术性差异已编入正文中并在它们所涉及的条款的页边空白处用垂直单线标识。在附录 B 中给出了这些技术性差异及其原因的一览表以供参考。

本部分对 IEC 60076-6:2007 进行了下列编辑性修改：

- a) “本国际标准”一词改为“本部分”；

- b) 删除了 IEC 60076-6:2007 的前言；
- c) 用小数点“.”代替作为小数点的逗号“,”。

本部分由中国电器工业协会提出。

本部分由全国变压器标准化技术委员会(SAC/TC 44)归口。

本部分起草单位：沈阳变压器研究院、顺特电气有限公司、北京电力设备总厂、特变电工沈阳变压器集团有限公司、保定天威保变电气股份有限公司、西安西电变压器有限责任公司、国网电力科学研究院、广州市番禺明珠电器有限责任公司、思源电器股份有限公司第一分公司、宁波宁变电气有限公司、保定保菱变压器有限公司、广东电网公司电力科学研究院、广州智光电气股份有限公司、特变电工衡阳变压器有限公司、中电电气集团。

本部分主要起草人：郭振岩、孙军、刘燕、李霞、任玉民、张喜乐、陈荣、陈江波、毛启武、侯建国、王辉、郑泉、徐林峰、易兆林、禹云长、徐子宏、张显忠。

本部分所代替的 GB/T 10229 于 1988 年首次发布，本次为第一次修订。

引 言

本部分的目的是为在该范围内的电抗器提供技术参数和试验的依据。本部分也为电抗器的某些应用提供重要信息,以帮助制定电抗器的技术规范。

本部分尽可能地参考了 GB 1094 其他部分中与电力变压器相关的章节。然而,由于电抗器与变压器有些本质上的区别,所以在电抗器的规范、试验和应用上需要有些特殊的考虑。本部分包括了这些考虑。

本部分的第 1 章至第 6 章适用于所有的电抗器,第 7 章至第 12 章对应于不同类型的电抗器。一般来说,第 7 章至第 12 章的每一章对应一类电抗器。

本部分的定义条款不止一个,第 3 章的一般定义适用于整个部分,第 7 章至第 12 章中的每一章规定了某一类型的电抗器及其定义,并只适用于该章节。

第 7 章至第 12 章有统一的结构。在该结构下,额定值条款给出用户需要提供的电抗器技术参数的基本信息。每章的试验条款规定了用于该类型电抗器的试验,并且还包括了一些附加项目,这些项目需要在订货时协商确定。

附录 C、附录 D、附录 E、附录 F、附录 H 和附录 I 提供了某类型电抗器使用和试验的更进一步的信息。附录 G 阐述了干式电抗器匝间过电压试验。

本部分包括了干式和液浸式电抗器,当某些章条只适用于某一种电抗器时,也做了澄清。

电力变压器 第6部分:电抗器

1 范围

GB 1094 的本部分适用于下列电抗器:

- 并联电抗器;
- 串联电抗器,包括限流电抗器、中性点接地电抗器、功率控制电抗器、电动机启动电抗器和电弧炉串联电抗器;
- 滤波(调谐)电抗器;
- 电容器阻尼电抗器;
- 电容器放电电抗器;
- 接地变压器(中性点耦合器);
- 消弧线圈;
- 高压直流输电和工业用平波电抗器。

但下列电抗器除外:

- 额定容量小于 1 kvar 的单相电抗器和额定容量小于 5 kvar 的三相电抗器;
- 各种专用电抗器,例如:高频的线路阻波器或安装于铁道车辆上的电抗器。

若小型电抗器或专用电抗器无相应标准时,本部分的全部或部分内容可适用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 1094.1—1996 电力变压器 第1部分:总则(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 1094.3—2003 电力变压器 第3部分:绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙(eqv IEC 60076-3:2000)

GB/T 1094.4—2005 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(IEC 60076-4:2002,MOD)

GB 1094.5—2008 电力变压器 第5部分:承受短路的能力(IEC 60076-5:2006,MOD)

GB/T 1094.7 电力变压器 第7部分:油浸式电力变压器负载导则(GB/T 1094.7—2008,IEC 60076-7:2005,MOD)

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

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

GB/T 4109 交流电压高于 1 000 V 的绝缘套管(GB/T 4109—2008,IEC 60137:2003,MOD)

GB/T 4797.7 电工电子产品环境条件分类 自然环境条件 地震振动和冲击(GB/T 4797.7—2008,IEC 60721-2-6:1990,IDT)

GB/T 7354 局部放电测量(GB/T 7354—2003,IEC 60270:2000,IDT)

GB/T 13499—2002 电力变压器应用导则(IEC 60076-8:1997,IDT)

GB/T 16927.1—1997 高压试验技术 第一部分:一般试验要求(eqv IEC 60060-1:1989)

GB/T 17211 干式电力变压器负载导则(GB/T 17211—1998,eqv IEC 60905:1987)
GB/T 20836 高压直流输电用油浸式平波电抗器
GB/T 20837 高压直流输电用油浸式平波电抗器技术参数和要求
GB/T 25092 高压直流输电用干式空心平波电抗器
JB/T 5895 污秽地区绝缘子使用导则(JB/T 5895—1991,neq IEC 60815:1986)
IEC/TR 60943:1998 电气设备部件许可温升相关导则 特指端子

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

本章给出的定义属于通用性的。在本文件其余各章中给出的补充定义则是针对某种具体类型的电抗器作出的专门规定,或者当它与电抗器类型有关时给出特别的含义。

本文件会经常引用 GB 1094 系列标准中有关变压器和变压器试验方面的技术条款。这些标准中的术语可能不总是与电抗器内容有严格的关系,例如:在电抗器上进行的“感应耐受电压试验”是这样一种试验,即绕组两端上的试验电压不是从另一个绕组“感应”过来的,而是直接由试验电源施加的。

3.1 电抗器的类型

3.1.1

并联电抗器 **shunt reactor**

接到电力系统中的相与地之间、相与中性点之间或相间的用以补偿电容电流的电抗器。

3.1.2

限流电抗器 **current-limiting reactor**

串联在电力系统中用以限制系统故障电流的电抗器。

3.1.3

中性点接地电抗器 **neutral-earthing reactor**

接到电力系统的中性点与地之间,能将系统接地故障时的线对地电流值限制到要求值以内的电抗器。

3.1.4

功率控制电抗器 **power flow control reactor**

串联在电力系统中用以控制功率的电抗器。

3.1.5

电动机启动电抗器 **motor starting reactor**

与电动机串联连接,用以限制电动机启动涌流值的电抗器。

3.1.6

电弧炉串联电抗器 **arc-furnace series reactor**

与电弧炉串联连接,用以提高金属熔融工作效率和减少电力系统电压波动的电抗器。

3.1.7

阻尼电抗器 **damping reactor**

与并联电容器串联连接,用以限制该电容器合闸涌流,限制近区发生故障或邻近电容器切换时产生的外界涌流或供电容器组消谐,以避免其与电力系统发生谐振的电抗器。

3.1.8

滤波电抗器 **filter reactor**

与电容器串联或并联连接,用以降低或阻断频率达 10 kHz 的谐波或控制信号(脉动信号)的电

抗器。

3.1.9

放电电抗器 **discharge reactor**

用于高压电力系统串联电容器组的旁路/放电回路中以限制故障电流的电抗器。

3.1.10

接地变压器(中性点耦合器) **earthing transformer (neutral coupler)**

接到电力系统中,为系统提供一个直接接地或经阻抗接地的中性点的三相变压器或电抗器。

注:接地变压器也可以向本地辅助负载供电。

3.1.11

消弧线圈 **arc-suppression reactor**

接到电力系统中性点与地之间,用以补偿单相接地故障(谐振—接地系统)时的相对地电容电流的电抗器。

3.1.12

平波电抗器 **smoothing reactor**

串联在直流系统中,用以降低交流电流成分和暂态过电流的电抗器。

3.2 其他定义

3.2.1

设备最高电压 **highest voltage for equipment**

U_m

按 GB 1094.3 的规定,决定电抗器绝缘水平值的基准电压。

3.2.2

磁屏蔽 **magnetic shield**

电抗器绕组外部用以控制磁通的铁磁部分。

注:它包括铁轭、无绕组的心柱、铁磁油箱磁分路等。

3.2.3

空心电抗器 **air-core reactor**

绕组内部或外部均不含有用以控制磁通的铁磁材料的电抗器(通常为干式电抗器)。

3.2.4

间隙铁心电抗器 **gapped-core reactor**

绕组内部有带间隙铁心的电抗器。

3.2.5

磁屏蔽空心电抗器 **magnetically-shielded air-core reactor**

绕组内部不含任何铁磁材料,但在绕组外部配有用以控制磁通的磁屏蔽的电抗器。

3.2.6

间隙铁心磁屏蔽空心电抗器的空心电抗 **air-core reactance of a gapped-core or magnetically-shielded air-core reactor**

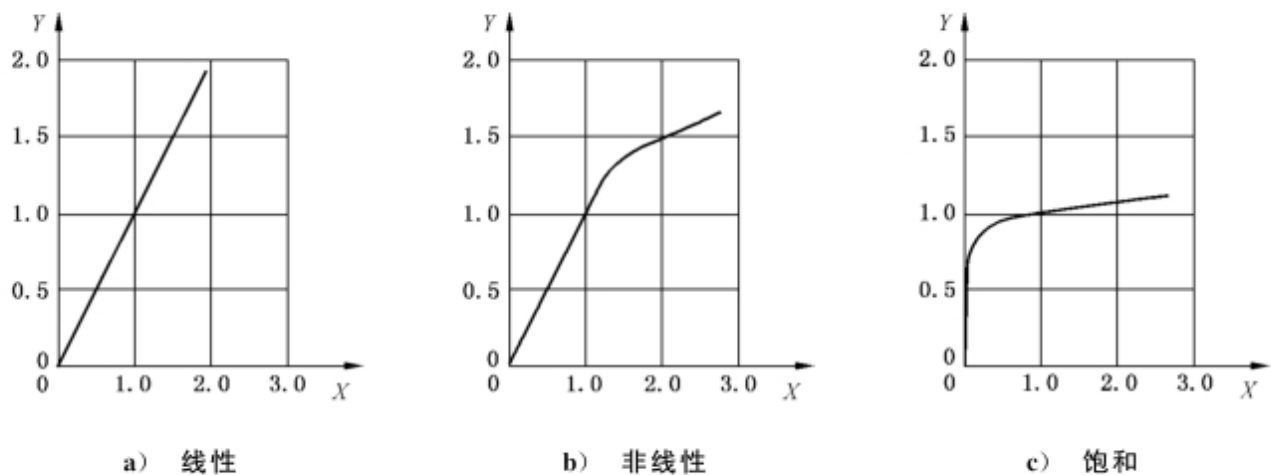
在一台含有控制磁通用的铁磁材料的电抗器中,当其所有铁磁部分中的磁通呈完全饱和时,由电抗器微分电感(见 C.4)计算出的电抗值。

3.2.7

磁化特性 **magnetic characteristic**

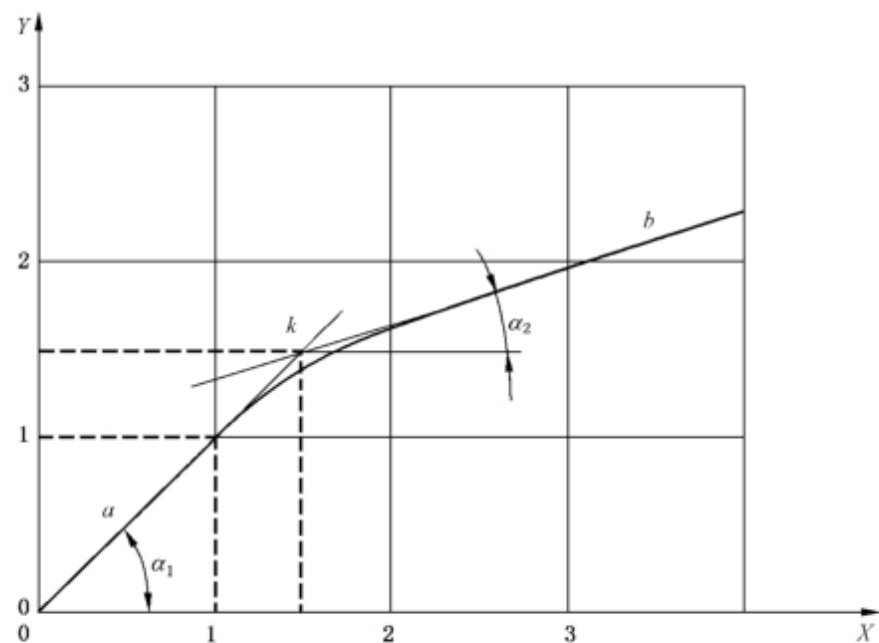
电抗器的磁化特性是指电抗器绕组的磁链与电流之间的关系。

注:磁化特性可以是如图 1a)所示的线性特性、如图 1b)所示的非线性特性或如图 1c)所示的饱和特性。



图中：
X 轴：以额定电流为基准值的瞬时电流标么值。
Y 轴：以额定电流下的磁链为基准值的瞬时磁链标么值。

图 1 电抗器磁化特性类型



图中：
X 轴：以额定电流为基准值的瞬时电流标么值。
Y 轴：以额定电流下的磁链为基准值的瞬时磁链标么值。
 α_1 ：特性曲线非饱和部分斜角(微分电感)。
 α_2 ：特性曲线饱和部分斜角(微分电感)。
 k ：饱和拐点,两直线 a 和 b 的交点。

图 2 非线性磁化特性曲线

3.2.8

线性电抗器 linear reactor

当电流或电压在一定范围内,电抗(对于平波电抗器则指电感)是一个常数,且其偏差符合各有关章节规定的电抗器。

注：线性电抗器如果没有铁磁部分,则具有如图 1a)所示的线性磁化特性;如果配置有铁心或磁屏蔽,则具有图 1b)所示的非线性磁化特性。

3.2.9

饱和电抗器 **saturated reactor**

电抗值被专门设计成随运行电压或电流而变化的电抗器。

注：图 1c)为具有磁饱和特性的电抗器的示例。

3.2.10

工频 **power frequency**

电抗器所安装电力系统中的额定频率。

3.2.11

参考温度 **reference temperature**

对于液浸式电抗器,参考温度是 75 ℃;对于干式电抗器,按绝缘等级规定的参考温度见 GB 1094.11。

注：对于干式电抗器,如果在正常运行时的温升明显低于相应绝缘等级的规定值时,则需要协商降低参考温度。

4 符号与缩写

符 号	含 义	单 位
f_r	额定频率(见注)	Hz
f_{rd}	额定放电频率	Hz
f_{rIN}	额定涌流频率	Hz
f_{rt}	额定调谐频率	Hz
I_{eq0}	工频等效电流	A
I_d	额定持续直流电流	A
I_h	h 次谐波下的谐波电流	A
I_{Nr}	额定持续中性点电流	A
I_{NSTr}	额定短时中性点电流	A
I_{MSCr}	额定机械短路电流(动稳定电流)	A
I_r	额定电流(见注)	A
I_{rd}	额定放电电流	A
I_{rIN}	额定涌入电流	A
I_{SCr}	额定热短路电流(热稳定电流)(见注)	A
I_T	等效直流试验电流	A
I_{test}	试验电流	A
I_{STr}	额定短时电流	A
k	耦合系数(见注)	
L_{inc}	增量电感	H
L_r, L_{SCr}	额定电感(见注)	H
Q_l	品质因数	
R	直流电阻	Ω
T_{NSTr}	额定短时中性点电流持续时间	s
T_r	额定电流持续时间	s

符 号	含 义	单 位
T_{SCr}	额定热短路电流持续时间	s
T_{STr}	额定短时电流持续时间	s
U_{ac}	交流耐受电压	V
U_{d}	额定直流电压	V
U_{dc}	直流耐受电压	V
U_{dmax}	最高持续直流电压	V
U_{m}	设备最高电压(见 GB 1094.3—2003 中的 3.1)	V
U_{max}	最高运行电压、最高持续电压(见注)	V
U_{pr}	极性反转试验电压	V
U_{r}	额定电压(见注)	V
U_{test}	试验电压	V
X_0	零序电抗	Ω
X_{m}	互电抗	Ω
$X_{\text{r}}, X_{\text{SCr}}$	额定电抗(见注)	Ω
Z_0	零序阻抗	Ω
Z_{r}	额定连续阻抗	Ω
Z_{r1}	额定单相连续阻抗	Ω
Z_{r3}	额定三相连续阻抗	Ω
Z_{SCr}	额定短路阻抗	Ω
Z_{SCr1}	额定单相短路阻抗	Ω
Z_{SCr3}	额定三相短路阻抗	Ω
Z_{STr}	额定短时阻抗	Ω
Z_{STr1}	额定单相短时阻抗	Ω
Z_{STr3}	额定三相短时阻抗	Ω
注：这些额定值定义，在涉及具体类型电抗器的有关条款中给出。		

5 使用条件

5.1 概述

电抗器的正常使用条件和特殊使用条件分别与 GB 1094.1 和 GB 1094.11 的规定相同。

GB 1094.1 和 GB 1094.11 规定的正常使用条件中未包括的使用条件，用户应在询价时提出。

注：这些条件举例如下：

- 最高或最低环境温度超过 GB 1094.1 规定限值；
- 海拔超过 GB 1094.1 规定限值；
- 考虑电抗器外绝缘或电抗器自身对环境污染等级(见 GB/T 4109 和 JB/T 5895)的环境因素。

例如：

- 有害的烟雾和蒸气；

- 过量的或研磨的粉尘；
- 工业污染；
- 盐雾；
- 湿热性气候。

这些与干式电抗器特别有关。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、防护罩等)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电抗器,经供需双方协商,应按 GB/T 4797.7 的规定,用计算的方法验证其抗震能力。

6 设计、试验、偏差和应用

电抗器试验的实施,一般遵从 GB 1094 对变压器所作出的相应的规定,但在本部分列出了适用于某些电抗器的特殊因素,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在投标时向用户说明。

无论其实际试验水平是否能达到规定的水平,电抗器都应设计成能承受 GB 1094 系列标准中所规定的试验水平。当实际试验水平低于 GB 1094 给出的水平时,制造方应向用户证明:通过计算或参考类似的已被验证的设计,电抗器的绝缘、间隙距离及其他有关因素均应能完全满足 GB 1094 规定的试验水平。

在某些条件下,为了满足全试验水平的要求,可以使用一个带试验铁心的试验绕组进行试验。

试验时,电抗器的安装状态应与其运行时相同,凡对试验结果有影响的因素均应予以关注。试验按 GB 1094.1—1996 中 10.1 进行,但是,干式电抗器试验可以在任何环境温度下进行。

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电抗器的这些试验。

用模拟式瓦特表测量损耗时,由于电抗器的功率因数通常很低,可能会带来相当大的误差。用磁通补偿式电流互感器、电容式电压互感器和数字式瓦特表测量损耗可以得到所需要的准确度。使用合适的电桥法也可得到所要求的准确度。更多内容见 GB/T 13499—2002 的第 10 章。如用户有要求时,应就所推荐方法的准确度提出满意的文件。

干式电抗器通常不是置于封闭的钢箱或钢外壳内,故电抗器总装配体各个部分均应看成是带电体。因此,当电抗器在运行时应考虑如何避免人身与电抗器发生偶然的接触。如用户特别要求,须将电抗器安置在高架位置时,应在投标时阐明。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,制造方应提供一张电抗器周围区域的磁场强度分布图。

干式空心电抗器附近处的磁场强度,可能高到足以使位于该处的金属体发热和受到一定的作用力。如果需要,制造方应提供一个适当的磁间距的指导原则。

在最高环境温度下,干式电抗器绕组端子的温度不应超过表 1 规定的限值。

表 1 干式电抗器绕组端子的温度限值

端子板材质种类	温 度
铜、铜合金、铝和铝合金制作的裸露端子	90 ℃
铜、铜合金、铝和铝合金制作的镀锡端子	105 ℃
铜、铜合金、铝和铝合金制作的镀银或镀镍端子	115 ℃

更多的信息详见 IEC/TR 60943。

各额定值和规定值的偏差见有关条款规定。对其他需要保证的参数,如果合适,应参考 GB 1094.1。

注:其他偏差可在询价或订货时规定。

7 并联电抗器

7.1 概述

本章阐述了对接到电力系统中的相与地之间、相与中性点之间或相间的用以补偿电容电流的电抗器的要求。在额定电压下吸收的无功功率可以是固定的,或者可以通过辅助的方法进行调整:

- 以电力电子装置实施相位控制(例如:静止无功补偿);
- 铁心直流励磁;
- 有载或无励磁分接开关进行绕组分接调节。

注:特殊应用的内容参见附录 D。

7.2 设计

按设计和安装不同,电抗器分为:

- 单相或三相;
- 干式或液浸式;
- 空心或间隙铁心式;
- 带或不带磁屏蔽;
- 户内或户外式;
- 电抗固定或可调式;
- 线性或饱和式。

用户有必要知道电抗器的磁化特性,如果要求,制造方应提供。磁化特性可以通过测量或通过计算得到。详情参见附录 C。

7.3 术语和定义

下列术语和定义适用于本章。

7.3.1

额定电压 **rated voltage**

U_r

额定频率下,在三相电抗器的一个绕组的线端之间或在单相电抗器的一个绕组的端子之间施加的电压。

注:用单相电抗器联结成三相星形电抗器组时,单相电抗器的额定电压用分数表示,其分子表示线对线电压,分母为 $\sqrt{3}$ 。例如:

$$U_r = \frac{525}{\sqrt{3}} \text{ kV}$$

7.3.2

最高运行电压 **maximum operating voltage**

$U_{\max}$

在额定频率下,电抗器能够长期工作的最高电压。

注: $U_{\max}$ 不同于 U_m (见 3.2.1),但在特殊情况下,可能会相同。

7.3.3

额定容量 rated power

在额定电压和额定频率下,并联电抗器的无功功率。见 7.4.3 中的注。

如果电抗器的电抗可调,除非另有规定,额定容量指最大无功功率。

注:如果电抗器有分接,额定容量指匝数最少的分接位置。

7.3.4

额定电流 rated current
 I_r

由额定容量和额定电压推导出的电抗器线电流。

注:用单相电抗器联结成三相三角形电抗器组时,单相电抗器的额定电流用分数表示,其分子相应于线电流,分母为 $\sqrt{3}$ 。例如:

$$I_r = \frac{500}{\sqrt{3}} \text{ A}$$

对用于静止无功补偿、具有电流相位控制的电抗器,如无另行规定,额定电流指满负载电流,该电流是正弦波。

7.3.5

额定电抗(额定电感) rated reactance (rated inductance)
 $X_r(L_r)$

用欧姆/相表示的额定电压和频率下的电抗。它是由额定容量和额定电压导出的。对电流相位控制的电抗器,应标出额定电感($L_r = X_r / (2\pi f_r)$)。

7.3.6

三相星形联结电抗器的零序电抗 zero-sequence reactance of a three-phase star-connected reactor
 X_0

为额定频率下的每相电抗值,等于三相星形联结绕组各线端并在一起时,线端与中性点之间测得的电抗乘以 3 所得的值。比率 X_0/X_r 取决于电抗器的设计,详情参见附录 E。

7.3.7

三相电抗器的互电抗 mutual reactance of a three-phase reactor
 X_m

用欧姆/相表示的额定频率下,开路相的感应电压与励磁相中的电流的比值。互电抗通常用额定电抗的标幺值表示。

7.3.8

涌流水平 inrush current level

电抗器励磁时最大峰值电流与 $\sqrt{2}$ 倍额定电流的比值。

7.4 额定值

如无另行规定,并联电抗器的额定值按连续工作条件确定。

如无另行规定,对用于静态无功补偿、具有电流相位控制的电抗器,其规定值应是折算到正弦波形

的满载电流下的值。

7.4.1 额定电压

额定频率下的额定电压 U_r 由用户提供。除非 7.8 中另有规定,额定电压是设计、制造保证值和试验的基础。额定电压一般就是系统的运行电压。

7.4.2 最高运行电压

最高运行电压 U_{max} 由用户提供。它不能低于电抗器运行时的最高持续运行电压。它可能等于额定电压 U_r 。

7.4.3 额定容量

额定容量由用户提供。

注:当三个单相电抗器联结成三相电抗器组时,额定容量通常指单相电抗器的容量。如果指的是三相容量,则需明确说明。

7.4.4 三相星形联结电抗器的零序电抗

如对比值 X_0/X_r 有任何特殊要求,用户在询价时应说明,并且订货时应由供需双方同意。

注:零序电抗的详细设计依据参见附录 E。

7.4.5 三相电抗器的互电抗

如果对系统很重要,互电抗 X_m 的最大值可以由用户规定。

注 1:下列互电抗可以忽略:

- 三台单独的单相液浸式电抗器组成的电抗器组;
- 三台水平布置的单相空心(干式)电抗器组成的电抗器组;
- 具有供零序磁通流通的磁屏蔽的三相电抗器。

注 2:互电抗的详细设计依据参见附录 E。

7.4.6 涌流水平

如无另行规定,最大峰值涌流计算以额定电压 U_r 、额定频率以及最严酷的开关合闸角度为基础。用户要求时,制造方应提供合闸涌流水平。

注:关于涌流的进一步信息参见 C.6。

7.4.7 并联电抗器的线性度

如无另行规定,电抗器在 U_{max} 范围内应该是线性的,偏差应符合 7.9.3 的规定。此外,也可规定在 U_r 或 U_{max} 时的最大谐波电流与基波的百分比。

7.5 温升

在最高运行电压下的温升限值应符合 GB 1094.2 和 GB 1094.11 的要求。

7.6 绝缘水平

绝缘水平要求见 GB 1094.3。

7.7 铭牌

每台电抗器均应提供由不受气候影响的材料制成的铭牌,并安装在明显可见的位置。铭牌上应标

出下述各项,所示项目应该用耐久方法刻出(如用蚀刻、雕刻或打印法)。

- 电抗器型号;
- 户内或户外用;
- 本部分代号;
- 制造方名称;
- 出厂序号;
- 制造年月;
- 绝缘水平;
- 相数;
- 额定容量(如果有分接,应标出每个分接的容量);
- 额定频率;
- 额定电压;
- 额定电流;
- 最高运行电压;
- 绕组联结(适用时);
- 额定电压及频率下的电抗或额定电压下的电感的实测值;
- 冷却方式;
- 绝缘耐热等级(仅适用于干式电抗器);
- 顶层油温升和绕组平均温升(仅适用于液浸式电抗器);
- 总质量;
- 运输质量(液浸式电抗器);
- 器身质量(液浸式电抗器);
- 绝缘液体质量(适用时);
- 非矿物油时绝缘液体的种类(适用时);
- 分接和互感器的接线图(适用时);
- 分接开关类型(如有载、无励磁,适用时);
- 零序电抗的实测值(要求时适用);
- 互电抗的实测值(要求时适用)。

7.8 试验

7.8.1 概述

例行试验、型式试验和特殊试验的一般要求见 GB 1094.1。

7.8.2 例行试验

应进行下列例行试验:

- 绕组电阻测量(GB 1094.1);
- 电抗测量(7.8.5);
- 环境温度下的损耗测量(7.8.6);
- 绝缘试验(7.8.10);
- 间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器绕组对地的绝缘电阻测量(作为参考值,用于与以后的现场测量值进行比较,此处不给出限值);
- 液浸式电抗器电容及介质损耗因数($\tan\delta$)测量(作为参考值,用于与以后的现场测量值进行比

较,此处不给出限值)。

7.8.3 型式试验

应进行下列型式试验:

- 温升试验(7.8.14);
- 间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器振动测量(7.8.13);
- 声级测定(7.8.12);
- 绝缘试验(7.8.10);
- 风扇和油泵所消耗功率的测量(如果有)。

7.8.4 特殊试验

当用户特殊要求时,应进行下列特殊试验:

- 三相电抗器零序电抗测量(7.8.8);
- 三相电抗器互电抗测量(7.8.9);
- 谐波电流测量(7.8.7);
- 间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器接近参考温度下的损耗测量(7.8.6);
- 间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器的线性度测定(7.8.5.3);
- 间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器磁化特性测量(7.8.11);
- 绝缘试验(7.8.10);
- 接近运行温度下的声级测定(7.8.12)。

7.8.5 电抗测量及电抗线性度的测定

7.8.5.1 方法

- a) 电抗测量在额定频率、施加近似正弦波电压下进行;
- b) 电抗由施加的电压和实测电流(方均根值)得到,并假定阻抗中的电阻成分可以忽略;
- c) 三相电抗器的电抗应在对称三相电压施加在电抗器线端上时测量。

电抗值为:

$$\frac{\text{线间所施加电压}}{\text{实测线电流平均值} \times \sqrt{3}}$$

注1:应考虑到试验时流过并联电抗器的零序电流会影响试验结果。

注2:对有零序磁通磁屏蔽的三相电抗器,经供需双方协商,电抗测量可以采取单相励磁的方法。在这种情况下,需对低压下单相和三相测量值进行比较,并给出双方协商的、适当的校正系数。

7.8.5.2 额定电压下电抗测量(例行试验)

除空心电抗器外,电抗测量应按照7.8.5.1规定在额定电压和额定频率下进行。对于空心电抗器,测量可在额定频率、电压不高于额定电压的任何电压下进行。

在某些情况下,如电抗器具有超大额定容量和超高电压时,在额定电压下测量可能是很困难的。对线性的间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器来说,试验电压可以是试验室可得到的最高电压,但至少为 $0.9U_r$ 。此时,电抗器应呈现7.8.5.3所规定的线性。如果制造方不能在 U_r 下测量,则需要在投标说明能够达到的试验水平。

7.8.5.3 间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器的线性度测定(特殊试验)

电抗测量应按照7.8.5.1规定的方法,在不超过 $0.7U_r$ 、 $0.9U_r$ 、 U_r 和 U_{max} 或其他不高于最高运行电压,或在供需双方商定的略高于这些电压的电压下测量。

如果试验设备不能满足对试验电压的要求,或希望确定高于 $U_{\max}$ 时的线性度,这时试验就要在降低频率下进行(相应的电压也降低)。电抗器的线性度也可通过按 7.8.11 所进行的磁化特性的测量及电抗计算来表示。

注:进一步信息也可参见附录 C。

7.8.6 损耗测量(例行试验、特殊试验)

7.8.6.1 概述

损耗指的是在额定频率和参考温度下以额定电流运行时的损耗。损耗测量值应校正到额定电流和参考温度下。

需要时,应对所采用方法的测量准确度提供说明文件。

三相电抗器损耗测量应在三相励磁下进行。

注 1: 对低损耗三相电抗器来说,单个相的损耗测量值可能不相等或某一相为负值。总损耗为三相损耗值的算术和。

注 2: 对有零序磁通磁屏蔽的三相电抗器,如果供需双方有特殊协议,损耗测量可以在单相励磁下进行。在此情况下,必须对低压下单相和三相测量值进行比较,并就合适的校正系数达成共识。

7.8.6.2 空心电抗器

空心电抗器可在额定频率下且高于额定电压的任何电压下测量。测量的损耗乘以额定电流与实测电流(降低电压下的)之比的平方就是额定电流下的损耗。

电抗器周围的金属件对损耗测量有很大影响。所以,试验时,制造方提供的属于支撑结构的金属件应装好,尽量避免有其他金属件。

总损耗包括电阻损耗和附加损耗。电阻损耗部分等于 $I_r^2 R$, R 是测得的直流电阻, I_r 是额定电流。附加损耗部分是总损耗与电阻损耗 $I_r^2 R$ 之差。

损耗测量可在任何方便的环境温度下进行,然后按照 GB 1094.1 校正到参考温度。

7.8.6.3 间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器

对于间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器,损耗应在额定电压和额定频率下测量。电压用平均值电压表测量(读数为方均根值)。如果在额定电压下,测得的电流不是额定电流,则测得的损耗应通过乘以额定电流与实测电流之比的平方来校正到额定电流下。

在某些情况下,如超大额定容量和超高电压,试验条件很难满足。这时,额定电流下的损耗就等于测量的损耗乘以额定电流与实测电流(降低电压下的)之比的平方。试验电压应不低于 $0.9U_r$ 。

总损耗包括电阻损耗、铁损和附加损耗。电阻损耗部分等于 $I_r^2 R$, R 是测得的直流电阻, I_r 是额定电流。铁损和附加损耗从测量上无法分开,铁损和附加损耗之和是总损耗与电阻损耗 $I_r^2 R$ 之差。

损耗测量可以做为例行试验在工厂环境温度下进行,然后校正到参考温度。电阻损耗按照 GB 1094.1 校正到参考温度。通常不方便将铁损和附加损耗校正到参考温度。因此,通常假定铁损和附加损耗与温度无关。这样假定通常会使参考温度下的损耗略高于实际损耗。

当损耗测量作为特殊试验时,要求测量温度接近参考温度,损耗测量可以与温升试验同时进行。但还应在环境温度下做同一试品的损耗的例行试验,以便得到总损耗的温度系数(假定线性变化)。相同设计的电抗器的损耗值可以利用从这个试品上得到的温度系数校正到参考温度。

注:附录 F 给出了损耗的温度校正的例子。

7.8.7 间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器的谐波电流测量(特殊试验)

所有三相中的谐波电流是在额定电压或按要求的最高运行电压下,用谐波分析仪测量。各次谐波

的幅值用基波的百分数表示。如果试验电压达不到要求,额定电压或要求的最高运行电压下的谐波电流可以从测得的磁化特性或通过计算得到。磁化特性的详情,参见附录 C。

同时还应测量施加电压的谐波。

注 1: 除非用户特殊要求,线性并联电抗器可以不作此试验。

注 2: 只有当施加电压的畸变率(见 C.5)小于 2% 时,测量才有效。

7.8.8 三相电抗器零序电抗测量(特殊试验)

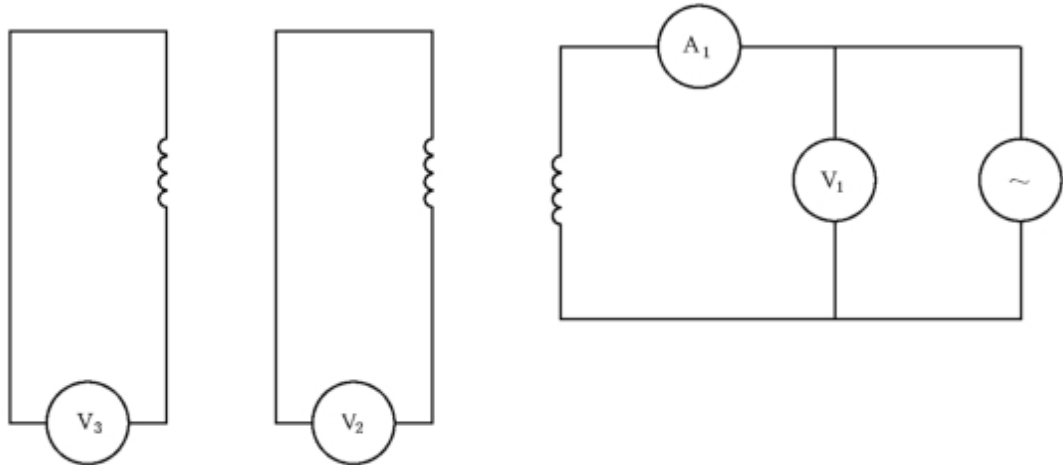
见 GB 1094.1。

本测量应在使中性点电流不超过额定相电流的电压下进行。应限制中性点电流和施加的时间,以免金属结构件过热。

7.8.9 三相电抗器互电抗测量(特殊试验)

如无另行规定,间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器的测量应按图 3 在额定电压下进行。其他电抗器测量可在任何方便的试验电压下进行。

应限制中性点的电流和施加电流的时间,以免金属结构件过热。



图中:

V_1 、 V_2 、 V_3 : 电压表读数;

A_1 : 电流表读数;

互电抗 X_m : 分别为 V_2/A_1 或 V_3/A_1 。

图 3 三相电抗器或三台单相电抗器三相组的互电抗测量

7.8.10 绝缘试验

7.8.10.1 概述

并联电抗器的绝缘试验一般按 GB 1094.3、GB/T 1094.4 和 GB 1094.11 中变压器的相关规定进行。

7.8.10.2 外施耐压试验(例行试验、特殊试验)

对于间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器,作为例行试验。参见 GB 1094.3—2003 的第 11 章。

对于干式空心电抗器作为特殊试验。该类型电抗器通常采用标准支柱式绝缘子或母线支柱绝缘子做为电抗器的支撑和绕组间及对地绝缘以及两个或多个绕组叠装起来时的相间绝缘,所以,试验是对支柱绝缘子的试验,只有特殊要求时才进行。

注: 如制造方在投标时未特别标明,则认为支柱绝缘子的设计按 IEC 60273 的规定,试验按 IEC 60168 的规定。

7.8.10.3 感应耐压试验(例行试验)

供需双方在订货时应就 GB 1094.3 规定的试验电压 U_1 和 U_2 及相关试验方法达成一致。

电抗器的感应耐压试验在高电压下需要大的无功功率,必须提供合适的高压且额定容量足够的电源。

此外,按照 GB 1094.3 所要求的试验水平,对大型电抗器做感应耐压试验也许是不可能的。制造方应在投标时说明可达到的极限试验水平。此时,如果供需双方同意,电抗器的感应耐压试验可以在较低的试验水平上进行,对 $U_m < 170$ kV 的电抗器,用额外的雷电冲击试验考核绝缘耐受能力,对 $U_m \geq 170$ kV 的电抗器,用额外的雷电冲击及操作冲击试验考核绝缘耐受能力。

对三相无零序磁通磁屏蔽空心电抗器所做的单相试验,还应做进一步特别的考虑。

$U_m \leq 72.5$ kV 的全绝缘电抗器应按照 GB 1094.3—2003 中 12.2.1(短时感应耐压试验)进行试验。

72.5 kV $< U_m \leq 170$ kV 的全绝缘电抗器应按照 GB 1094.3—2003 中 12.2.2(短时感应耐压试验)进行试验。单相电抗器的试验电压 U_1 应等于两倍的绕组额定电压。

如果对容量和电压 U_1 的要求超过了试验站的能力,制造方应在投标时说明。这样试验电压 U_1 可以降低或忽略,所需延长的试验时间由供需双方商定。

72.5 kV $< U_m \leq 170$ kV 的分级绝缘电抗器应按照 GB 1094.3—2003 中 12.3a) 和 12.3b) (短时感应耐压试验) 进行试验。按照 12.3a) 进行相对地试验时,用于各种类型电抗器的励磁回路见图 4。这时,中性点的电压是 $1/3 U_{\text{test}}$ 。如果是特殊设计的有零序磁通磁屏蔽的电抗器,也可采用图 6 的试验回路。这时,中性点没有电压。

如果供需双方同意,按照 GB 1094.3—2003 中 12.3b) 的三相试验可以用图 5 的三个单相试验代替。此时,试验电压 U_1 等于 $2U_r/\sqrt{3}$ 。

注 1: 试验中的相间电压比三相试验中的电压低,该相间电压为三相试验时的 $1.5/\sqrt{3}$ 倍。

对单相电抗器,只进行 GB 1094.3—2003 中 12.3a) 的试验。试验时中性点通常接地,可通过将中性点接到一台辅助增压变压器上来提高中性点电压,以使绕组上的试验电压不超过 2 倍的绕组额定电压。此时,中性点应进行相应的绝缘。

如果这些试验对容量和电压的要求超过了试验站的能力,制造方应在投标时说明。在此情况下,只有进行 GB 1094.3—2003 中 12.3b) 的试验时, U_1 可降低或忽略,所需延长的试验时间由供需双方商定。

$U_m > 170$ kV 的分级绝缘电抗器应按照 GB 1094.3—2003 中 12.4(长时感应电压试验)进行试验。三相电抗器可以进行三相试验或三个单相试验,试验回路见图 5。如果这些试验对容量和电压的要求超过了试验站的能力,经供需双方商定,短时感应耐压试验电压 U_1 可以降低或忽略,并延长试验时间。

如果这些试验对容量和电压的要求超过了试验站的能力,对有零序磁通磁屏蔽的电抗器,经供需双方商定,可按图 6 进行单相试验。

注 2: 图 6 的回路 with GB 1094.3—2003 中 12.4 的图 3 并不一致。图 6 回路中,绕组两端的感应电压等于按 12.4 试验时的感应电压,但不同相的绕组间的电压只有按 12.4 试验中感应电压的 $2/3$,略低于 U_m 。

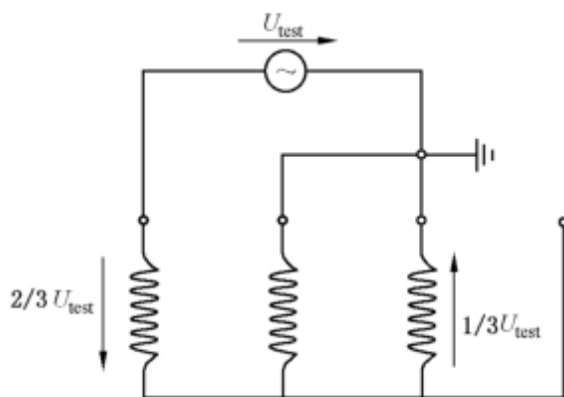


图 4 单相励磁相对地试验线路

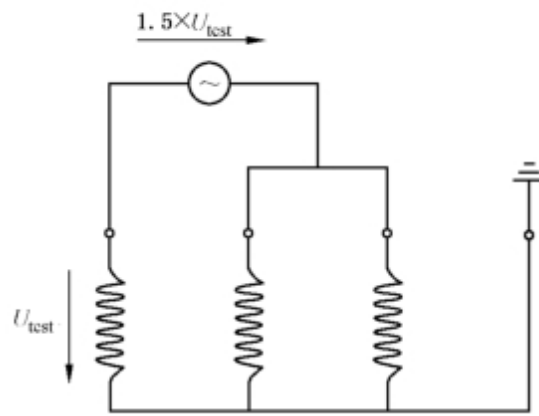


图 5 单相励磁相对相试验线路

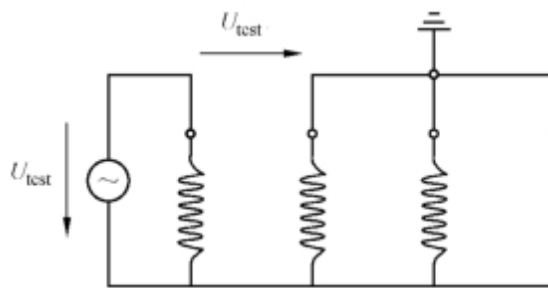


图 6 带零序磁通磁屏蔽的电抗器单相励磁线路

干式电抗器应做为单相产品进行试验。经供需双方同意,感应耐压试验可以用额外的雷电冲击试验代替。如无另行规定, $U_m \leq 40.5 \text{ kV}$ 的产品可用附录 G 中的匝间过电压试验代替。

7.8.10.4 雷电冲击试验(例行试验)

对于液浸式电抗器,雷电冲击(包括截波)试验作为例行试验。按 GB 1094.3—2003 的第 13 章、第 14 章和 GB/T 1094.4—2005 的第 7 章进行。

对于干式电抗器,雷电冲击试验按 GB 1094.3—2003 的第 13 章和 GB/T 1094.4—2005 的第 7 章进行。如无另行规定, $U_m \leq 40.5 \text{ kV}$ 的产品也可用附录 G 中的匝间过电压试验代替。

7.8.10.5 干式电抗器雷电冲击湿试验(特殊试验)

如有规定,雷电冲击湿试验应按 7.8.10.4 进行,喷水按 GB/T 16927.1—1997 的第 9 章进行。

7.8.10.6 操作冲击试验

见 GB 1094.3—2003 的第 15 章和 GB/T 1094.4—2005 中 8.3。

注:通常情况下,试验时难以获得满足要求的波形。当制造方预计难以获得要求的波形时,供需双方应尽早进行协商。

对三相电抗器来说,操作冲击试验时相间的压差将小于 1.5 倍试验电压。电抗器设计应满足能承受 1.5 倍相间试验电压。

7.8.11 磁化特性测量(特殊试验)

当电抗器的磁化特性为非线性(图 1b))或饱和(图 1c))时,可以规定对磁化特性进行测量。

由于电抗器绕组的磁链不能直接测量,因而,测量磁化特性应采用间接方法。测量方法包括额定频率下电压和电流的瞬时值测量、降低频率下电压和电流的瞬时值测量或直流放电试验方法(参见附录

C),也可采用具有同等准确度的其他测量方法。

注:如果电抗器没有零序磁通的磁屏蔽(通常为三柱电抗器),则应考虑单相测量的磁路可能不能代表三相运行条件。

7.8.12 声级测定(型式试验、特殊试验)

测量应在额定电压和额定频率下进行。

试验一般应按照 GB/T 1094.10 进行。在某些情况下,如果试验用升压变压器的放置靠近被试电抗器,则电抗器的噪声可能会受到升压变压器的影响。可采用声强测量法以去掉任何干扰声源。

测量可在油、绕组或铁心处在任何温度下进行,但环境温度不应低于 5℃。如果该试验被做为特殊试验进行,则试验应在油、绕组和铁心尽可能接近运行温度下进行,最好与温升试验同时进行。

注 1:电抗器的噪声水平可能受温度影响。如果电抗器的运行温度变化大,可规定在两个或多个温度条件下进行声级测定。

对于干式电抗器进行测量时,应保证对绕组有足够的安全距离。GB/T 1094.10—2003 的第 8 章所述的规定轮廓线应距绕组表面 2 m,规定轮廓线应位于绕组高度一半的水平面上。

注 2:对于大容量电抗器,如果试验无法在工厂进行,则在订货时经供需双方同意,试验可在现场进行。

7.8.13 振动测量(型式试验)

7.8.13.1 概述

间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器的设计和结构应避免振动产生的有害应力影响。为保证性能,在控制振动方面主要考虑的区域如下:

- a) 液浸式电抗器
 - 器身的振动;
 - 油箱振动,应力会影响到板、撑条和焊缝;
 - 仪表、附件和冷却设备的振动。
- b) 干式电抗器(空心电抗器除外)
 - 夹件的振动;
 - 仪表、附件和风机(如果有)的振动。

7.8.13.2 试验条件

被试电抗器应按照运行条件完全装配好,包括冷却设备、仪表、附件都应安装并连接好。

注:如果电抗器装有箱壁式隔音罩,经供需双方同意,试验可在没有隔音罩时进行。

电抗器应安装在为底座提供合适支撑的平台上,以消除油箱的非正常应力。

电抗器应在额定频率及最高运行电压下励磁。三相电抗器需三相励磁。当试验容量不能满足最高运行电压和(或)三相励磁要求时,制造方需向用户证明,在降低电压条件下做的试验,其结果的准确度与规定条件下等同。试验首选在运行温度下进行,但也可在环境温度下进行。

7.8.13.3 测量方法

电抗器的振动由传感器、光学探头或类似的测量装置测量。位移的峰-峰值由直接测量得到,或由测得的加速度或速度计算得到。两倍额定频率下的测量准确度应不超过 10 μm 。

对液浸式电抗器,测量应在油箱四壁上进行,测量点数应足够,以保证测得振动的最大值。

对于干式电抗器,测量应在上夹件进行,测量点数应足够,以保证测得振动的最大值。

装配在油箱、夹件上的设备的振动也要测量或观察。

7.8.13.4 最大振动水平

对于液浸式电抗器,箱壁的最大振幅不应大于 $200\ \mu\text{m}$ (峰-峰值)。

对于干式电抗器,夹件的最大振幅不应大于 $100\ \mu\text{m}$ (峰-峰值)。

制造方应证明试验时测量或观察到的振动,对安装在油箱、夹件上的设备的可靠性和性能没有长期的影响。

7.8.14 温升试验(型式试验)

试验一般按照 GB 1094.2 进行。对于干式电抗器,温度等级限值参照 GB 1094.11。

试验应在最高运行电压 U_{max} 和额定频率下进行。

在某些情况下,如超大容量和超高电压,试验条件难以达到。在这种情况下,试验可以在降低电压下进行,但不低于 0.9 倍额定电压 U_r 。试验水平由制造方在标书中说明,并应在订货时由供需双方达成共识。

温升应校正到最高运行电压下。

对液浸式电抗器,油温升应乘以 $\left[\frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{test}}}\right]^{2x}$,绕组对油温升应乘以 $\left[\frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{test}}}\right]^y$, x 和 y 值如下选取:

——对于 ON 冷却电抗器, $x=0.8$; $y=1.3$;

——对于 OF 冷却电抗器, $x=1.0$; $y=1.3$;

——对于 OD 冷却电抗器, $x=1.0$; $y=2.0$ 。

注 1: 对带有零序磁通磁屏蔽的三相电抗器,如果供需双方同意,温升试验可通过在绕组上施加直流电流进行。油温升测量时,施加与按 7.8.6.1 确定的校正后的损耗相对应的直流电流。在最高电压 U_{max} 下的单相交流试验用于测绕组对油温升。

对于干式电抗器来说,绕组对环境温度的温升应乘以 $\left[\frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{test}}}\right]^y$, y 值如下选取:

——对于 AN 冷却电抗器, $y=1.6$;

——对于 AF 冷却电抗器, $y=1.8$ 。

在大多数情况下,因为试验时的环境温度通常低于设计值,所以稳定状态下的电抗器的总损耗在一定程度上小于参考温度下的值。此影响可以忽略。

温升试验时,应注意采用合适的连接件和导线将电抗器接到电源上。这对于干式空心电抗器特别重要。

对于干式空心电抗器,如果要求,在温升试验时应测量电抗器端子的温升。为得到有效的端子温升测量值,用户应提供一个连接件和至少 $1\ \text{m}$ 的现场用的导线,供制造方温升试验时用。端子温升限值见第 6 章(也可见 IEC/TR 60943)。

7.9 偏差

7.9.1 概述

如无另行规定,带分接的并联电抗器的偏差指主分接的偏差。

7.9.2 额定电压和频率下的电抗偏差

偏差不应超过额定电抗值的 $\pm 5\%$ 。

对于三相并联电抗器或由单相电抗器组成的三相组,若连接到具有对称电压的系统上,三个相的电抗偏差都应在 $\pm 5\%$ 容许范围内,每相电抗与三个相电抗平均值间的偏差不应超过 $\pm 2\%$ 。

7.9.3 电抗器的线性偏差

对于线性电抗器,按照 7.8.5.3 测得的电抗值偏差不应超过在额定电压下测得的电抗值的 $\pm 5\%$ 。

7.9.4 损耗偏差

按 7.8.6 测得并校正后的总损耗偏差不应超过损耗规定值的 10% 。

8 限流电抗器和中性点接地电抗器

8.1 概述

本章阐述了对串联连接于电力系统或接在中性点与地之间用以限制或控制电流的电抗器的要求,这些电抗器包括:

- 用于限制短路电流或短时电流的限流电抗器。正常情况下,持续电流通过这种电抗器。
- 用于三相电力系统的单相中性点接地电抗器,接于系统中性点和地之间,用以限制系统故障时的接地电流。通常中性点接地电抗器无持续电流通过,或仅有很小的持续电流通过。

本部分其他章中没有包括的其他限流或控制用电抗器,都包括在本章中。本章中包括的电抗器应用例子如下:

- 单相中性点接地电抗器,接在并联电抗器中性点和地之间,用于输电线路单相开断时的消弧。详情参见附录 D。
- 母联电抗器,接在两条不同母线或不同系统间,以限制故障电流的转移。
- 电机启动电抗器,与交流电机串联,限制启动电流。
- 功率控制电抗器,串接在电力系统中,以控制功率潮流。
- 电弧炉串联电抗器,与电弧炉串接,以提高金属熔化的效率并减小系统电压波动。
- 插入电抗器,临时接入开关装置的触头间,以同步和(或)衰减开关暂态过程。
- 试验电抗器,用于大容量试验室的电气回路中,调节试验电流。
- 变流器用进线电抗器,串接在变流器上,以调整变流器端子和交流母线上的电压波动。

由于这些电抗器使用条件不同,因此第 8 章的要求和试验不可能完全适用。不同之处应由供需双方商定。

8.2 设计

按设计和安装不同,电抗器分为:

- 单相或三相;
- 干式或液浸式;
- 空心或间隙铁心式;
- 带或不带磁屏蔽;
- 带或不带分接;
- 户内或户外安装;
- 干式水平安装或立式叠装。

注 1: 限流电抗器的磁屏蔽通常设计成在强短路电流下为饱和的。这样有在短路条件下减小电抗的效果。因而短路电流时的额定电抗比持续电流时的小。

注 2: 接到并联电抗器中性点的电抗器的磁屏蔽通常设计成在额定短时电流下为不饱和的。因而在运行电流范围内,认为电抗是常量。

8.3 术语和定义

下列术语和定义适用于本章。

8.3.1

额定持续电流 rated continuous current

I_r

规定的额定频率下稳态电流的方均根值。

8.3.2

额定热短路电流 rated thermal short-circuit current

I_{SCr}

在额定频率下,电抗器在规定时间内可通过的短路电流的稳态分量的方均根值。适用于限流电抗器和电力系统中性点接地电抗器。

8.3.3

额定热短路电流持续时间 rated thermal short-circuit current duration

T_{SCr}

规定的额定热短路电流持续时间。

8.3.4

额定机械短路电流 rated mechanical short-circuit current

I_{MSCr}

规定的不对称故障电流(峰值)。如果没有规定,不对称故障电流(峰值)可从额定热短路电流导出。

8.3.5

额定短时电流 rated short-time current

I_{STr}

对于电机启动电抗器或试验电抗器:为额定频率下施加规定负载周期时的规定的电流方均根值。

对于接到并联电抗器中性点的中性点接地电抗器:为额定频率下规定的故障线路灭弧电流方均根值。

8.3.6

额定短时电流持续时间或负载周期 rated short-time current duration or duty-cycle

T_{STr}

规定的额定短时电流持续时间。负载周期是每种使用情况规定的持续时间、各使用情况之间的时间间隔以及额定短时电流的次数。

8.3.7

额定电感 rated inductance

L_{SCr}

额定频率以及额定热短路电流 I_{SCr} 下的规定电感。适用时,额定电感包括互电感。

8.3.8

额定电抗 rated reactance

X_{SCr}

额定电感与额定频率的积乘以 2π 。额定电抗用欧姆/相表示。

8.3.9

三相电抗器的互电抗 mutual reactance of a three-phase reactor

X_m

开路相的感应电压与励磁相的电流的比值,用额定持续电流 I_r 和额定频率下欧姆/相表示(也可见图 7)。

8.3.10

耦合系数 **coupling factor** k

用额定电抗标么值或百分数表示的互电抗。

8.3.11

额定短路阻抗 **rated short-circuit impedance** Z_{SCR} 额定频率以及额定热短路电流 I_{SCR} 下的每相阻抗。

额定短路阻抗是额定电抗和电抗器有效电阻(由损耗导出)的向量和。通常电阻远小于电抗。

8.3.11.1

额定三相短路阻抗 **rated three-phase short-circuit impedance** Z_{SCR3} 额定频率及额定三相热短路电流 I_{SCR} 下的每相阻抗,为三相的平均值。

8.3.11.2

额定单相短路阻抗 **rated single-phase short-circuit impedance** Z_{SCR1} 在额定频率以及额定热短路电流 I_{SCR} 下,其他两相开路时的每相阻抗。

8.3.12

额定短时阻抗 **rated short-time impedance** Z_{STR} 额定频率以及额定短时电流 I_{STR} 下的每相规定阻抗。

8.3.12.1

额定三相短时阻抗 **rated three-phase short-time impedance** Z_{STR3} 额定频率以及额定三相短时电流 I_{STR} 下的每相阻抗,为三相的平均值。

8.3.12.2

额定单相短时阻抗 **rated single-phase short-time impedance** Z_{STR1} 在额定频率以及额定短时电流 I_{STR} 下,其他两相开路时的每相阻抗。

8.3.13

额定连续阻抗 **rated continuous impedance** Z_r

额定频率和额定持续电流下的每相阻抗。

8.3.13.1

额定三相连续阻抗 **rated three-phase continuous impedance** Z_{r3} 额定频率以及额定三相持续电流 I_r 下的每相阻抗,为三相的平均值。

8.3.13.2

额定单相连续阻抗 **rated single-phase continuous impedance** Z_{r1} 额定频率以及额定持续电流 I_r 下,其他两相开路时的每相阻抗。

8.4 额定值

8.4.1 额定持续电流

额定持续电流 I_r 由用户规定。对串联连接到每相的电抗器,额定持续电流可由用户规定的系统电

压和通过容量得出。

如无另行规定,对串联连接到每相的电抗器,额定持续电流是对称三相电流。

对于中性点接地电抗器(既包括接到三相电力系统接地中性点,也包括接到并联电抗器中性点),如果额定持续电流大于额定热短路电流或额定短时电流的 5%,则需要由用户规定。

对电机启动电抗器,如果电机启动后电抗器不被旁路,则额定持续电流就需由用户规定。

8.4.2 额定热短路电流

对限流电抗器和接到三相电力系统中性点的接地电抗器,其额定热短路电流 I_{SCr} 由用户规定。要求不应低于电抗器运行中预计会发生的、认可的故障情况下的最大对称电流的方均根值。此外,额定热短路电流可以用给定的系统的短路容量、系统电压和电抗器阻抗得出。

8.4.3 额定热短路电流持续时间

额定热短路电流持续时间 T_{SCr} ,可以由用户规定或采用下列的标准值:

——限流电抗器,2 s。

注 1: 选用的持续时间应能够反映自动重合闸时的累积热效应和在故障被切除前允许存在的时间。

注 2: 如果短路电流超过额定持续电流大约 25 倍,热短路电流持续时间能影响电抗器的成本。

——接到系统中性点的中性点接地电抗器,10 s。

如果有几个故障在短期内连续发生,其持续时间、发生的时间间隔以及发生的次数应由用户规定。额定热短路电流持续时间应做相应的选择。

8.4.4 额定机械短路电流

规定的额定机械短路电流 I_{MSCr} 取决于系统的 X/R 比值,应按 GB 1094.5—2008 中 4.2.3 计算。如果用户没有指定系统阻抗和 X/R 值,额定机械短路电流应取额定热短路电流值的 $1.8\sqrt{2}$ 倍($I_{MSCr} = 2.55I_{SCr}$)。

8.4.5 额定短时电流

额定短时电流 I_{STr} 应该同额定短时电流持续时间 T_{STr} 或负载周期一起,由用户规定(如果适用)。

对接到并联电抗器中性点的中性点接地电抗器,这个电流应该是单极开关动作后故障线路的灭弧电流。

注: 对于运行时电流重复施加的任何类型的电抗器,可以规定额定短时电流。

8.4.6 额定短时电流持续时间或负载周期

额定短时电流持续时间 T_{STr} 或负载周期应由用户规定(如果适用)。例如,它可能与电机启动操作和试验电路负载有关,这时,应规定短时电流周期和零电流状态。在启动或试验周期之后,电抗器可承载额定持续电流或解除运行。

电抗器技术参数应有短时电流负载周期的所有信息,包括短时电流的最大幅值和持续时间、持续短时电流运行之间的最小时间间隔、短时电流之间的电流水平以及规定持续时间的短时电流连续施加的最大次数(如果适用)。

注: 可以针对不同的工况规定不同的负载周期,如电机冷启动或热启动。

对接到并联电抗器中性点的中性点接地电抗器,额定短时电流持续时间由用户规定。它与一段时间间隔有关,就是故障相发生故障至成功重合闸或三相完全切断的时间。

8.4.7 耦合系数

如果用户要求额定单相短路阻抗近似等于三相短路阻抗,那么最大允许耦合系数需要在订货时

规定。

三相电抗器或指定安装方式的单相电抗器三相组,制造方应按要求提供相间耦合系数或互电抗的信息(详情参见附录 E)。

8.4.8 额定短路阻抗

额定短路阻抗 Z_{SCr} 由用户规定。用户也可以规定系统的短路电流或短路容量以及预期的热短路电流。额定短路阻抗可以从这些数值导出。

如果电抗器没有热短路电流额定值,则应规定额定短时电流 I_{STr} (见 8.4.9) 和(或)额定持续电流 I_r (见 8.4.10) 下的额定阻抗(如果适用)。

8.4.8.1 耦合系数小于 5% 的电抗器

如果三相电抗器的耦合系数小于 5%,则只有 8.3.11.1 规定的额定三相短路阻抗 Z_{SCr3} 需要规定。

8.4.8.2 耦合系数不小于 5% 的电抗器

如果耦合系数不小于 5%(常见于三相立式叠装电抗器),应区分两个不同的阻抗:额定三相短路阻抗 Z_{SCr3} 和额定单相短路阻抗 Z_{SCr1} 。

三相限流电抗器的作用取决于系统接地方式。如果系统经高阻抗接地,则串接到每相的电抗器的任务是限制对称的三相故障电流,这时,只有 Z_{SCr3} 需要规定。

如果系统是有效接地,则应对单相以及三相系统故障电流进行评估,并应考虑 Z_{SCr3} 和 Z_{SCr1} 。应规定其中一个或两个阻抗值,如果用户要求,则还应提供测量值。如果只规定一个阻抗值,则意味着两个阻抗 Z_{SCr3} 和 Z_{SCr1} 都应满足规定的阻抗值要求,并在 8.10 的偏差范围内。需要注意的是,在某些情况下,例如电抗器立式叠装,相邻相的耦合系数是很大的,单相故障时电抗器的阻抗将与三相故障有很大不同。

立式叠装电抗器一般要保证三相短路故障情况下各相阻抗相等。这需要考虑相间互感的作用而分别调整各相自感。如果用户要保证各相单相接地故障电流相同,要求各相自感相同,就需要特殊说明。更多的信息参见附录 E。

8.4.9 额定短时阻抗

短时阻抗 Z_{STr} 、额定短时电流 I_{STr} 和额定短时电流持续时间 T_{STr} 或负载周期由用户规定(如果适用)。

电抗器在额定短时电流 I_{STr} 及以下应该是线性的。

如果三相电抗器耦合系数小于 5%,则只需规定三相短时阻抗。

如果耦合系数不小于 5%(常见于三相立式叠装电抗器),则需要区分两个阻抗:额定三相短时阻抗 Z_{STr3} 和额定单相短时阻抗 Z_{STr1} 。应视系统中性点接地情况规定一个或两个阻抗并且还应按要求提供测量值(见 8.4.8.2)。只有在中性点有效接地的系统,规定额定单相短时阻抗 Z_{STr1} 才是必要的。

8.4.10 额定连续阻抗

对于空心电抗器,额定连续阻抗 Z_r 、额定短时阻抗 Z_{STr} 以及额定短路阻抗 Z_{SCr} 是相同的。

耦合系数小于 5% 的三相电抗器,只需规定额定三相短时阻抗。

如果耦合系数不小于 5%(常见于三相立式叠装电抗器),则需要区分两个阻抗:额定三相连续阻抗 Z_{r3} 和额定单相连续阻抗 Z_{r1} 。应视系统中性点接地情况规定一个或两个阻抗并且还应按要求提供测量值(见 8.4.8.2)。只有在中性点有效接地的系统,规定额定单相连续阻抗 Z_{r1} 才是必要的。

对于间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器,额定连续阻抗 Z_r 将大于额定短路阻抗 Z_{SCr} 和额定短时阻

抗 Z_{STr} 。

这时,因为连续阻抗对电压控制很重要或其他原因,因此用户可规定额定连续阻抗的最大值。如果没有规定最大值,则制造方应按要求提供额定持续电流阻抗值,其测量值应标在铭牌上。

电抗器在额定持续电流 I_r 及以下时应该是线性的。

8.5 承受额定热短路电流和机械短路电流的能力

限流电抗器和接到系统中性点的中性点接地电抗器,应设计为能承受额定短路电流下的热和机械作用,包括在额定持续时间下的电场作用。如用户无另行规定,则故障的间隔时间最少为 6 h。如果预计短路故障发生的频率高于平均 10 次/年,则需要用户说明。

8.6 温升

8.6.1 额定持续电流下的温升

温升限值见 GB 1094.2 和 GB 1094.11 的相关部分。串接到电力系统中的电抗器应设计成能承受正常负载和过负载,负载导则见 GB/T 1094.7(对液浸式电抗器)和 GB/T 17211(对于式电抗器)。

8.6.2 额定热短路电流和额定短时电流负载下的温升

额定热短路电流 I_{SCr} 或额定短时电流 I_{STr} 负载下的绕组计算温度不应超过 GB 1094.5—2008 中 4.1.4 规定的变压器绕组在短路条件下的值。

8.7 绝缘水平

8.7.1 概述

对绝缘水平的要求见 GB 1094.3。

8.7.1.1 限流电抗器的绝缘要求

各相间和相对地的绝缘要求通常应与电抗器所连接的系统设备最高工作电压 U_m 相匹配。绕组上的绝缘要求可以稍低些,特别是当有避雷器与绕组并联时。推荐避雷器的额定电压不低于额定热短路电流在电抗器两端产生电压的 1.2 倍。

注:制造方应保证电抗器的设计能承受短路条件下绕组上承受的电压。

如果电抗器装有当电抗器励磁时接通的旁路装置,用户应予以说明,并应规定进行双端连接的雷电冲击试验。

8.7.1.2 中性点接地电抗器的绝缘要求

绝缘要求应与电抗器连接的系统中性点或并联电抗器中性点的绝缘要求一致。接地端子可以采用降低的绝缘水平(分级绝缘)。

8.8 铭牌

每台电抗器均应提供由不受气候影响的材料制成的铭牌,并安装在明显可见的位置,铭牌上应标出下述各项。所示项目应该用耐久的方法刻出(如用蚀刻、雕刻或打印法)。

- 电抗器型号;
- 户内或户外用;
- 本部分代号;
- 制造方名称;

- 出厂序号；
- 制造年月；
- 绝缘水平；
- 相数；
- 额定频率；
- 设备最高电压；
- 额定持续电流(适用时)；
- 额定热短路电流和持续时间(适用时)；
- 额定机械短路电流(适用时)；
- 额定短时电流和持续时间或负载周期(适用时)；
- 单相和三相励磁额定持续电流下的阻抗实测值(适用时)；
- 额定短路电流下的阻抗的计算值或实测值(用于间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器)；
- 额定短时电流下的阻抗的计算值或实测值(对规定了短时电流的电抗器)；
- 冷却方式；
- 绝缘耐热等级(仅适用于干式电抗器)；
- 总质量；
- 运输质量(液浸式电抗器)；
- 器身质量(液浸式电抗器)；
- 绝缘液体质量(适用时)；
- 非矿物油时绝缘液体的种类(适用时)；
- 分级绝缘中性点接地电抗器接地端子绝缘水平；
- 分接和互感器的接线图(适用时)；
- 分接开关类型(如有载、无励磁,适用时)。

8.9 试验

8.9.1 概述

例行试验、型式试验和特殊试验的一般要求见 GB 1094.1。

8.9.2 例行试验

应进行下列例行试验：

- 绕组电阻测量(GB 1094.1)；
- 额定持续电流时的阻抗测量(8.9.5)；
- 连接到并联电抗器中性点的中性点接地电抗器、启动电抗器和试验电抗器在额定短时电流下的阻抗测量(8.9.6)；
- 环境温度下的损耗测量(8.9.7)；
- 间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器外施耐压试验(8.9.8)；
- 限流电抗器绕组过电压试验(8.9.9)；
- 中性点接地电抗器绕组过电压试验(8.9.10)；
- 间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器绕组对地的绝缘电阻测量(作为参考值,用于与以后的现场测量值进行比较,此处不给出限值)；
- 液浸式电抗器绕组对地电容及介质损耗因数($\tan\delta$)测量(作为参考值,用于与以后的现场测量值进行比较,此处不给出限值)。

8.9.3 型式试验

应进行下列型式试验：

- 额定持续电流下的温升试验(8.9.11)；
- 限流电抗器雷电冲击试验(8.9.12)；
- 风扇和油泵所需功率测量(如果有)。

8.9.4 特殊试验

当用户特殊要求时,应进行下列特殊试验：

- 限流电抗器、接到电力系统中性点的中性点接地电抗器和试验电抗器的短路试验(8.9.13)；
- 间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器的绕组电抗测量(8.9.21)；
- 声级测定(8.9.14)；
- 安装在支柱绝缘子上的干式电抗器外施耐压试验(8.9.8)；
- 间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器接近参考温度下的损耗测量(8.9.7)；
- 间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器在额定持续电流下的振动测量(8.9.15)；
- 操作冲击试验(8.9.16)；
- 双端连接的雷电冲击试验(8.9.17)；
- 耦合系数测量(8.9.18)；
- 绕组过电压湿试验(8.9.19)；
- 装在支柱绝缘子上的干式电抗器的外施耐压湿试验(8.9.20)。

8.9.5 额定持续电流时的阻抗测量(例行试验)

对于空心电抗器,测量可在不超过额定持续电流的任何电流下进行。

对于间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器,如果规定了额定持续电流,则应在额定持续电流下测量;如果没有规定,则施加的最高持续电流应由供需双方在投标时商定。

对于相间耦合系数大于5%的三相电抗器或空心电抗器立式叠装三相组,应在向星形联结的相绕组施加三相对称电压时测量相电流。

电抗值为：
$$\frac{\text{线间所施加电压}}{\text{实测线电流平均值} \times \sqrt{3}}$$

对于耦合系数大于5%的三相电抗器或空心电抗器立式叠装三相组,用于中性点有效接地系统时,还应测量单相阻抗 Z_{STr1} 以及每两相之间的互电抗并检查极性。互电抗测量方法见图7。如果不可能做到对连接引线完全屏蔽以免产生感应电压,就应采用一个更严格的测量互电抗的方法,即测量每个单相绕组电抗和每两相绕组串接在一起的电抗。互电抗可通过对测量值的计算得出。

对于所有空心电抗器,每相电抗器的单相阻抗应用单相电源测量。

注：对空心电抗器,本试验还用以校验额定短路阻抗或额定短时阻抗。

8.9.6 额定短时电流下的阻抗测量(例行试验)

本测量适用于具有间隙铁心和(或)磁屏蔽的、连接到并联电抗器中性点的中性点接地电抗器、启动电抗器和试验电抗器。

阻抗测量应在额定频率及额定短时电流下进行。应限制测量的时间以避免电抗器的任何部分产生过热。

注：如果试验设备无法满足大容量试验要求时,也可以按协议。作为型式试验时,在额定短时电流下进行试验,作为例行试验时,在降低的电流下进行试验。

8.9.7 损耗测量(例行试验、特殊试验)

8.9.7.1 概述

本试验仅适用于规定了额定持续电流的电抗器。

损耗指的是电抗器在额定频率和参考温度下以额定持续电流运行时的损耗。损耗测量值应校正到额定持续电流和参考温度下。

需要时,应对所采用方法的测量准确度提供说明文件。

三相电抗器损耗测量应在三相励磁下进行。

注 1: 对低损耗三相电抗器来说,单个相的损耗测量值可能不相等或某一相为负值。总损耗为三相损耗值的算术和。

注 2: 对有零序磁通磁屏蔽的三相电抗器,如果供需双方有特殊协议,损耗测量可以在单相励磁下进行。在此情况下,必须对低压下单相和三相测量值进行比较,并就合适的校正系数达成共识。

8.9.7.2 空心电抗器

损耗测量可在额定频率的任何电流下进行,测量值需校正到额定持续电流下,即测量值乘以额定持续电流与试验电流之比的平方。

由制造方提供的属于支撑结构的金属件可能会影响损耗测量,应在试验前装好。

注: 电抗器周围的金属件对损耗测量有很大影响。所以,在试验期间,属于电抗器支撑结构的金属件应装好,应尽量避免有其他金属件。

总损耗包括电阻损耗和附加损耗。电阻损耗部分等于 $I_r^2 R$, R 是测得的直流电阻, I_r 是额定持续电流。附加损耗部分是总损耗与电阻损耗 $I_r^2 R$ 之差。

损耗测量可在任何方便的环境温度下进行,并应按照 GB 1094.1 给出的方法校正到参考温度。

8.9.7.3 间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器

损耗测量应在额定频率和额定持续电流下进行。

在某些情况下,如对于超大额定容量的电抗器,试验条件是难以满足的。此时,额定持续电流下的损耗可由测量值乘以额定持续电流与试验电流之比的平方来得到。试验电流应不小于 $0.9I_r$ 。

总损耗包括电阻损耗、铁损和附加损耗。电阻损耗部分等于 $I_r^2 R$, R 是测得的直流电阻, I_r 是额定持续电流。铁损和附加损耗在测量上无法分开,铁损和附加损耗之和是总损耗与电阻损耗 $I_r^2 R$ 之差。

损耗测量应做为例行试验,在工厂环境温度下进行,然后校正到参考温度。电阻损耗按照 GB 1094.1 校正到参考温度。通常不方便将铁损和附加损耗校正到参考温度。因而,通常假定铁损和附加损耗与温度无关,这样假定通常会使参考温度下的损耗略高于实际损耗。

当要求在温度接近参考温度时进行损耗测量的特殊试验时,损耗测量可以与温升试验同时进行。但还应在环境温度下做同一试品的损耗例行试验,以便得到总损耗的温度系数(假定线性变化)。同一设计的电抗器的损耗值可以利用从这个试品上得到的温度系数校正到参考温度。

注: 附录 F 给出损耗温度校正的例子。

8.9.8 外施耐压试验(例行试验、特殊试验)

试验一般应按照 GB 1094.3 进行,对所有间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器,本试验均属于例行试验。

试验电压应施加到:

——每个绕组与地之间;

——各个绕组间(适用时)。

干式空心电抗器通常采用标准支柱式绝缘子或母线支柱绝缘子做为电抗器的支撑、绕组对地绝缘

以及两个或多个绕组叠起来时的相间绝缘。所以,试验是对支柱绝缘子的试验,只有特殊要求时才进行。

注:如制造方在投标时无特别说明,则认为支柱绝缘子的设计按 IEC 60273 的规定,试验按 IEC 60168 的规定。

8.9.9 限流电抗器绕组过电压试验(例行试验)

由于感应耐压试验不能按照 GB 1094.3—2003 的第 12 章进行,因此,本试验应采用雷电冲击试验方法进行,雷电冲击依次施加在每个绕组的各端子上,同时绕组的另一端直接接地,所有其他绕组的端子(如果有)也都接地。试验水平按照 GB 1094.3。如果绕组是降低绝缘的,则雷电冲击试验按照降低的绝缘水平进行。

由于电抗器阻抗低,因此,通常不能满足标准波形要求。更多的信息见 GB/T 1094.4—2005 中的 A.3。

注:可能达不到半峰的规定时间,通常应该接受较短的时间。

如无另行规定,对于 $U_m \leq 40.5$ kV 的干式空心电抗器,附录 G 的匝间过电压试验可以代替雷电冲击试验。

8.9.10 中性点接地电抗器绕组过电压试验(例行试验)

本试验应采用雷电冲击试验方法进行,将电压施加到与变压器或并联电抗器的中性点相连的端子上,同时另一端子接地。试验应符合 GB 1094.3—2003 中 13.3.2b) 的要求。允许冲击电压波前时间稍长,直至 $13 \mu\text{s}$ 。

注:可能达不到半峰的规定时间,通常应该接受较短的时间。

如无另行规定,对于 $U_m \leq 40.5$ kV 的干式空心电抗器,附录 G 中的匝间过电压试验可以代替雷电冲击试验。

8.9.11 额定持续电流下的温升试验(型式试验)

本试验一般应按照 GB 1094.2 进行。对于干式电抗器,绝缘耐热等级应按照 GB 1094.11 的规定。

试验应在额定持续电流 I_r 和额定频率下进行。

在某些情况下,如超大额定容量,试验条件是难以满足的。此时,试验可在降低电流下进行,但电流不应小于 $0.9I_r$ 。试验水平应由制造方在标书中说明,并由供需双方在订货时达成共识。

温升应校正到额定持续电流下。

对于液浸式电抗器,油温升应乘以 $\left(\frac{I_r}{I_{\text{test}}}\right)^{2x}$,绕组对油温升应乘以 $\left(\frac{I_r}{I_{\text{test}}}\right)^y$, x 和 y 值如下选取:

——对于 ON 冷却电抗器 $x=0.8$; $y=1.3$;

——对于 OF 冷却电抗器 $x=1.0$; $y=1.3$;

——对于 OD 冷却电抗器 $x=1.0$; $y=2.0$ 。

注:对于带有零序磁通磁屏蔽的三相电抗器,如果供需双方同意,温升试验可通过在绕组上施加直流电流进行。油温升测量时,施加与按 8.9.7.1 确定的校正后的损耗相对应的直流电流。额定持续电流 I_r 下的单相试验用于测量绕组对油温升。

对于干式电抗器,绕组对环境温度温升应乘以 $\left(\frac{I_r}{I_{\text{test}}}\right)^y$, y 值如下选取:

——对于 AN 冷却电抗器 $y=1.6$;

——对于 AF 冷却电抗器 $y=1.8$ 。

在大多数情况下,稳态条件下电抗器的总损耗在一定程度上小于参考温度下的,这是因为试验时环境温度通常低于设计温度。这个影响可以忽略。

对于干式空心电抗器,如果要求,在温升试验时应测量电抗器端子的温升。为得到有效的端子温升测

量值,用户应提供一个连接件和至少 1 m 的现场用的导线,供制造方温升试验时用。端子温升限值见第 6 章(也可见 IEC/TR 60943)。

8.9.12 限流电抗器雷电冲击试验(型式试验)

一般要求参考 GB 1094.3—2003 的第 13 章,干式电抗器见 GB 1094.11—2007 的第 21 章,还可参考 GB/T 1094.4。

本试验的目的是考核被试端子与地间的绝缘。

将试验电压依次加到被试绕组的各个端子上,必要时,绕组的另一端通过电阻接地以得到标准冲击波形。如可能的话,其他绕组的端子也应接地。

8.9.13 短路电流试验(特殊试验)

8.9.13.1 概述

一般要求参考 GB 1094.5。

当规定做短路电流试验时,试验应按照 GB 1094.5—2008 中的 4.2.2~4.2.7 进行。

短路试验的技术参数包括试验电流水平、每次冲击的持续时间、冲击次数以及要求的分接位置(如果电抗器有分接)。

如果没有规定,试验应包括每相两次 0.25 s 的冲击,冲击电流的第一个峰值为额定机械短路电流值。试验应在具有最大电感的分接位置进行(如果电抗器有分接)。

三相电抗器或有明确安装方式的单相电抗器组成的三相电抗器组,应进行六次三相短路试验,每相应有两次获得最大不对称峰值电流。

试验时的电流峰值的偏差不应超过相关规定值的 5%。

如果电抗器需进行热短路试验,试验应包括一次额定持续时间的、大小为额定热短路电流 I_{SCr} 的对称电流冲击。如果达不到额定热短路电流,应在降低电流值下试验,持续时间应最多延长到 6 s,至少达到规定的 I^2t 值。

如果所有的试验参数都能满足,为减少冲击次数,热短路试验也可以与机械短路试验同时进行。

更多的信息参见附录 H。

8.9.13.2 评价准则

电抗器耐受短路试验的能力按照 GB 1094.5—2008 中的 4.2 进行确认。

短路试验前、后都应进行例行试验,包括阻抗测量、损耗测量及按照 8.9.9 或 8.9.10 在 100% 规定电压下的绕组过电压试验。阻抗和损耗的测量值应在偏差限值内。绝缘试验的波形不应有变化,同时符合高压绝缘试验系统限值的相关规定。

有关液浸式电抗器故障查找的一般资料参考 GB 1094.5—2008 中的 4.2.7。

对于干式电抗器,目测检查电抗器及其支撑结构,在机械结构上不应有能影响电抗器功能的任何变化。如果短路试验后,绕组的夹紧系统损坏或表面裂痕的数量或尺寸明显增加,则认为电抗器未通过短路试验。如果有疑问,应增加最多三次的全偏移电流下的短路试验,以确认监视的现象是否稳定。如果情况更加恶化,则应认为电抗器未通过试验。如果一次或二次增加的短路试验后,未出现恶化情况,并且短路试验后的例行试验合格,则认为电抗器通过了短路试验。更多的信息参见附录 H。

8.9.14 额定持续电流下的声级测定(特殊试验)

测量应在额定持续电流及额定频率下进行。测量方法参考 GB/T 1094.10。某些情况下,电抗器的噪声可能会受试验变压器的影响(如果变压器距电抗器很近)。为消除干扰噪声,可以采用声强测

量法。

对于干式电抗器进行测量时,应保证对绕组有足够的安全距离。GB/T 1094.10 所述的规定轮廓线应距绕组表面 2 m。规定的轮廓线应位于绕组高度一半的水平面上。

为了模拟运行时的稳定状态(即绕组温度升高),试验应尽可能在温升试验快结束时进行。

注:对于大容量电抗器,如果试验无法在工厂进行,则在订货时经供需双方同意,试验可在现场进行。

8.9.15 额定持续电流下的振动测量(特殊试验)

8.9.15.1 概述

间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器的设计和结构应避免因振动产生的有害应力影响。为保证性能,在控制振动方面主要考虑的区域如下:

- a) 液浸式电抗器
 - 器身的振动;
 - 油箱振动,应力会影响到板、撑条和焊缝;
 - 仪表、附件和冷却设备的振动。
- b) 干式电抗器(空心电抗器除外)
 - 夹件的振动;
 - 仪表、附件和风机(如果有)的振动。

8.9.15.2 试验条件

被试电抗器应按运行条件完全装配好,包括冷却设备、仪表、附件都应安装并连接好。

注:如果电抗器装有箱壁式隔音罩,经供需双方同意,试验可在没有隔音罩下进行。

电抗器应安装在为底座提供合适支撑的平台上,以消除油箱的非正常应力。

电抗器应在额定频率及额定持续电流下励磁。三相电抗器需三相励磁。当试验容量不能满足额定持续电流和(或)三相励磁要求时,制造方需向用户证明,在降低电流条件下做的试验,其结果的准确度与额定条件下等同。试验首选在运行温度下进行,也可在环境温度下进行。

8.9.15.3 测量方法

电抗器的振动由传感器、光学探头或类似的测量装置测量。位移的峰-峰值由直接测量得到,或用测得的加速度或速度计算得出。两倍额定频率下的测量准确度应不超过 10 μm 。

对液浸式电抗器,测量应在油箱四壁上进行,测量点数应足够,以保证测得振动的最大值。

对于干式电抗器,测量应在上夹件进行,测量点数应足够,以保证测得振动的最大值。

装配在油箱、夹件上的设备的振动也要测量或观察。

8.9.15.4 最大振动水平

对于液浸式电抗器,箱壁的最大振幅不应大于 200 μm (峰-峰值)。

对于干式电抗器,夹件的最大振幅不应大于 100 μm (峰-峰值)。

制造方应证明试验时测量或观察到的振动,对安装在油箱、夹件上的设备的可靠性和性能没有长期的影响。

8.9.16 操作冲击试验(特殊试验)

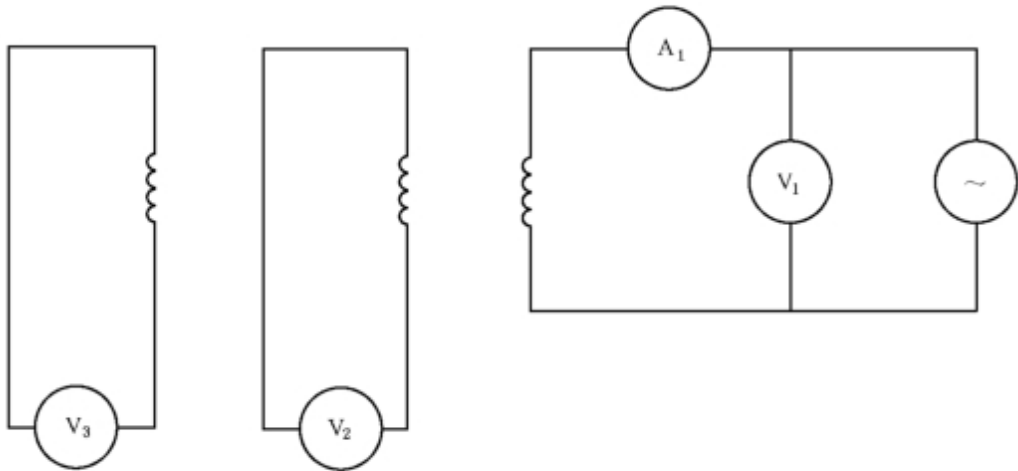
操作冲击试验一般按照 GB 1094.3 的有关规定进行。然而,这一试验只适用于阻抗足够高的电抗器,否则不具有实际性。试验方法和波形应由供需双方协商确定。

8.9.17 双端连接雷电冲击试验(特殊试验)

本试验适用于有旁路的电抗器,电抗器运行时,旁路可能闭合。
试验应对每相依次进行,被试绕组的两个端子接在一起,其他端子接地。
一般要求参考 GB 1094.3—2003 的第 13 章。

8.9.18 耦合系数测量(特殊试验)

测量应按照图 7 进行,对间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器优先采用额定持续电流进行试验。如果无法做到,那么采用的试验电流应尽可能接近额定持续电流。对于其他电抗器,测量可在任意电流下进行。



图中:
 V_1 、 V_2 、 V_3 :电压表读数;
 A_1 :电流表读数;
互电抗 X_m :分别为 V_2/A_1 或 V_3/A_1 ;
耦合系数 k :互电抗 X_m /额定电抗 X_{SCr} 。

图 7 三相电抗器或单相电抗器三相组的互电抗测量

8.9.19 绕组过电压湿试验(特殊试验)

当要求时,绕组过电压湿试验应按照 8.9.9 或 8.9.10 进行,喷水按照 GB/T 16927.1—1997 的第 9 章进行,试验电压为要求值的 0.75 倍。

8.9.20 外施耐压湿试验(特殊试验)

当要求时,外施耐压湿试验按 8.9.8 进行,喷水按照 GB/T 16927.1—1997 的第 9 章进行,试验电压不降低。

8.9.21 间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器绕组电抗测量(特殊试验)

当要求时,需要测试一相绕组的电抗值。测量应在没有间隙铁心、磁屏蔽或在附近没有任何其他铁磁材料的情况下进行。该值相当于 3.2.6 中定义的空心电抗值。

8.10 偏差

8.10.1 没有互耦合补偿的电抗器阻抗偏差

对于限流电抗器、接到电力系统中性点的中性点接地电抗器以及主要功能是限制短路电流的其他

类型电抗器,由试验和(或)计算得到的额定热短路电流下的阻抗偏差应在额定短路阻抗的 $^{+10}_0\%$ 以内。对额定持续电流下的阻抗偏差要求与此相同。

对于本章所涉及的所有其他类型电抗器,由试验和(或)计算得到的额定短时电流下的阻抗偏差应在额定短时阻抗的 $\pm 5\%$ 以内。对额定持续电流下的阻抗偏差要求与此相同。

8.10.2 有互耦合补偿电抗器的阻抗偏差

当要求对三相电抗器(包括空心电抗器立式叠装三相组)互阻抗进行补偿时,按照 8.9.5 所规定的条件测量的每相绕组的电流与平均值的偏差应不超过 5% 。此时,每相电抗器的单相阻抗(Z_{SCr1} 、 Z_{r1} 、 Z_{STr1})应不小于额定值的 85% 。包括互阻抗在内的每相电抗器的阻抗(Z_{SCr3} 、 Z_{r3} 、 Z_{STr3})偏差应在额定值的 $^{+10}_0\%$ 或 $\pm 5\%$ 以内,见 8.10.1。

注:应用单相阻抗 Z_{SCr1} 的最小值来确定电抗器最大额定单相故障电流。

8.10.3 损耗偏差

按 8.9.7 测得并校正后的总损耗偏差不应超过损耗规定值的 10% 。

9 与电容器连接的滤波电抗器、阻尼电抗器和放电电抗器

9.1 概述

本章阐述了对与电容器相关的电抗器的要求。

典型应用包括:

——最高频率达 10 kHz 、与电容器串联或并联以减少或阻断谐波或控制信号(脉动信号)的滤波电抗器;

注:本部分不包括线路阻波器(见 IEC 60353),但包括阻断系统遥控开关所需控制信号的电抗器。

——与并联电容器串接的阻尼电抗器,用以限制电容器的合闸涌流,限制故障或邻近的电容器投切时产生的外界涌流或供电容器组去谐用,以免与电力系统发生谐振;

——用于高压电力系统串连电容器组的旁路或放电回路的放电电抗器,以限制故障时的电流。

加在这些电抗器上的稳态电压通常低于系统电压。然而开关操作会引起很高的暂态电压,暂态电压的频率是电容器和电抗器共同形成的谐振频率。

正常条件下运行的滤波电抗器和阻尼电抗器,流过的电流由工频电流和叠加的谐波电流两部分组成。阻尼电抗器的工频电流通常远大于谐波电流,滤波电抗器的使用条件决定了两个电流间的比例。

串联电容器组的放电电抗器在正常工作时没有持续电流通过,但是为了允许电容器长时间被放电电抗器旁路,通常也为放电电抗器规定一个持续电流值。

阻尼电抗器、放电电抗器和某些滤波电抗器在投切或故障时会通过很高的短时电流。阻尼电抗器可能投切频繁,经常是每天数次,因而每日承受多次暂态过电压是很正常的。某些情况下,还应考虑到电容器短路引起的故障电流。

由于放电电抗器通常同串联的电容器组一起安装在绝缘平台上,因而对电抗器的绝缘要求是由串联的电容器绝缘配合决定的,而不取决于系统电压。

本章涉及的电抗器通常专指干式空心电抗器,本章的额定值和试验通常只适用于这些电抗器。

注:并联电容器导则见 IEC 60871-1,串连电容器导则见 IEC 60143。

9.2 设计

本章的电抗器是干式空心电抗器,按设计和安装不同,分为:

——单相或三相;

- 户内或户外安装；
- 相与相并列或立式叠装；
- 带或不带分接。

注：也可以用其他方法改变电感，本部分对此不予考虑。

9.3 术语和定义

下列术语和定义适用于本章。

9.3.1

额定工频电流 rated power frequency current

I_r

工频下持续电流的方均根值。

9.3.2

额定电流频谱 rated current spectrum

除工频外规定频率下的持续电流的方均根值。

9.3.3

RSS 电流 RSS current

额定工频电流和额定电流频谱中规定频率下的电流的方和根值。

9.3.4

工频等效电流 equivalent current at power frequency

I_{equ}

计算的工频电流方均根值，其产生的绕组损耗相当于工频电流和额定电流频谱产生的损耗之和。

9.3.5

额定涌入电流 rated inrush current

I_{rIN}

当给相关的电容器或附近的电容器充电或系统故障时，可能通过滤波电抗器或阻尼电抗器的暂态电流的最高峰值。

注：系统故障或临近电容器充电产生的暂态电流有时叫做涌出电流，本定义也将其包括在内。

9.3.6

额定涌流频率 rated inrush frequency

f_{rIN}

对于阻尼电抗器，指与额定涌入电流相关的谐振频率。

9.3.7

额定调谐频率 rated tuning frequency

f_{rt}

对于滤波电抗器，指滤波电路的谐振频率，电抗器只是滤波电路中的一个元件。

9.3.8

额定放电电流 rated discharge current

f_{rd}

对放电电抗器，指电抗器通过的最大电流的峰值。

9.3.9

额定放电频率 rated discharge frequency

f_{rd}

对于放电电抗器，指电抗器和关联的串连电容器的谐振频率。

9.3.10

额定频率 rated frequency

对于滤波电抗器,指额定调谐频率;对阻尼电抗器,指额定涌流频率;对放电电抗器,指额定放电频率。

9.3.11

额定热短路电流 rated thermal short-circuit current
 I_{SCr}

规定的工频下流过规定持续时间的短路电流的稳态对称分量的方均根值。

9.3.12

额定热短路电流持续时间 rated thermal short-circuit current duration
 T_{SCr}

规定的额定热短路电流持续时间。

9.3.13

额定机械短路电流 rated mechanical short-circuit current
 I_{MSCr}

规定的非对称(峰值)故障电流。如果未规定,非对称(峰值)故障电流由额定热短路电流导出。

9.3.14

额定电感 rated inductance
 L_r

规定的额定频率下的电感。适用时,额定电感还包括相间的互感。

9.3.15

额定电抗 rated reactance
 X_r

对阻尼电抗器和放电电抗器,指规定工频下的电抗,用每相欧姆表示。

9.3.16

耦合系数 coupling factor
 k

用三相电抗器或立式叠装空心电抗器三相组的两相自感乘积的平方根的标么值或百分数表示的两相间的互感。

注:对相1和相2,耦合系数等于 $k = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 \times L_2}}$ 。

9.3.17

有效电阻 effective resistance

用规定频率和参考温度下的损耗导出的电阻。

注:功率损耗包括电阻损耗和所有特定频率的附加杂散损耗。

9.3.18

品质因数 quality factor
 Q_f

规定频率下的电抗与有效电阻的比。

9.4 额定值

9.4.1 额定工频电流

额定工频电流 I_r 由用户规定,但不应低于电抗器运行时的最大工频持续电流。对于阻尼电抗器,

也可见 9.4.2。

对于放电电抗器,额定工频电流不应低于电抗器串接于输电线路时的工作电流。

9.4.2 额定电流频谱

对于滤波电抗器,额定电流频谱上各个频率的电流应由用户规定,但不应低于运行中的电抗器的最大持续电流。

注 1: 电流频谱的资料应由用户提供,以恰当地进行电抗器的热设计。

对于阻尼电抗器,额定电流频谱在必要时可以规定。不规定时,较高频率的电流分量应该通过限定工频电流不低于相关电容器组的最大许可电流来考虑。

注 2: 通过滤波电抗器或阻尼电抗器的较高频率的电流需要特殊考虑,因为较高频率的电流既会增加电抗器的损耗,也会增加电抗器绕组的压降。

注 3: 按照 IEC 60871-1,最大许可电流的方均根值是额定正弦电压加到电容器上所得到的电流的 1.3 倍。

对于放电电抗器,额定电流频谱一般不适用。

9.4.3 额定涌入电流

滤波电抗器和阻尼电抗器的额定涌入电流 I_{rN} 应由用户规定,但不应低于投、切相关电容器以及临近电容器或系统故障时的电流峰值。在询价时,需要指明开关每天预计的操作次数。

注: 本章涉及的系统故障是指导致电容器通过电抗器放电,但没有导致工频故障电流通过电抗器的故障。

9.4.4 额定涌流频率

额定涌流频率 f_{rN} 应由用户规定。

9.4.5 额定放电电流

对于放电电抗器,额定放电电流 I_{rd} 应由用户规定,但不应低于所有相关串联电容器放电电流的最大峰值。规定额定放电电流时应考虑到电容器高频放电电流和工频故障电流。

9.4.6 额定放电频率

额定放电频率 f_{rd} 应由用户规定。

9.4.7 额定热短路电流

如果电抗器设计为能耐受特殊短路条件时,对于滤波电抗器和阻尼电抗器,额定热短路电流 I_{SCr} 应由用户规定,但不应低于规定持续时间的工频短路电流的稳态对称分量。

注: 如果电抗器接到电容器中性点侧或电容器与电抗器间的连接非常短,短路的可能性就很低。这时规定额定热短路电流就不十分恰当。但应注意带有维修接地的电容器组因为误操作导致通电的可能性。

对于放电电抗器,额定热短路电流应由用户指定,但不应低于电抗器运行时故障条件下可能产生的最高对称电流方均根值,也可从系统短路容量、系统电压和电抗器阻抗导出。

9.4.8 额定热短路电流持续时间

额定热短路电流持续时间 T_{SCr} ,既可由用户规定,也可取标准值。对于滤波电抗器和阻尼电抗器,标准值为 1 s,对于放电电抗器,标准值为 2 s。

注 1: 选取的持续时间应能够反映自动重合闸时的累积热效应和故障跳闸前允许的时间。

注 2: 如果短路电流超过额定持续电流大约 25 倍,则热短路电流持续时间能影响电抗器的成本。

注 3: 如果有几个故障在短期内连续发生,其持续时间、发生的时间间隔以及发生次数应由用户规定。额定热短路电流持续时间应做相应的选择。

9.4.9 额定机械短路电流

对已经规定了热短路电流 I_{SCr} 的电抗器,用户还应规定额定机械短路电流。该电流取决于系统的 X/R 比值,应按 GB 1094.5—2008 计算。如果用户没有规定系统阻抗和 X/R 比值,额定机械短路电流 I_{MSCr} 应取额定热短路电流值的 $1.8\sqrt{2}$ 倍 ($I_{\text{MSCr}} = 2.55I_{\text{SCr}}$)。

9.4.10 额定电感

电抗器的额定电感 L_r 应由用户规定。该值应保证电抗器的滤波、阻尼和放电性能。

对于立式叠装滤波电抗器三相组,如果用于无零序电流通路的滤波装置、并联电容器装置,则应明确规定正序电流下的电感。为保证电抗器对正序和负序电流呈现所规定的有效电感,则每相电抗器的电感应补偿相间互感的影响。

如果立式叠装滤波电抗器三相组用于具有零序电流通路的滤波电容器或并联电容器组,并且零序与正序、负序电流(或分量)都存在,则应规定是保证零序电流下的有效电感还是保证正序电流下的有效电感,同时应规定耦合系数或互感的上限。

采用立式叠装的阻尼电抗器,除非特殊规定,每个单相电抗器的电感不应进行互感影响的补偿。

注:相间具有较大磁耦合的电抗器,在零序电流下的有效电感明显小于正序(和负序)电流下的有效电感,更多的信息参见附录 E。

不采用叠装结构的放电电抗器和水平布置的滤波电抗器、阻尼电抗器,耦合系数一般很小。因而,这些装置在设计上不需做电感补偿。

9.4.11 品质因数

如果希望得到某个暂态过程的特定阻尼系数,询价中就应规定电抗器在额定频率下的最大品质因数 Q_f 。如果没有规定品质因数,则制造方应按要求提供电抗器在额定频率下的预期的品质因数。

对于滤波电抗器,如果品质因数对滤波电路的性能或控制损耗很重要,用户就应规定某一个或多个特定频率下的品质因数 Q_f 及其偏差。

9.5 耐受额定热短路电流和额定机械短路电流的能力

当电抗器规定了某一短路电流时,它的设计就应能承受额定持续时间下的额定热短路电流和额定机械短路电流的热和机械作用以及相应的电场作用。如用户无另行规定,两次故障间的时间间隔则至少是 6 h。如果短路发生的预期频率大于平均 10 次/年,则应由用户特殊说明。

电抗器耐受额定机械短路电流的能力应由以下方法来验证:

- 试验验证,或
- 计算和设计验证。

验证方法应由供需双方在订货前商定。

电抗器承受额定热短路电流持续时间的额定热短路电流的热耐受能力应由计算验证,此外还可用试验作为计算的补充。计算绕组在施加额定时间的额定短路电流所能达到的平均温度的方法见 GB 1094.5—2008 中 4.1.5。计算的绕组平均温度不应超过 GB 1094.5—2008 中 4.1.4 要求的变压器绕组在短路条件下的温度。

9.6 承受涌入或放电电流的能力

当电抗器规定了一个额定涌入电流或额定放电电流时,电抗器的设计就应能承受这些电流的热和机械作用以及相应的电场作用。由于涌入或放电重复发生,电抗器在两倍额定涌入频率或两倍放电频率的 10% 偏差以内不应发生机械谐振。如果有要求,避免谐振能力以及承受涌入和放电电流热和机械

作用的能力应由计算验证或按要求由试验验证,见 9.10.13、9.10.14 和 9.10.6。

9.7 温升

9.7.1 工频等效电流下的温升

温升限值参考 GB 1094.11。

串联在电力系统中的放电电抗器,负载和过负载能力应按 GB/T 17211 负载导则的规定。

9.7.2 额定热短路电流下的温度

绕组在额定热短路电流 I_{sc} 负载下的计算温度不应超过 GB 1094.5—2008 中 4.1.4 给出的变压器绕组短路条件下的值。

9.8 绝缘水平

9.8.1 概述

对绝缘水平的要求见 GB 1094.3。

9.8.2 绝缘要求

对于滤波电抗器和阻尼电抗器,各相间和相对地的绝缘水平通常应与电抗器所连接系统的设备最高工作电压 U_m 相一致。根据实际运用情况,用户也可以规定一个降低的绝缘水平。电压的选择应考虑到流过短路电流时作用到电抗器的电压或投切、放电或连续操作时作用到电抗器上的最高电压,取两者中较大值。

对于放电电抗器,绝缘水平取决于相关联的串连电容器的绝缘配合。用作用到电容器上的最高电压做为绝缘水平的依据。放电电抗器以及放电电抗器与平台间受到的雷电冲击和操作冲击水平应由用户规定。

因为放电电抗器通常安装在绝缘平台上,放电电抗器是否设置防电晕的屏蔽取决于放电电抗器在平台上的位置。所以放电电抗器安装电晕屏蔽的要求(如果需要)应由用户提出。

9.9 铭牌

每台电抗器均应提供由不受气候影响的材料制成的铭牌,并安装在明显可见的位置。铭牌上应标出下述各项,所示项目应该用耐久的方法刻出(如用蚀刻、雕刻或打印法):

- 电抗器型号;
- 户内或户外用;
- 本部分代号;
- 制造方名称;
- 出厂序号;
- 制造年月;
- 额定雷电冲击耐受电压;
- 设备最高电压;
- 额定工频;
- 额定工频电流;
- 额定热短路电流和持续时间(如果有要求);
- 额定机械短路电流(如果有要求);
- RSS 电流(对滤波电抗器);

- 额定涌入电流(对滤波和阻尼电抗器,如果有要求);
- 额定放电电流(对放电电抗器);
- 额定调谐频率(对滤波电抗器)
- 额定涌流频率(对阻尼电抗器);
- 额定放电频率(对放电电抗器);
- 额定调谐频率下的测量电感(对滤波电抗器);
- 额定涌流频率下的测量电感(对阻尼电抗器);
- 额定放电频率下的测量电感(对放电电抗器);
- 工频下的测量电感(适用时);
- 测量的品质因数以及相关频率(适用时);
- 绝缘耐热等级;
- 总质量。

9.10 试验

9.10.1 概述

例行试验、型式试验和特殊试验的一般要求见 GB 1094.1。

9.10.2 例行试验

应进行下列例行试验:

- 绕组电阻测量(GB 1094.1);
- 电感测量(9.10.5);
- 损耗和品质因数测量(9.10.6);
- 绕组过电压试验(9.10.7)。

9.10.3 型式试验

应进行下列型式试验:

- 电感测量(9.10.5);
- 损耗和品质因数测量(9.10.6);
- 温升试验(9.10.8);
- 雷电冲击试验(9.10.9)。

9.10.4 特殊试验

当用户特殊要求时,应进行下列特殊试验:

- 短路电流试验(9.10.10);
- 声级测定(9.10.11);
- 外施耐压试验(9.10.12);
- 滤波和阻尼电抗器的涌流耐受试验(9.10.13);
- 放电电抗器的放电电流试验(9.10.14);
- 对放电电抗器做修改的短路或放电电流试验(9.10.15);
- 机械谐振试验(9.10.16)。

9.10.5 电感测量(例行试验、型式试验)

电感测量应在工频以及额定频率下进行。

如果有分接,作为型式试验时,电感测量应在所有分接上进行。作为例行试验时,电感测量则应在额定、最小和最大电感分接上进行,其他分接位置是否正确应检查确认。

如果电抗器的电感连续可调,则在例行和型式试验时,电感测量最少应在五个位置进行,这五个值应在调节范围内均布。

对于立式叠装电抗器,作为型式试验时,电感测量应在电抗器按运行状态装配好后在三相励磁下进行。作为例行试验时,可利用型式试验得到的互感(耦合系数),通过测量每个单相的自感来得到每相的电感(包括互感)。这种情况下,型式试验应包括每个单相的自感测量以及按运行条件布置的耦合系数测量。

对于水平布置的三相电抗器(耦合系数小于5%的电抗器),可以在单相励磁下进行电感测量。

9.10.5.1 滤波电抗器

对于滤波电抗器,电感测量只在额定频率下进行。如果有多个调谐频率,电感测量则应在最低调谐频率下进行。

对于立式叠装滤波电抗器三相组,如果额定调谐频率为零序谐波频率,并且滤波装置具有零序电流通路,制造方应根据用户的明确要求施加零序电流进行三相励磁。如果滤波装置没有零序电流通路,则以三相正序电流励磁。

注:某些调谐在3次谐波频率的滤波装置,虽然额定调谐频率为零序谐波频率,但未必有零序谐波电流。

9.10.5.2 阻尼电抗器

对于立式叠装阻尼电抗器三相组,应根据系统中性点接地方式和用户要求施加正序或零序试验电流。

注:用于中性点非有效接地系统的阻尼电抗器,通常在三相正序励磁时测量有效电感,更多信息参见附录E。

9.10.6 损耗和品质因数测量(例行试验、型式试验)

损耗测量应在工频、额定频率以及额定电流频谱规定的每一频率下进行。

损耗测量可在任何电流及任何方便的环境温度下进行,并应校正到相应的额定电流下,校正方法是用实测损耗乘以相应的额定电流与试验电流比值的平方,还应校正到参考温度。

总损耗包括电阻损耗和附加损耗。电阻损耗部分等于 $I_r^2 R$, R 是测量的直流电阻, I_r 是相应的额定电流。附加损耗部分等于总损耗与电阻损耗 $I_r^2 R$ 之差。

品质因数通常用测量的损耗和电感导出。应在额定频率和用户要求的任何其他频率下得出品质因数。对三相叠装电抗器,品质因数由三相测得的总损耗的三分之一得出。

如无另行规定,对于滤波电抗器,品质因数是指参考温度下的;对于阻尼电抗器和放电电抗器,是指20℃下的。

电阻的温度校正应按照 GB 1094.1 的方法进行。

对于立式叠装电抗器,作为型式试验时,电抗器应按照运行条件组装好,在三相励磁下测量总损耗和品质因数。作为例行试验时,应在单相励磁条件下,测量单相损耗和品质因数。

注:对于立式叠装电抗器来说,三相励磁条件下单个相的损耗测量值可能是不相等的或甚至一相是负值。三个测量值的算术和就是总损耗。

电抗器周围的金属件可能对损耗测量有很大影响。所以,试验时,属于电抗器支撑结构的金属件应装好,同时应尽量避免有其他金属件。

9.10.7 绕组过电压试验(例行试验)

本试验应采用雷电冲击试验的方法,将试验电压依次施加在每个绕组的一个端子上,同时绕组的另

一端子直接接地。试验水平应按照 GB 1094.3。由于电抗器阻抗低,所以通常不能满足标准波形要求。更多的信息见 GB/T 1094.4—2005 中 A.3。

注 1: 可能达不到半峰的规定时间,通常应该接受较短的时间。

注 2: 由于要求试验容量很高,因此感应耐压试验通常不能按照 GB 1094.3—2003 的第 12 章进行。

对于 $U_m \leq 40.5$ kV 的设备,附录 G 中的匝间过电压试验可用来代替雷电冲击试验。

9.10.8 温升试验(型式试验)

本试验一般应按照 GB 1094.2 进行。绝缘耐热等级应按照 GB 1094.11 的规定。

试验应在工频等效电流 I_{equ} 下进行。

在某些情况下,如果不能达到温升试验要求的工频下的等效电流,则试验可在降低电流下进行,但不应低于 $0.9I_{\text{equ}}$ 。试验水平应由制造方在标书中说明,并由供需双方在订货时达成共识。

温升应校正到工频等效电流下。

绕组对环境温度的温升应乘以 $\left[\frac{I_{\text{equ}}}{I_{\text{test}}}\right]^y$, y 值如下选取:

——对于 AN 冷却电抗器 $y=1.6$;

——对于 AF 冷却电抗器 $y=1.8$ 。

如果有要求,在温升试验时应测量电抗器端子的温升。为得到有效的端子温升测量值,用户应提供一个连接件和至少 1 m 的现场用的导线,供制造方温升试验时用。端子温升限值见第 6 章(也可见 IEC/TR 60943)。

9.10.9 雷电冲击试验(型式试验)

一般要求参考 GB 1094.3 和 GB 1094.11,也可参考 GB/T 1094.4。

试验电压依次施加到被试绕组的每一个端子上,另一个端子通过尽可能小的电阻接地,以得到标准冲击波形。如果要求绕组或绕组对地降低绝缘水平,则雷电冲击试验应按所要求的降低绝缘水平进行。

9.10.10 短路电流试验(特殊试验)

9.10.10.1 概述

一般要求参考 GB 1094.5。

当规定做短路电流试验时,试验应按照 GB 1094.5—2008 中 4.2.2~4.2.7 进行。

短路试验的技术参数包括试验电流水平、每次冲击的持续时间、冲击次数以及要求的分接位置(如果电抗器有分接)。

如果没有规定,试验应包括每相两次 0.25 s 的冲击,冲击电流的第一个峰值为额定机械短路电流值。试验应在具有最大电感的分接位置进行(如果电抗器有分接)。

三相电抗器或有明确安装方式的单相电抗器组成的三相电抗器组,应进行六次三相短路试验,每相应有两次获得最大不对称电流。

试验时的电流峰值的偏差不超过相关规定值的 5%。

如果电抗器需进行热短路试验,试验应包括一次额定持续时间的、大小为额定热短路电流 I_{SCR} 的对称电流冲击。如果达不到额定热短路电流,应在降低电流值下试验,持续时间应最多延长到 6 s,至少达到规定的 I^2t 值。

如果所有的试验参数都能满足,为减少冲击次数,热短路试验也可以与机械短路试验同时进行。

更多的信息参见附录 H。

9.10.10.2 评价准则

电抗器耐受短路试验的能力按照 GB 1094.5—2008 中 4.2 进行确认。

短路试验前、后都应进行例行试验,包括电感测量、损耗测量及按照 9.10.7 在 100%规定电压下的绕组过电压试验。电感和损耗的测量值应在偏差限值内。绝缘试验的波形不应有变化,同时符合高压绝缘试验系统限值的相关规定。

目视检查电抗器及其支撑结构,在机械结构上不应有影响电抗器功能的任何变化。如果短路试验后,绕组的夹紧系统损坏或表面裂痕的数量或尺寸明显增加,则认为电抗器未能通过短路试验。如果有疑问,应增加最多三次的最大不对称电流下的短路试验,以确认监视的现象是否稳定。如果情况更加恶化,则认为电抗器未通过试验。如果一次或二次增加的短路试验后,未出现恶化情况,并且短路试验后的例行试验合格,则认为电抗器通过了短路试验。更多的信息参见附录 H。

9.10.11 声级测定(特殊试验)

测量方法按 GB/T 1094.10。

测量时,应保证对绕组有足够的安全距离。GB/T 1094.10 所述的规定轮廓线应距绕组表面 2 m。规定的轮廓线应位于绕组高度一半的水平面上。

为了模拟运行时的稳定状态(即绕组温度升高),试验应尽可能在温升试验快结束时进行。

电抗器发出的声波取决于工频电流以及其他频率的电流(如适用)。除另行规定,否则只需考虑额定电流频谱中最有影响的电流。

因为试验时工频和其他频率的电流通常不能同时施加,所以电抗器可以在工频和其他频率的电流下连续试验。此时,电抗器还应在能反映不同频率的电流相互作用的电流和频率下进行试验。如果不能在所有有影响的频率和电流下进行试验,制造方应在标书中说明,供需双方需就试验方法和测量值达成共识。

对于电流频谱中含有电流 I_1 、 I_2 、 I_3 ……的电抗器,这些声级等效电流如下:

试验电流幅值	试验电流频率	声波频率
I_1	f_1	$2f_1$
I_2	f_2	$2f_2$
I_3	f_3	$2f_3$

对上述任何一对电抗器电流,例如 I_1 和 I_2 ,由于相互影响,应考虑到下述试验电流:

试验电流幅值	试验电流频率	声波频率
$(2I_1 I_2)^{1/2}$	$(f_1 + f_2)/2$	$f_1 + f_2$
$(2I_1 I_2)^{1/2}$	$(f_2 - f_1)/2$	$f_2 - f_1$

注: f_1 、 f_2 、 f_3 ……是相互影响的电抗器方均根值电流值 I_1 、 I_2 、 I_3 ……的频率,通常 f_1 是工频, f_2 、 f_3 ……是额定电流频谱中有影响的电流对应的频率。

总的声功率水平应用下面的公式计算,也可见 GB/T 1094.10—2003 的附录 D:

$$L_{\text{tot}} = 10 \cdot \log \left[\sum_i 10^{L_i/10} \right]$$

式中:

L_{tot} ——总的声功率级水平;

L_i ——每个单独分量下的声功率级水平。

在试验中未包括的有影响的电流分量的声级水平应用计算法估算并包含在总的声功率级水平中。

9.10.12 外施耐压试验(特殊试验)

试验一般参照 GB 1094.3—2003 的第 11 章进行。

试验电压应施加在绕组与地之间。

干式空心电抗器通常采用标准支柱式绝缘子或母线支柱绝缘子做为电抗器的支撑、绕组对地绝缘

以及两个或多个绕组叠起来时的相间绝缘。所以,试验是对支柱绝缘子的试验。

注:如制造方在投标时无特别说明,则认为支柱绝缘子的设计按 IEC 60273 的规定,试验按 IEC 60168 的规定。

9.10.13 涌流耐受试验(特殊试验)

按照 9.10.10 在工频下施加额定涌流进行试验。

9.10.14 放电电流试验(特殊试验)

当规定进行放电电流试验时,应对放电电抗器施加不小于 1.1 倍额定放电电流的试验电流。试验电流应含有半个周期的工频电流。试验应重复 25 次。

试验方法和评价准则按照 9.10.10 的规定(如适用)。由于放电电抗器的每一相通常装在单独的平台,因此,如无另行规定,则放电电流试验应做为单相试验在一个单元上进行。

9.10.15 修改的短路或放电电流试验(特殊试验)

对于放电电抗器,作为 9.10.10 和 9.10.14 试验的替代方法,可以考虑下述试验:

对放电电抗器做工频短路电流试验,包括 10 个周期的对称试验电流,其峰值为 1.1 倍的额定放电电流。

评价准则见 9.10.10.2。

9.10.16 机械谐振试验(特殊试验)

适用时,制造方应向用户提议,并与用户就适当的试验方法达成一致,以证明电抗器绕组机械谐振频率与两倍额定涌流频率或两倍额定放电频率至少偏离 10%。

9.11 偏差

9.11.1 额定电感偏差

对于阻尼电抗器和放电电抗器,额定频率下测量的电感对额定值的偏差应在 $^{+10}_{-0}\%$ 内。

对于滤波电抗器,如不可调,则应规定额定电感值的偏差,如带有分接,应规定每个分接的偏差或最小分接范围和最大分接步长。

9.11.2 测量损耗和品质因数的偏差

测量的损耗偏差不应超过规定值的 10%。

测量的品质因数偏差应在制造方标书中给出值的 $\pm 20\%$ 之内。

10 接地变压器(中性点耦合器)

10.1 概述

接地变压器用于为三相电网提供一个接地的中性点。

接地变压器的中性点,可通过下述方法接地:

- 直接接地;
- 通过限流电抗器接地(第 8 章);
- 通过电阻接地;
- 通过消弧线圈接地(第 11 章)。

当接地变压器是电网的唯一接地方式时,接地变压器的零序阻抗加上中性点和地之间的阻抗决定

了单相对地故障时流过的电流。

注：故障下流过中性点的电流的持续时间通常被限制为数秒，但如果中性点接到消弧线圈上就不同了。此时，中性点电流的幅值是有限的，但持续时间更长（通常为 2 h）。某些情况下，变压器有能力通过一个因系统电压不平衡引起的持续的小电流。

接地变压器经常带有一个二次（低压）绕组，以给本地辅助负载供电，如电站 400 V 的设备。本部分也适用于向二次负载供电的接地变压器。

10.2 设计

接地变压器设计成三相、户内或户外安装、自然冷却方式。

接地变压器有两种不同的结构：

——主绕组曲折形联结；

——主绕组星形联结，同时带有三角形联结稳定绕组。三角形联结绕组可以做成开口结构，以便允许接入一个内部或外部电阻器或电抗器来调整其零序阻抗。

接地变压器可以设计成带有消弧线圈并装在同一油箱内。本章包括了这种组合结构，但如果变压器的中性点端子不引出，则适用时可参考第 11 章。

如果规定有二次绕组，则通常是星形联结绕组以适用于连续负载。

还可以包括用于测量的辅助绕组。

10.3 术语和定义

下列术语和定义适用于本章。

10.3.1

主绕组 main winding

接地变压器线端间的绕组，线端连接到拟接地系统的各相上。

10.3.2

额定电压 rated voltage

U_r

规定的额定频率下的线电压，即施加到主绕组线端间的电压。

10.3.3

最高运行电压 maximum operating voltage

U_{max}

规定的额定频率下的最高线电压，接地变压器在此电压下应能够连续运行。

注： U_{max} 不同于 U_m （见 3.2.1），但在特殊情况下可以有相同的值。

10.3.4

稳定绕组 stabilizing winding

星形联结变压器附加的三角形联结绕组以减小零序阻抗。

注：只有不是用来连接外部三相电路的绕组才称为稳定绕组。

10.3.5

额定零序阻抗 rated zero-sequence impedance

Z_0

规定的额定频率下的每相阻抗，用欧姆表示，它等于连接在一起的线端与中性点之间的阻抗的三倍，要求任意二次绕组开路，稳定绕组处于运行状态。

如果是接地变压器和消弧线圈组合的情况，用欧姆/相表示的额定零序阻抗等于连接在一起的线端与消弧线圈接地端之间的阻抗的三倍。

注：如果零序阻抗可调，则通常指最低阻抗，但也可以规定另外的额定值。

10.3.6

额定持续中性点电流 rated continuous neutral current

I_{Nr}

规定的额定频率下通过主绕组中性点端子的持续电流。

注：如果是接地变压器和消弧线圈组合的情况，则指的是流过变压器中性点和消弧线圈的电流。

10.3.7

额定短时中性点电流 rated short-time neutral current

I_{NSTr}

额定频率下通过主绕组中性点端子的，时间为额定短时中性点电流持续时间的电流。

注：如果是接地变压器和消弧线圈组合的情况，则指的是流过变压器中性点和消弧线圈的电流。

10.3.8

额定短时中性点电流持续时间 rated short-time neutral current duration

T_{NSTr}

规定的额定短时中性点电流持续时间。

10.3.9

二次绕组 secondary winding

接地变压器上用于连接辅助负载的绕组。

10.3.10

二次绕组额定电压 rated voltage of secondary winding

当主绕组施加额定电压时，在二次绕组线端上感应出的额定频率下的空载电压。

10.3.11

二次绕组额定容量 rated power of secondary winding

规定的二次绕组连续负载时的容量。该额定容量是主、二次绕组的负载损耗和温升试验的规定值和试验值的参考。

10.3.12

主绕组和二次绕组间短路阻抗 short-circuit impedance between main and secondary winding

在额定频率及参考温度下，二次绕组端子短接且辅助绕组(如果有)开路时，规定的主绕组端子上的等效串联阻抗，用欧姆/相表示。

注：该值也可用二次绕组额定值的百分数表示，见 GB 1094.1—1996 中 3.7.1。

10.3.13 更多定义

在接地变压器和消弧线圈组合的情况下，更多定义参见第 11 章。

10.4 额定值

10.4.1 额定电压

额定频率下的额定电压 U_r 由用户规定。如 10.9 中无另行规定，则额定电压是设计、制造保证值和试验的基础。

注：额定电压通常认为是系统标称电压。

在接地变压器和消弧线圈组合的情况下，消弧线圈的额定电压(定义见 11.3)应该由中性点短时电流和消弧线圈阻抗导出。

10.4.2 最高运行电压

最高运行电压 U_{max} 应由用户规定。它不能低于运行中的接地变压器最高持续运行线电压。如无

另行规定,则应为 1.1 倍的额定电压。

注:当接地变压器拟用于运行电压明显高于额定电压的情况下,参数 $U_{\max}$ 就特别重要。这是接地变压器设计的一个方面。用户要求在 $U_{\max}$ 下测量空载损耗和空载电流可以认为是特殊试验。

10.4.3 额定零序阻抗

额定零序阻抗可由用户规定,例如:接地变压器与单独的中性点限流装置一起使用的情况。

如果接地变压器的中性点直接接地或是接地变压器与消弧线圈组合的情况,则额定零序阻抗可以由最高运行电压和额定短时中性点电流导出。如果没有规定额定零序阻抗,就应该规定额定短时中性点电流。

10.4.4 额定持续中性点电流

用户可以规定持续中性点电流。额定持续中性点电流应规定为不低于运行条件下最高持续中性点电流。该电流是由于系统电压不平衡引起的。

当持续中性点电流中预期含有高次谐波分量时,用户应说明。

对于接地变压器和消弧线圈组合的情况,该电流既流过接地变压器中性点也流过消弧线圈。消弧线圈的最高持续电压(见 11.3 定义)等于额定持续中性点电流与消弧线圈阻抗之积。

注:如果接地变压器拟与消弧线圈一起使用,则接地变压器的额定持续中性点电流宜与消弧线圈匹配(见 11.4)。

10.4.5 额定短时中性点电流

额定短时中性点电流既可以由用户规定,也可以不规定,但应规定额定零序阻抗。如果有规定,不应低于发生单相接地故障时的最大电流。

如无另行规定,则额定短时中性点电流应该用最高运行电压和零序阻抗算出。

注:额定短时中性点电流可用公式算出:

$$I_{\text{NSTr}} = 3 \times \frac{U_{\max}}{\sqrt{3} \times Z_0}$$

这是短时中性点电流的最严酷情况。如果认为太高,那么额定短时中性点电流和额定零序阻抗应由用户规定,以替代公式计算。

10.4.6 额定短时中性点电流持续时间

用户应该既可以规定额定短时中性点电流持续时间,也可以在连续的故障可能在短时间内发生的情况下,指定两次故障之间的时间间隔、故障的持续时间和发生的次数。在后一种情况下,短时电流持续时间相应地应由制造方选定。

10.4.7 二次绕组额定电压

如果规定了二次绕组,则其额定电压应由用户规定。

注:考虑到带负载时变压器的短路阻抗引起的电压降,二次绕组的额定电压通常等于或略高于辅助系统的额定线电压。

10.4.8 接地变压器和消弧线圈组合的进一步的额定值

如果是接地变压器和消弧线圈组合的情况,本部分第 11 章中的额定值适用于消弧线圈。额定电压、最高持续电压以及额定电流(见 11.4.1~11.4.3)不需要由用户规定。这些额定值应由制造方计算出。

10.5 耐受额定短时中性点电流的能力

接地变压器应能耐受额定短时中性点电流的热和机械的作用而不受损坏。

当变压器有二次绕组,变压器还应能耐受辅助电网故障时故障电流的热和机械的作用而不受损坏。
GB 1094.5 适用于对二次绕组端子的短路要求。

10.6 温升

10.6.1 在额定电压、额定持续中性点电流和额定二次绕组容量下的温升

液浸式变压器的温升限值见 GB 1094.2,干式变压器的温升限值见 GB 1094.11。

引起温升的损耗有额定电压下的铁损、额定持续中性点电流下的绕组损耗以及二次带负载时的负载损耗。

如果变压器有二次绕组,则变压器在二次绕组额定容量下不应超过温升限值。或当规定了持续中性点电流时,在二次绕组额定容量和持续中性点电流组合作用下不应超过温升限值。

在接地变压器和消弧线圈组合的情况下,11.5 给出的温升限值适用于额定持续中性点电流下的消弧线圈。

10.6.2 额定短时中性点电流负载下的温度

短时负载就是流过额定短时中性点电流持续时间的额定短时中性点电流。适用时,变压器和消弧线圈在短时负载前的温度应该达到额定持续中性点电流和二次绕组额定容量下应达到的温度。

如果额定短时中性点电流持续时间小于或等于 10 s,则短时负载后,绕组的温度不应超过 GB 1094.5—2008 中 4.1.4 要求的变压器绕组在短路条件下的温度。

如果额定短时中性点电流持续时间大于 10 s,则流过额定短时负载后绕组的平均温升和顶层油的温升不应超过 11.5 给出的值。

在接地变压器和消弧线圈组合的情况下,如果可以单独测量,则绕组平均温升指的是变压器和消弧线圈单独的温升,如果不能单独测量,则绕组平均温升指的是组合的温升。

10.7 绝缘水平

接地变压器主绕组线端的绝缘水平应按 GB 1094.3 选择。

对于中性点端子,可选择降低的绝缘水平(分级绝缘)。

10.8 铭牌

每台变压器应提供由不受气候影响的材料制成的铭牌,并安装在明显可见的位置。铭牌上应标出下述各项,所示项目应该用耐久的方法刻出(如用蚀刻、雕刻或打印法)。

- 变压器型号;
- 户内或户外用;
- 本部分代号;
- 制造方名称;
- 出厂序号;
- 制造年月;
- 绝缘水平;
- 额定频率;
- 额定电压;
- 额定中性点电流和持续时间;
- 冷却方式;

- 绝缘耐热等级(仅适用于干式);
- 顶层油温升和绕组平均温升(对液浸式变压器);
- 总质量;
- 绝缘液体质量(适用时);
- 非矿物油时绝缘液体的种类(适用时);
- 绕组联结或接线图;
- 零序阻抗测量值(如果不是接地变压器和消弧电抗器组合)。

如果有二次绕组,还应附加的信息:

- 二次绕组空载电压;
- 短路阻抗测量值;
- 二次绕组额定容量。

如果还有消弧线圈,应附加的信息:

- 消弧线圈型号;
- 调节方式(连续或分级,适用时);
- 分接开关类型(如有载、无励磁,适用时);
- 用图或表说明零序阻抗调节范围,如果用户要求,还应说明额定电压下的电流(对电感可调消弧线圈)。

10.9 试验

10.9.1 概述

例行试验、型式试验和特殊试验的一般要求参考 GB 1094.1。

如果是接地变压器和消弧线圈组合的情况,这两部分通常不能单独试验。如果用户要求对每一部分单独试验,那么供需双方应在订货时就单独试验需采取的措施达成共识。

10.9.2 例行试验

应进行下列例行试验:

- 绕组电阻测量(GB 1094.1);
 - 零序阻抗测量(10.9.5);
 - 空载损耗和空载电流测量(GB 1094.1);
 - 绝缘试验(10.9.7)。
- 如果接地变压器有二次绕组:
- 电压比测量和联结组标号检定(GB 1094.1);
 - 短路阻抗和负载损耗测量(GB 1094.1);
 - 辅助绕组和控制、测量线路外施耐压试验(GB 1094.3—2003 的第 10 章);

如果是接地变压器和消弧线圈组合的情况:

- 如果消弧线圈电感可调,全部可调范围内的零序阻抗测量(10.9.5);
- 分接开关、铁心气隙调整机构或任何其他开关设备以及与控制 and 测量有关的设备的操作试验(按照 GB 1094.1—1996 中 10.8.1 的 a)、b)、c)或由用户规定)。

10.9.3 型式试验

应进行下列型式试验:

——绝缘试验(10.9.7);

——温升试验(10.9.6)。

如果是接地变压器和消弧线圈组合的情况:

——三相励磁单相故障情况下的中性点电流测量(10.9.10)。

10.9.4 特殊试验

当用户特殊要求时,应进行下列特殊试验:

——额定短时中性点电流耐受能力试验(10.9.8);

——最高运行电压 $U_{\max}$ 下的空载损耗和空载电流测量(GB 1094.1);

——声级测定(GB/T 1094.10);

如果接地变压器带二次绕组:

——当二次绕组短路时的变压器短路试验(GB 1094.5)。

如果是接地变压器和消弧线圈组合的情况:

——额定持续中性点电流下的损耗测量(10.9.9);

——电感调节机构机械寿命试验(11.8.12);

——线性度测量(11.8.10)。

10.9.5 零序阻抗测量(例行试验)

零序阻抗测量可以在 0.1 倍~1.0 倍额定短时中性点电流范围内的任意电流下进行。

如果是接地变压器和消弧线圈组合的情况,且供需双方无其他协议,则零序阻抗测量应在额定短时中性点电流下进行。

测量方法见 GB 1094.1。

如果是接地变压器和可调消弧线圈组合的情况,则零序阻抗测量应在全部可调范围内进行。对于分级可调消弧线圈,测量应在每级进行。

10.9.6 温升试验(型式试验)

10.9.6.1 额定持续中性点电流和二次绕组额定容量下的温升试验

试验应按照 GB 1094.2 进行,测量油温升时应计入空载损耗。

如果规定了额定持续中性点电流和二次绕组,则油平均温升和顶层油温升的测量应在能提供总损耗的电流下进行,这个总损耗包括额定持续中性点电流(如果规定)产生的损耗、二次绕组(如果有)额定容量下的损耗和空载损耗。主绕组温升测量应在持续电流与二次绕组额定容量相应的电流之和的电流下进行。二次绕组温升的测量应在相应于二次绕组额定容量的电流下进行,并考虑之前在总损耗下测得的油温升。

注 1: 对某些结构的绕组(如星-星-角),还应考虑额定持续中性点电流下的附加温升试验,以证明稳定绕组和中性点的额定运行能力。

如果是接地变压器和消弧线圈组合的情况,则应进行额定持续中性点电流下的温升试验。消弧线圈和接地变压器应同时试验。此时,测量的绕组温度是两部分的平均温度。如果消弧线圈是可调的,则温升试验应在最高损耗位置进行。

绕组温度应在试验后用电阻法确定,见 GB 1094.2。

注 2: 如果是接地变压器和消弧线圈组合的情况,应进行两次电阻测量,以确定变压器主绕组温差和消弧线圈绕组的温差。一次测量是在一个线端和消弧线圈接地端子间进行,另一次测量是在接地变压器两个线端间进行。

10.9.6.2 额定短时中性点电流下的温升试验(不带二次绕组)

如果接地变压器的额定短时中性点电流持续时间不超过 10 s,则耐热能力按 GB 1094.5—2008 中 4.1.5,通过计算来验证。

如果接地变压器的额定短时中性点电流持续时间超过 10 s 但少于 10 min,则温升应由供需双方协商采用算法或测量法确定。

如果额定短时中性点电流持续时间是 10 min 或更长,就应在施加额定短时中性点电流持续时间的额定短时中性点电流后,用电阻法来测量绕组的平均温升。

试验开始时,顶层油温度的初始值应该是接近于按 10.9.6.1 施加总损耗时测得的温度。如果试验开始时的顶层油温度不同于该温度,则应对测得的绕组平均温升做校正。

10.9.6.3 干式接地变压器的温升试验

10.9.6.3.1 不带二次绕组的干式接地变压器

温升试验采用模拟负载法,可采用下述两种方法之一:

- 先进行额定持续中性点电流下的温升,维持额定的持续时间;然后进行空载试验,直到铁心和绕组温度达到稳定为止;
- 先进行空载试验,直到铁心和绕组温度达到稳定为止;然后,进行额定持续中性点电流下的温升,直到维持额定的持续时间为止。

10.9.6.3.2 带二次绕组的干式接地变压器

温升试验推荐采用如下方法:

先进行空载试验,直到铁心和绕组温度达到稳定为止;然后进行二次绕组额定容量下的负载试验,将一次侧 A-B-C 端子短接,由二次侧施加相应的额定电流,直到铁心和绕组温度达到稳定,不断电,在一次绕组 A-B-C 短接端子与中性点间施加额定持续中性点电流,维持额定的持续时间,然后断电,测试一、二次侧绕组热电阻,确定绕组的平均温升。

10.9.7 绝缘试验(例行试验、型式试验)

额定耐受电压应通过下列绝缘试验来检验。

10.9.7.1 全绝缘

- 外施耐压试验(GB 1094.3—2003 的第 11 章,例行试验);
- 感应耐压试验(GB 1094.3—2003 中 12.2,例行试验);
- 雷电冲击试验(GB 1094.3—2003 的第 13 章,型式试验)。

10.9.7.2 分级绝缘

- 主绕组接地端子外施耐压试验(GB 1094.3—2003 的第 11 章,例行试验);
- 感应耐压试验(GB 1094.3—2003 中 12.3,例行试验);
- 接地变压器和消弧线圈组合情况下的感应耐压试验,试验应分别进行,一次是单相励磁,一次是三相励磁;
- 雷电冲击试验(GB 1094.3—2003 的第 13 章,型式试验);
- 接地变压器和可调电感消弧线圈组合情况下的雷电冲击试验,试验时电感连续可调的消弧线

圈应设定为电流最小。如果消弧线圈有分接绕组,可参考 GB 1094.3—2003 第 8 章的原理。

10.9.8 额定短时中性点电流耐受能力试验(特殊试验)

耐受额定短时中性点电流机械作用的能力应通过试验或参考对类似产品的试验来验证。

可采用的两种试验接线:

——对接地变压器应施加三相对称电源,并应将一相线端和中性点端子短路。

——将接地变压器三相的线端连结在一起,对线端和中性点端子施加单相电源。

如用户无另行规定,则应进行两次试验,每次试验的时间为 $0.5\text{ s} \pm 0.05\text{ s}$ 。

短路电流第一个峰值应为额定短时中性点电流乘以系数 k (k 值参考 GB 1094.5—2008 中 4.2.3) 所得的值,系数 k 的最小值为 $1.8\sqrt{2}=2.55$ 。

两次试验的时间间隔应是足够的,以避免热量的过度累积,其他应按照 GB 1094.5—2008 中 4.2 的规定。

如果是接地变压器与消弧线圈组合的情况,则两部分应同时进行试验。如果消弧线圈是可调的,且是用分接调节的,则试验应在极限分接位置进行。如果是电感连续可调的,则试验应在最低零序阻抗位置进行。如果消弧线圈是有多个独立绕组的结构,则应首先对具有最低零序阻抗的绕组进行试验,然后依次对其他绕组进行试验。

10.9.9 额定持续中性点电流下的损耗测量(特殊试验)

应在额定持续中性点电流下进行损耗测量。试验按 11.8.9 进行。

如果是接地变压器和消弧线圈组合的情况,则两部分应同时进行试验。如果消弧线圈是可调的,则试验最少应在两个极限位置上进行。

10.9.10 三相励磁单相故障情况下的中性点电流测量(型式试验)

本试验是对接地变压器和消弧线圈组合的情况进行的,以测量三相电源供电时单相对地故障下的中性点电流。试验应按 11.8.5 进行。消弧线圈的接地端子应接到电源的一个线端上,通常在试验时还应接地(见图 8)。如果试验电源内部有接地中性点,则消弧线圈的接地端子就不能接地,而应该能承受相对地电压(见图 9)。

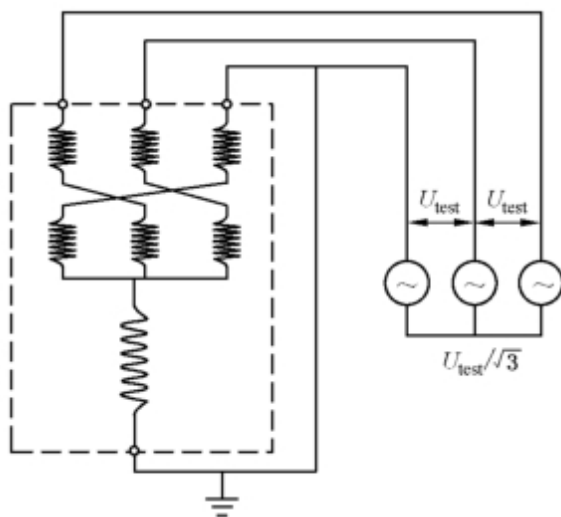


图 8 中性点接地情况下单相故障试验电路

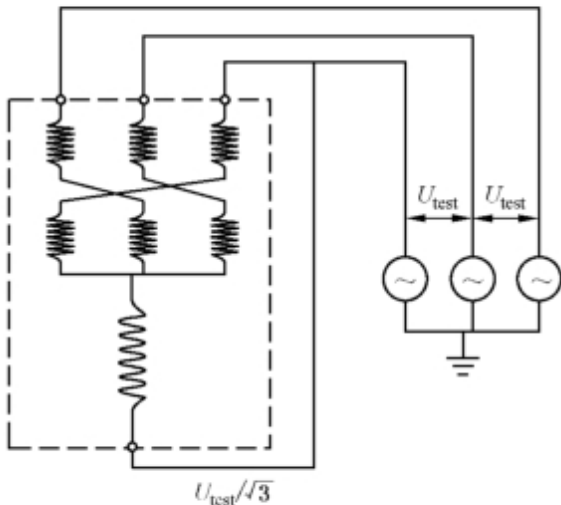


图 9 电源带接地点的单相故障试验电路

10.10 偏差

表 2 给出了额定参数的偏差。

表 2 偏差

参 数	偏 差
零序阻抗	额定值的 ⁺²⁰ ₀ %
接地变压器和消弧线圈组合情况时的零序阻抗	最小位置时:额定值的±5% 其他位置时:额定值的±10%
辅助或二次绕组对主绕组的电压比	规定值的±0.5%

用户可以提出较低的偏差,但应在询价时提出。

11 消弧线圈

11.1 概述

消弧线圈是用来补偿电力系统发生对地故障时产生的容性电流的单相电抗器。消弧线圈在三相电力系统中接在电力变压器或接地变压器中性点与地之间。

11.2 设计

消弧线圈通常是自然冷却、户内或户外安装。

注：消弧线圈和配套的接地变压器可以合装在一个油箱中,这种结构方式参考第 10 章。

消弧线圈的电感通常是可调的,包括分级可调和连续可调,在规定的范围内可与电网的电容相配合。

消弧线圈应该是线性的,见 11.4.8。

消弧线圈可带有一个测量用辅助绕组和(或)供连接负载电阻用的二次绕组,有关负载电阻的更多信息参见附录 I。

11.3 术语和定义

下列术语和定义适用于本章。

11.3.1

额定电压 **rated voltage**

U_r

额定频率下施加到消弧线圈主绕组端子间的规定电压。

11.3.2

最高持续电压 **maximum continuous voltage**

$U_{\max}$

额定频率下持续施加到消弧线圈主绕组端子间的规定电压。

11.3.3

额定电流 **rated current**

I_r

额定频率下施加额定电压时,流过主绕组的电流。如果电感在某一范围内可调,额定电流指最小电感时的电流。另外,用户也可以规定其他电感设定下的电流为额定电流。

11.3.4

额定电流持续时间 **rated current duration**

T_r

规定的额定电流持续时间。

11.3.5

调节范围 **adjustment range**

对电感可调消弧线圈,规定的额定电流与(额定电压下)最大电感位置时的电流的比值。

11.3.6

辅助绕组 **auxiliary winding**

用于测量和控制的绕组,承受低电压和低电流。

11.3.7

二次绕组 **secondary winding**

附加的用于连接短时工作电阻的绕组,短时工作电阻用以增加接地故障电流的电阻分量。

注:二次绕组还可用于连接测量、控制和接地故障保护为目的的设备。

11.4 额定值

11.4.1 额定电压

额定电压 U_r 应由用户规定,至少应该等于接地故障时,在变压器或接地变压器中性点与地之间产生的最高电压。

注:通常规定额定电压等于电力系统的相电压。

11.4.2 最高持续电压

最高持续电压 $U_{\max}$ 应由用户规定,这个电压不应低于在正常运行条件下由于电力系统电压不平衡而在中性点产生的电压,除非此值小于 10% 额定电压。

如果没有规定最高持续电压,就取 10% 额定电压。

11.4.3 额定电流

额定电流 I_r 由用户规定,不应低于线对地故障时产生的最大电流。

电抗器应设计为能持续通过这个电流或在额定电流持续时间下通过这个电流(如果规定)。

11.4.4 额定电流持续时间

额定电流持续时间 T_r 应由用户规定,不应低于预期的最长接地故障时间(一般不超过 2 h),额定电流持续时间是连续的除外。

如果在很短时间内可能连续发生故障,其时间间隔和发生的次数应由用户规定。规定的额定电流持续时间应与之适应。

注:常用的持续时间是 10 s、30 min、2 h 和连续。对于消弧线圈,连续一般指持续时间大于 2 h,但通常不会超过 2 h。

11.4.5 调节范围

额定电压、额定频率下电流可用下列方法之一调节:

——用无励磁或有载分接开关,逐级接入主绕组的附加线段;

注:在此项中,建议调节范围不大于 2.5。

——用机械方法减小磁路气隙;

——切断一组并联线圈中的单个线圈。

11.4.6 辅助绕组

如果用户要求有一个辅助绕组,应规定其电流、电压和偏差。

注:辅助绕组的典型额定值是 100 V、1 A。

11.4.7 二次绕组

如果用户要求有二次绕组,应规定其电流和电压。

注:二次绕组的典型额定值是 500 V、100 A。

11.4.8 消弧线圈的线性特性

如无另行规定,消弧线圈在 1.1 倍额定电压 U_r 及以下应该是线性的,偏差应在 11.9 给出的范围内。

11.5 温升

应将最高持续电压下的温升作为计算额定电流下的温升的初始值。

11.5.1 液浸式消弧线圈

按 11.8.7 试验时,额定电流下的绕组平均温升和顶层油温升不应超过下述值:

——额定电流持续时间为连续时,绕组为 80 K,油为 75 K;

——额定电流持续时间为不超过 2 h 时,绕组为 100 K,油为 90 K。

注:温升值考虑到接地故障不是频繁发生,并且持续时间是有限的。

如果规定了二次绕组短时负载最长时间为 10 s,则二次绕组的温度不应超过 GB 1094.5—2008 中 4.1.4 规定的变压器绕组短路条件下的值,顶层油温升不应超过 90 K。

11.5.2 干式消弧线圈

按 11.8.7 试验时,额定电流下的绕组平均温升限值不应超过下述值:

——对于持续流过额定电流的绕组,按 GB 1094.11;

——对于额定电流的持续时间为不超过 2 h 的绕组,根据绝缘耐热等级,由供需双方协商确定。

11.6 绝缘水平

如无另行规定,则消弧线圈的绝缘水平应与系统中变压器中性点的绝缘水平相同,消弧线圈接地端可以取更低的绝缘水平(分级绝缘)。绝缘水平值见 GB 1094.3。

11.7 铭牌

每台消弧线圈均应提供由不受气候影响的材料制成的铭牌,并安装在明显可见的位置。铭牌上应标出下述各项,所示项目应该用耐久的方法刻出(如用蚀刻、雕刻或打印法):

- 消弧线圈型号;
- 户内或户外用;
- 本部分代号;
- 制造方名称;
- 出厂序号;
- 制造年月;
- 绝缘水平;
- 额定频率;
- 额定电压(辅助和二次绕组的空载电压,适用时);
- 最高持续电压(如果规定);
- (所有绕组)额定电流以及规定持续时间;
- 调节方式(连续或分级);
- 冷却方式;
- 绝缘耐热等级(仅适用于干式消弧线圈);
- 额定电流和持续时间下的顶层油温升和绕组平均温升(顶层油温升只适用于液浸式消弧线圈);
- 总质量;
- 运输质量(对液浸式消弧线圈);
- 器身质量(对液浸式消弧线圈);
- 绝缘液体质量(适用时);
- 非矿物油时绝缘液体的种类(适用时);
- 分接和互感器接线图(适用时);
- 分接开关类型(如有载、无励磁,适用时);
- 用图或表说明调节范围,以安培或比率表示(对电感可调的消弧线圈)。

11.8 试验

11.8.1 概述

例行试验、型式试验和特殊试验的一般要求按 GB 1094.1 的规定。

11.8.2 例行试验

应进行下列例行试验:

- 绕组电阻测量(GB 1094.1);
- 电流测量(11.8.5);
- 辅助绕组和二次绕组空载电压测量(11.8.6)(适用时);

- 主绕组绝缘试验(11.8.8);
- 辅助绕组、二次绕组以及控制、测量回路的外施耐压试验(GB 1094.3—2003 的第 10 章,适用时);
- 分接开关、铁心气隙调整机构或任何其他开关设备以及与控制 and 测量有关的设备的操作试验(按照 GB 1094.1—1996 中 10.8.1 的 a)、b)、c)或由用户规定,适用时)。

11.8.3 型式试验

应进行下列型式试验:

- 额定电压下的电流测量(11.8.5);
- 温升试验(11.8.7);
- 绝缘试验(11.8.8)。

11.8.4 特殊试验

当用户特殊要求时,应进行下列特殊试验:

- 损耗测量(11.8.9);
- 1.1 倍额定电压及以下的磁化特性测量(11.8.10);
- 声级测定(11.8.11);
- 电感调节机构机械寿命试验(11.8.12);
- 耐受额定电流机械力试验(11.8.13)。

11.8.5 电流测量(例行试验)

消弧线圈的电流应在额定频率及额定电压下测量。如果试验条件不够,施加的试验电压应尽量接近额定电压,并应由供需双方在订货时达成共识。

测量应在全部调节范围内进行。对于分级调节的消弧线圈,测量应在每级进行。对于连续调节的消弧线圈,测量应在至少五个位置上进行,这五个位置在全部调节范围内均匀分布。

11.8.6 辅助绕组和二次绕组空载电压测量(例行试验)

任何辅助绕组和二次绕组的空载电压测量应在全部调节范围内,并保持在主绕组为额定电压下进行。如果不可行,试验电压应尽可能高。

11.8.7 温升试验(型式试验)

11.8.7.1 液浸式消弧线圈

试验应按照 GB 1094.2 进行。试验时,任何辅助绕组和二次绕组的端子应开路。

如果产品是短时工作制,并且最高持续电压高于额定电压的 30%,则温升试验应以最高持续电压开始,直到达到稳定状态。施加额定电流持续时间的额定电流后,绕组温度用电阻法测量,顶层油温度用温度计测量(见 GB 1094.2)。

如果最高持续电压不大于额定电压的 30%,则可以不施加最高持续电压,初始温度可以计算得出并应加到温升试验测得的温升值上。

11.8.7.2 干式消弧线圈

试验按 GB 1094.11 进行,试验时,任何辅助绕组和二次绕组的端子应开路。

对持续流过额定电流的消弧线圈,应施加额定电流,当绕组和铁心的温升变化值不超过 1 K/h,则

温升视为稳定,用电阻法测量绕组温度。

对额定电流持续时间不超过 2 h 的消弧线圈,应按规定持续时间施加额定电流后,用电阻法测量绕组温度。

11.8.8 绝缘试验(例行试验、型式试验)

包括下列各项试验:

——外施耐压试验(GB 1094.3—2003 的第 11 章,例行试验);

——感应耐压试验(GB 1094.3—2003 中 12.2,例行试验);

——雷电冲击试验(GB 1094.3—2003 中 13.3.2,型式试验)。

外施耐压试验电压水平取决于接地端子的绝缘水平。

对可调电感的消弧线圈,在进行上述试验时,应该设定在最小电流位置。如果供需双方同意,也可以设定在某一特定位置。

雷电冲击试验时,将电压施加在与电力变压器中性点或接地变压器中性点连接的端子上。试验按照 GB 1094.3—2003 中 13.3.2 的方法 b)。

注:GB 1094.3—2003 中 13.3.2 方法 b)允许冲击电压波前时间最长为 13 μ s。

如果消弧线圈有分接绕组,则雷电冲击试验应在消弧线圈位于最大分接和最小分接时进行。

如果无法实施感应耐压试验,经供需双方在订货时协商,可用雷电冲击试验代替。

11.8.9 损耗测量(特殊试验)

电感可调消弧线圈的损耗应至少在可调范围内的五个位置上进行测量,包括额定电流位置。损耗应在额定电压、额定频率下测量。如果在额定电压下的额定电流档时测得的电流不等于额定电流,则测得的损耗应通过乘以额定电流与实测电流之比的平方校正到额定电流下。

损耗测量应该在工厂的环境温度下进行,并按 GB 1094.1 给出的方法校正到参考温度。

总损耗包括电阻损耗、铁损和附加损耗。电阻损耗部分等于 $I_r^2 R$, R 是测得的直流电阻, I_r 是额定电流。铁损和附加损耗从测量上无法分开,铁损和附加损耗之和是总损耗与电阻损耗 $I_r^2 R$ 之差。

电阻损耗按照 GB 1094.1 校正到参考温度。通常不方便将铁损和附加损耗校正到参考温度,因此,通常假定铁损和附加损耗与温度无关,这样的假定通常会使参考温度下的损耗略高于实际损耗。

参考温度下的总损耗等于校正到参考温度的电阻损耗与测量的铁损和附加损耗之和。

11.8.10 线性度测量(特殊试验)

对于电感可调的消弧线圈,测量应在最大和最小电流位置下进行。

试验应通过施加额定频率的电压进行,电压逐级增加,每级约为 10%,直至 1.1 倍的额定电压。通过绘制电流方均根值与电压方均根值的关系曲线来确定产品的线性度。在这个曲线上的任一点的电流,与通过零与额定电压时对应电流值作出的直线上相应的电流的偏差不应超过 $\pm 5\%$ 。

11.8.11 声级测定(特殊试验)

测量一般按照 GB/T 1094.10 的规定,在额定电压下进行,消弧线圈设置为额定电流位置。电感可调的消弧线圈在其他电流下的测量应由供需双方协商确定。

11.8.12 电感调节机构机械寿命试验(特殊试验)

当消弧线圈带有调感的机构时,用户可以与制造方达成协议,通过进行相关的机械寿命试验或验证程序,以验证消弧线圈的调节机构的完整性和操作的持久性。

试验应包括一系列的消弧线圈调节操作,反映消弧线圈在寿命期内的预期操作数。典型的机械寿

命试验包括 1 000 次全部调节范围的循环操作。试验时的环境温度应由供需双方达成协议,如-20℃、20℃或40℃。

注:机构可能包括如电机、开关等。

11.8.13 耐受额定电流机械力试验(特殊试验)

本试验适用于用机械方法调节磁路气隙的消弧线圈。

消弧线圈耐受额定电流机械作用力的能力应按 GB 1094.5—2008 中 4.2 要求,用试验或参考在类似产品上进行的试验来验证。

如用户无另行规定,应进行两次持续时间为 0.5 s±0.05 s 的试验。试验中,消弧线圈应置于额定电流位置,二次绕组和辅助绕组应开路。

注 1:供需双方可以协商在其他电流位置进行试验。

电流第一个峰值应为额定电流乘以系数 k (k 值见 GB 1094.5—2008 中 4.2.3)所得的值,系数 k 的最小值为 $1.8\sqrt{2}=2.55$ 。

注 2:由于铁心饱和的效应,因此系数 k 可能大于 2.55。用户可以要求一个模拟系统条件的特殊试验以考虑这种情况。

11.9 偏差

表 3 给出了额定参数的偏差:

表 3 偏差

参 数	偏 差
额定电压下及最小电感时主绕组的电流	额定值的±5%
其他位置时的电流	规定值的±10%
在全部调节范围内,主绕组施加额定电压时的辅助绕组和二次绕组的空载电压	规定值的±10%
线性度(见 11.8.10)	±5%

12 平波电抗器

12.1 概述

平波电抗器串联连接于直流系统中,对流过的谐波电流提供一个高值阻抗,并降低直流系统故障电流的上升速度。平波电抗器主要用于下述两种场合:

- a) 工业用:直流中通常叠加有大量的谐波分量,这类平波电抗器一般为户内用且直流系统电压通常不高于 10 kV;
 - b) 高压直流输电系统用:直流中通常叠加有少量的谐波分量,直流系统电压通常高于 50 kV。
- 高压直流输电用平波电抗器也可按 GB/T 20836、GB/T 20837 和 GB/T 25092 的有关规定。

12.2 设计

按电抗器设计和安装不同,可分为:

- 干式或液浸式;
- 空心或间隙铁心式;
- 带磁屏蔽或不带磁屏蔽;

- 户内或户外安装；
- 空气自冷、强迫风冷或绕组直接液冷式(用于干式电抗器)；
- 具有恒值的电感(线性电抗器)或对于某些工业用的电抗器,其电感是随电流而变化的。

12.3 术语和定义

下列术语和定义适用于本章：

12.3.1

额定电压 rated voltage

U_d

规定的施加于电抗器绕组线端与地之间的直流电压。

12.3.2

最高运行电压 maximum operating voltage

U_{dmax}

规定的电抗器绕组线端与地之间的最高持续直流电压。

12.3.3

额定持续直流电流 rated continuous direct current

I_d

规定的电抗器的持续直流电流。

注：额定直流电流不计入任何交流电流分量。

12.3.4

额定持续电流频谱 rated continuous current spectrum

除直流电流外,规定的各标称频率下的持续稳态电流方均根值。

12.3.5

短时过载直流电流 short-time overload direct current

在短时过载电流持续时间或负载周期内电抗器通过的短时直流电流规定值。

12.3.6

短时过载电流频谱 short-time overload current spectrum

在短时过载电流持续时间或负载周期内,除了直流电流外,规定的各标称频率下的短时过载电流方均根值。

12.3.7

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

规定的短时过载电流的持续时间。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。

12.3.8

额定暂态故障电流 rated transient fault current

规定的系统故障电流峰值和波形。

12.3.9

额定增量电感 rated incremental inductance

L_{inc}

在标称频率和额定直流电流 I_d 下的增量电感规定值。

注 1：增量电感是指电抗器中通过一个叠加于直流电流上的具有某一特定幅值和频率的交流电流而得出的值。

注 2：对于空心电抗器,增量电感与直流电流无关。对于气隙铁心式或带磁屏蔽的空心式电抗器,增量电感是直流电流的函数。

注 3：有关增量电感更多的信息见 C.4。

12.4 额定值

12.4.1 额定电压

额定电压由用户规定。

12.4.2 最高运行电压

最高运行电压应由用户规定,它应不低于电抗器在运行时所受到的最高持续运行直流电压。

12.4.3 额定持续直流电流

额定持续直流电流应由用户规定。

12.4.4 额定持续电流频谱

各个频率及相应频率下的电流值均应由用户规定。

注:不同的运行条件可能导致有不同的电流频谱。所有这些电流频谱均应包括在技术规范内,其中有一个被指定为额定持续电流频谱。

12.4.5 短时过载电流、电流频谱及电流持续时间或负载周期

短时过载电流连同短时过载电流频谱(如果有),还有相关的短时过载电流持续时间或负载周期以及周围环境温度均应由用户规定,还可以规定几个电流值及相关的持续时间或负载周期。

负载周期应给出如下信息,即短时过载电流最大幅值及最大持续时间、相邻两次短时过载电流的最小时间间隔、各次施加短时过载电流之间的电流水平和规定持续时间的短时过载电流的最大连续施加次数。所有关于短时过载电流负载周期的信息(如果有)应在电抗器规范中给出。

12.4.6 额定暂态故障电流

电抗器应考虑能承受用户规定的最严酷的暂态故障电流峰值和波形。此外,用户还应提出 I^2t 值或足够的相关信息,以便制造方计算出 I^2t 值。如果不进行暂态故障电流试验,制造方应阐明该电抗器具有能承受住额定暂态故障电流的能力。

12.4.7 额定增量电感

在特定频率及额定直流电流下的增量电感应由用户规定其最小值。除另有规定外,该值的偏差见 12.9。如未规定频率,则制造方应选择某个合适的频率。

如果交流电流幅值与直流电流比较相对明显时,则在设计中应考虑这一点,以便得到额定增量电感。

12.4.8 平波电抗器的线性度

若用户无另行规定,则电抗器在其直流电流为额定值及以下时应是线性的,其偏差应符合 12.9 规定。

如使用时有要求,则用户可规定在某一个或多个高于额定直流电流时降低的增量电感的最小值。此时,在所有规定的直流电流值下的增量电感最大值等于额定值加上正偏差值。

12.4.9 绕组直接液冷式电抗器的补充要求

对于绕组直接液冷式(通常用水的混合液)的干式电抗器,其进、出口处的液体最高温度值及其相关的压力值、最大的流速和有关冷却液的细节应由用户或由用户与制造方双方协商予以规定。

12.5 温升

GB 1094.2 关于液浸式变压器的温升限值和 GB 1094.11 关于干式变压器的温升限值适用于额定持续直流电流和叠加的额定持续电流频谱,此外,如果有规定,也适用于短时过载直流电流、电流频谱以及电流持续时间或负载周期等情况。

注:温升验证是利用 12.8.13 中的公式求出的当量直流电流来进行的。

12.6 绝缘水平

绝缘水平应由用户规定,它与电抗器所在直流系统中的位置的绝缘水平相配合。

下列绝缘水平可能不适用于 12.1 中 a) 项所包括的工业用电抗器,但 12.6.5(外施交流耐压水平)除外。但是,如果要求进行匝间过电压试验时,其试验水平值也可以由用户规定。

12.6.1 雷电冲击水平

应规定电抗器绕组每个端子对地和两个端子之间的雷电冲击水平。

12.6.2 操作冲击水平

应规定电抗器绕组每个端子对地和两个端子之间的操作冲击水平。

12.6.3 外施直流耐压水平

直流耐压水平应为 $U_{dc} = 1.5U_{dmax}$ 。

此电压应施加于连接在一起的绕组各端子与地之间。

注:外绝缘爬电距离的特殊要求应由供需双方协商确定。

12.6.4 极性反转耐压水平

极性反转耐压水平应为 $U_{pr} = 1.25U_{dmax}$ 。

此电压应施加于连接在一起的绕组各端子与地之间。

12.6.5 外施交流耐压水平

外施交流耐压水平应为:

对于 12.1 中 a) 项所包括的电抗器: $U_{ac} = \frac{2.5 \cdot U_{dmax}}{\sqrt{2}}$

对于 12.1 中 b) 项所包括的电抗器: $U_{ac} = \frac{1.5 \cdot U_{dmax}}{\sqrt{2}}$

此电压应施加于连接在一起的绕组各端子与地之间。

注:当运行中可能出现叠加有较高的交流电压值的特殊使用情况时,用户可以规定更高的外施交流耐压水平。

12.7 铭牌

每台电抗器应提供由不受气候影响的材料制成的铭牌,并安装在明显可见的位置。铭牌上应标出下述各项,所示项目应该用耐久的方法刻出(如用蚀刻、雕刻或打印法):

- 电抗器型号;
- 户内或户外用;
- 本部分代号;
- 制造方名称;

- 出厂序号；
- 制造年月；
- 绝缘水平；
- 最高运行电压；
- 额定持续直流电流；
- 有关短时过载电流及其持续时间的信息；
- 额定持续直流电流下的增量电感；
- 冷却方式；
- 绝缘耐热等级(仅适用于干式电抗器)；
- 关于液体冷却(对绕组直接液冷式电抗器)的细节；
- 顶层油温升限值和绕组平均温升限值(对液浸式电抗器)；
- 总质量；
- 运输质量(对液浸式电抗器)；
- 器身质量(对液浸式电抗器)；
- 绝缘液体质量(适用时)；
- 绝缘液体的种类,如果不是矿物油(适用时)；
- 包括互感器在内的接线图(适用时)。

12.8 试验

12.8.1 概述

例行试验、型式试验和特殊试验的一般要求按 GB 1094.1 的规定。

12.8.2 例行试验

应进行下列例行试验：

12.8.2.1 12.1 中 a)项所包括的电抗器

- 绕组电阻测量(GB 1094.1)；
- 增量电感测量(12.8.5)；
- 外施交流耐压试验(12.8.7)；
- 绕组直接液冷式电抗器液体冷却管路的密封试验(12.8.16)。

12.8.2.2 12.1 中 b)项所包括的电抗器

- 绕组电阻测量(GB 1094.1)；
- 谐波电流损耗测量(12.8.6)；
- 增量电感测量(12.8.5)；
- 液浸式电抗器的外施交流耐压试验(12.8.7)；
- 液浸式电抗器的外施直流耐压试验(12.8.8)；
- 液浸式电抗器的极性反转耐压试验(12.8.9)；
- 雷电冲击试验(12.8.10)；
- 液浸式电抗器的操作冲击试验(12.8.11)；
- 液浸式电抗器绕组对地的绝缘电阻和(或)电容及介质损耗因数($\tan\delta$)测量(作为参考值,用于与以后的现场测量值进行比较,此处不给出限值)。

12.8.3 型式试验

- 应进行下列型式试验：
- 温升试验(12.8.13)；
 - 12.1 中 b)项所包括的干式电抗器的操作冲击试验(12.8.11)；
 - 绕组直接液冷式电抗器的压力差测量(12.8.17)；
 - 干式电抗器的外施直流耐压湿试验(12.8.12)；
 - 风扇和油泵(如果有)消耗功率的测量。

12.8.4 特殊试验

- 当用户特殊要求时,应进行下列特殊试验：
- 声级测定(12.8.14)；
 - 高频阻抗测量(12.8.15)；
 - 暂态故障电流试验(12.8.18)；
 - 液浸式电抗器截波冲击试验(12.8.19)。

12.8.5 增量电感测量(例行试验)

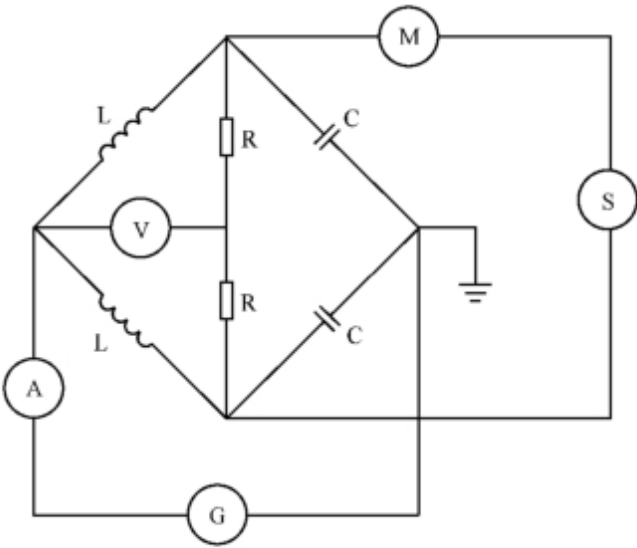
增量电感测量应在叠加有规定的谐波电流的额定直流电流 I_d (额定增量电感)和在零直流电流时进行(空载增量电感),并且还应在直流电流值介于上述两个极限值之间的若干个中间值下进行,以确认电抗器是线性电抗器。

注 1: 如果交流电流与直流电流相比较低(小于 10%)时,交流试验电流是否准确对测量而言无关紧要。

本测量应采用如图 10 所示的两台规格相同的平波电抗器组成的桥式接线图,以便同时施加直流电流和交流电流。但是,如经供需双方同意也可采用其他方法测量,尤其是在只有一台电抗器适合于试验的情况下。

注 2: 经供需双方协商,还可以采用由测出的磁化特性(见 C.7)确定的微分电感来代替增量电感。

对于空心电抗器,由于其电感值与电流大小无关,故只需进行空载增量电感的测量。



图中：

- | | |
|--------------------|-------------------|
| A——交流电流测量装置； | M——直流电流测量装置； |
| C——隔离直流泄漏电流的隔离电容器； | R——交流电压测量用的辅助电阻器； |
| G——交流电源； | S——直流电源； |
| L——被试平波电抗器； | V——交流电压表。 |

图 10 两台规格相同的平波电抗器增量电感的测量线路

12.8.6 谐波电流损耗测量和总损耗计算(例行试验)

本试验应在工厂环境温度下,当直流电流为零时,在规定的谐波电流频谱中每个频率及电流下进行。测得的损耗值应校正到参考温度。

总谐波损耗包括电阻损耗、附加损耗和在间隙式铁心及磁屏蔽空心电抗器中的铁损。电阻损耗部分等于 $I_h^2 R$, R 为直流电阻测量值, I_h 为谐波电流值。铁损和附加损耗不能用测量方法予以分开,因此,铁损和附加损耗的总和等于总谐波损耗与总电阻损耗之差。

电阻损耗按 GB 1094.1 给出的方法校正到参考温度,通常不方便将铁损和附加损耗校正到参考温度。因此,应认为铁损和附加损耗值与温度无关。这种假定一般会使给出的参考温度下的损耗值略高于实际损耗值。

空心电抗器的损耗测量见 7.8.6.2。

如果测量时的电流值不等于规定值时,则损耗值应通过乘以规定电流值与测量电流值之比的平方校正到规定的谐波电流频谱中相应的电流值。

电抗器的总损耗由额定直流电流下的绕组直流损耗(按 GB 1094.1 给出的方法校正到参考温度)与总谐波电流损耗之和算出。

12.8.7 外施交流耐压试验(例行试验)

本试验应在 50 Hz 或 60 Hz 下进行。电压应施加于连接在一起的绕组各端子与地之间,试验时间为 1 min。

对于 12.1 中 b) 项所包括的液浸式电抗器,应按 GB 1094.3—2003 附录 A 的相关部分进行局部放电测量。所用测量设备应符合 GB/T 7354 的规定,本试验持续时间为 1 h。

注:推荐采用能对局部放电进行检测和定位的测量设备,特别是采用能对电抗器内部产生的局部放电和试验线路上可能产生的局部放电加以区分的测量设备。

局部放电量不应大于 500 pC。

当试验结果不符合要求时,建议按 GB 1094.3—2003 附录 A 采取的措施进行处理。

12.8.8 液浸式电抗器的外施直流耐压试验(例行试验)

12.8.8.1 试验程序

电抗器的油温应是 $(20 \pm 10)^\circ\text{C}$ 。电压应施加于连接在一起的绕组各端子与地之间,电压为正极性。

本试验开始前,套管应至少接地 2 h,且不允许对电抗器绝缘结构施加较低的预加电压。试验电压应在 1 min 之内上升到规定耐压值并维持 120 min,此后,试验电压应在 1 min 或更短的时间内下降到零。

在整个外施直流耐压试验期间,应进行局部放电测量。

注 1:在直流耐压试验结束后,绝缘结构还可能有相当多的残余电荷。若不进行充分的放电,可能会对以后的局部放电测量有影响。

注 2:推荐使用能对局部放电进行定位的测量设备,特别是采用能对电抗器内部产生的局部放电和试验线路上可能产生的局部放电加以区分的测量设备。

12.8.8.2 评价准则

局部放电测量应按 GB 1094.3—2003 附录 A 的相关部分进行,测量设备应符合 GB/T 7354 的规定。

若在本试验中最后 30 min 期间出现的不小于 2 000 pC 的放电脉冲数不超过 30 个,且在最后的 10 min 内出现的不小于 2 000 pC 的放电脉冲数不超过 10 个时,则应认为试验结果是可以接受的。如

果上述条件未得到满足时,则可将本试验延长 30 min。如在此延长期间中仍不能满足评价准则时,则应认为该产品未能通过试验。

同时应将试验最后 30 min 以前所出现的局部放电予以记录,以作参考用。

如果虽未满足评价准则,但又未发生击穿现象时,则不应断然拒绝该电抗器,而应由供需双方协商,提出进一步的调查工作和具体行动。用户亦可要求成功通过局部放电试验后再接受该电抗器。

12.8.9 液浸式电抗器的极性反转耐压试验(例行试验)

12.8.9.1 试验程序

电抗器的油温应是 $(20\pm 10)^{\circ}\text{C}$ 。电压应施加于连接在一起的绕组各端子与地之间。双反转试验应按图 11 所示。

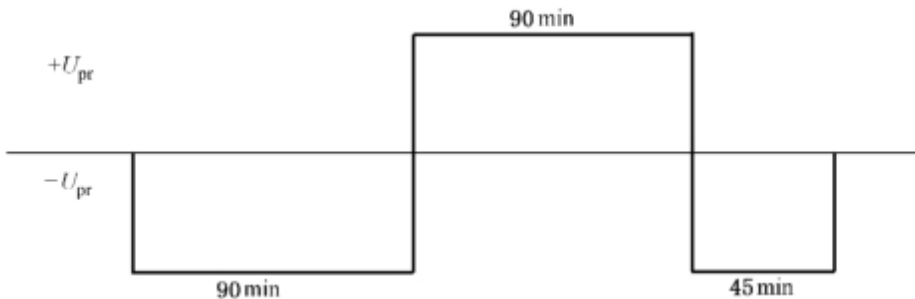


图 11 极性反转试验电压变化图

试验开始时,套管应至少接地 2 h,且不允许对电抗器绝缘结构施加较低的预加电压。本试验应进行两次反转,其试验顺序为:先在负极性下加压 90 min,然后紧接着在正极性下加压 90 min,最后再在负极性下加压 45 min。电压从一个极性反转到另一个极性时应在 2 min 内完成。当电压达到 100% 试验电压时,极性反转完成。

在反转耐压试验的全过程中都应进行局部放电测量。

注 1: 极性反转试验结束后,绝缘结构还可能有相当多的残余电荷。若不进行充分的放电,可能会对以后的局部放电测量有影响。

注 2: 推荐使用能对局部放电进行定位的测量设备,特别是采用能对电抗器内部产生的局部放电与试验线路上可能产生的局部放电加以区分的测量设备。

12.8.9.2 评价准则

局部放电测量应按 GB 1094.3—2003 附录 A 的相关部分进行,测量设备应符合 GB/T 7354 的规定。

用局部放电测量结果进行判断,若任何一个 10 min 期间出现的不大于 2 000 pC 的放电脉冲数不超过 10 个时,则应认为试验试验结果是可以接受的,且不需进行进一步的极性反转试验。由于在直流电压变化时出现一些局部放电现象是正常的,故在试验开始后的第一个 5 min 期间、极性反转期间及此后的第一个 5 min 期间所记录的局部放电量不予考虑。但是,上述期间内出现的 500 pC 及以上的局部放电脉冲仍应予以测量和记录,以作参考用。

如果虽未满足评价准则,但又未发生击穿现象时,则不应断然拒绝该电抗器,而应由供需双方协商,提出进一步的调查工作和具体行动。用户也可要求成功通过局放试验后再接受该电抗器。

12.8.10 雷电冲击试验(例行试验)

试验一般应按 GB 1094.3—2003 的第 13 章和第 14 章、GB/T 1094.4—2005 的第 7 章以及 GB 1094.11—2007 的第 21 章(对于干式电抗器)进行。本试验应依次对每个端子进行冲击,试验时另

一个端子应接地。

对于干式电抗器,本试验应分别在正极性和负极性冲击电压下进行。

注:如果绕组两个端子之间的绝缘要求与各端子对地的绝缘要求不同时,其冲击试验程序应由供需双方协商确定。

12.8.11 操作冲击试验(例行试验、型式试验)

试验一般应按 GB 1094.3—2003 的第 15 章和 GB/T 1094.4—2005 的第 8 章进行。

操作冲击试验应在连接在一起的两个端子与地之间进行。冲击电压应是负极性,其波形应符合 GB/T 16927.1 的规定。

由于试验用冲击电压发生器容量不够,因此在端子之间进行的操作冲击试验可能无法进行,此时,电抗器承受操作冲击试验水平的能力应由制造方说明。

对于干式电抗器,本试验应分别在正极性和负极性冲击电压下进行,试验程序应符合 GB/T 16927.1 的规定。如果这种电抗器是供户外使用,则是否进行湿状态下的冲击试验应由供需双方协商确定。

12.8.12 干式电抗器的外施直流耐压湿试验(型式试验)

本试验是对干式平波电抗器的绝缘子进行的试验。应在潮湿状态下施加直流试验电压 U_{dc} (试验水平见 12.6.3)并持续 1 h。

试验应在绝缘子的布置与运行情况相同的条件下进行。

注 1:可以不要使用真实的电抗器来达到符合运行的情况,可采用一种与电抗器结构相当的合适结构件来代替。

按 GB/T 16927.1 的规定,试验前对一个支撑绝缘子进行淋雨,至少应淋雨 30 min,且在试验电压施加期间一直淋雨。湿试验期间不应发生闪络。

注 2:根据投标时供需双方之间的协议,本试验可在一个独立的绝缘子上进行。

12.8.13 温升试验(型式试验)

试验一般应按 GB 1094.2 进行,试验中施加的直流电流为按 12.8.6 确定的总损耗值下的等效直流试验电流 I_T 。对于干式电抗器,其绝缘耐热等级应采用 GB 1094.11 中的规定值。

电抗器的等效直流试验电流 I_T 应使用下式计算:

$$I_T = \sqrt{\frac{R_{ref} \cdot I_d^2 + P_b}{R}}$$

式中:

I_T ——等效直流试验电流;

R_{ref} ——校正到参考温度下的绕组直流电阻测量值;

R ——在试验温度下测出的绕组直流电阻值;

I_d ——额定直流电流;

P_b ——按 12.8.6 得到的总谐波损耗值。

在某些情况下,例如,在需要一个高的试验电压、大的电流或功率时,可能难以满足这些试验条件。此时,本试验可以在不低于 $0.9I_T$ 的降低的试验电流 I_{test} 下进行。试验水平应由制造方在投标书中说明,并在订货时由供需双方协商确定。测得的温升值应校正到等效的直流试验电流 I_T 。

对于液浸式电抗器,油的温升应乘以 $\left(\frac{I_T}{I_{test}}\right)^{2x}$,绕组对油的温升应乘以 $\left(\frac{I_T}{I_{test}}\right)^y$, x 及 y 值如下选取:

——对于 ON 冷却式电抗器 $x=0.8$; $y=1.3$;

——对于 OF 冷却式电抗器 $x=1.0$; $y=1.3$;

——对于 OD 冷却式电抗器 $x=1.0$; $y=2.0$ 。

对于干式电抗器,绕组对环境温度的温升应乘以 $\left(\frac{I_T}{I_{test}}\right)^y$, y 值如下选取:

——对于 AN 冷却式电抗器 $y=1.6$;

——对于 AF 冷却式电抗器 $y=1.8$ 。

在大多数情况下,稳态条件下的电抗器总损耗略低于参考温度下的相应值,这是由于试验时的环境温度通常低于设计规定值。不过,这种影响应予以忽略。

温升试验中,应注意采用合适的连接和电气引线将电抗器与试验电源相连。这一点,对于干式空心电抗器尤为重要。

对于干式空心电抗器,如有要求时,应在电抗器温升试验期间测量电抗器端子的温升。为了得到有效的端子温升测量值,用户应提供一个连接件和至少 1 m 的现场用导线,供制造方温升试验时用。端子温升限值见第 6 章(也可见 IEC/TR 60943)。

12.8.14 声级测定(特殊试验)

试验一般应按 GB/T 1094.10 进行。本试验在施加额定直流电流的同时,还应依次叠加规定谐波电流频谱中每一个重要的交流电流。

试验线路如图 10 所示。此接线图需要两台同一规格的电抗器,但试验时它们应进行隔声处理。交流电源可用一台容量足够、频率可调的正弦波发生器。为了加大注入电抗器的谐波电流,可以利用电容器将试验回路的谐振频率调谐到指定状态下。

总声功率值应使用下述公式计算,也可见 GB/T 1094.10 中附录 A:

$$L_{\text{tot}} = 10 \lg \left(\sum_i 10^{L_i/10} \right)$$

式中:

L_{tot} ——总声功率级;

L_i ——每个电流分量下的声功率级。

如果试验中达不到规定的电流值时,经供需双方之间协商,可按下述公式用计算的方法将测量值校正到额定电流下的声功率级:

$$L_{\text{W-rated}} = L_{\text{W-meas}} + 20 \lg \left(\frac{I_{\text{DC-rated}} \times I_{\text{h-rated}}}{I_{\text{DC-meas}} \times I_{\text{h-meas}}} \right) \text{ dB(A)}$$

式中:

$L_{\text{W-rated}}$ ——在额定直流电流和额定谐波电流下的声功率;

$L_{\text{W-meas}}$ ——在测量的直流电流和谐波电流下的声功率;

$I_{\text{DC-rated}}$ ——额定直流电流;

$I_{\text{h-rated}}$ ——额定谐波电流;

$I_{\text{DC-meas}}$ ——噪声测量时的直流电流;

$I_{\text{h-meas}}$ ——噪声测量时的谐波电流。

12.8.15 高频阻抗测量(特殊试验)

超出频率范围的电抗器阻抗测量应由供需双方协商确定。

注:测量时用的典型频率范围为工频与几千赫兹之间以及 30 kHz 和 500 kHz 之间。试验方法取决于使用情况,用户应对使用情况提供信息。

12.8.16 绕组直接液冷式电抗器液体冷却管路的密封试验(例行试验)

应通过试验来表明液体冷却管路无泄漏。试验应在工厂环境温度下进行,试验时,冷却管路中所安装的全部元器件(管路、附件及仪表等)按实际运行时完全装配好,尽可能对影响试验结果的各种因素予以关注。冷却管路中应充入冷却液,不应有气泡。如无另行规定,试验时应施加的静压力至少等于与电抗器相连通的冷却系统最大工作压力的 1.5 倍并加上 200 kPa,试验持续时间至少为 6 h。

施加压力时,应仔细检查电抗器中可能出现的泄漏,尤其是象接合处和连接件等关键部位。如果未出现泄漏,则应认为试验合格。

12.8.17 绕组直接液冷式电抗器的压力差测量(型式试验)

应测量电抗器液冷管路中进、出口之间的压力差。测量应在工厂环境温度下进行,测量时,冷却管路中所安装的全部元器件(管路、附件及仪表等)按实际运行时完全装配好,尽可能对影响试验结果的各种因素予以关注。将用户所规定的冷却液(例如,纯水或水与乙二醇的混合液)用泵按规定的流速注入电抗器冷却管路内。应测量进水口、出水口处的压力和冷却液的流速(L/min)。冷却液在额定流速下的压力差不应大于规定值。

如用户另有规定,还应在多个不同的流速下测量压力差,以便绘出压力差与冷却液流速之间的关系曲线图。

12.8.18 暂态故障电流试验(特殊试验)

12.8.18.1 概述

如果用户要求进行暂态故障电流试验,应在订货时规定,试验方法应由供需双方协商确定。暂态故障电流试验规范应包括试验电流峰值、 I^2t 值和试验电流冲击次数。

应采用一种能得到规定的试验电流峰值和 I^2t 值的方法进行暂态故障电流试验。如无另行规定,在全值试验电流下的冲击应进行两次。

注1:可能有各种不同的方法,其中一种方法见 IEEE 1277-2000 中附录 E。

注2:如果暂态故障电流峰值与额定电流之比较低(通常小于10),通常可以不进行本试验。

注3:对于高压直流输电用的平波电抗器进行全暂态故障电流试验的要求,一般会超过工业用大电流试验站的设备能力。

12.8.18.2 评价准则

暂态故障电流试验前后,应在直流电流为零时对电抗器进行电感测量,并且应按 12.8.10 的规定在 100%规定试验电压下进行雷电冲击试验。前后测得的电感值应在测量偏差限值范围内。绝缘试验的波形不能有变化,同时符合高压绝缘试验系统的相关规定。

对于液浸式电抗器,有关故障检测的一般要求参考 GB 1094.5—2008 中 4.2.7。

对于干式电抗器,目视检查电抗器及其支撑结构,在机械结构上应没有能影响电抗器功能的任何变化。如果在暂态故障电流试验后,绕组夹紧系统损坏或其表面裂痕的数量或尺寸明显增加,则应认为电抗器未通过本试验。当有疑问时,最多应再施加全峰值电流三次,以确定上述监测结果是否稳定。如果情况继续恶化,则应认为电抗器未通过试验。如果在增加的一次或两次暂态故障电流试验后,未出现恶化情况,且随后的各项例行试验项目又合格,则应认为电抗器通过了本试验。如果适用,更多的信息参见附录 H。

12.8.19 液浸式电抗器截波冲击试验(特殊试验)

试验应按 GB 1094.3—2003 的第 14 章进行。试验时,依次对每个端子进行冲击,另一端子接地。

12.9 偏差

额定增量电感的偏差应为 $^{+20}_{-0}\%$ 。

按 12.8.5 测得的在直流电流为零时的增量电感偏差应不超过额定直流电流下的增量电感测量值的 $^{+10}_{-0}\%$ 。

按 12.8.6 测得并校正后的总损耗值偏差不应超过规定值的 10%。

附 录 A
(资料性附录)

本部分章条编号与 IEC 60076-6:2007 章条编号对照

表 A.1 给出了本部分章条编号与 IEC 60076-6:2007 章条编号对照一览表。

表 A.1 本部分章条编号与 IEC 60076-6:2007 章条编号对照

本部分章条编号	对应 IEC 60076-6:2007 章条编号
9.10.5.1	—
9.10.5.2	—
10.9.6.3	—
10.9.6.3.1	—
10.9.6.3.2	—
11.5.1	—
11.5.2	—
11.8.7.1	—
11.8.7.2	—
附录 A	—
附录 B	—
附录 C	附录 B
附录 D	附录 A
附录 E	附录 C
附录 F	附录 D
附录 G	附录 E
附录 H	附录 F
附录 I	附录 G

表 A.2 给出了本部分图表编号与 IEC 60076-6:2007 图表编号对照一览表。

表 A.2 本部分图表编号与 IEC 60076-6:2007 图表编号对照

本部分图表编号	对应 IEC 60076-6:2007 图表编号
图 C.1	图 B.1
图 C.2	图 B.2
图 C.3	图 B.3
图 C.4a)	图 B.4a
图 C.4b)	图 B.4b
图 C.5	图 B.5

表 A.2 (续)

本部分图表编号	对应 IEC 60076-6:2007 图表编号
图 C. 6	图 B. 6
图 E. 1	—
图 E. 2	图 C. 1
图 G. 1	图 E. 1
表 E. 1	表 C. 1
表 E. 2	—
表 E. 3	表 C. 2
表 E. 4	—

附 录 B
(资料性附录)

本部分与 IEC 60076-6:2007 的技术性差异及其原因

表 B.1 给出了本部分与 IEC 60076-6:2007 的技术性差异及其原因一览表。

表 B.1 本部分与 IEC 60076-6:2007 的技术性差异及其原因

本部分章 条编号	技术性差异	原 因
2	引用了采用国际标准的我国标准,而非直接引用国际标准;增加了“高压直流输电用油浸式平波电抗器”、“高压直流输电用油浸式平波电抗器技术参数和要求”和“高压直流输电用干式空心平波电抗器”引用标准。	符合我国国情;另外,我国前期已制定了“高压直流输电用平波电抗器”的系列标准,应与本标准配合使用。
7.8.2 8.9.2	将“液浸式电抗器绕组对地的绝缘电阻和/或电容及介质损耗因数($\tan\delta$)测量(作为参考值,用于与以后的现场测量值进行比较,此处不给出限值)”试验改为“间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器绕组对地的绝缘电阻测量(作为参考值,用于与以后的现场测量值进行比较,此处不给出限值)”和“液浸式电抗器电容及介质损耗因数($\tan\delta$)测量(作为参考值,用于与以后的现场测量值进行比较,此处不给出限值)”,分开叙述。	国内存在干式铁心电抗器,为符合我国电抗器的实际情况而修改。
7.8.3 7.8.4 7.8.10.2 7.8.13.1 8.9.2 8.9.15.1	将“液浸式电抗器”改为“间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器”。	国内存在干式铁心电抗器,符合我国国情。
7.8.5.3	将“电抗的线性度测量”改为“间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器的线性度测定”。	空心电抗器不需测试线性度,符合电抗器的实际情况。
7.8.7	将“谐波电流测量”改为“间隙铁心或磁屏蔽空心电抗器的谐波电流测量”。	空心电抗器不存在磁饱和引起的谐波,无需测试谐波电流,这样将更好地适应电抗器的实际情况。
7.8.10.3 7.8.10.4 8.9.9 8.9.10 9.10.7	将“ $U_m \leq 36 \text{ kV}$ ”改为“ $U_m \leq 40.5 \text{ kV}$ ”。	按 GB 311.1 中我国电力系统电压等级的规定,进行适应性修改。
7.8.10.6	删除条标题后的“(型式试验、例行试验)”字样。	GB 1094.3 中已规定按电压等级确定该项试验的类型,此处不必重复描述。
7.8.12	将“环境温度不应低于 10°C ”改为“环境温度不应低于 5°C ”。	按我国实际情况调整。

表 B.1 (续)

本部分章 条编号	技术性差异	原 因
7.8.13.1 8.9.15.1	将电抗器分为液浸式和干式两种进行阐述,增加对“干式电抗器(空心电抗器除外)”的要求。	国内存在干式铁心电抗器,适应我国国情,完善标准。
7.8.13.3 8.9.15.3	增加了“干式电抗器振动的测量方法”。	按我国实际完善标准。
7.8.13.4 8.9.15.4	增加“对于干式电抗器,夹件的最大振幅不应大于 $100\ \mu\text{m}$ (峰-峰值)”	按我国实际完善标准。
7.8.14	删除“注 1”,将原“注 2”改为“注 1”。	根据我国国情,注 1 不适用。
8.9.5	补充对“空心电抗器立式叠装三相组”的要求,并提出当“用于中性点有效接地系统时,还应测量单相阻抗 Z_{STr1} ”的要求。	完善标准。
9.4.10	用新编写的两段内容替换原标准的两段内容,并增加一个注。	完善标准。
9.10.5.1	增加此条,条标题为“滤波电抗器”,将原标准内容归入此条,补充了“立式叠装滤波电抗器三相组”的有关要求,并补充一个注。	完善标准。
9.10.5.2	增加此条,条标题为“阻尼电抗器”,并补充相关内容。	完善标准。
9.10.6	将正文中和注中的“三相叠装电抗器”改为“立式叠装电抗器”。 将“对单个相进行的损耗和品质因数测量的值可用于得到三相电抗器的总损耗,这时应考虑立式叠装产生的附加损耗”改为“应在单相励磁条件下,测试单相损耗和品质因数”。 在注中“单个相的测量损耗值……”前增加“三相励磁条件下”字样。	我国空心电抗器叠装方式有“三相立式叠装”,也有“两叠一平式叠装”,为了进行区分,特明确正文的表述,易于理解和实施。
10.9.6.3	增加此条,标题为“干式接地变压器的温升试验”。	国内存在干式接地变压器,增加该条是为了适应我国国情,完善标准。
11.5.1	增加此条,标题为“液浸式消弧线圈”,将液浸式消弧线圈的温升要求归入此条。	国内存在干式消弧线圈,由于增加干式消弧线圈温升,故此处需明确类别。
11.5.2	增加此条,标题为“干式消弧线圈”,并补充对干式消弧线圈的温升要求。	增加干式消弧线圈温升要求。
11.8.5	删除“作为例行试验,本试验可在低电压下进行,并校正到额定电压下”一段。	提高对试验的要求。
11.8.7.1	增加此条,条标题为“液浸式消弧线圈”,并将原 11.8.7 中的内容放入此条。	由于增加干式消弧线圈温升,故此处需明确类别。
11.8.7.2	增加此条,内容为干式消弧线圈的温升试验。	明确干式消弧线圈温升试验要求。
11.8.13	增加“本试验适用于用机械方法调节磁路气隙的消弧线圈。”	按实际使用情况,明确适用的产品范围。

表 B.1 (续)

本部分章 条编号	技术性差异	原 因
12.1	增加“高压直流输电用平波电抗器也可按 GB/T 20836《高压直流输电用油浸式平波电抗器》、GB/T 20837《高压直流输电用油浸式平波电抗器技术参数和要求》和 GB/T 25092《高压直流输电用干式空心平波电抗器》的有关规定”一段。	我国前期已制定了“高压直流输电用平波电抗器”的系列标准,应与本标准配合使用。
12.8.6	增加“空心电抗器的损耗测量见 7.8.6.2”。	符合产品实际需要。
附录 E	增加 E.1 条,条标题为“相间互感影响有效阻抗和有功功率的基本原理”,并补充相关内容;原标准条款、图、表序号依次顺变;增加表 E.2 和 E.4 及相关内容;修改了表 E.3 中的符号;图 E.2 中绕组标识由“U”、“V”、“W”改为“A”、“B”、“C”。	详细说明原理,并按我国习惯标识绕组。
附录 F	标题中删除“液浸式”字样;F.1 和 F.2 中将“附加损耗”改为“铁损和附加损耗”。	需考虑干式电抗器产品,以符合产品实际情况。
附录 G	将“试验应包含不低于 7 200 个要求幅值的过电压”改为“试验应包含不低于 3 000 个要求幅值的过电压”; 将“典型值为 100 kHz”改为“一般在 100 kHz 及以下”; 将注 2 中“试验电压的值用过电压和在第一个波峰上高频波得出的曲线的平均值来决定”改为“试验电压幅值应当用穿过第一个振荡波波顶上的所有过冲波或高频脉冲的平均值曲线来确定”。	IEC 使用的频率为 60 Hz,我国使用的频率为 50 Hz,因此按我国国情修改。 由于匝间过电压的谐振频率由设备电容和试品电感决定,因而频率不可能固定不变; 考虑试验实际情况,方便确定匝间过电压的值。

附 录 C

(资料性附录)

电抗器磁化特性

C.1 概述

尽管从电力系统的观点来看,电抗器电压与电流的关系是电力系统最感兴趣的主要性能,但磁链与电流的关系更适合于描述电抗器的磁化性能。磁链是电压对时间的积分。当磁链与电流的关系已知后,就能够计算稳态下和暂态下交流电压与电流的关系。

在电抗器中,如果至少部分磁通通过铁磁材料(铁心、磁屏蔽等),由于铁磁材料的磁饱和特性,电抗器将是非线性的。电抗器整体的特性是这样的,即在低磁通水平时,磁通与磁化电流是线性关系;在高磁通时,当铁磁材料完全饱和时,磁通的变化与磁化电流的变化也呈线性关系。在这两部分线性关系之间,存在一个渐变的过程。两条直线的交点叫拐点。见图 2 说明。

图 1 中,说明了三种不同的磁化特性。图 1a)说明励磁电流与磁链间的线性关系,这可以在磁路中没有铁磁材料的电抗器中看到。图 1b)中,当部分磁路中的磁密在高于正常运行水平时开始饱和时,磁通与电流间存在一定的非线性关系。图 1c)说明了在额定运行条件下,铁磁材料完全饱和时的情况。

C.2 磁化特性定义

基本上,铁磁材料中的磁密 B 与磁场强度 H 之间是非线性关系。对电抗器来说,正常情况下,磁路不同部分的磁密是不同的。这意味着磁路的不同部分在不同的磁通下饱和。因而,磁通 Φ 与电流的关系比磁密与磁场强度的关系更有意义。

绕组的磁链是指与计入绕组匝数的所有绕组相交链的总磁通。电抗器磁化特性是指瞬时磁链 ψ 与瞬时电流 i 的关系。

因为磁化特性主要受空气间隙影响,因此,电抗器中可以忽略磁滞现象。

C.3 磁化特性和电抗

正如 C.2 所述,电抗器磁化特性是指瞬时磁链 ψ 与瞬时电流 i 的关系,而电抗是施加的电压与电流的比值,两者都是方均根值(假定阻抗的电阻分量可以忽略)。给定了电压幅值和波形,就可以用磁化特性导出电抗。

如果磁链与电流间为线性关系,那么电压(方均根值)与电流(方均根值)之间也是线性关系,则电抗就是恒定的。如果磁链与电流是非线性关系,那么电压(方均根值)与电流(方均根值)间也是非线性关系,则磁链与电流间的关系就具有不同的特性。此时,电抗随电压变化。

在电压较低时,磁链与电流间的关系是线性的(磁链远低于拐点),但在较高电压时变为非线性的,这时磁通开始饱和。当施加引起磁化特性非线性的幅值的正弦电压时,电流就不是正弦的。说明见图 C.1。

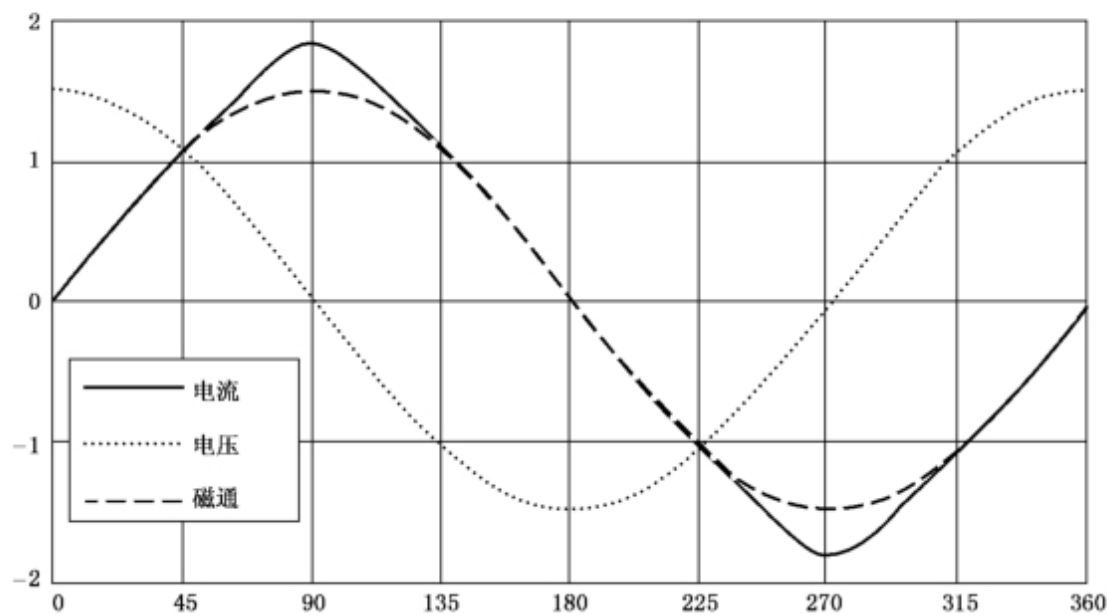


图 C.1 正弦电压加到具有图 C.6 所示非线性磁化特性电抗器上时的磁链和电流波形的关系

C.4 电感

电抗器的电感可用不同的方法来规定。在本部分中,微分电感、增量电感以及用电抗导出的电感都有应用。每种类型电抗器所定义的电感,表明了该电感的特殊应用。

微分电感定义为以电流为变量的磁链的导数(等于磁化特性的斜率):

$$L_d = \frac{d\psi}{di} \dots\dots\dots (C.1)$$

如果有一个交流电流叠加到直流上,增量电感定义如下:

$$L_{inc} = \frac{X_{a.c.}}{2\pi f_{a.c.}} \Big|_{I_{d.c.}} \dots\dots\dots (C.2)$$

式中 $X_{a.c.}$ 是在直流电流 $I_{d.c.}$ 下用测得的交流电压和交流电流导出的电抗。在较低的频率 $f_{a.c.}$ 下,电阻部分可以忽略。

从电抗导出的电感定义为

$$L_{reac} = \frac{X}{2\pi f} \dots\dots\dots (C.3)$$

式中 X 是用电压和电流方均根值导出的电抗值。

注:在国际电工委员会词典(IEV)中,电感是以磁链与电流的关系来定义的:

$$L = \frac{\psi}{i}$$

对具有非线性或饱和磁化特性的电抗器,该电感的定义有局限性,本部分中不采用。

C.5 谐波

施加电压中的谐波和电抗器的非线性特性,都会引起电流中的谐波。当磁链与电流不是线性关系时,纯正弦电压下的电流中就产生谐波。如果铁心的磁化特性已知,就能计算出电流中产生的谐波分量。

通常对线性电抗器,没有必要测量或计算谐波含量。

有时,准确地测量谐波电流是很困难的,因为谐波电流本身可引起施加电压的畸变。如果实际测量很难保证准确时,可采用磁化特性来计算谐波含量做为测量的替代方法。

总的谐波畸变率 THD 定义为谐波的方均根值与基波方均根值的关系。某个电流的 THD_i 就可以按照下式计算出来:

$$THD_i = \frac{I_{\text{rms, harmonics}}}{I_{\text{rms, fundamental}}} \approx \sqrt{\frac{I_{\text{rms}}^2 - I_{\text{rms, fundamental}}^2}{I_{\text{rms, fundamental}}^2}} = \sqrt{\frac{I_{\text{rms}}^2}{I_{\text{rms, fundamental}}^2} - 1} \quad \dots\dots\dots (\text{C.4})$$

或更实用的:

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^n i_h^2} \quad \dots\dots\dots (\text{C.5})$$

$i_h = I_h / I_1$;

I_h ——第 h 次谐波电流方均根值;

I_1 ——基波电流方均根值;

n ——最高谐波次数。

注:本部分中, n 在实际中可以取为 7。

C.6 涌入电流

稳定状态下,电抗器上的电压与流过电抗器的电流有近 90° 的相移。电压为峰值时电流过零。电抗器接到系统后,有一个暂态条件,会产生一个涌入电流,其峰值高于额定电流的峰值,涌入电流的峰值取决于频率及电抗器接入系统时电压的相位。

最坏的情况发生于电抗器接入时,电压正好过零。这样产生的磁链是稳态的两倍。对具有线性磁化特性的电抗器来说,涌入电流的峰值约为两倍的稳态电流峰值。

对具有非线性磁化特性的电抗器来说,涌入电流的峰值可能大于稳态电流峰值的两倍。涌入电流水平可以从磁化特性导出。

涌入电流现象与变压器的相同,但峰值电流与额定电流的比值较低。剩磁效应对电抗器涌入电流没有影响。

假定电力系统只有很小的电阻分量,电抗器绕组的损耗决定了涌入电流的阻尼。

C.7 磁化特性测量

由于磁链不能直接测量,因此必须使用间接法来测量磁化特性。当施加幅值足以使电抗器饱和的交流电压至少一个周期后,就可以用测得的电压和电流的瞬时值计算出磁化特性。如果要求特性测量的电流高于最大运行电流,就应使用不使电抗器过载的方法,例如采用 C.7.1 的直流法,高于标称电流的磁化特性就可以估算出来了。

C.7.1 直流充电-放电法(理论)

用直流给电抗器充电(高于标称峰值电流),磁链随着磁化曲线增加(图 C.2 中开关 1 和 3 闭合),然后将电抗器短路,记录衰减电流和时间(图 C.2 中开关 2 闭合,开关 1 和 3 打开)。利用衰减电流,磁化特性(磁链与电流的关系)可用下面公式计算出来:

电抗器短路时(如图 C.3 所示 $U_R = U_L$),使用下列公式:

$$R \times i(t) = -\frac{d\psi(t)}{dt} = -\frac{d\psi(i)}{di} \times \frac{di(t)}{dt} = \left[-L_d \times \frac{di(t)}{dt} \right] \quad \dots\dots\dots (\text{C.6})$$

式中: R 为已知的整个回路的电阻(绕组+连接导线+分流器)。用测得的 $i(t)$,可算出电流变化率 $di(t)/dt$ 。

这意味着 $\psi(i)$ 可计算如下:

$$\int_{i_0}^{i'} \frac{R \times i(t)}{\frac{di(t)}{dt}} di = - \int_{\psi_0}^{\psi'} d\psi = \psi_0 - \psi' = \psi(i) \dots\dots\dots (C.7)$$

在 $t=0$ 时(开关 2 闭合),起始电流和磁通是 i_0 和 ψ_0 。磁链从初始值 ψ_0 (起始、未知)到 ψ (在公式 C7 中)记为磁链 ψ' 。在无穷的时间,电抗器的磁链和电流双双为零,这意味着 $\psi'(t=\infty)=\psi_0$ 。

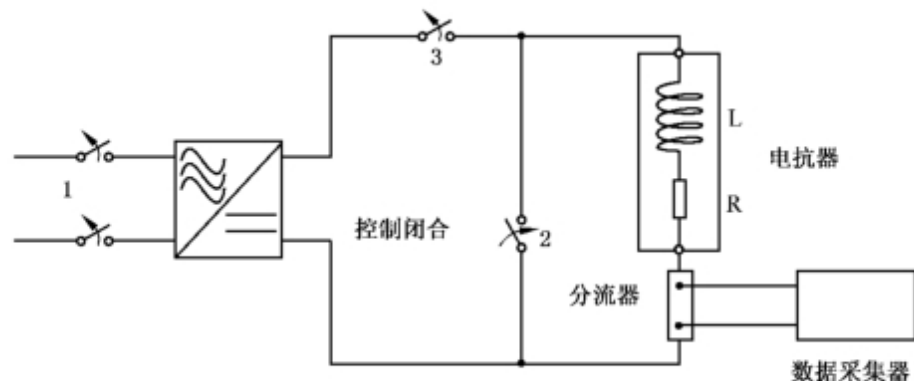


图 C.2 按 C.7.1 测量磁化特性的电路

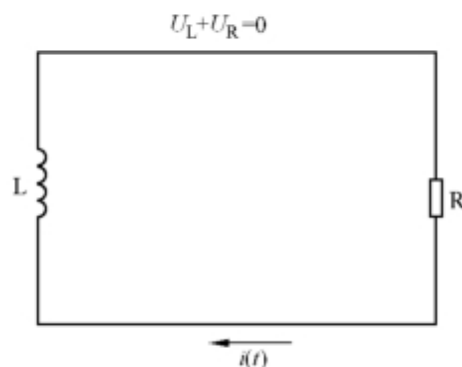


图 C.3 电抗器短路等效电路

当磁链与电流的关系位于线性部分时(低电流时),测量可以停止,因为在这时电流指数衰减,因而

$$\frac{i(t)}{\frac{di}{dt}} = \text{常数} = \tau \dots\dots\dots (C.8)$$

当测量停止后,剩余的磁链 ψ_1 就可用最后测量的电流 i_1 和计算的 $d\psi/di$ 下降到 $i=0$ 的数值通过外推法计算出,或更简单地用下面公式得出:

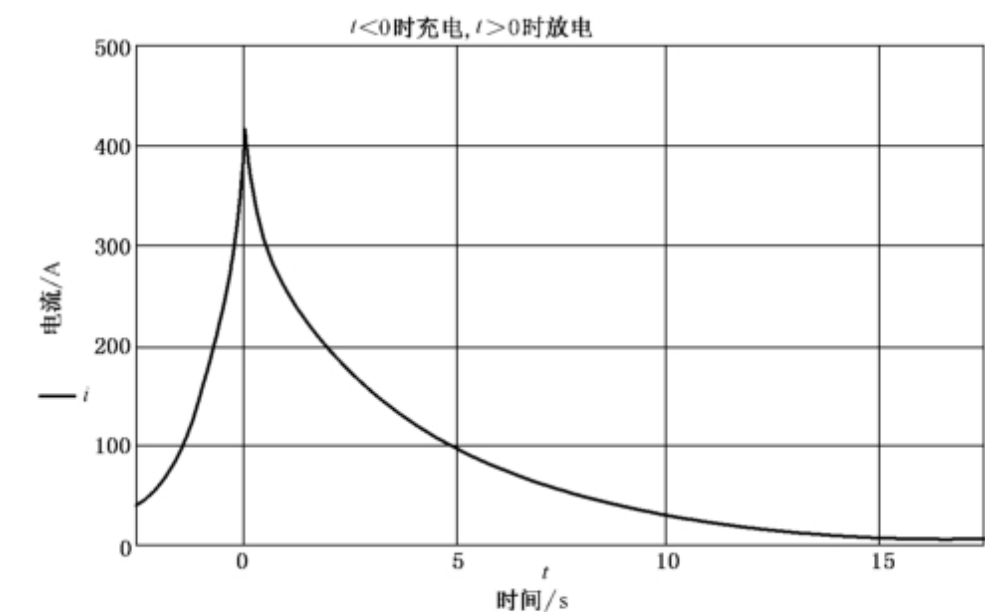
$$\psi_1 = \tau \times R \times i_1 \dots\dots\dots (C.9)$$

然后就可以建立 ψ_0 并计算 $\psi(i)$ 。

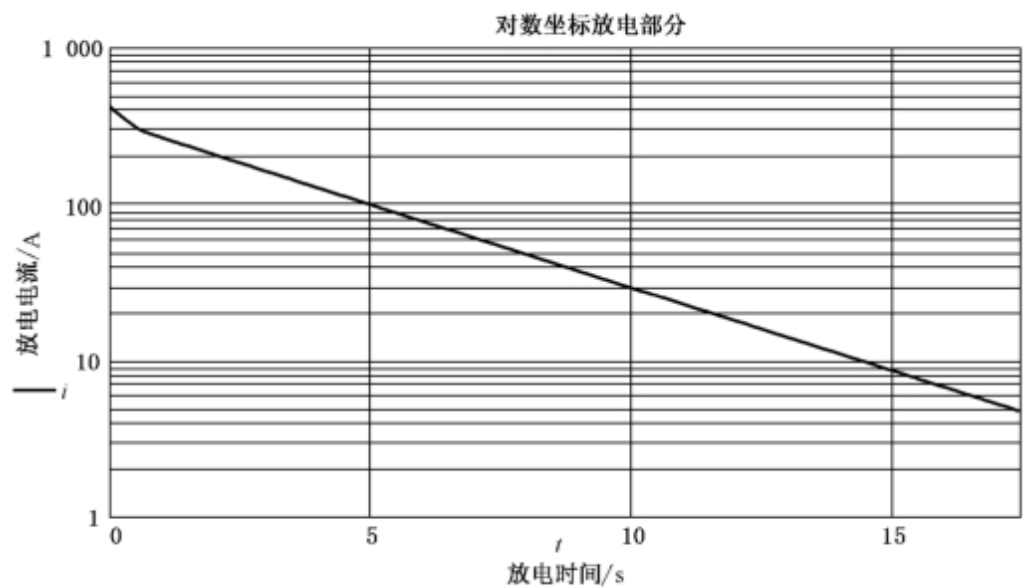
C.7.2 直流充电-放电法(应用)

用下面方法通过用直流对电抗器充放电来测量及计算电抗器的磁化特性:

- 1) 电抗器充电应越快越好,以免由于温升影响使电阻产生变化。给电抗器充电时就可以开始测量电流。当电流开始指数衰减时,电流测量可以停止(公式 C.8)。这样做的好处是避免低电流时的大比例的误差。图 C.4a)和图 C.4b)表示了一个测量结果。



a) 充电、放电电流图



b) 对数坐标放电电流图

图 C.4 电抗器直流充电、放电电流测量曲线

- 2) 应对测量的信号进行数字滤波,因为记录电流的随机变化会导致在计算电流的导数 $di(t)/dt$ 时出现错误。
- 3) 用记录下并经数字滤波的电流,可以计算出时间常数 τ (公式 C.8)。
- 4) 用时间常数是定值的任何电流,能够计算出这个电流下的磁链(公式 C.9)。
- 5) 因为 $i(t)/(di/dt)$ 和电阻 R 是已知的,磁链可以从放电开始到达到一个低电流进行积分(公式 C.7)。总的磁通变化是积分值加低电流 i_1 下的剩余磁通,见图 C.5 说明。测量得到的磁化特性见图 C.6。

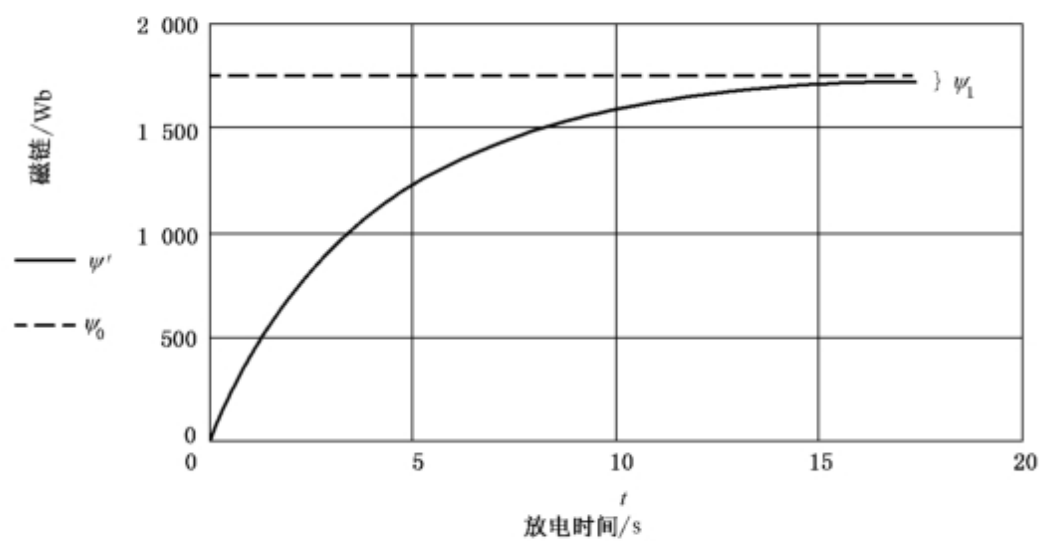


图 C.5 放电阶段的磁通计算(见公式 C.7 和公式 C.9)

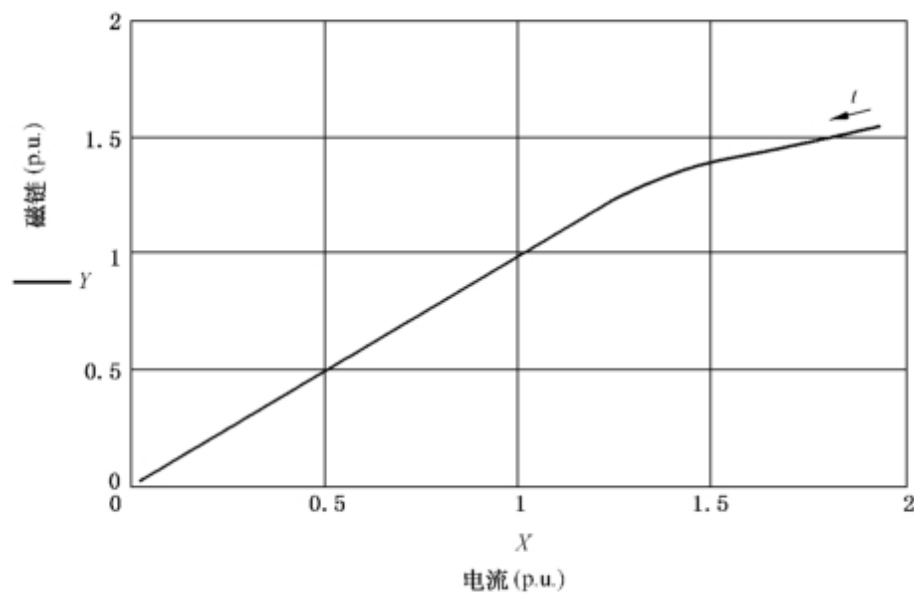


图 C.6 磁化特性

6) 从磁化特性,就能够计算其他几个相关的关系。

附录 D

(资料性附录)

并联电抗器操作及特殊应用的资料

D.1 并联电抗器操作

D.1.1 名词术语

SIWL:电抗器操作冲击耐受水平

LIWL:电抗器全波雷电冲击耐受水平

LICWL=1.1×LIWL:电抗器截波雷电冲击耐受水平

SIPL:接到电抗器端子上的避雷器操作冲击保护水平

LIPL:接到电抗器端子上的避雷器雷电冲击保护水平

D.1.2 操作现象

并联电抗器经常是每天进行操作(如:在轻负载时合上,在线路或电网满负载时切断)。这些开合操作对断路器和并联电抗器绝缘的作用是复杂的(见 IEC 62271-110 和 IEEE C57.21)。切断时,断路器由于电流截断以及重燃会产生暂态电压。这对并联电抗器绝缘产生很大的威胁。

断路器截断电流使电抗器受到操作过电压的作用,操作过电压频率可达几千赫。电抗器的 SIWL 和过电压应互相协调。幅值可以用断路器截断电流水平、电抗器电感以及电抗器绕组的并联电容(通常在 100 pF 到 5 nF 之间)计算出。计算方法见 IEC 62271-110。如果避雷器的 SIPL 比电抗器 SIWL 低 30% 以上,电抗器的绝缘就应由避雷器保护不受截断电流过电压作用。

电流消失后,当断路器触头上的暂态恢复电压(TRV)超过触头的开路耐压能力时,断路器重燃。如果没有特殊的方法避免,那么在开、合并联电抗器的断路器中,重燃是很常见的。在这种情况下,并联电抗器受到高频电压振荡的作用,高频振荡的频率是兆赫级,峰-峰幅值由避雷器限制到两倍的 LIPL。重燃引起的电压变化率与截波试验时的电压变化率是相当的。

断路器的性能(电流截断值以及避免重燃的燃弧时间范围)可以用 IEC 62271-110 给出的试验来检验。可以用这些性能来检验电抗器在开、合操作时的过电压耐受水平。

在大多数情况下,可通过控制断路器的操作来避免重燃(见 ELECTRA No. 185; 1999 年 8 月)。断路器触头的打开可按这样的方法控制,即燃弧时间总是在不发生重燃的时间期限内。

注:如果电抗器不是中性点直接接地,并联电抗器开、合时的电压会更高。

$U_m \leq 52$ kV 的电抗器(通常中性点不接地),电抗器承受重燃时的电压变化率的能力可用截波试验来验证。避雷器可能足以保护电抗器绝缘。

对 $52 \text{ kV} < U_m \leq 170$ kV 的电抗器,在重燃时的电压变化对电抗器的作用与截波试验时的作用在同一等级。对这些电抗器,应按 GB 1094.3 选用与 U_m 相对应的较高的 LIWL,断路器应按照 IEC 62271-110 满足电抗器操作要求。

对 $U_m > 170$ kV 的电抗器(通常电抗器中性点直接接地),重燃时电压变化对电抗器的作用超过了截波试验时的作用。对这些电抗器,应按照 GB 1094.3 选用与 U_m 对应的较高的 LIWL 值,断路器应该按照 IEC 62271-110 满足电抗器操作要求。此外,还应通过控制断路器的开、合来避免重燃。在避雷器的 SIPL 低于电抗器 SIWL 30% 的情况下,用断路器参数计算得出的电抗器截波过电压不应该高于电抗器 SIWL 的 70%。

对 $U_m > 170$ kV、用于线路补偿的电抗器,可以用隔离开关。在这种情况下,通常在从线路上断开

时,电抗器上没有严格的过电压产生,用避雷器保护是充分的。然而对双回路线路,当电抗器和线间电容形成自然谐振时,用隔离开关将电抗器切断,就可能有问题。

D.2 带有载分接开关(OLTC)的电抗器

带 OLTC 的电抗器可以按照线路或电网负载的条件来调节无功补偿。在轻负载时(如:夜里),使用最大无功补偿即分接匝数最少;在满负载时(如:白天),电抗器分接匝数最大。典型的分接范围,允许无功功率从 100%减少到 50%。应针对零功率因数操作,选择特殊的 OLTC。还应考虑 OLTC 的最大操作次数。

D.3 接到变压器第三绕组的并联电抗器

并联电抗器经常接到电力变压器的第三绕组上,为更高电压的系统提供无功补偿。通常,这些电抗器的星形联结中性点不接地。

并联电抗器接到变压器上,有两种可能的方法:

- a) 通过断路器将并联电抗器的端子接到变压器的第三绕组上。电抗器的端子可用避雷器保护以限制断开时的过电压(可参见附录 D.1)。
- b) 通过隔离开关将电抗器端子接到变压器的第三绕组上,在电抗器的三相绕组的中性点端用断路器。用断路器接成星形联结的中性点时,电抗器就接到了变压器上。通常不需要限制过电压的避雷器。隔离开关在断路器开路后,隔离开电抗器。

为了避免断开变压器时变压器高压侧过电压,先断开电抗器,然后从电网断开变压器是很有用的,但这个操作顺序在清除故障时是不可能的。设计变压器过电压保护时应该考虑到这些情况(见 ELEC-TRA No.138;1991 年)。

D.4 并联电抗器用于带有单相自动重合闸系统的电力线路

接到具有有效中性点接地的线路或电网的并联电抗器,其电抗器中性点通常接地。在某些情况下,输电系统线路上装有单相自动重合闸装置,它可能是控制单相接地故障的二次电弧电流以及暂态恢复电压优选办法。这可以通过在并联电抗器中性点与地之间增加一个中性点接地电抗器来实现或在断开接地的中性点与地之间安装具有适当额定值的避雷器保护来实现。两种方法都需要较高的并联电抗器中性点绝缘水平以满足不平衡条件下的暂态过电压要求。

更多资料见:

E. W. Kimbark 用并联电抗器抑制单极开关操作超高压线路的接地故障电弧消弧,IEEE 传输和分配,1964 年 3 月。

附录 E

(资料性附录)

三相电抗器的互电抗、耦合系数和有效阻抗

E.1 相间互感影响有效阻抗和有功功率的基本原理

对于三相铁心电抗器或相间距离比较近的空心电抗器三相组,由于相间磁耦合的存在,各相等效阻抗不仅决定于各相自感 L_a 、 L_b 、 L_c 和交流电阻 R_a 、 R_b 、 R_c ,还受其他相的电流幅值及相位影响。根据图 E.1 所示等效电路,可以推导出以下结果。

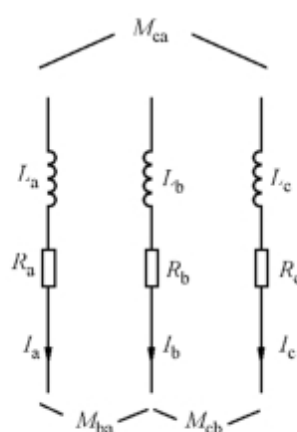


图 E.1 具有相间磁耦合的三相电抗器通用电路模型

A 相有效阻抗 Z_{ae} 为:

$$Z_{ae} = R_{ae} + jX_{ae}$$

$$R_{ae} = R_a - \omega M_{ba} I_b / I_a \sin \Psi_{ba} - M_{ca} I_c / I_a \sin \Psi_{ca}$$

$$X_{ae} = \omega (L_a + M_{ba} I_b / I_a \cos \Psi_{ba} + M_{ca} I_c / I_a \cos \Psi_{ca})$$

B 相有效阻抗 Z_{be} 为:

$$Z_{be} = R_{be} + jX_{be}$$

$$R_{be} = R_b - \omega M_{ba} I_a / I_b \sin \Psi_{ab} - \omega M_{cb} I_c / I_b \sin \Psi_{cb}$$

$$X_{be} = \omega (L_b + M_{ba} I_a / I_b \cos \Psi_{ab} + M_{cb} I_c / I_b \cos \Psi_{cb})$$

C 相有效阻抗 Z_{ce} 为:

$$Z_{ce} = R_{ce} + jX_{ce}$$

$$R_{ce} = R_c - \omega M_{bc} I_b / I_c \sin \Psi_{bc} - \omega M_{ca} I_a / I_c \sin \Psi_{ac}$$

$$X_{ce} = \omega (L_c + M_{bc} I_b / I_c \cos \Psi_{bc} + M_{ca} I_a / I_c \cos \Psi_{ac})$$

式中:

Ψ_{ba} 是 B 相电流超前于 A 相电流的相位角, Ψ_{ab} 则是 A 相电流超前于 B 相电流的相位角, Ψ_{ca} 、 Ψ_{ac} 、 Ψ_{bc} 、 Ψ_{cb} 类同。

I_a 、 I_b 、 I_c 是各相电流相量的幅值。

M_{ba} 等表示 A、B 两相之间的互感, M_{cb} 、 M_{ca} 类同, 根据各相线圈的绕向和相对位置, 可能是正值也可能是负值。

由以上公式可以看出, 相间互感对各相电抗器等效阻抗的影响是比较复杂的, 在各相电流幅值相等时, 如果两相之间的相位相同或相反, 则互感以其全部增大或减小有效电感。如果相位相差 120° (正序或负序电流), 互感则以其 50% 增大或减小有效电感。

可见,涉及到有效电感、有效电抗的定义、额定值以及测试时,应首先明确系统条件,确定有效电感、有效电抗试验电流的相序,尤其是要明确有无零序电流的存在。否则,电感、电抗测试结果未必等于运行中所呈现的有效参数。

如果系统中性点不接地,那么通过限流电抗器、并联电容器组用阻尼电抗器的非对称短路故障电流、合闸涌流以及谐波电流中不含零序分量。有效电抗和有效电感的测试电流显然可以是三相正序电流。

用于中性点有效接地的系统时,滤波电抗器、并联电容器组用阻尼电抗器中的3次、6次、9次等谐波电流以零序分量为主,合闸涌流中也能够分解出很大的零序分量,对这些零序电流所呈现的电感明显小于对其他正序和负序电流的电感(见下文),除非将相间互感设计为零。

立式叠装空心限流电抗器三相组以及三相间隙铁心电抗器在零序电流的有效电抗小于正序电抗和负序电抗,这使中性点接地系统限流电抗器电抗保证值和测试条件有两种选择,即单相阻抗和三相阻抗。单相阻抗是单相励磁条件下的阻抗,不受互感影响,因而其阻抗值大于零序阻抗但小于三相阻抗。如果为了保证三相阻抗符合要求,单相阻抗往往有较大偏差。并且,对于立式叠装空心电抗器,各相阻抗因考虑互感影响而调整自感,结果造成各相自感或单相阻抗不够均匀。其最终结果是,不同相的线路出现单相接地故障时,短路电流水平不同。为此,对使用于中性点接地系统的三相限流电抗器,应规定单相阻抗和三相阻抗两个指标,当用于中性点不接地系统或经高阻抗接地系统时,单相阻抗的规定和测试不是必要的。

对于既要考虑零序电流又需要考虑正、负序电流的电抗器,考虑到零序有效电感与正序、负序等效电感之间可能出现较大差异,最好不采用具有相间磁耦合的三相电抗器(组),受场地限制不得不采取立式叠装布置时,用户可规定互感或磁耦合系数的上限,并根据互感和电流相序分别计算各种相序有效电抗或有效电感。对于这样的电抗器,制造方进行例行试验时应测试相间磁耦合系数,并标出正负极性。

当各相电流的相位既不相同也非相反时,相间互感电势还在很大程度上对阻抗中的电阻分量产生干扰。最典型的情况是,相邻两相之间的相位差为 120° ,这时,如果各相电流幅值相等,则某一相将以互感电抗的86.6%增大或减小相邻相有效阻抗中的电阻分量。这种干扰使得各相电抗器从电源吸取的有功功率并不等于该相电抗器的实际损耗,见表E.2、表E.4。

对于既要考虑零序电流又需要考虑正、负序电流的滤波电抗器,因三相励磁条件下各相电抗器损耗和Q值与电流相序有关,建议用户根据自感、互感和各相单相励磁时的交流等效电阻以及实际应用中各频率电流的相序分别计算电抗器对于不同电流所呈现的交流有效电阻。

E.2 相间的均匀磁耦合

本章主要适用于星形联结的并联电抗器。

具有均匀相间磁耦合的三相电抗器的磁性能,可用图E.2的等效图来表示:

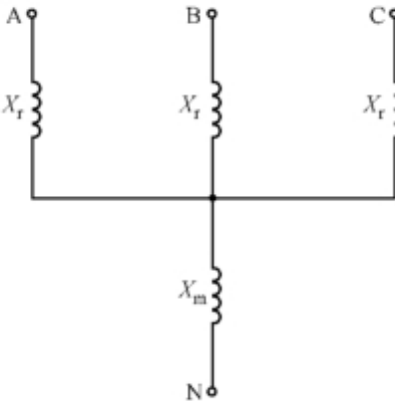


图 E.2 包含相间磁耦合的三相电抗器等效图

零序电抗 X_0 、互电抗 X_m 以及下面用到的单相励磁时的电抗 $X_{\text{single-phase}}$ 用与额定电抗 X_r (X_r 是电抗器的正序阻抗) 的相对值表示。类似的, 在一个端子与中性点之间进行单相励磁时, 在上、下轭间通过空气及油箱的磁通 Φ_{yoke} 以及通过非励磁相绕组的磁通 Φ_{return} 也用以 X_r 代表的绕组中磁链的相对值表示。电抗和磁通的大小取决于磁路的设计。表 E.1 给出耦合值的百分比, 这些数据是从不同类型的并联电抗器的测量值中取出的。标么值公式重新计算如下:

$$\begin{aligned}x_0 &= x_r + 3x_m \\x_{\text{single-phase}} &= x_r + x_m \\\varphi_{\text{yoke}} &= 1 + 2x_m \\\varphi_{\text{return}} &= (-x_m)/(x_r + x_m)\end{aligned}$$

注: 互电抗 x_m 总是负值。

表 E.1 均匀磁耦合电抗器的电抗和磁通比率

参 数	三个单相液浸式电抗器组成的三相组或三相五柱液浸式间隙铁心电抗器	间隙铁心以及箱壁上带磁屏蔽的三相三柱液浸式电抗器	无磁屏蔽的三个单相空心、水平安装的电抗器组
额定电抗 x_r	100 %	100 %	100 %
互电抗 x_m	0 %	-10 % ~ -8 % *	-3 % ~ 0 (不含 0)
零序电抗 x_0	100 %	70 % ~ 76 % *	91 % ~ 100 % (不含 100 %)
单相励磁时的电抗 $x_{\text{single-phase}}$	100 %	90 % ~ 92 % *	97 % ~ 100 % (不含 100 %)
一个端子与中性点间单相励磁时的 φ_{yoke}	0 %	80 % ~ 84 % *	不适用
一个端子与中性点间单相励磁时的 φ_{return}	0 %	9 % ~ 11 % *	0 (不含 0) ~ 3 %
* 数值取决于单相试验时施加的电压。由于箱壁上的磁屏蔽饱和导致电流增加, 磁耦合值(电抗)随着电流增加而减小。给出值是在电流接近额定值时测得的。			

所谓均匀磁耦合, 是指各相间互感相等或基本相等, 例如表 E.1 所列三种结构。在这种情况下, 在各相自感相等的条件下有效电抗可以保证基本平衡而不需要分别调整各相自感数值。但实际上, 由于制造偏差的存在, 互感与互感之间绝对相等是不可能的, 这种偏差虽然不至于破坏有效电抗的平衡性, 但仍然会严重影响有效阻抗中的电阻分量, 使得电抗器三相励磁条件下的各相损耗测量值(即由该相电抗器所连接的电源向三相电抗器输入的有功功率)偏离该相电抗器的实际损耗。作为示例, 表 E.2 给出了三相三柱式间隙铁心电抗器在以三相正序电流励磁时各相的有功功率构成情况。

表 E.2 三相三柱式间隙铁心电抗器在正序电流励磁时从电源吸取的有功功率

相 序	有 功 功 率
A 相	$P_a + 0.866 I^2 \omega (M_{ca} - M_{ba})$
B 相	$P_b + 0.866 I^2 \omega (M_{ba} - M_{cb})$
C 相	$P_c + 0.866 I^2 \omega (M_{cb} - M_{ca})$
三相总功率	$P_a + P_b + P_c$
注: P_a 、 P_b 、 P_c 分别为各相电抗器的实际损耗, 包括铁损和杂散损耗, I 为正序对称电流的幅值。另外, 在三相三柱式铁心电抗器中, 各相之间的互感 M 为负数, 为直观起见, 表中均对他们取绝对值。	

当 $|M_{ca}|$ 小于 $|M_{ba}|$ 时,互感之间的相对偏差使 A 相电源输出的有功功率小于 A 相电抗器的损耗,当两个互感之间的差值达到一定程度时,电抗器从 A 相电源输入的有功功率(即损耗测量值)可能小到零甚至出现负数。零损耗或负损耗难以修正到指定的参考温度下。此外,当视在功率中的有功功率接近零时,瓦特表和互感器可能带来更大的测试误差,使测试结果失去应有的准确性。鉴于这种情况,对于间隙铁心或带铁磁物的其他三相电抗器,可在三相励磁条件下用两瓦特表法测量三相电抗器总损耗而不区分各相损耗。

E.3 相间非均匀磁耦合

本章涉及立式叠装电抗器。对此类电抗器,一般使中间相的线圈绕向与其他两相相反,导致在承载三相对称电流时相邻绕组间产生正的磁耦合。在这种情况下,三相短路条件下作用到轴向支撑(绝缘子)上的主要应力低于线圈绕向都相同的情况。

注 1: 对所有线圈绕向相同的三相立式叠装电抗器,可用将中间绕组的端子接成与其他两个绕组相反的办法来得到正的磁耦合。

每个绕组的自感的选择和在电抗器短路条件下有效电感上的非均匀耦合取决于中性点的接地方式,取决于电抗器连接的电力系统是有效接地或非有效接地。

注 2: 非均匀磁耦合会产生干扰保护系统的零序电压或电流(取决于系统中性点接地方式)。

立式叠装电抗器每个绕组的自感可选为补偿或无补偿的设计方案:

——无补偿方案

在此情况下,每相电抗器设计成具有相同的自感。由于相间非均匀磁耦合,这个布置会导致三相故障条件下各相具有不同的电流幅值。然而,对中性点有效接地的电力系统,单相故障电流幅值在所有三相都相同。因而,无补偿布置是接入中性点有效接地系统的电抗器的首选。

——补偿方案

在这种情况下,每相的自感经过单独调节以便在非接地三相故障情况下得到三个相同的电流幅值。然而,对中性点有效接地的电力系统,三相的单相故障电流幅值各不相同。需要着重注意,自感可能会低于额定值,因而有效接地系统的单相故障电流可能会超过额定值。

无补偿与补偿的比较见表 E.3,表中:

$L_a = L_c$: 下部(C 相)和上部(A 相)绕组的自感;

L_b : 中部(B 相)绕组的自感;

m_{ca} : 下部(C 相)和上部(A 相)绕组的互感 M_{ca} ,用 L_a 的百分数表示;

$m_{ba} = m_{cb}$: 中部绕组与上部或下部绕组的互电感 M_{ba} 或 M_{cb} ,用 $\sqrt{(L_a \times L_b)}$ 的百分数表示;

z_{SCr1} : 以额定三相短路阻抗 z_{SCr3} 的相对值表示的单相阻抗 z_{SCr1} 。

表 E.3 非均匀磁耦合电抗器耦合值

	无补偿 $L_a = L_b = L_c$	补偿 $L_a = L_c \neq L_b$
$m_{ba} = m_{cb}$	$-15\% \sim -5\%$	$-15\% \sim -5\%$
m_{ca}	$1\% \sim 2\%$	$1\% \sim 2\%$
z_{SCr1} (外侧相)	100%	101%~102%
z_{SCr1} (中间相)	100%	72%~89%
非接地三相故障不平衡短路电流	$-11\% \sim -4\%$	0%
注 1: 表中给出的互感是典型值。		
注 2: 因为中间绕组具有相反的绕向,所以 m_{ab} 和 m_{bc} 有负号。		
注 3: 三相短路电流不平衡度是三相短路电流对其平均值的最大偏差,用百分数表示。		

立式叠装空心电抗器在三相正序电流励磁时从电源吸取的有功功率见表 E. 4。

表 E. 4 立式叠装空心电抗器三相正序电流励磁时从电源吸取的有功功率

相 序	有 功 功 率
A 相	$P_a - 0.866 I^2 \omega (M_{ab} + M_{ac})$
B 相	$P_b + 0.866 I^2 \omega (M_{ab} - M_{bc})$
C 相	$P_c + 0.866 I^2 \omega (M_{bc} + M_{ac})$
三相总功率	$P_a + P_b + P_c$
注： P_a 、 P_b 、 P_c 分别为各相电抗器的实际损耗，包括杂散损耗， I 为正序对称电流的幅值。	

由表 E. 4 可以看出，对于三相立式叠装空心电抗器，以三相正序电流励磁时，C 相电抗器从 C 相电源吸取的有功功率总是大于该相电抗器的实际损耗，而 A 相电抗器从 A 相电源吸取的有功功率总是小于自身损耗，当磁耦合系数足够大或电抗器损耗足够小时，A 相电源输出的功率可出现负值。若以此测量值确定电抗器的品质因数 Q ，将出现负 Q 值的情况，不能满足 Q 值大于某一下限的技术要求。

空心电抗器的损耗测量是检查和评估电抗器品质的重要手段。为准确反映绕组质量，电阻性损耗和主要是由涡流损耗构成的附加损耗通常都要修正到指定的参考温度下。在单相损耗测量值为负数或零时，温度修正难以进行，从而无法判断该相电抗器品质。为此，由三台单相空心电抗器组成的立式叠装三相组的损耗测量，最好是在单相励磁下进行。

附录 F
(资料性附录)

间隙铁心和磁屏蔽空心电抗器损耗的温度校正

F.1 例行试验和型式试验方法

损耗在环境温度下测量。 I^2R 损耗按照 GB 1094.1 给出的方法重新计算。附加损耗认为不受温度影响。

例如：

温度 θ	I^2R	铁损和附加损耗	总损耗 P_{tot}
19.5 °C (测量的平均油温)	57.95 kW	24.16 kW	82.11 kW (测量并按额定电流重新计算)
参考温度 75 °C	70.59 kW	24.16 kW	94.75 kW

F.2 特殊试验方法

损耗在环境温度下以及在温升试验稳定状态时测量。基于这两个测量，可以得出温度系数。

例如：

温升试验时对与 F.1 相同电抗器做的测量：

温度 θ	I^2R	铁损和附加损耗	总损耗 P_{tot}
60.5 °C (绕组平均温度)	67.29 kW	22.20 kW	89.49 kW (测量并按额定电流重新计算)

建立总损耗的温度系数：

$$\Delta P_{\text{tot}}/\Delta\theta = (89.49 - 82.11)\text{kW}/(60.5 - 19.5)^\circ\text{C} = 0.18\text{ kW}/^\circ\text{C}$$

用温度系数重新计算到参考温度 75 °C：

$$P_{\text{tot}}(75\text{ }^\circ\text{C}) = P_{\text{tot}}(60.5\text{ }^\circ\text{C}) + \Delta P_{\text{tot}}/\Delta\theta \times (75 - 60.5)^\circ\text{C}$$

$$P_{\text{tot}}(75\text{ }^\circ\text{C}) = 89.49\text{ kW} + 0.18\text{ kW}/^\circ\text{C} \times (75 - 60.5)^\circ\text{C} = 92.1\text{ kW}$$

这个值低于按照 F.1 方法的估算值，用做测量损耗值的规定值。

环境温度下对第二个相同装置的测量(例行试验)：

温度 θ	I^2R	铁损和附加损耗	总损耗 P_{tot}
24.0 °C (测量的平均油温)	59.10 kW	25.20 kW	84.30 kW (测量并按额定电流重新计算)

用温度系数重新计算到参考温度下 75 °C：

$$P_{\text{tot}}(75\text{ }^\circ\text{C}) = P_{\text{tot}}(24.0\text{ }^\circ\text{C}) + \Delta P_{\text{tot}}/\Delta\theta \times (75 - 24.0)^\circ\text{C}$$

$$P_{\text{tot}}(75\text{ }^\circ\text{C}) = 84.30\text{ kW} + 0.18\text{ kW}/^\circ\text{C} \times (75 - 24.0)^\circ\text{C} = 93.48\text{ kW}$$

这个值是第二个相同装置的测量损耗值的规定值。

附 录 G
(规范性附录)

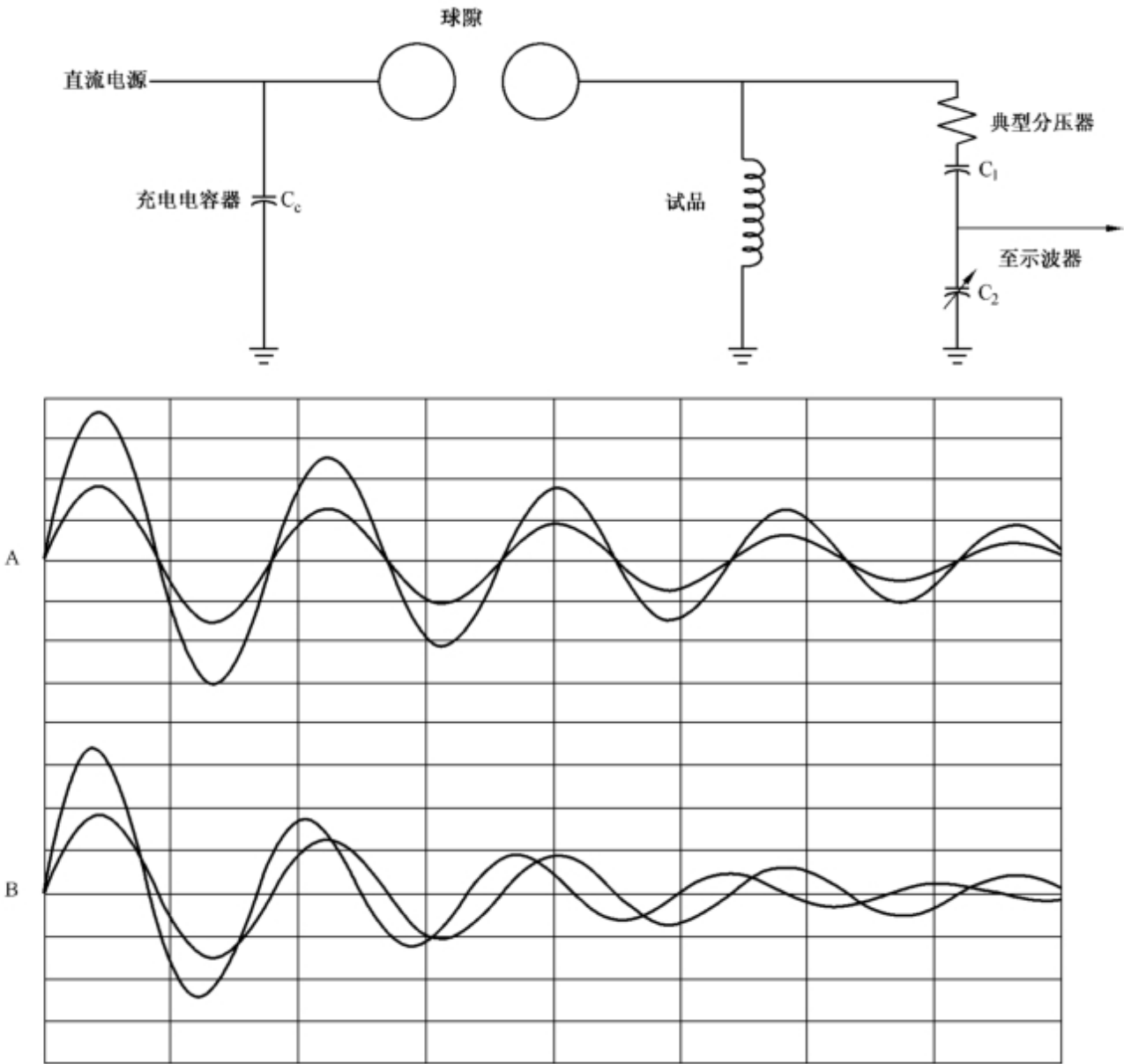
干式电抗器匝间过电压试验

匝间过电压试验通过向电容重复充放电,并通过球隙将电压施加到电抗器绕组上。电抗器受到的过电压类型与指数衰减的正弦波的操作冲击相似。图 G.1 说明试验原理及过电压波形。试验持续时间 1 min,每次放电的初始峰值应为 $1.33\sqrt{2}$ 倍(户外设备)或 $\sqrt{2}$ 倍(户内设备)GB 1094.3—2003 中表 2 和表 3 中给出的额定短时感应或外施耐压试验电压(方均根值)。响应频率是绕组电感和充电电容的函数,一般在 100 kHz 及以下。试验应包含不低于 3 000 个要求幅值的过电压。

注 1: 匝间过电压试验的电压波的典型的波前时间,大大短于标准雷电冲击试验的波前时间。
注 2: 试验电压幅值应当用穿过第一个振荡波波顶上的所有过冲波或高频脉冲的平均值曲线来确定。这个方法与 GB/T 16927.1—1997 中 19.2 和图 10 中对相似冲击波形的描述相似。

首先用图形法确认绕组绝缘的完好性。冲击示波器、相机或数字记录仪等设备用于记录叠加到降低电压放电上的最后一个放电。降低电压的波形与全波之间周期的改变或包络线衰减速度的改变能表明绕组阻抗的变化,从而表示匝间故障。

其次,用观察法确认绝缘的完好性。故障可通过电抗器绕组上的噪声、烟雾或火花放电发现。



A. 通过了匝间过电压试验的电抗器波形。
B. 与波形 A 中的电抗器额定值相同,但没有通过匝间过电压试验的电抗器波形。注意频率的变化和增加的阻尼。

图 G.1 匝间过电压试验电路和波形实例

附 录 H
(资料性附录)
短 路 试 验

H.1 概述资料

短路试验时,非对称电流通常在 10 个周期内衰减为零。在故障的初始阶段,非对称电流峰值会在电抗器上产生最大的机械力,而长时间的对称故障电流使电抗器承受高温,同时受机械力作用。

当规定短路试验冲击的次数以及每次冲击的持续时间时,应考虑某些电力系统的操作因素:

- 当规定机械短路试验时的峰值冲击的次数时,就应考虑允许的自动重合闸次数,如 1、2 或 3;
- 机械短路试验每次冲击的持续时间应能反映出装置的实际情况。

H.2 干式电抗器短路试验时的布置、母线连接和验收导则

电抗器可在不同的布置结构下接受短路试验。单相短路试验可以在一个装置上进行,三相短路试验可以在三相水平一字形、三角形或立式叠装结构上进行。三相电抗器结构用在输入端子上加三相短路电流,同时输出端子接在一起的方法来进行试验。

电抗器的试验首选使试品的元件和安装方式尽可能的接近运行条件。

电抗器的磁场与引线(如母线、电缆等)的相互作用力对设计来说是很重要的,试验中任何安装方式或元件上的偏差都应该全部进行评估。

如果在某些情况下,不能使电抗器像运行中布置那样试验,那么电抗器磁场与引线的相互作用力应该减至最小。

试验时由于母线固定不牢或电抗器对试验底座固定不稳等而传递到电抗器上的力,并不能代表现场安装情况。因而,合适的布置对保证试验结果真实是重要的。

试验布置注意事项:

- 所有基座支撑应用螺栓固定到地基上;
- 所有的螺栓应用正确的力矩紧固;
- 进出母线应该用最大长度为 0.2 m 的柔性连接头或链接件连接到电抗器上;
- 进出母线应该在柔性连接或链接处用刚性支撑;
- 最终的布置应该由供需双方和试验方或相关方进行全面的评估并达成共识。

短路试验前、后,应对绕组的包封仔细检查,看有没有裂缝。在不连贯处的表面层裂纹(例如:在线圈夹紧系统结合处的裂纹)通常不表明存在机械问题,主要原因是漆和其他涂层材料没有弹性。

附录 I

(资料性附录)

电阻器——性能、参数和试验

I.1 概述

本附录拟作为连接到第 11 章所述消弧线圈二次侧的单相电阻器的导则。

注 1：本附录也可以做为用于配电网单独使用的电阻器的导则。

通常，电阻器设计用于在系统接地故障时短时运行，目的是增加接地故障电流中的电阻分量，以改善接地故障保护装置运行的可靠性。

一般要求电阻器通过电流的时间明显小于消弧线圈通过电流的时间。电流持续时间或负载周期由接地故障保护系统控制。

电阻器的设计由电流持续时间或负载周期以及阻值和电流幅值决定。因而，正确的规定电流持续时间和负载周期是很重要的。

注 2：电阻器可用于减小系统单相线对地故障时的时间常数。

I.2 性能参数

电阻器的主要性能参数是：

- 环境温度下的额定电阻 R_r ；
- 额定电流 I_r 或额定电压 U_r ；
- 额定电流或额定电压持续时间 T_r 或相应的负载周期；
- 额定绝缘水平。

电阻器可以是空气绝缘或液浸式的，两种方式都是自然冷却，户内或户外安装。空气绝缘电阻器有保护外壳，液浸式电阻器可装在消弧线圈油箱内或独立的油箱中。

空气绝缘电阻器带电部分的最大允许温升取决于它自身的结构材料。最高温升的典型值是几百度。由于这个原因，需要注意绝缘、保护外壳、套管、端子及附件的材料。由于高温，还应注意安装的安全性。

注 1：对此元件主要使用的不锈钢来说，最大允许温升大约为 600 K。

还应考虑由于温升引起的电阻值变化。

注 2：例如，不锈钢的温度系数是 0.001 K^{-1} ，考虑到 600 K 的温升，电阻值可能达到 $1.6R_r$ 。

对液浸式电阻器，可参考 11.5 给出的消弧线圈的温升限值。

I.3 电阻器要求

下列参数由用户规定：

- 额定电阻；
- 额定电流或额定电压持续时间下电阻值的最大增量(如果有要求)；
- 额定电流或电压，由于电阻随温度变化，所以额定电流或电压取决于应用情况以及电压或电流是否是常数；
- 额定电流或电压持续时间及负载周期(电流或电压的最大持续时间，连续作用的次数，连续两

- 次间的最小时间间隔)；
- 电阻上施加的最大持续电压或电流(如果有要求)；
- 电阻端子与地间的绝缘水平,通常规定外施耐压试验水平；
- 安装方式(户内或户外)；
- 空气绝缘电阻器的 IP 代码(IP 代码一如 IEC 60529 规定的外壳防护等级)；
- 绝缘方式(空气绝缘、液浸式)；
- 电阻带电元件允许的最高温升。如果用户没有规定,制造方应公布这个值。

I.4 试验

建议进行下列试验：

- a) 例行试验：
 - 环境温度下的电阻测量；
 - 外施耐压试验(确认电阻器和外壳或油箱间的绝缘水平)。
- b) 型式试验：
 - 温升试验(确认温升和阻值增量(如果需要))。用额定电流或额定电压持续时间下的额定电流或额定电压确认电阻器的温升。试验时电压或电流(规定的)应保持近似常量。除非另有规定,否则应测量最热元件的温度。试验后,应确认绝缘及其他元件没有被损坏。试验期间应监测电阻值。
- c) 特殊试验：
 - 雷电冲击试验(对于 $U_m > 1 \text{ kV}$ 的直接接到系统的电阻器)；
 - 确认外壳的 IP 代码。

I.5 铭牌

铭牌上应有下列内容：

- 户内或户外应用；
- 制造方名称；
- 出厂序号；
- 制造年月；
- 环境温度下额定电阻；
- 额定电流或额定电压；
- 额定电流或额定电压持续时间及相关负载周期(如果适用)；
- 最大持续电压或电流(如果适用)；
- IP 代码(对空气绝缘电阻器)；
- 电阻器元件最大允许温升(对空气绝缘电阻器)；
- 总质量。

I.6 偏差

额定电阻在 20°C 时的偏差为 $\pm 10\%$ 。要求偏差更低时,可由供需双方协商确定。

参 考 文 献

- [1] IEC 60143 Series capacitors for power systems
 - [2] IEC 60168:2001 Tests on indoor and outdoor post insulators of ceramic material or glass for systems with nominal voltages greater than 1 000 V
 - [3] IEC 60273:1990 Characteristic of indoor and outdoor post insulators for systems with nominal voltages greater than 1 000 V
 - [4] IEC 60353 Line traps for a. c. power systems
 - [5] IEC 60529 Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)
 - [6] IEC 60871-1:2005 Shunt capacitors for a. c. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 1:General
 - [7] IEC 61378-1:1997 Converter transformers—Part 1:Transformers for industrial applications
 - [8] IEC 61378-2:2001 Converter transformers—Part 2:Transformers for HVDC applications
 - [9] IEC 62271-110 High-voltage switchgear and controlgear—Part 110:Inductive load switching
 - [10] IEEE C57.21-1990 IEEE standard requirements,terminology,and test code for shunt reactors rated over 500 kVA
 - [11] IEEE 1277-2000 IEEE trial-use standard general requirements and test code for dry-type and oil-immersed smoothing reactors for DC power transmission
 - [12] E W Kimbark, Suppression of Ground Fault Arcs on Single—Pole-switched EHV Lines by Shunt Reactors,IEEE Transmission and Distribution, March 1964.
 - [13] Controlled switching of HVAC circuit-breakers. Guide for application lines-reactors-capacitors-transformers, 2nd Part, ELEKTRA No. 185,1999
 - [14] Interruption of small inductive currents. Chapter 6:Switching of reactor-loaded transformers, ELEKTRA No. 138,1991
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
电力变压器 第6部分:电抗器
GB/T 1094.6—2011

*

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.gb168.cn

服务热线:010-68522006

2011年12月第一版

*

书号:155066·1-43640

版权专有 侵权必究



GB/T 1094.6—2011