



中华人民共和国国家标准

GB/T 1094.4—2005
代替 GB/T 7449—1987

电力变压器 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

Power transformers—Part 4: Guide to the lightning impulse and
switching impulse testing—Power transformers and reactors

(IEC 60076-4:2002, MOD)

2005-08-26 发布

2006-04-01 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	Ⅲ
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 总则	1
4 规定的波形	2
5 试验电路	2
6 校正	3
7 雷电冲击试验	3
7.1 波形	3
7.2 波尾截断的冲击波	3
7.3 端子接线和故障探测方法	4
7.4 试验程序	4
7.5 试验记录	5
8 操作冲击试验	7
8.1 特殊要求	7
8.2 变压器	7
8.3 电抗器	9
9 波形图或数字记录的判断	10
9.1 雷电冲击	10
9.2 操作冲击	12
10 包括传递函数分析在内的数字处理	12
11 冲击试验报告	13
附录 A (资料性附录) 波形控制原理	19
A.1 概述	19
A.2 高阻抗绕组 ($L_s > 100$ mH)	19
A.3 低阻抗绕组 ($L_s < 20$ mH)	20
附录 B (资料性附录) 典型的波形图和数字记录	24
图 1 典型的冲击试验电路	15
图 2 雷电冲击试验中的端子接线和适用的故障探测方法	16
图 3 变压器和电抗器的操作冲击波形	16
图 4 操作冲击试验中的端子接线及故障探测方法	18
图 A.1 高阻抗绕组的波形控制	19
图 A.2 低阻抗绕组的波尾控制	20
图 A.3 衰减振荡波形图	21
图 A.4 波尾缩短的影响	22
图 A.5 绕组经电阻接地	23

图 A.6	低阻抗绕组的电阻接地	23
图 B.1	雷电冲击,全波故障——400 kV 发电机变压器高压绕组线端对中性点的击穿	26
图 B.2	雷电冲击,全波故障——115 kV 变压器高压绕组入口出线饼间的击穿	27
图 B.3	雷电冲击,400 kV/220 kV 变压器粗调分接绕组的层间击穿	28
图 B.4	雷电冲击,全波故障——400 kV 发电机变压器分接绕组外部两根相差 1.1%线段的引线之间的击穿	29
图 B.5	雷电冲击,全波故障——220 kV 变压器细调分接绕组的一段击穿	30
图 B.6	雷电冲击,全波故障——220/110 kV 变压器主高压绕组中多根并联导线之间的击穿	30
图 B.7	雷电冲击,全波故障——被试绕组 66 kV 套管内部电容屏之间的击穿	31
图 B.8	雷电冲击,截波故障——115 kV 变压器主高压绕组的匝间击穿	32
图 B.9	雷电冲击,截波故障——220 kV 变压器细调分接绕组的匝间击穿	33
图 B.10	雷电冲击截波——115 kV 变压器在不同电压值但截波时间相同时的冲击试验波形	33
图 B.11	雷电冲击截波——220 kV 变压器试验时不同截断时间的影响	34
图 B.12	雷电冲击全波——独立绕组变压器的中性点侧有载分接开关装有非线性电阻元件时的影响	35
图 B.13	雷电冲击全波——400 kV 变压器试验时冲击发生器在不同电压值下引燃动作不同时的影响	36
图 B.14	操作冲击——400 kV 三相发电机变压器试验合格	37
图 B.15	操作冲击——单相 525 kV 发电机变压器主高压绕组纵向闪络击穿	38
图 B.16	操作冲击——单相 525 kV、33Mvar 并联电抗器试验合格	39
图 B.17	雷电冲击——全波和截波传递函数的比较	40
图 B.18	雷电冲击全波——非标准波形的估算——数字记录仪中的内置平滑算法的影响	41
图 B.19	雷电冲击全波——非标准波形,叠加的振荡波幅值大于 50%且频率小于 0.5 MHz	41
图 B.20	雷电冲击截波——层式绕组的非标准截波	41
图 B.21	雷电冲击全波——非标准波形,用不同的数字记录仪对同一记录的非标准波形的比较	42
图 B.22	雷电冲击全波——由测量电缆对地闪络引起的试验电路问题	43
图 B.23	雷电冲击全波——分接开关的分接引线之间及粗调分接绕组与细调分接绕组之间闪络的故障数字记录	44
表 B.1	波形图和数字记录实例一览表	24

前 言

《电力变压器》目前已包含了下列几部分：

- 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 10 部分：声级测定

本部分为第 4 部分。本部分的前版标准代号为 GB/T 7449，对应的国际标准代号为 IEC 60722。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。

本部分修改采用 IEC 60076-4:2002《电力变压器 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》(英文版)。

本部分根据 IEC 60076-4:2002 重新起草。

考虑到我国国情，在采用 IEC 60076-4:2002 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。本部分与 IEC 60076-4:2002 的主要差异如下：

- a) 第 2 章中部分规范性引用文件，用采用国际标准的我国国家标准代替；
- b) 为便于使用，本部分还进行了下列编辑性修改：
 - 用小数点“.”代替作为小数点的逗号“，”；
 - 删除了 IEC 60076-4:2002 的“前言”。

本部分代替 GB/T 7449—1987《电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则》。

本部分与 GB/T 7449—1987 相比主要变化如下：

- a) 原标准只规定了变压器和电抗器波形的模拟记录，本部分规定了可用模拟或数字记录系统来记录冲击电压和电流响应波形；
- b) 原标准只规定了用变压器和电抗器的波形图判断试验结果，本部分规定了可用波形图或数字记录来判断试验结果；
- c) 给出了包括传递函数分析在内的数字处理方法；
- d) 规定了试品冲击试验报告的内容；
- e) 增加了传递函数分析、非标准波形的估算、由试验电路问题产生的响应及试品故障的响应等相应的波形图。

本部分的附录 A、附录 B 均为资料性附录。

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/TC44)归口。

本部分起草单位：沈阳变压器研究所、武汉高压研究所、保定天威保变电气股份有限公司、特变电工沈阳变压器集团有限公司、西安西电变压器有限责任公司、特变电工股份有限公司新疆变压器厂、浙江三变科技股份有限公司。

本部分主要起草人：孙军、傅锡年、胡振忠、钟俊涛、吕建玉、马旭平、周才康。

本部分所代替的 GB/T 7449 于 1987 年首次发布，本次为第一次修订。

电力变压器 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

1 范围

本部分目的是对电力变压器的雷电冲击和操作冲击试验的现行方法提供一个准则并作一些说明,以作为 GB 1094.3 的补充。本部分通常也适用于电抗器试验(见 GB/T 10229),当它与电力变压器所用的试验方法有不同之处时,将单独给出专门的叙述。

本部分包括波形、连同试验接线在内的试验回路、试验时接地的实施、故障探测方法、试验程序、测量技术以及试验结果的判断等方面。

本部分所述的一些试验技术尽可能地采用了 GB/T 16927.1 和 GB/T 16927.2 所推荐的内容。

2 规范性引用文件

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

GB 1094.3 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(GB 1094.3—2003, eqv IEC 60076-3:2000)

GB/T 10229 电抗器(GB/T 10229—1988, eqv IEC 60289:1987)

GB/T 16896.1 高电压冲击试验用数字记录仪 第一部分:对数字记录仪的要求(GB/T 16896.1—1997, eqv IEC 61083-1:1991)

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

GB/T 16927.2 高电压试验技术 第二部分:测量系统(GB/T 16927.2—1997, eqv IEC 60060-2:1994)

IEC 61083-2 高压冲击试验用数字记录仪 第2部分:用于测定脉冲波形参数的评估软件

3 总则

本部分是以使用常规冲击发生器对变压器和电抗器进行雷电冲击和操作冲击试验为基础而编制的。至于另用电容器对中压或低压绕组放电产生操作冲击波的方法也是适用的。但对于另加电感与该电容器串联以对高压绕组传递一种弱衰减振荡波的方法则不适用。

本部分不讨论其他产生或模拟操作冲击波的方法,如截断中压或低压绕组上的直流电流或利用工频电压一个周波中的某一段波形,因为这些方法至今尚未得到普遍的采用。

选择变压器和电抗器的雷电冲击试验和操作冲击试验的试验电路(端子接线)有不同的考虑。对于变压器,所有的端子和绕组均可分别地按规定的试验水平值进行雷电冲击试验;但在操作冲击试验时,由于是靠磁耦合传递电压,故规定的试验水平(见 GB 1094.3)可以只在一个绕组上得到。

电抗器的雷电冲击试验与变压器相类似,即所有端子可分别地进行试验,但在操作冲击试验中却有不同考虑,且出现的问题也不一样。因此,本部分中的雷电冲击试验,对于变压器和电抗器是用同一条文来叙述的;对于操作冲击试验,则须按变压器和电抗器分别叙述。

4 规定的波形

变压器和电抗器的雷电冲击试验和操作冲击试验时采用的电压波形,见 GB 1094.3;确定波形的方法见 GB/T 16927.1。

5 试验电路

按试验设备、试品和测量电路的实际布置,可分为下述三种主要电路:

- 主电路:包括冲击发生器、附加调波元件和试品;
- 电压测量电路;
- 波形截断电路(如果采用)。

试验电路的基本布置如图 1 所示。

下列参数对冲击波波形有影响:

- a) 试品的等效电容 C_i 和电感 L_i ; 对于任何给定的设计和给定的波形, C_i 是一常数, 对于任何给定设计, L_i 也是常数。但是, 等效电感 L_i 却可能受端子接线不同的影响。它在端子短路时的漏感 L_s 和端子开路时的电感 L_o 之间变动。详细情况见 7.1.7.3 并参见附录 A;
- b) 冲击发生器电容 C_g ;
- c) 装在冲击发生器内部和外部的调波元件 R_a, R_w, R_p, C_1 及分压器阻抗 Z_1 (如果采用);
- d) 冲击发生器和整个试验电路中的寄生电感和杂散电容;
- e) 截断装置(如果采用)。

波前时间 T_1 主要由试品的等效冲击电容(包括 C_i) 以及冲击发生器的内部和外部串联电阻决定。

对于雷电冲击波, 半峰值时间 T_2 主要由冲击发生器电容、试品电感和冲击发生器放电电阻或其他并联电阻决定。但是, 在某些情况下, 如绕组电感太小时, 串联电阻也会对波尾有明显的影晌。对于操作冲击, 将采用其他的参数, 详见第 8 章。

雷电冲击和操作冲击试验用的试验设备基本一样, 只是有些元件的参数不同, 如电阻值和电容值不同以及试品端子接线不同。

为了满足雷电冲击和操作冲击波形的不同要求, 必须重视冲击发生器的电容和串联电阻以及放电(并联)电阻等参数的选择。对于操作冲击波, 可能需要高值串联电阻和/或负载电容, 这将使冲击发生器的效率明显地降低。

由于冲击发生器的输出电压是由绕组的试验水平决定的, 而绕组试验水平与试品的设备最高电压 U_m 有关, 因此, 所需的冲击发生器能量主要是由试品本身的阻抗决定的。

有关波形控制原理的简要说明参见附录 A。

试验设备、试品、连接电缆和接地线及其他有关设备的布置, 会受到试验室空间的限制, 特别是各种结构件的邻近效应。由于冲击试验时冲击电压和冲击电流的幅值很大并且变化率又很高, 再者接地系统的阻抗是有一定的数值的, 因此, 不能认为整个接地系统都处于零电位, 故选择一个合适的参考接地点是很重要的。

试品和冲击电压发生器之间的电流回路应是低阻抗的, 并且此电流回路应与试验室的整个接地系统牢固地相连, 最好在试品附近处的接地点接地。此连接点应作为参考接地点。为使试品接地良好, 应当采用一根或几根低阻抗导线与此参考接地点相连(见 GB/T 16927.2)。

电压测量电路是试品的一个单独回路, 只流过测量电流, 它应当与上述参考接地点连接良好, 该回路中的电流只占流过被试绕组冲击电流值很小的一部分。

在操作冲击试验中, 冲击电压和冲击电流的变化率比雷电冲击试验时要小得多并且又无截波电路, 故试验电路周围和参考接地点的电位梯度均显得较低, 因而危险性小。但仍建议按雷电冲击试验的接地方式接地。

6 校正

测量装置应按 GB/T 16927 进行校验。至于测量系统或其校正,本部分不再提出任何新的建议。试验前,应对试验电路和测量系统进行全面的检查,此时施加的电压值应比试验中采用的降低电压水平值还要低。检查时,电压值可通过球隙或通过与其他已经检验合格的测量系统进行比较来测定。当用球隙测量电压时,只能作为一般性的检查,不能代替测量系统的定期校正。检查完毕,除了拆除检查用的各种装置外,测量系统和试验电路均不得变动。

关于分压器的型式及其使用方法、准确度、校正和检查等方面的内容,见 GB/T 16927.2。

7 雷电冲击试验

7.1 波形

在大型电力变压器和电抗器的冲击试验中,由于其绕组电感小和/或冲击电容大,往往不可能得到规定的波形,此时应允许波形有较大的偏差。

由于被试变压器的冲击电容是一个常数,故为得到符合要求的波前时间 T_1 或上升率,只能减少串联电阻值,但又不能过分减少,以免电压波形峰值处的振荡过大。如果为了得到更小的波前时间(最好仍是在规定的范围内),可允许其振荡峰值和/或过冲值比 GB/T 16927.1 规定的 5% 的电压波形峰值大一些。此时,必须对振荡峰值和波前时间同时兼顾。通常,即使将波前时间延长到制造单位与用户协商的极限值时,亦应尽量使振荡峰值不大于 10%。试验电压值的测量按 GB/T 16927.1 规定的原则进行。

对于大型电力变压器,尤其是其中的中压和低压绕组,视在半峰值时间 T_2 可能达不到所规定的偏差值。这些绕组的电感可能小到使波形出现振荡。对于此问题,可用下述一些办法以得到某种程度上的解决,如增大冲击发生器电容、采用并联级运行方式、调节串联电阻或者对非被试绕组的端子或对被试绕组的非被试端子采用特殊的试验接线。

当非被试绕组的端子通过阻抗接地而不是直接接地时,会使绕组的等效电感明显地增加。对于直接接地的端子,只含有漏电感(由短路阻抗确定)。对于通过阻抗接地的端子,主电感是占主要的,它可使等效电感比直接接地时高 100 倍~200 倍。

当任何非被试端子通过阻抗接地时,必须确保任何非被试端子上的对地电压不超过:

——对于星接绕组,端子额定雷电耐受电压的 75%;

——对于角接绕组,端子额定雷电耐受电压的 50%,(由于角接端子上的反极性对地电压——也可见 7.4)。

当电感太小和/或冲击发生器电容太小而使波形出现振荡时,反极性幅值不应超过第一个峰值的 50%。根据这个限值,附录 A 给出了冲击发生器电容选择和波形调节的准则。

7.2 波尾截断的冲击波

7.2.1 截断时间

由于绕组结构及其布置不同,不同的截断时间 T_c (其定义见 GB/T 16927.1)将在绕组的不同部位处产生不同的电气应力(电压和持续时间)。因此,不可能对一般的或特殊的变压器或电抗器规定一个最苛刻的截断时间。所以截断时间不作为规定的试验参数,只要求其符合 GB 1094.3 规定的 $2\ \mu\text{s}$ ~ $6\ \mu\text{s}$ 范围。

但是,只有在截断时间几乎相同的情况下,才可以对截波的波形或数字记录进行比较。

7.2.2 截断冲击波的骤降陡度和反极性幅值

截断时各种特性参数,主要与截断电路的布置、截断电路的阻抗及试品的阻抗有关。它们均可用来决定骤降的陡度和反极性电压幅值。

在 GB 1094.3 中,已限制振荡部分的反极性电压幅值不大于截断冲击电压幅值的 30%。这一规定,实际上已成为截断电路布置的准则,此外,还可以在该电路中接入附加的阻抗 Z_c 。以满足此限值(见

图 1)。

截断回路外形尺寸应尽可能小以使骤降陡度最大,但是,应限制反极性振荡不超过 30%。在多层式绕组中,层间阻抗会使骤降陡度降低,从而不能形成围绕零点的振荡(见图 B.20)。

在 GB 1094.3 中已建议采用触发型截断间隙,因为它能保持截断时间稳定,便于对截断前及截断后的波形或数字记录进行比较。只有在截断时间相同的条件下才能比较截断后的那部分波形。

7.3 端子接线和故障探测方法

7.3.1 端子接线

试品端子接线和接地的方式主要与所采用的故障探测方法有关。

变压器冲击试验时的接线在 GB 1094.3 中有详细的叙述,至于电抗器,则在 GB/T 10229 中有详细的叙述。通常,被试相绕组的非被试端子接地,非被试相绕组应短路接地。但是,为了改善波尾时间 T_2 ,非被试绕组经电阻接地是比较合适的(见第 5 章和 7.1)。此外,被试绕组的非被试线端也可以同样地经电阻接地。

除了 7.1 中的波形调整方法外,还必须考虑以下因素:

- 如果已规定了端子在使用时直接接地或和一个低阻抗电缆相连,那么在试验时,该端子应直接接地或经一个电阻值不超过该电缆波阻抗的电阻接地;
- 为了进行冲击响应电流测量,可以认为经低阻分流器接地与直接接地等效。

当变压器内部或外部装有非线性元件或避雷器以限制瞬时传递过电压时,应预先对每种特殊情况下的冲击试验程序进行讨论。也可参见 GB 1094.3。

7.3.2 故障探测方法

故障检测一般是通过检查施加试验电压和冲击响应电流的波形图或数据记录来实现的。

图 2 表示出各种可能采用的瞬态现象记录方式,它们可单独采用,也可同时采用,今列于下述项 a)~项 e) 中。在验收试验中,主要是记录施加的试验电压波形和下列至少一个瞬态现象波形:

- 中性点电流(适用于中性点在试验时可以接地的星形联结和曲折形联结绕组);
- 绕组电流(适用于其他类型的绕组以及中性点在试验时不能接地的星接联结和曲折形联结绕组);
- 传递到邻近短路的非被试绕组上的电流,有时被称为电容传递电流;
- 油箱电流;
- 传递到非被试绕组上的电压。

有时将 a)、c)、d) 的总和或者 b)、c)、d) 的总和称为线电流。

电抗器试验时,不论是并联电抗器还是串联电抗器,c) 和 e) 都不适用;由于其灵敏度比变压器试验时要低,故 d) 也仅作为一种辅助的瞬态现象记录方式。

7.4 试验程序

有关全波试验或全波与截波试验的顺序见 GB 1094.3。

直接施加冲击电压的方法是一种优先采用的方法。不过,在某些特殊的情况下,如中压或低压绕组在运行时不会直接受到与其相连接系统中的雷电过电压,故对中压、低压绕组可采用传递冲击方法。此时,低压或中压绕组和高压绕组的冲击试验是同时进行的。在这种情况下,传递电压的波形将不满足 GB 1094.3 的规定。因此设法在绕组端子上接入足够大的电阻值,以使试验电压值达到规定的水平是比较重要的。但有时即使用了相当大的电阻值,也不能总是得到所要的试验电压值。在这种方式的试验中,可能会在三角形联结绕组上出现较高的相间电压值,从而使相间的内绝缘或外绝缘遭受到过高电气应力的危险,这可能使低压绕组上的电压值受到限制。合适的电压限值可由低压重复式冲击发生器的瞬态分析确定。

接到绕组上的非线性保护装置,由于其特有的性能,可能会使降低电压全波与全电压全波的波形图或数字记录有差异,为了证明这些差异确实是由保护装置动作所引起的,须通过两个或多个电压值不同

的降低电压的全波冲击试验来表明保护装置动作的趋势。为表明非线性效应的可逆性,应在全电压全波试验电压施加后,按相反的顺序,依次施加原用的几个降低电压的全波冲击波。

例如:60%、80%、100%、80%、60%。

GB 1094.3 给出了变压器中性点的试验方法。当用间接加压方法时,即中性点上的冲击电压是由一个或多个线端传递的,其中性点上的波形尚不能规定,因为它基本上是由变压器本身的参数决定的;当采用对中性点直接加压的方法时,所有线端需接地,其波前时间允许长达 $13 \mu\text{s}$ 。此时,冲击发生器的感性负载显著地加大,很难达到符合偏差要求的半峰值时间。因此,可允许被试绕组的非被试端子经阻抗接地。

7.5 试验记录

7.5.1 概述

可以用模拟或数字记录系统来记录雷电冲击电压和电流响应波形。

7.5.2 模拟和数字记录系统

GB/T 16896.1 给出了模拟示波器和数字记录仪的要求。

数字记录可以对试验结果提供数学的解释,并允许使用辅助的数学处理,例如对所记录的现象进行故障分析。这些技术表明是有前途的,但对试验结果的解释尚未得到证实。

在此须强调,当为使试验结果可以被接受而采用波形图对比的方法时,用数字测量技术得到的波形应当是由未经任何数学处理、滤波及平滑化的原始数据得出的。

对非标准波形进行评估时,采用原始数据也是同样重要的。

(图 B.18、B.19 和 B.21 显示了在幅值、波前时间 T_1 及半峰值时间 T_2 评估上的明显差异。)

当数字记录仪作为直接测量装置记录电压和电流波形而无需对所记录的数据进行数学处理(见第 10 章)时,可视为技术先进的模拟式仪器。

GB 1094.3 要求同时测量:

- 外施电压;
- 至少有一个如 7.3.2 列出的瞬态现象。

因此,至少需要两个独立的记录通道。

尽管外施电压测量已有专门的规定,但记录其他瞬态现象特性的选择则与所采用的故障探测方法有关。

7.5.3 波形的模拟记录

为使试验结果判断容易,主要是根据降低电压和全电压下记录的波形图比较,最好是利用示波器上合适的衰减器,使相对应的波形图均具有相同的幅值。

7.5.3.1 冲击电压波形的模拟记录

a) 冲击电压波形测定

在对试验电路参数进行初步调整时,记录波形的最佳扫描时间,对于波前,为不大于 $10 \mu\text{s}$ (当对变压器中性点进行试验时,可能需要更长的扫描时间)。对于波尾,只要能估算出半峰值时间就可以,不过,有时还要能估算出反极性电压幅值。

b) 外施冲击试验电压波形记录

为确定试验波形峰值并对任何可能出现的故障进行探测:

- 对于全波,扫描时间应不小于 $100 \mu\text{s}$;
- 对于截波,扫描时间在 $10 \mu\text{s} \sim 25 \mu\text{s}$ 之间一般是足够的。

至于试验报告(见第 11 章),对于验收试验,一般有一个恰当的扫描时间的记录是足够的;但对于诊断性试验,则可能需要几个不同扫描时间的记录。

7.5.3.2 冲击响应电流的模拟记录

一般地说,冲击电流是探测故障的最灵敏的参数。因此,电流波形图是试验结果的主要判断依据。

根据电流波形的形状以及所采用的线性扫描或指数扫描,可能需要扫描时间不同的多个记录,以保证:

- a) 尽可能得到包括波前附近处的高频分量在内的清晰波形图;
- b) 电流波形图的持续时间应足够长,以便判断稍晚些时间出现的波形差异。由于每台变压器的响应特性不同,且扫描时间在一定程度上与绕组结构型式有关,故“稍晚些时间”的含义也就不够确切。对于扫描时间,很难拟出一个更好的规则。当记录中性点或绕组电流时,记录时间至少应持续到感性电流峰值的出现,以便由波形图判断是否存在由于匝绝缘击穿造成匝间短路而使电感发生变化的现象。

7.5.4 波形的数字记录

数字记录的原理是在试验过程中以规则的时间间隔采样,从而对电压或电流波形进行测定。这些采样应直接表示为原始数据,以便对波形参数进行估算(见 7.5.3.1),也可以根据降低电压值和全电压值(见 7.5.3.2)下记录波形的比较来对试验结果进行评估。另外,所记录的数据也可以用波形分析法进行处理,如对记录波形的故障分析(见第 10 章)。

冲击试验时,试验区附近会出现很高的电磁场,故需要对数字记录系统中的敏感的电子装置、整个处理设备及其电源进行保护,以免受电磁场的损害。

数字记录仪的屏幕分辨率应不小于 768×1024 像素,打印机应不小于 300 dpi。

7.5.4.1 冲击电压波形的数字记录

a) 冲击电压波形的确定

在对试验线路参数进行初步调整时,供测定波形用的记录数据的最佳扫描时间,对于波前,为不大于 $10 \mu\text{s}$ (当对变压器中性点进行试验时,可采用较长的扫描时间);对于波尾,只要能算出半峰值时间就可以,不过,有时还要能算出反极性电压幅值。

GB/T 16896.1 规定了用于记录冲击电压和电流波形的数字记录仪的最低分辨率为 9 bit 60 MHz。当调节至 $10 \mu\text{s}$ 时间段或小于 $10 \mu\text{s}$ 时间段以便对波前或对截波冲击进行估算时,应考虑使用 10 bit 的数字记录仪和 100 MHz 的采样率。

过去,波形估算是根据示波器记录、技术规定和目测来进行估算。随着电力变压器高压试验中数字记录仪的使用,就非标准波形的估算来说,应给出其幅值和时间参数。特别是,当试验额定容量大的低压绕组时,出现了频率小于 0.5 MHz 的单极性过冲,此时根据 IEC 61083-2 来估算这种非标准波形的峰值是不适用的。由于使用了数字记录仪内置曲线平滑算法,已观测到的误差大于 10%(见图 B.18、B.19 和图 B.21)。

在这种情况下,需要用技术规定对原始数据曲线进行仔细的估算,根据 GB/T 16896.1,力荐使用峰值电压表同时进行峰值电压的测量。

b) 外施冲击试验电压波形记录

为确定试验波形的幅值且对任何可能出现的故障进行探测,则:

- 对于全波,采样数据的扫描时间应不小于 $100 \mu\text{s}$;
- 对于截波,扫描时间在 $10 \mu\text{s} \sim 25 \mu\text{s}$ 之间一般是足够的。

因为部分绕组的最高响应频率一般不超过 $1 \text{ MHz} \sim 2 \text{ MHz}$,故数字记录仪每个通道有 $10 \text{ MHz} \sim 20 \text{ MHz}$ 的采样率一般是足够的。如果在电压波形或电流波形中观测到高频,则是由于测量电路中的寄生振荡或是接地系统中的噪声所引起的。因此,推荐用更高的采样率(如前所述),以便对测量电路中的噪声和试品的实际特性进行区别。

对于波形分析,重要的是要用数字记录仪的最大可用内存,在整个波形上进行采样,直到波形已完全衰减。同样重要的是,在编写数字记录仪的程序中要有足够的采样数,以便确定波形的视在起点。

此外,因为可能需要进行若干次 50% 电压下的预冲击,以确定电压波形幅值和/或每个通道偏

测量的最佳范围,故使用数字记录仪输入放大器的最大可用的分辨率也很重要。

应该特别注意雷电冲击波的反极性峰值大小。当要测量它时,可能会由于数字记录仪内输入放大器在所选量程内达到饱和,从而使记录的波形被削平。

对于验收试验,有一个恰当的记录(见第11章)一般是足够的。但是,对于诊断性试验,由于所有的信息已储存在计算机内存中,系统软件有能力在整个采样时间内检验波形或检验波形的某一部分。软件可以将全电压下波形与降低电压下波形相减,并将此差显示于可调幅值的刻度上。但是,倘若难于对这两条波形曲线进行适当的时间调节时,在波形的快速上升部分可能出现问题。

7.5.4.2 冲击响应电流的数字记录

通常,冲击电流是探测故障最灵敏的参数。因此,记录电流波形是对试验结果进行判断的主要依据。对于验收试验,其波形的显示与7.5.3.2中示波器的显示相同。

但是,数字记录仪内存中储存的数据允许对同一波形采用放大或缩小时间刻度来作不同的显示。有关采样率和数字记录仪输入通道的分辨率的要求,与7.5.3.1的规定相同。

为了更好地利用辅助的数学研究工具,如传递函数分析(见第10章),对试验结果进行分析,重要的一点是使所用的冲击电流波形和电压波形的记录时间相同。

8 操作冲击试验

8.1 特殊要求

变压器和电抗器对操作冲击波的响应有较大的差异,这是因为变压器有一完全闭合的磁路且操作波的持续时间较长,因此,在铁心中能出现相当多的磁通(见GB 1094.3),而电抗器则不同。此外,二者的波形问题和试验程序也各不相同,所以应对这两种电气设备予以分别叙述。

8.2 变压器

8.2.1 波形

正如GB 1094.3所述,对操作冲击波的视在波前时间无严格的规定值,但应有足够长的时间以保证电压分布基本上是均匀的。一般要求波前时间 $T_1 \geq 100 \mu\text{s}$,它是由绕组等效电容、负载电容和串联电阻等决定的。

波尾不仅受到各种调波元件的影响,而且也受到铁心可能饱和的影响。由于铁心饱和,大多数变压器在全电压值下,其波尾部分的指数衰减曲线会在峰值以后某一不确定的时刻突然下降为零。因此,视在半峰值时间不能用来表征操作冲击波的波尾。此时,波形参数可改用高于90%峰值的时间 T_a 和第一个过零时间 T_z 来表征。GB 1094.3规定: $T_a \geq 200 \mu\text{s}$, $T_z \geq 500 \mu\text{s}$,但最好是 $1\,000 \mu\text{s}$ 。这些波形参数的表示见图3a。

铁心达到饱和的时间与铁心尺寸、起始磁化状态和施加电压的水平及其波形等有关。为保证施加电压相同的各次操作冲击波的波形一致,必须使加压前铁心的初始磁化状态相同。此外,降低电压下的波形也不可能与全试验电压下的波形相同。有关减少铁心饱和影响的试验程序见8.2.3。

在降低电压下一般不出现铁心饱和现象,有时甚至在全试验电压下也可能不出现饱和。如果出现饱和,它对电压波形的影响多少是与其饱和程度有关的。为此,当从变压器的高压侧施加操作冲击波时,可在降低电压下确定 T_1 和 T_a 。然而,在第一次全电压操作冲击波施加前, T_z 是不能确定的。当从变压器的低压侧施加操作冲击波时,只能在降低电压下确定 T_1 。此时, T_a 和 T_z 只能在全电压下确定。

应注意由于磁路磁阻不同,故变压器不同心柱上的波尾形状可能有明显的差异。

8.2.2 端子接线和故障探测方法

8.2.2.1 端子接线

为了满足GB 1094.3的要求,对三相变压器只允许采用一种试验接线,如图4所示。其中性点总是接地的且非被试相端子最好连在一起。(对于具有三角形联结绕组的变压器,非被试端子不必连在一起。)

对于三心柱式和五心柱式三相变压器,所选的电路应使相对地绝缘和相间绝缘分别受到 $1.0p.u.$ (标么值)和 $1.5p.u.$ (标么值)的外施电压。这两种绝缘的试验是同时进行的。

选择哪一个绕组直接施加试验电压及此试验电压的水平,一般可由制造单位决定,但应该使具有最高额定电压的绕组达到额定操作冲击耐受水平。

不允许将非被试绕组短路,因为在操作冲击试验时,这种短路的效应基本上与感应电压试验时相同。

虽然操作冲击波的基本波形是通过感应传递的,但相间耦合电容、各相自身电容和自身电感也能引起附加的振荡,并叠加在传递电压波上。图 B.14 表示出这种影响的实例。因此,当在一个端子上施加电压 U 时,按 GB 1094.3 的要求,相间的电压值便为 $1.5U$ 。这点仅从理论上说是正确的。所以,在试验时如果不在非被试端子上采取经高阻抗接地的措施以抑制振荡电压的话,那么相间的电压值很可能比 $1.5U$ 要高,非被试端子上的相对地电压值也很可能比 $0.5U$ 要高得多。

为了得到适当的电压衰减,可采用一种简便的方法,即在被试绕组系统的非被试相端子上和/或非被试绕组相端子上接入高阻值的负载。但是,此电阻负载会使非被试端子上的波前时间显著地拉长,从而使相间的电压值小于 $1.5U$ 。这是由于施加电压波 (U) 和感应电压波 ($0.5U$) 峰值出现的时间不同所致。当负载过大(即电阻太小)时,所施加的操作冲击波的波尾时间便明显地缩短,以致饱和效应也不存在了。

对于无三角形联结绕组的壳式及五柱式变压器,由于磁通不能直接通过非被试心柱上的绕组,故要求相间达到 1.5 倍的相对地电压值可能得不到满足。如果无角接绕组,那么通过非被试相绕组端子的短路和接地只能实现 $1.0p.u.$ (标么值)的相对地试验。

对于单相自耦变压器,也可能有类似的叠加振荡问题需要予以考虑。

8.2.2.2 故障探测方法

至于故障探测,一般只测量电压波形就足够了。但在对中压或低压端子上施加冲击波时,则应记录高压端子上的电压波形。对于被试绕组的接地电流,也可以作为一种辅助的探测方法。

8.2.3 试验程序

在 GB/T 1094.3 中已叙述了试验程序。它包括了缓和铁心饱和的方法,以增加冲击波的持续时间。

在本部分中,当对高压绕组直接加压时,其试验程序包括对每相端子施加的冲击波,即:

- 一次降低试验电压水平(为额定操作冲击耐受水平的 50%~75%)的负极性冲击波;
- 施加幅值约为 50% 试验水平的正极性冲击波或直流电压,以产生正极性剩磁;
- 三次额定操作冲击耐受水平下的负极性冲击波,每次冲击前应先产生反极性剩磁。

产生剩磁优先选用的方法是施加大约 50% 试验水平的反极性(即正极性)冲击波。为使任一施加电压值下的波形图或数字记录相同,建议将剩磁点保持不变,此点最好是饱和剩磁点。若连续施加各冲击波中的第一次过零时间保持不变,则意味着已找到这样的点了。所需要的预励磁冲击次数及其电压值与预定的试验电压值有关。为避免外绝缘闪络,此正极性预励磁冲击电压值应不大于 50%~60% 试验电压值。

8.2.4 试验记录

8.2.4.1 概述

操作冲击试验时,要求记录高压端子上的电压波形。但是,正如 8.2.2 所述,由于非被试端子对地电压或相间电压可能过大,因此建议至少还需要对这些电压值进行检查。

电压波形记录通常也能很好地显示不直接遭受操作冲击波的有磁耦合的绕组上的任何故障。也可以记录冲击电流波形,在许多情况下,它还可以给出有关故障的补充信息。

为了记录操作冲击电压波形,最好用电容式分压器,因为电阻式分压器会对波形有影响,并且它本身还会出现过载发热的问题。当用电阻式分压器检查非被试端子的电压值时,因为它们被看成是电路

中的一个相当大的负载,故应将其保留在电路中。也可用经过严格校准的电容式套管各测屏(末屏)端子作为分压器。

8.2.4.2 冲击电压波形的模拟记录

a) 冲击电压波形的确定

在调节试验电路参数确定波形的情况下,当记录波前时间时,其扫描时间必须将波形峰值部分包括在内,通常为 $100\ \mu\text{s} \sim 300\ \mu\text{s}$;当记录波尾时间时,由于只需确定高于 90% 峰值的时间 T_d ,建议扫描时间为 $500\ \mu\text{s} \sim 1000\ \mu\text{s}$ 。

b) 施加冲击试验电压的波形记录

为了确定试验波形的峰值和对任何可能出现的故障进行探测,扫描时间必须足够长,直到包括第一个过零点,即应大于预定的 T_d 值,通常为 $1000\ \mu\text{s} \sim 2000\ \mu\text{s}$ 。在特殊情况下,甚至可能需要更长的扫描时间,如 $2000\ \mu\text{s} \sim 3000\ \mu\text{s}$ 。

8.2.4.3 冲击电压波形的数字记录

a) 冲击电压波形的确定

需要从波形的起点到其完全下降时的整个波形上采样,为此,要使用数字记录仪内的最大可用的内存。重要的是要采用这样一种方法对数字记录仪进行程序编制,即它应具有足够多的采样数以便能确定波形的视在原点。对于记录操作冲击,10 MHz 的采样率是足够的。7.5.3 所述的用于雷电冲击的数字记录仪的要求,足以用来记录操作冲击。

重要的是要用数字记录仪输入放大器的最大可用分辨率。为了确定每个通道的电压最佳范围和/或偏移量,需要若干次 50% 降低电压水平的冲击。

应特别注意铁心饱和的影响和由于数字记录仪输入放大器饱和所引起的电压波形和电流波形被削波的可能性。

b) 施加冲击试验电压波形记录

为了确定试验波形的峰值和对任何可能出现的故障进行探测,记录时间必须足够长,直到包括第一个过零点,即应大于预定的 T_d 值,一般需要 $1\ 000\ \mu\text{s} \sim 2\ 000\ \mu\text{s}$,特殊情况下需要 $2\ 000\ \mu\text{s} \sim 3\ 000\ \mu\text{s}$ 。

8.2.4.4 冲击响应电流的模拟和数字记录

如 8.2.2 所述,记录冲击电流将有可能探测局部放电。当记录直接施加冲击电压绕组中的电流时,不论绕组是否承受到规定的试验电压水平,该电流都包括以下三个部分:

- 初始电容性电流脉冲;
- 与施加电压波尾部分相对应的缓慢且均匀上升的电感性电流分量;
- 与任何饱和现象相对应的电流峰值。如果是由于饱和的影响,那么该电流峰值将会与电压骤降或下降相对应。

任何匝间或绕组某一部分的故障也会产生一个瞬态电流峰值,但是还伴有一个快得多的电压骤降,这表示磁通已被阻断。

当记录冲击响应电流的波形或数值时,最好选用与电压记录相同的扫描时间或采样时间。

8.3 电抗器

8.3.1 波形

在电抗器上得到的波形,呈一余弦衰减波。由于通过绕组的磁路不是完整的铁磁回路,故在波尾处不出现任何饱和现象。此波形主要是用频率及衰减系数来表征的。频率是由电抗器电感和冲击发生器电容决定的。但是,在实际应用中,电抗器上的试验波形规定仍如变压器那样,是用 T_1 、 T_d 和 T_2 (见图 3b 和 B.16) 来表示的。

其视在波前时间仍如变压器那样,主要是由绕组等效电容、附加负载电容和串联电阻等决定的。波前时间应足够长以确保被试绕组上的电压分布大致均匀。当 T_1 较大时,衰减系数也较大,因而使 T_2

相应地缩短；当 T_1 较小时， T_d 也小且反极性电压幅值可能达到 75% 试验电压值，从而增加相对地或相间闪络的危险。因此，应象变压器那样，将此反极性幅值限制在不超过 50% 的安全值以内，然后按此条件决定相应的 T_1 、 T_d 和 T_2 。

通常，对于小于 100 Mvar、阻抗相对较高的三相小型电抗器，要得到象变压器那样 $T_d \geq 200 \mu\text{s}$ 的特性要求是没有问题的。对于大型电抗器，要得到如变压器所规定的 T_d 和 T_2 将需要容量相当大的冲击发生器。此时，为确保有足够的“电压-时间”电气特性， T_d 和 T_2 的最小值应分别为 120 μs 和 500 μs 。

8.3.2 端子接线和故障探测方法

8.3.2.1 端子接线

由于每相只有一个绕组，试验电压只能加到被试相绕组的线端，该相绕组的另一端子应接地。

对于三相电抗器，不能满足如图 4 所示的相间电压等于 1.5 倍相对地电压的要求。在这些电抗器中的磁通不能直接通过非被试心柱上的绕组。因此，要求其正常操作冲击试验程序与雷电冲击试验相同。

8.3.2.2 故障探测方法

对于故障探测，如变压器一样，通常只记录电压波形就足够了，但是记录通过被试绕组中的接地电流波形也可以作为辅助的探测方式。

8.3.3 试验程序

由于没有铁心饱和的影响，电抗器的操作冲击试验程序与其雷电冲击试验程序相同。它包括：

- 冲击电压波形的确定；
- 施加一次降低电压值的负极性冲击；
- 施加三次额定操作冲击耐受电压值的负极性冲击且不需采取任何预励磁措施。

8.3.4 冲击电压波形和冲击响应电流的模拟和数字记录

对于电抗器来说，尽管 8.3.1 所述的波形与变压器的波形有些区别，但其电压及电流波形记录的原则，总的说仍与变压器相同。不过，在其电压和电流波形中所用的扫描时间最好是包括外施电压的第二个半周期波形在内。

此外，对于电流波形，采用更短的扫描时间或许要好一些，因为它能更详细地指示出初始的电容电流。与余弦电压波形对应的电流基本波形为正弦波波形(见图 3b)和 B.16)。

9 波形图或数字记录的判断

判断试验结果的基本方法是对在一个给定试验顺序内所得到的各试验波形之间进行比较。总的说，除了有非线性装置外，在同一试验条件下并使用同一试验电路参数，由同一通道所记录的各曲线图应该相同。不同试验电压水平下的波形图，应通过适当的衰减进行补偿，以得到相同的波形记录幅值。

附录 B 包括了一些变压器和电抗器实际试验时所记录的一批有故障和无故障时的波形图和数字记录。但应强调的是：在另一台产品上出现的类似的波形畸变不能看成是由同一原因引起的，因为产品设计不同时，其故障的表现形式也是不相同的。

9.1 雷电冲击

9.1.1 概述

波形图或数字记录的判断，是根据对降低电压和额定试验电压或连续几次额定试验电压之间的电压和电流波形图的比较而进行的。这是一项技术性较强的工作，此外，由于总可能出现各种各样的干扰，故即使经验丰富的人，常常也难于确定畸变的原因。因此，不管出现了什么样的畸变，都应对它进行研究。

为了研究这些畸变，建议先检查试验线路、测量线路和接地方式，确定它们是否产生干扰。如果干扰是由试验线路引起的，应尽量消除此干扰或尽可能减少其影响。应注意：在多级冲击发生器中，由于各级点火时间不同，可能使电流波形的起始高频振荡处的幅值有少量的变化(基波频率不变)，见图

B.13。但是,在大多数情况下,这些变化出现的时刻被限制在与电压波波前50%幅值以下相对应的时间内。

如果多级并联运行冲击发生器的各放电回路投入运行时间不一致,则有可能在峰值出现后产生畸变。此时,可能要求在冲击发生器上装设一种新型的既有串联又有并联间隙的放电间隙。

其次,应检查铁心接地或试品内任何非线性元件,使它们不是干扰源。无间隙的非线性电阻元件随着外施电压的增加,波形图可能会出现一种有规律的逐步发展或变化(见图 B.12)。

一旦上述引起畸变的原因消除或给予指明之后,则在降低试验电压和额定试验电压之间或者连续几次额定试验电压之间的电压或电流波形图中的任何变化,均可以认为是由于试品绝缘故障所引起的,不能再认为是由于试验线路或试品内的非线性电阻元件引起的。

9.1.2 全波试验的电压记录

用施加电压的波形图或数字记录来探测故障是很不灵敏的。因此,当用它探测到有畸变时,则表明在试品绝缘或试验线路中出现了较大的故障。

只要时间分辨率足够高,就可以对畸变进行更细致的分析。

——被试端子附近出现直接对地故障时,将使电压波出现骤降。当沿被试绕组逐渐发展但呈完全闪络时,电压骤降较慢,一般呈阶梯状下降(见图 B.1)。

——沿绕组某一部分的闪络将降低绕组的阻抗,从而减少半峰值时间。在闪络的瞬间,将会在电压波上出现振荡的特征(见图 B.1~B.5)。

——范围较小的故障,如线段间甚至匝间绝缘击穿,一般在电压波形记录上看不出变化,但有时会有高频振荡出现。通常用电流波形图可探测出这些故障,见图 B.6。在被试端子处或其附近处出现的潜伏性故障,同样会使波形图或数字记录上出现少量的变化迹象。

传递电压波形图也能指示上述故障且其灵敏度比外施电压波形图要高。

9.1.3 全波试验的电流记录

冲击响应电流的波形图或数字记录是最灵敏的故障探测方法。但是,此灵敏度有可能显示出与故障无关的各种干扰现象,其中一些已在9.1中列举出。它们可能使波形的振荡出现异常的突变或者使电流波形的波前部分发生变化,因此应对其进行研究。

若电流波形图中发生了明显的变化,如幅值和频率的变化,一般表明在被试绕组内或绕组对地之间有部分绕组发生击穿(见图 B.1)。根据所用的故障探测方法不同,其波形变化形式也不相同。由电流增减、电流变化方向与所用的故障探测方法一起可用来确定故障的性质和其发生的部位(见图 B.3)。

在中性点电流中,若电流明显增大且伴有叠加频率的变化,则表明被试绕组内部出现故障;若电流减少,则表明被试绕组对相邻绕组或对地出现故障。

在电容传递电流中,若被试绕组内部或被试绕组对地出现故障,则使电流的极性发生突然的变化,也会使基波频率发生变化且使幅值可能降低;若是被试绕组对相邻绕组的故障,则电流波形幅值会按同一极性方向突增且使基波频率发生变化。

小量的、局部的、锯齿状的、或许会持续 $2\mu\text{s}$ 或 $3\mu\text{s}$ 的畸变,有可能表示匝间、段间或线圈引线间的绝缘发生严重的放电或局部击穿。对于串联电容小的绕组,即基本上显示行波特性的绕组,可以利用电容电流波畸变信号和行波畸变信号到达中性点时的时间差异来确定故障源的部位。

9.1.4 截波试验的电压和电流记录

若截波的截断时间不是很一致时,一般不可能对截断瞬间后的波形图进行比较。即使采用触发式截断间隙(见图 B.10)也只能得到大体相同的截断时间,而不能得到完全相同的截断时间。即便截断瞬间差别不大,对某些变压器而言,也能使截断后的那部分波形产生明显的畸变(此波形图是由原来冲击波中的波前时间相对应的瞬态现象和截断时引起的瞬态现象叠加而成的),并且这种畸变可能使连续几次施加的冲击波之间的波形图比较产生混乱,从而误认为有故障出现(见图 B.11)。

当使用数字记录技术时,用第10章所述的传递函数分析,可能有助于消除这种混乱(见图 B.17)。

应对截断后任何电压和电流记录中的频率变化进行研究。这些变化可能是由回路对试验室地的闪络或试品内部故障所引起的。

截波试验时,若截断间隙不动作或任何外部出现了火花放电,尽管电压记录仍显示为一个截波,仍明确表示在试品内或在试验电路内存在故障。

只要一个施加电压波的截断时间与另外一个很接近时,利用电压和电流记录中在截断后的振荡差异可以探测试验时出现的故障,见图 B.8 和 B.9。但当故障是在截断瞬间前出现时,则有关波形图的考虑与全波试验时相同(见图 B.2 和 B.7)。

9.2 操作冲击

9.2.1 电压记录

在操作冲击试验中,由于沿整个绕组上的电压分布是均匀的,因此,故障出现一般便意味着有较大的损坏,如段间、绕组某一部分、甚至绕组之间或绕组对地等出现了短路。这些故障形式使电压波形图有明显的变化,它可能使电压波突然下降或者使波尾缩短,有时也可能只出现短暂的下降。因此,操作冲击试验中的电压波形图对大多数故障而言,都有足够的灵敏度(见图 B.15)。

对于变压器,任何一部分绕组的故障(匝间故障,层间击穿,或在分接绕组内击穿)都会产生磁通阻断,因此,很容易用电压和电流记录来探测。

对于带气隙的铁心式电抗器,由于每相只有一个绕组并且没有闭合的磁路,故要探测匝间故障可能很困难,或者可能根本探测不到故障。此时,具有较高分辨率的流到地中的电容电流或第二个电流(油箱电流)记录,可能对此有帮助。当采用这种高分辨率的记录时,建议它应包含外施余弦电压波的峰值的时间和到达反极性的时间在。

变压器试验中的波尾缩短,一般是容易与连续施加数次冲击波时因铁心初始磁化状态不同所引起的波尾长度变化区分的。若各初始状态越接近,就越容易区分故障和无故障状态。

9.2.2 冲击响应电流记录

在 8.2.4.4 和 8.3.4 中已分别叙述了变压器和电抗器电流记录的一般波形。除了在波形起始部位或在变压器的铁心饱和点附近外,若在与电压波形图出现畸变的同一时刻电流波形也出现了急剧的变化,则表示出现了故障。对于预期的故障性质而言,电流记录的灵敏度与电压记录相同。

10 包括传递函数分析在内的数字处理

随着数字记录技术在 LI 和 SI 试验中的引入,现在,它已成为进行故障分析实用的辅助工具。

在传递函数分析中,外施电压 $U(t)$ 和相应的变压器中性点处或是短接的非被试绕组对地处(电容传递电流)的冲击响应电流 $I(t)$ 的实时记录,都可以通过快速傅氏变换算法(FFT)转换为频域,分别表示为 $U(\omega)$ 和 $I(\omega)$ 。

然后,对电压和电流频谱 $[U(\omega)$ 和 $I(\omega)]$ 进行如下数学处理:

- 通过 $I(\omega)/U(\omega)$ 得到传递导纳函数;或
- 通过 $U(\omega)/I(\omega)$ 得到传递阻抗函数。

对于变压器无源网络,导纳函数和阻抗函数都可看成是与波形无关的频域特征函数,但是,由于电压频谱 $U(\omega)$ 没有任何零点,因此,在传递函数分析中应优先使用传递导纳函数 $I(\omega)/U(\omega)$ 。

传递函数的实例见图 B.17。

对于导纳函数,由四端网络理论¹⁾,可得出如下的故障表示:

- 传递函数图中出现了所关注的极点的位置偏移,这表明了绕组中某一部分发生击穿;
- 极点降低,这表示有局部放电发生。

但是,当冲击电流和/或外施电压的变化并不引起传递导纳函数变化时,这表明了是试验电路的问

1) 四端网络理论是描述线性电气网络中的时域和频域输入量与输出量之间关系的一种数学工具。

题,而不是试品的问题,因此,它是一种用来区分内部故障和外部故障的工具。

要强调的是该技术尚未得到充分证据,表明它适用于所有的情况,因此,目前只建议作为结果的辅助判断方法。试验结果最终是否被接受,仍然是根据第7.5规定的波形对比结果。

数字记录仪从1980年起,就已经用于冲击试验。然而,关于传递函数分析的文献和经验,多年来一直受到反对意见的抵制。这些反对意见的理由如下,即:

- a) 四端网络理论是完全适用于集中线性电路元件的,但变压器,特别是雷电冲击试验电路却不用集中线性电路元件表征;
- b) 数字记录仪可能有非标准化的内置滤波器,以滤去信号中的噪声,从而可能:
 - 将初期性故障指示滤掉而不承认它存在;
 - 一对与导纳函数无关的波形有影响。
- c) 按不同故障状态下的差异性所确立的好/坏准则,至今尚未达到令人满意的程度。

此新技术在将来将是一个非常有用的工具,因为它也可用于发生严重短路后对绝缘故障和机械故障进行在线检测。

在下述一些记录实例中,既有实时记录又有传递函数分析。

示例1:用数字记录估算非标准波形

- 对于具有19%过冲的非标准波形1.44/46 μs ,是根据GB/T 16927.1通过波尾下降部分的切线进行估算的,见图B.18。由于数字记录仪中未知的内置曲线平滑算法,故幅值估算误差可能大于10%;
- 对于叠加振荡幅值大于50%且频率小于0.5 MHz的非标准波形2.48/50 μs ,见图B.19。根据叠加振荡的一段波形图,数字记录仪估算的半峰值时间为5 μs ,而根据GB/T 16927.1,其估算时间为50 μs ;
- 对于层式绕组上的非标准截波,见图B.20。由于层间阻抗避免了截波对地电压迅速下降,也不产生围绕零点的振荡;(比较图B.8~B.11和B.20的波形图或数字记录。)
- 用不同的数字记录仪对同一记录进行非标准波形的比较:在图B.21的例子中,发现幅值的差异为7% (109.9 kV对102.3 kV),参数 T_1 的差异为9% (2.55 μs 对2.34 μs)。 T_2 的差异未说明。校准的并联峰值电压表的读数为110 kV。

示例2:试验电路问题的响应

- 对于由测量电缆对地网络所引起的试验电路问题,见图B.22 a)。由低压绕组来的电容传递电流所引起的使测量电缆对地(不是油箱和冲击发生器的地)闪络,经与降低全波试验比较后,有:
 - a) 电压波形中无指示;
 - b) 电流波形中有明显的指示;
 - c) 传递函数分析中有明显的指示:
 - 传递函数中,存在着极点位置下降,但其频率没有变化时,这表明有放电;
 - 在消除测量电缆故障后,重复进行冲击试验。图B.22 b)示出了在降低电压和全电压全波冲击试验电压下各传递函数之间完全一致。

示例3:试品故障的响应

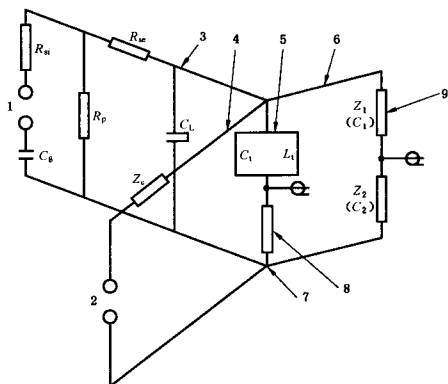
- 图B.23 a)示出了分接开关分接头引线之间网络的数字记录。全电压全波冲击下的电压和电流的实时记录及传递函数记录与降低全波冲击试验相比,有明显的变化;
- 粗调绕组和细调绕组之间故障的数字记录,见图B.23 b)。所有的实时记录和传递函数记录都有明显的变化。由上述所示的记录实例可知,所有的故障也可用实时记录探测出。

11 冲击试验报告

试品的冲击试验报告至少应包括以下内容:

- a) 一般内容,包括:
 - 试品的型号、额定值及电压;
 - 出厂序号;
 - 试验时的分接位置;

- 试验地点及试验日期；
 - 制造单位的试验工程师；
 - 用户的监制工程师；
 - 试品的标准；
 - 规定的试验电压及波形。
- b) 用表格列出每个端子的冲击试验,其内含有:
- 试验波形类型及幅值；
 - 记录编号,以便查验和相互参考引用；
 - 雷电冲击(LI,全波或截波)和操作冲击(SI)的实际试验电压；
 - 冲击发生器的实际配置参数(内部和外部)；
 - LI(T_1, T_2, T_c)和 SI(T_1, T_d, T_i)的波形参数；
 - 每次试验的接线图,包括:
 - 端子标志；
 - 施加冲击的端子；
 - 被试相和非被试相的非被试端子的接地布置,其中包括接地电阻或接地阻抗值；
 - 试验电路详述；
 - 电压和电流测量点及其测量布置。
- c) 试验中相关记录的复制是试验报告的一个重要部分。当有规定时,应对这些记录进行严格核对并合理地排列,以便各全波和各截波之间易于比较。应表示出每张波形图或数字记录中各坐标轴(幅值和时间)的刻度比例。



图中：

1——冲击发生器；

2——截断间隙；

3——主电路；

4——截断电路；

5——试品；

6——电压测量电路；

7——参考接地点；

8——分流器；

9——分压器；

C_g ——发生器电容；

C_t ——负载电容；

C_1 ——试品等效电容；

L_1 ——试品等效阻抗；

R_m ——内部串联电阻；

R_{st} ——外部串联电阻；

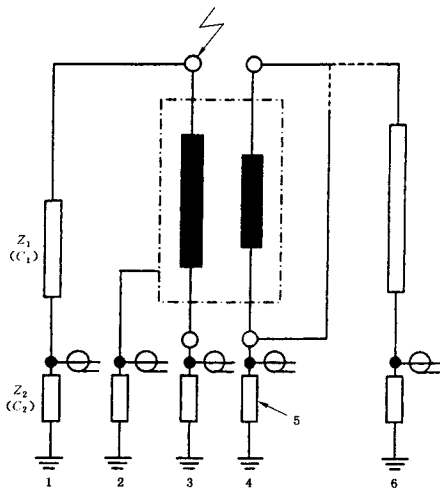
R_p ——并联电阻；

Z_c ——截断电路中的附加阻抗；

$Z_1(C_1)$ ——分压器高压侧阻抗(电容)；

$Z_2(C_2)$ ——分压器低压侧阻抗(电容)。

图 1 典型的冲击试验电路

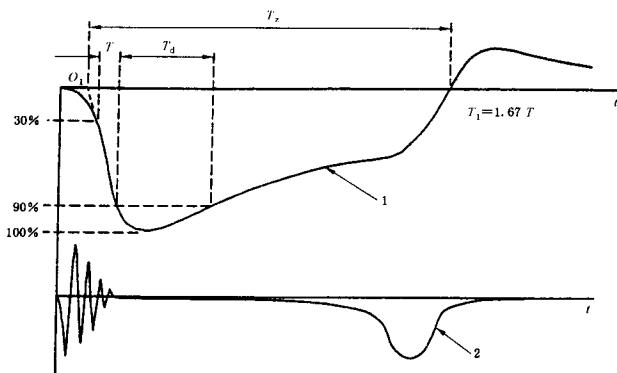


图中：

- 1—电压测量电路；
- 2—油箱电流；
- 3—中性点或绕组电流；
- 4—电容传递电流；
- 5—分流器；
- 6—电压测量电路和传递电压；

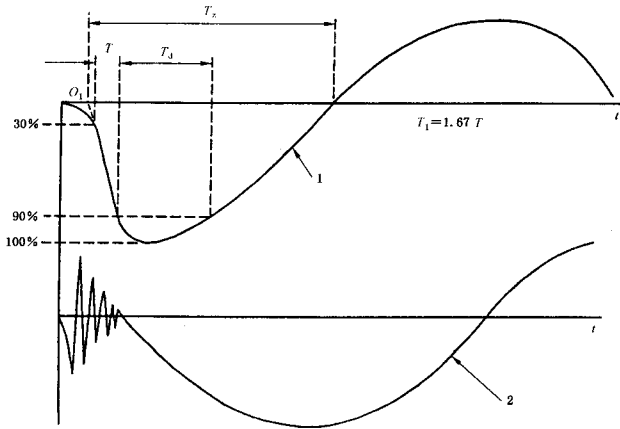
$Z_1(C_1)$ 、 $Z_2(C_2)$ ——分压器阻抗(电容)(也可见图1)。

图2 雷电冲击试验中的端子接线和适用的故障探测方法



a) 变压器的操作冲击波形

图3 变压器和电抗器的操作冲击波形



b) 电抗器的操作冲击波形

图中：

1——电压波形；

2——电流波形；

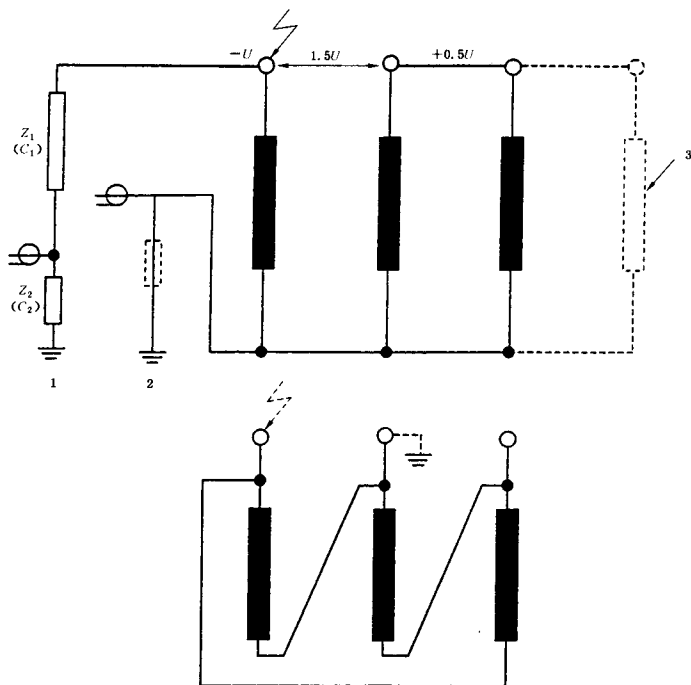
T ——冲击波 30% 峰值瞬间与 90% 峰值瞬间之间的时间；

T_1 ——视在波前时间；

T_s ——第 1 个过零点的时间；

T_d ——大于 90% 规定峰值的时间。

图 3 (续)



图中：

1——电压测量电路；

2——电流测量电路；

3——负载电阻，见 8.2.2.1；

$Z_1(C_1)$ 、 $Z_2(C_2)$ ——分压器阻抗(电容)(也可见图 1)。

注：三角形联结绕组的冲击施加方式如图中虚线所示。

图 4 操作冲击试验中的端子接线及故障探测方法

附录 A
(资料性附录)
波形控制原理

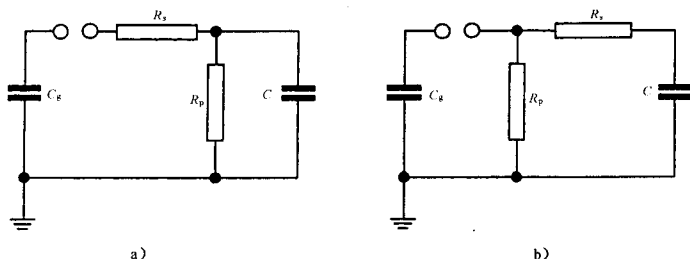
A.1 概述

冲击波是由装有一组电容器并联充电然后串联放电的设备所产生的。电压的幅值是由初始充电电压、放电时电容器串联的级数以及电路的效率决定的。波形主要是由冲击发生器的电容和电阻以及负载的阻抗确定的。

变压器雷电冲击试验时的波形控制原理,可用图 A.1 和 A.2 所示的简化图形来说明。它们可分为以下两种情况:

- 对于高阻抗绕组;
- 对于低阻抗绕组。

A.2 高阻抗绕组 ($L_1 > 100 \text{ mH}$)



其中:

C_g ——冲击发生器电容;

$C = C_1 + C_2 + C_3$ (见图 1);

$R_s = R_{s1} + R_{s2}$ ——总串联电阻(见图 1);

R_p ——并联电阻(见图 1)。

图 A.1 高阻抗绕组的波形控制

波前时间为:

$$T_1 \approx 3 \times \frac{R_s R_p}{R_s + R_p} \times \frac{C_g C}{C_g + C} \quad (\text{图 A.1a}) \quad \dots\dots\dots (\text{A.1})$$

或:

$$T_1 \approx 3R_s \times \frac{C_g C}{C_g + C} \quad (\text{图 A.1b}) \quad \dots\dots\dots (\text{A.2})$$

半峰值时间为:

$$T_2 \approx 0.7(R_s + R_p)(C_g + C) \quad (\text{图 A.1a}) \quad \dots\dots\dots (\text{A.3})$$

或:

$$T_2 \approx 0.7R_p(C_g + C) \quad (\text{图 A.1b}) \quad \dots\dots\dots (\text{A.4})$$

对于 $R_p \gg R_s$ 和 $C_g \gg C$:

$$T_1 \approx 3R_s \times C, T_2 \approx 0.7R_p \times C_g \dots\dots\dots (A.5)$$

通常,波前和波尾参数都是根据纯电容负载时的原理来进行调节的。但应当指出,变压器的等效电容 C_1 是包括在 C 之内的,且其在波前和波尾时有不同的实际值。

对于波前时间, C_1 可按 $C_1 \approx C_B + \sqrt{C_s C_r}$ 计算,其中 C_B 为套管电容, C_s 为绕组串联电容, C_r 为绕组的对地电容。

对于波尾, C_1 可用 C_B 加上 C_r 的某一部分来估算,它与起始电压分布有关。很显然,在大多数实际情况中(见式(A.5)),对于波尾考虑而言, C_1 值是次要的。

对于等效电感 L_1 在 20 mH~100 mH 范围内的绕组,绕组阻抗明显地使放电时间常数($\tau = R_p C_g$)减小了。此时, T_2 不能直接按式(A.5)调节。为了考虑这种影响,经验表明:必须增加 R_p 值,使其比按式(A.5)求出值大 2 倍~10 倍。

A.3 低阻抗绕组($L_1 < 20$ mH)

对于波前调节,与高阻抗绕组的情况相同。

对于波尾调节,试品可用图 A.2 所示的等效电感表示。

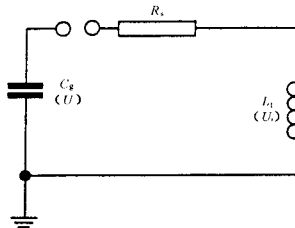


图 A.2 低阻抗绕组的波尾控制

根据电路中阻尼系数 k 的大小,试验电压 U_1 或呈振荡型或呈指数型。在临界阻尼($k=1$)或过临界阻尼($k>1$)电路中可得到指数的电压波形。然而,一般是不采用这种波形的,因为在这种情况下,与相应的电阻值将过大,使波前时间延长到不能接受的程度。

当 $k < 1$ 时,试验电压为:

$$U_1 = U e^{-\alpha t} (\cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t) = \frac{U}{\cos \varphi} e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) \dots\dots\dots (A.6)$$

式中:

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_1 C_r}$$

$$\alpha = \frac{R_1}{2L_1}$$

$$\tan \varphi = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{k}{\sqrt{1-k^2}}$$

并且阻尼系数为:

$$k = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{R_1}{2\sqrt{\frac{L_1}{C_r}}}$$

此电压为一衰减振荡波(如图 A.3 所示)。

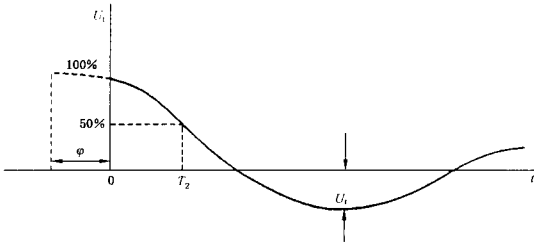


图 A.3 衰减振荡波形

为了初步估算 T_2 , 令 R_1 为零。此时式(A.6)变为:

$$U_1 = U \cos \omega_0 t$$

半峰值时间为:

$$T_2 = \frac{1}{6} \times \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{\pi}{3} \sqrt{L_1 C_g} \quad \dots\dots\dots (A.7)$$

但在这种理想条件下, 将得到反极性峰值为 100% 的非衰减型振荡波。

如此高的反极性振荡, 可能会使绕组匝绝缘和绕组之间的绝缘受到过高的电气应力, 从而引起局部放电, 并且仅仅是由于试验的限制, 迫使加强电极结构绝缘。因此, 应将反极性峰值限制为起始峰值电压的 50%。

由于反极性峰值 U_r 限值为 50% 以内, 故会出现明显的衰减, 由此, 半峰值时间将比按式(A.7)计算出的值还要小。此时, 衰减系数 $k=0.25$, 故半峰值时间为:

$$T_2 = \sqrt{0.5 L_1 C_g} \quad \dots\dots\dots (A.8)$$

式(A.7)和(A.8)表示出调节试品电感 L_1 或冲击发生器电容 C_g 以控制波尾的准则。

L_1 是受非被试绕组接线方式影响的, 如果将非被试绕组短路接地(即通常采用的接线方式), L_1 便是变压器的漏抗。以这种接线方式进行试验, 即使波尾较短, 一般仍会在绕组之间或绕组的各部分之间的绝缘产生最大的电气应力。但是, 由于波尾短, 电压持续时间也短, 所以这种较短的波尾不会象其他可能的接线方式那样, 使绕组中部对地的绝缘产生较大的电气应力。

如果在非被试绕组上接入电阻负载时, 等效电感增大, 但非被试绕组端子上的电压, 对于星接绕组, 应不超过雷电冲击耐受电压值的 75%; 或者对于角接绕组, 应不超过雷电冲击耐受电压值的 50%。

C_g 可随冲击发生器的各级串联或并联接线变动而改变。按式(A.9), 所需的最小冲击发生器电容为:

$$C_g \approx 2 \frac{T_2^2}{L_1} \quad \dots\dots\dots (A.9)$$

但是, 当 L_1 太小或者因上述的电压限制, 不能再靠非被试绕组端子经电阻接地的方法来加大 L_1 时, 式(A.9)不是总能得到满足的。此时, 电路中的放电时间常数为:

$$\tau = \frac{L_1}{R_1} \quad \dots\dots\dots (A.10)$$

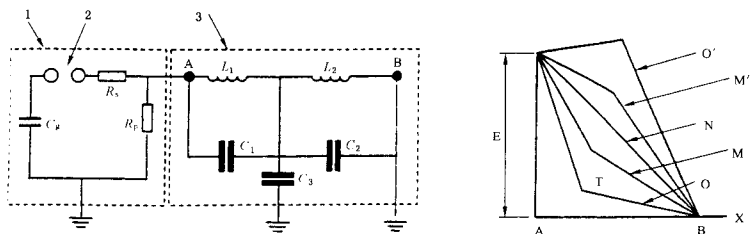
此式表示调节波尾的另一种方法。然而过分减少 R_1 , 将使冲击波波峰处出现过大的过冲或叠加振荡, 此外, 如前所述, 也将使反极性幅值过大。此时, 建议采用一种附加的负载电容 C_L 来控制波前, 此负载电容将抑制串联电阻 R_1 较小时不良影响。

如果上述控制波尾的方法还不能得到合适的半峰值时间, 则需要采取折衷的方法, 或是接受更小的半峰值时间; 或是按图 A.6 将被试绕组的非被试端子经电阻接地。此时, 非被试端子的电压限值, 对于星接绕组, 为其雷电冲击耐受水平的 75%; 对于角接绕组, 为其雷电冲击耐受水平的 50%。因此, 最好

还是采用更小的半峰值时间。

图 A.4 中的项 3 表示绕组一端直接接地的变压器等效图。如果串联电容 C_1 及 C_2 比对地电容 C_3 大,其起始电压分布如图中的曲线 M,最终的电压分布如图中的曲线 N,这表示振荡包络线是在曲线 M 和 M' 之间。如果 C_1 及 C_2 均远小于 C_3 ,则其起始电压分布如图中的曲线 O,这表示振荡包络线是在曲线 O 和 O' 之间。对于这种接线方法,绕组某些部分上的电压可能会超过线端上的外施电压。不过,一般来说,这些绕组的时间常数都较长,点 T 振荡至其最大幅值的时间通常足够长,而此时施加在端子上的电压已降至峰值的 50% 以下。因此,这种接线方法不会在绕组对地之间产生一个持续的较高的电气应力,但它会在绕组内部的绝缘上产生较高的电气应力。

此试验接线方法特别适合于电流测量,因为它不增加电路的电阻,因而,此电路对高频干扰有良好的响应。



其中:

1——冲击发生器;

2——火花放电间隙;

3——变压器;

X——地;

A——绕组端子;

B——绕组中性点端;

E——绕组端子上的电压幅值;

C_1, C_2 ——串联电容;

C_3 ——对地电容;

C_4, R_1, R_0 ——(见图 1);

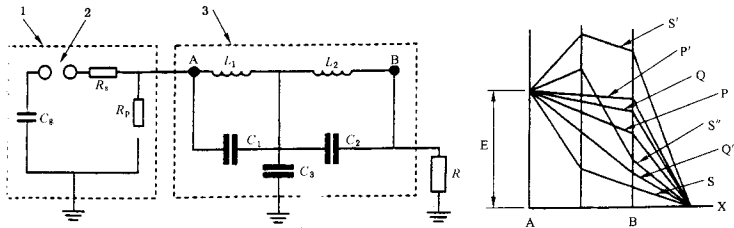
L_1, L_2 ——电感。

图 A.4 波尾缩短的影响

另一种可采用的接线方法是在被试绕组接地端接入一个电阻。这种接线方法改变了匝间和段(层)间的电气应力,变化的大小与绕组时间常数有关。图 A.5 中的项 3 表示绕组非被试端子经电阻接地的典型的变压器等效网络图。如果串联电容 C_1 和 C_2 均比对地电容 C_3 大很多,则起始电压分布与图中曲线 P 类似,最终的电压分布将与曲线 Q 类似,从而电阻上的电压为全部或几乎全部的电压值,振荡包络线是在曲线 P 和 P' 之间;当对地电容比串联电容大时,起始电压分布与图中的曲线 S 类似,而最终的电压分布可以再次假设为曲线 Q,振荡包络线是在曲线 S 和 S' 之间。可能再次在绕组某些部分产生过高的对地电压。实际上,通常接入的电阻值不会过大,只要求其波尾时间适当,且使该电阻两端之间的电压限制到不超过该绕组接地端子上的雷电冲击耐压水平的 75%。在后一个实例中,如果用于产生适当长度波尾的电阻值更小,则最终的电压分布曲线将降低至 Q', 振荡包络线是在 S 和 S'' 之间。应测量波尾时间和电阻两端的电压,以确定所用的电阻值的大小。

尽管此电阻可能会使故障探测灵敏度略有降低,但是这种试验接线方法能对线端施加合适的波形

且又适合于接地电流测量。由于全部冲击电压最初是施加在呈串联连接的绕组和电阻上,因此,绕组两端之间的电气应力将会减小。



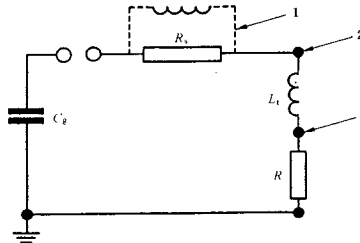
其中:

- 1——冲击电压发生器;
- 2——放电间隙;
- 3——变压器;
- X——地。

图 A.5 绕组经电阻接地

在冲击发生器和被试绕组之间接入一个电感元件,有时该电感还与 R 并联(见图 A.6),以增加电路的总电感,并且通常能增加波尾时间,使其大于单独使用冲击发生器时所产生的波尾时间。这种接线方法靠的是:在波前期间,能量是从冲击发生器传递到电感中;在波尾期间,能量是从电感传递至绕组中。在这种接线方法下所增加的波尾时间与绕组的特性和所用的电感值有关。

在调节操作冲击波的波前时间时,也可采用上述的一些考虑。但是,由于波前时间较长,变压器的等效电容 C_1 便等于绕组的对地有效电容 C_e 。



其中:

- 1——现已发展了一种加大半峰值时间的补充方法,它是在 R_1 上并联一个附加的电感元件以增加电路中的总电感;
- 2——被试端子;
- 3——非被试端子。

图 A.6 低阻抗绕组的电阻接地

附录 B
(资料性附录)
典型的波形图和数字记录

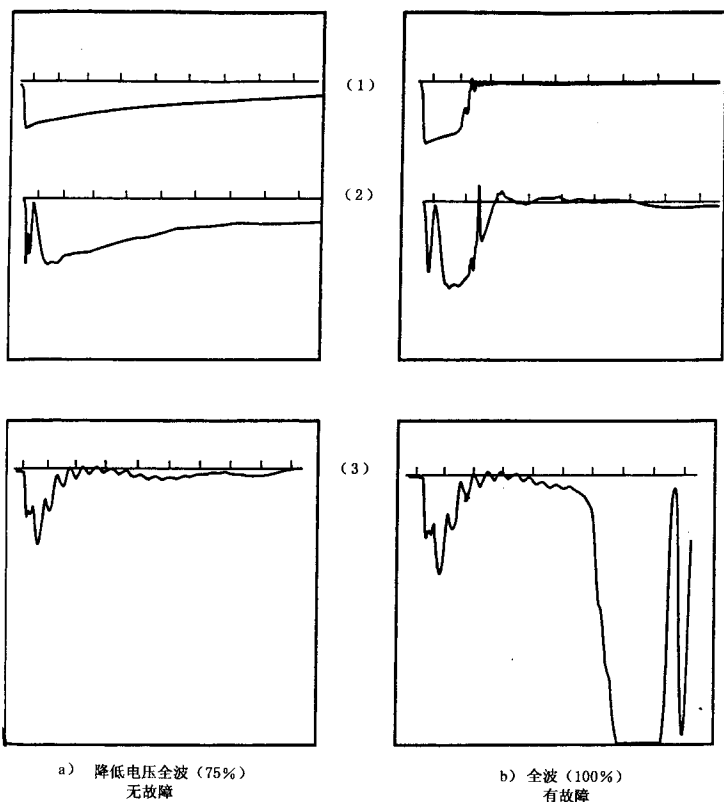
以后各页中的有、无故障的波形图和数字记录,是根据同心式绕组布置的心式电力变压器和并联电抗器在实际试验中的记录复制的。应强调注意的是:这些波形图仅是典型的,对于任何一台电压不同且设计制造也不一样的变压器或电抗器,其上所出现的畸变即使与本附录所列举的波形畸变很相似,也不能认为是由同一原因引起的。图中所列举故障的具体说明仅仅是作为一般的准则提出的。

表 B.1 波形图和数字记录实例一览表

图号	实 例	条款号
雷电冲击试验		
全波故障		
B.1	被试高压绕组线端对中性点的击穿	9.1.2; 9.1.3
B.2	被试高压绕组入口处线饼(线段)间的击穿	9.1.2; 9.1.4
B.3	粗调分接绕组层间的击穿	9.1.2; 9.1.3
B.4	分接绕组外部分接引线间的击穿	9.1.2
B.5	细调分接绕组的一段击穿	9.1.2
B.6	主高压绕组并联导线之间的击穿	9.1.2
B.7	套管内部电容屏间的击穿	9.1.4
截波故障		
B.8	被试主高压绕组的匝间击穿	9.1.4;10
B.9	细调分接绕组的匝间击穿	9.1.4;10
截波-截断时间不同时的影响		
B.10	截断时间相同时的试验	9.1.4;10
B.11	截断时间相差较大和较小时的试验	9.1.4;10
非故障引起的畸变		
B.12	分接开关中的非线性电阻元件的影响	9.1.1
B.13	冲击发生器引燃动作不同的影响	9.1.1
操作冲击试验		
B.14	变压器试验合格	8.2.2.1
B.15	变压器主高压绕组的击穿	9.2.1
B.16	电抗器试验合格	8.3.1;8.3.4

表 B.1 (续)

图号	实 例	条款号
传递函数分析		
B.17	全波和截波传递函数的比较	9.1.4;10
非标准波形的估算		
B.18	数字记录仪曲线平滑算法的影响	7.5.2;7.5.4.1;10
B.19	带叠加振荡波的估算	7.5.2;7.5.4.1;10
B.20	层式绕组上的非标准截波	7.2.2;10
B.21	用不同数字记录仪对非标准波形的比较	7.5.2;10;7.5.4.1
由试验电路问题产生的响应		
B.22	由测量电缆对地闪络所引起的试验电路问题	10
试品故障的响应		
B.23	分接开关分接头之间及粗调分接绕组与细调分接绕组之间的全波雷电冲击故障	10

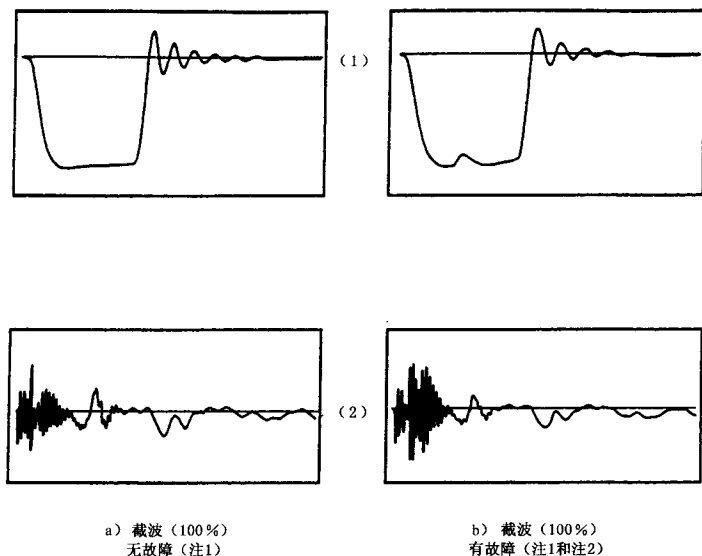


(幅值未调整相等)

其中:

- 1——施加的冲击电压,扫描时间为 $100 \mu\text{s}$;
- 2——传递到低压绕组的电压,扫描时间为 $100 \mu\text{s}$;
- 3——中性点电流,扫描时间为 $25 \mu\text{s}$ 。

图 B.1 雷电冲击,全波故障——400 kV 发电机变压器高压绕组线端对中性点的击穿



其中:

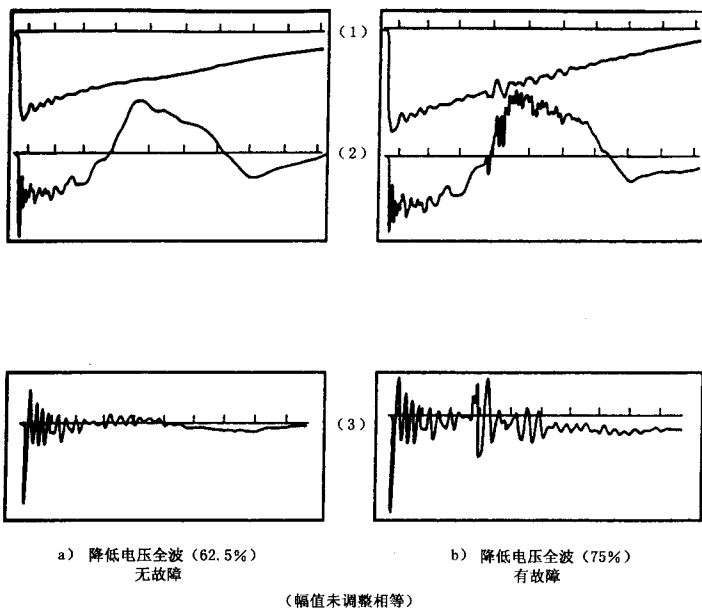
1——施加的冲击电压,扫描时间为 $10 \mu\text{s}$;

2——中性点电流,扫描时间为 $100 \mu\text{s}$ 。

注 1:由于故障是在截断前出现,故认为是全波故障。

注 2:在电压和中性点电流波形图中清楚地表明故障是在大约 $2 \mu\text{s}$ 后出现的。

图 B.2 雷电冲击,全波故障——115 kV 变压器高压绕组入口处线饼间的击穿



其中：

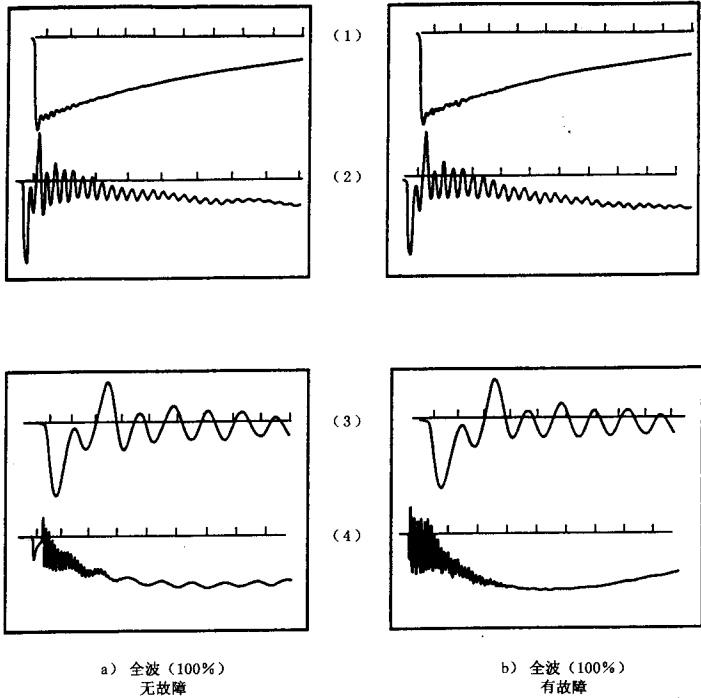
1——施加的冲击电压，扫描时间为 $100 \mu\text{s}$ ；

2——由邻近的短接绕组流入地中的电容传递电流，扫描时间为 $100 \mu\text{s}$ ；

3——中性点电流，扫描时间为 $100 \mu\text{s}$ 。

注：电压、电容传递电流和中性点电流波形图中，均清楚地表明故障是在 $30 \mu\text{s}$ 后出现的。

图 B.3 雷电冲击，400 kV/220 kV 变压器粗调分接绕组的层间击穿



其中:

1—施加的冲击电压,扫描时间为 $100 \mu\text{s}$;

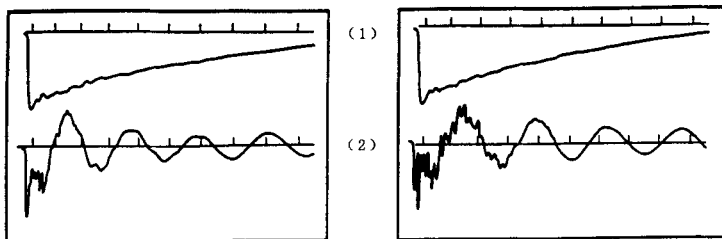
2—中性点电流,扫描时间为 $100 \mu\text{s}$;

3—中性点电流,扫描时间为 $25 \mu\text{s}$;

4—中性点电流,扫描时间为 $250 \mu\text{s}$ 。

注:在第二次施加全电压时,所有记录均显示出少量的变化,这表明有故障出现。

图 B.4 雷电冲击,全波故障——400 kV 发电机变压器分接绕组外部
两根相差 1.1% 线段的引线之间的击穿



a) 降低电压全波 (62.5%)
无故障

b) 全波 (100%)
有故障

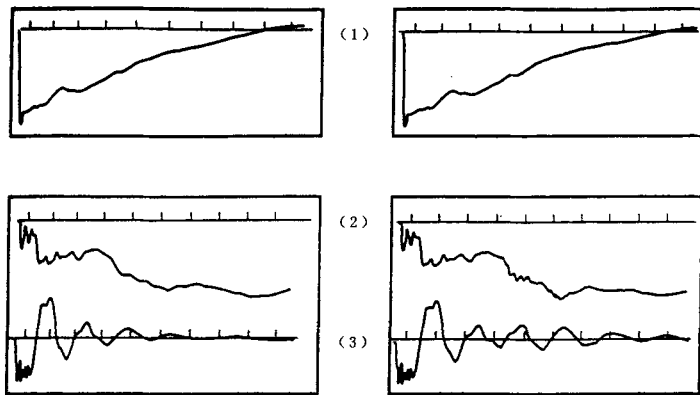
其中:

1——施加的冲击电压全波,扫描时间为 100 μ s;

2——由邻近的短接绕组流向地中的电容传递电流,扫描时间为 100 μ s。

注:电压和电容传递电流波形图均表明有故障出现。

图 B.5 雷电冲击,全波故障——220 kV 变压器细调分接绕组的一段击穿



a) 降低电压全波 (62.5%)
无故障

b) 全波 (100%)
有故障

其中:

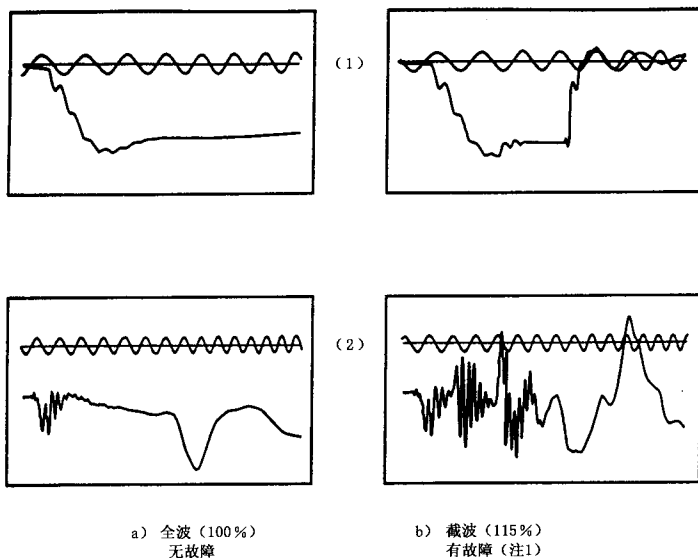
1——施加的冲击电压,扫描时间为 100 μ s;

2——中性点电流,扫描时间为 100 μ s;

3——由邻近的短接绕组流向地中的电容传递电流,扫描时间为 100 μ s。

注:中性点电流和电容传递电流波形图均清楚地表明故障出现在 30 μ s~35 μ s 之间,而外施电压波形图却没有显示。

图 B.6 雷电冲击,全波故障——220/110 kV 变压器主高压绕组中多根并联导线之间的击穿



其中:

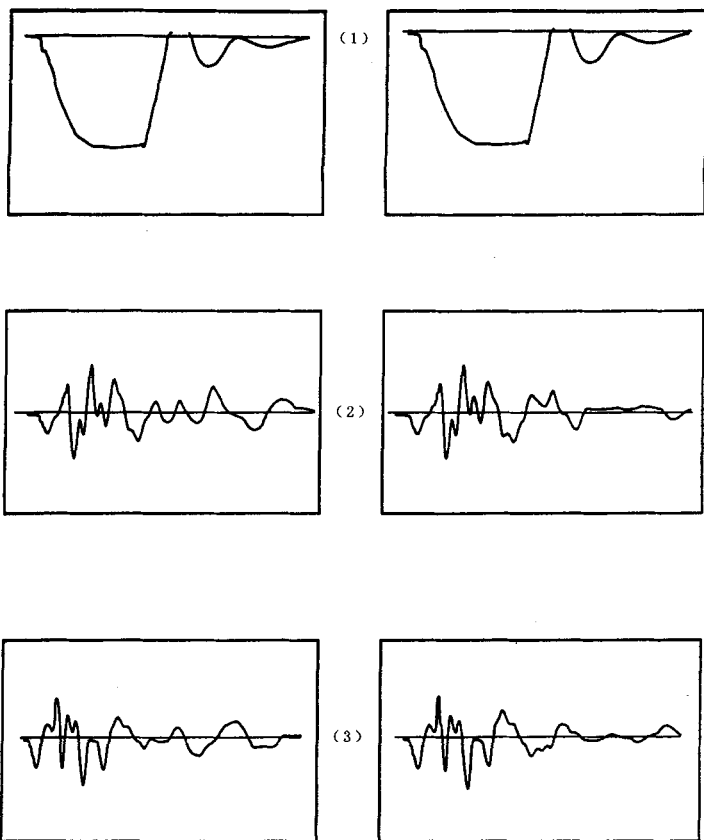
1——施加的冲击电压,扫描时间为 $10 \mu\text{s}$;

2——中性点电流,扫描时间为 $15 \mu\text{s}$ 。

注 1: 由于故障是在截断瞬间前出现的,因此,可认为是全波故障。

注 2: 从电压下降 10% 和中性点电流波形图上均清楚地表明故障出现在峰值之后、截断瞬间之前。

图 B.7 雷电冲击,全波故障——被试绕组 66 kV 套管内部电容屏之间的击穿



a) 降低电压截波 (60%)
无故障

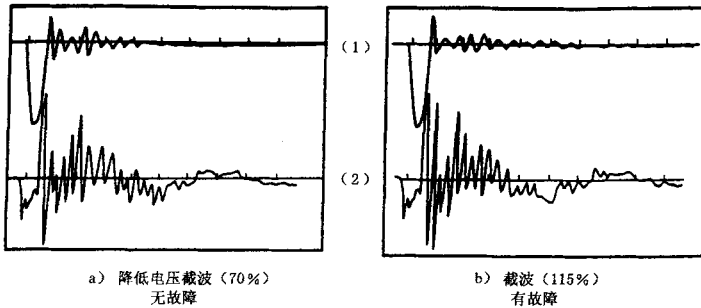
b) 截波 (100%)
有故障

其中:

- 1—施加的冲击电压,扫描时间为 $10 \mu\text{s}$;
- 2—由邻近的短接绕组流向地中的电容传递电流,扫描时间为 $50 \mu\text{s}$;
- 3—中性点电流,扫描时间为 $50 \mu\text{s}$ 。

注: 传递电流和中性点电流波形图均清楚地表明故障出现在 $10 \mu\text{s} \sim 15 \mu\text{s}$ 之间。

图 B.8 雷电冲击,截波故障——115 kV 变压器主高压绕组的匝间击穿



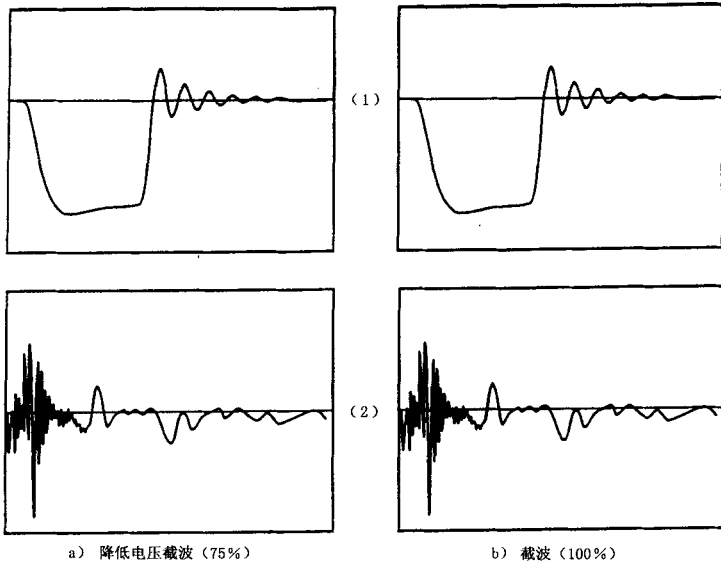
其中:

1——施加的冲击电压截波,扫描时间为 $50 \mu\text{s}$;

2——由邻近的短接绕组流向地中的电容传递电流,扫描时间为 $50 \mu\text{s}$ 。

注:电压波形图和中性点电流波形图均表明截断后即出现了故障。

图 B.9 雷电冲击,截波故障——220 kV 变压器细调分接绕组的匝间击穿



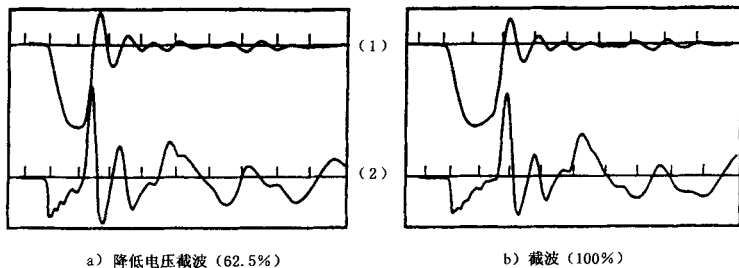
其中:

1——施加的冲击电压,扫描时间为 $10 \mu\text{s}$;

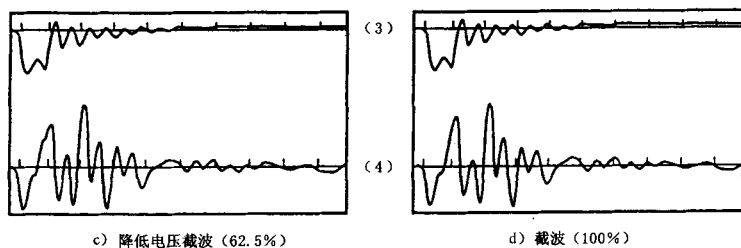
2——中性点电流,扫描时间为 $100 \mu\text{s}$ 。

注:当截断时间相同时,电压和中性点电流波形图也相同。

图 B.10 雷电冲击截波——115 kV 变压器在不同电压值但截波时间相同时的冲击试验波形



注：截断时间差别较大的试验(高压绕组)。注意电容传递电流上叠加的高频振荡波和截断后的电压波形均发生变化。

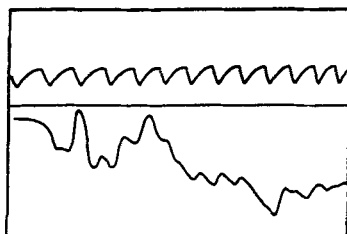


注：截断时间差别较小的试验(低压绕组)。注意，虽然电压波形看不出差异，但电容传递电流上叠加的高频振荡有变化。

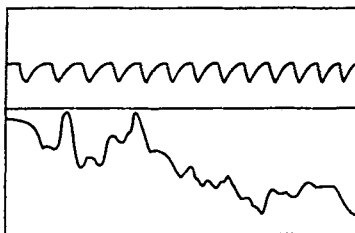
其中：

- 1——施加的冲击电压，扫描时间为 $25 \mu\text{s}$ ；
- 2——电容传递电流，扫描时间为 $25 \mu\text{s}$ ；
- 3——施加的冲击电压，扫描时间为 $50 \mu\text{s}$ ；
- 4——电容传递电流，扫描时间为 $50 \mu\text{s}$ 。

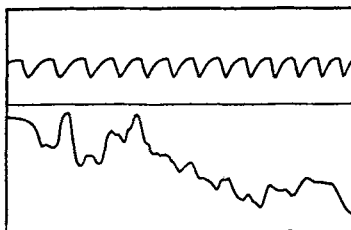
图 B.11 雷电冲击截波——220 kV 变压器试验时不同截断时间的影响



a) 降低电压全波 (50%)



b) 降低电压全波 (75%)

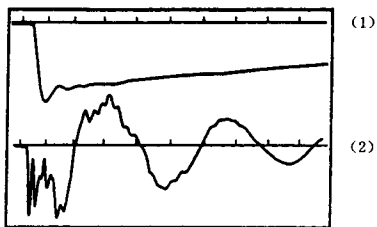


c) 全波 (100%)

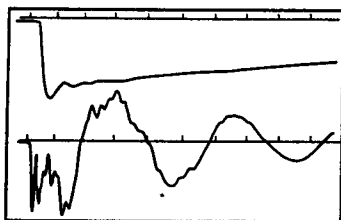
注1: 三个波形图都表示中性点电流,扫描时间为75 μs 。

注2: 上面示出的波形变化比通常有非线性电阻元件时更明显。

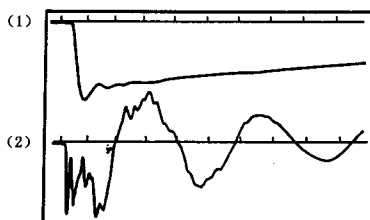
图 B.12 雷电冲击全波——独立绕组变压器的中性点侧有载分接开关装有非线性电阻元件时的影响



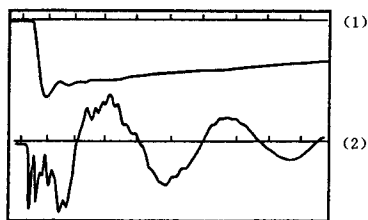
a) 降低电压全波 (62.5%)



b) 第一个全波 (100%)



c) 第二个全波 (100%)



d) 最后一个降低电压全波 (62.5%)

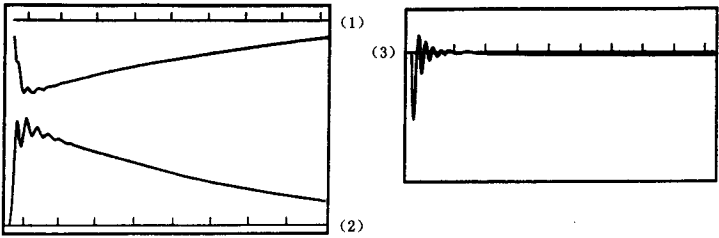
其中:

1——施加的冲击电压波,扫描时间为 $50 \mu\text{s}$;

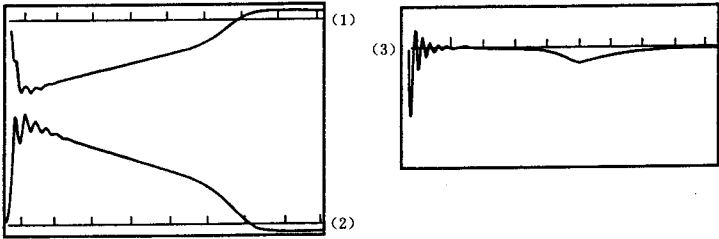
2——电容传递电流,扫描时间为 $50 \mu\text{s}$ 。

注:通过对 100% 电压值下的电容传递电流和 62.5% 电压值下的电容传递电流波形之间的对比,表明起始高频部分有变化。

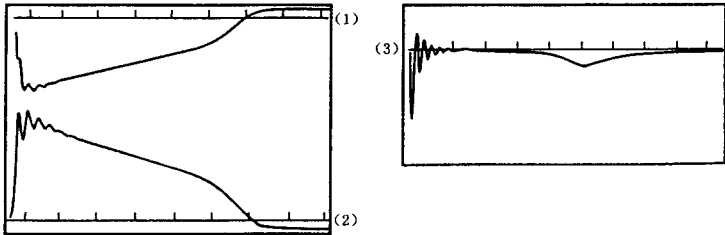
图 B.13 雷电冲击全波——400 kV 变压器试验时冲击发生器在不同电压值下引燃动作不同时的影响



a) 62.5%试验水平



b) 第一个100%试验水平



c) 第二个100%试验水平

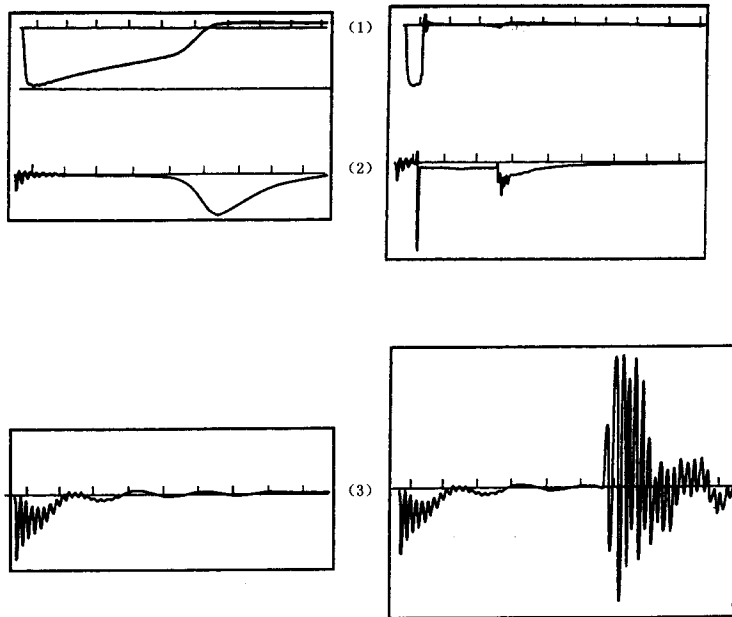
其中:

1—施加的操作冲击,扫描时间为 $5\,000\ \mu\text{s}$;

2—非被试相绕组各端子连在一起与地之间的感应操作冲击电压(为外施电压的52%,正极性),扫描时间为 $5\,000\ \mu\text{s}$;

3—中性点电流,扫描时间为 $5\,000\ \mu\text{s}$ 。

图 B.14 操作冲击——400 kV 三相发电机变压器试验合格



a) 90% 试验水平
无故障

b) 100% 试验水平
有故障

其中:

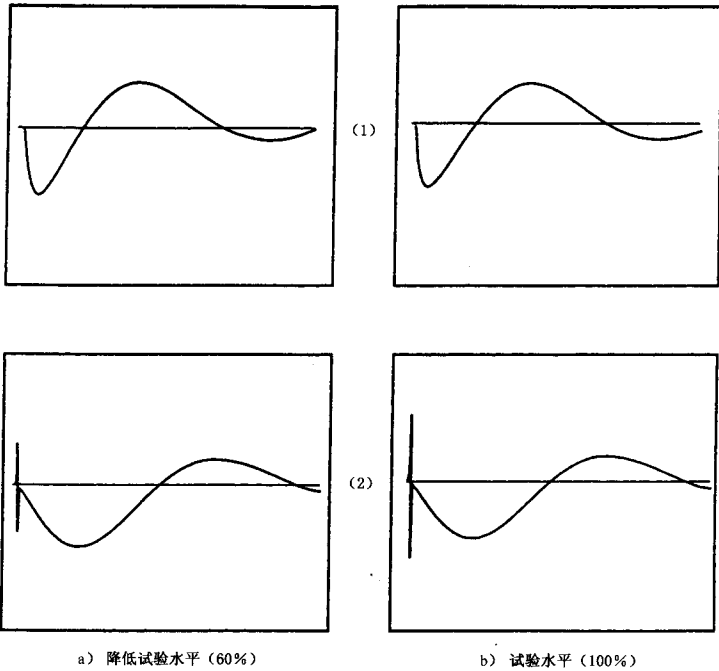
1 —— 施加的操作冲击, 扫描时间为 $5000 \mu\text{s}$;

2 —— 中性点电流, 扫描时间为 $5000 \mu\text{s}$;

3 —— 中性点电流, 扫描时间为 $500 \mu\text{s}$ 。

注: 在 100% 试验电压值下, 约在 $300 \mu\text{s}$ 前后显示有故障发生。

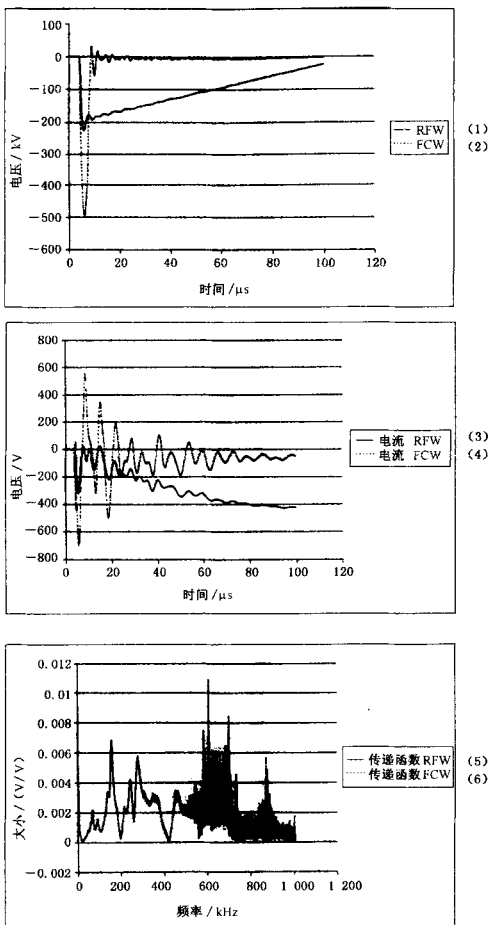
图 B.15 操作冲击——单相 525 kV 发电机变压器主高压绕组纵向闪络击穿



其中:

- 1—施加的冲击电压,扫描时间为 $5\,000\ \mu\text{s}$ (T_1 为 $200\ \mu\text{s}$, T_d 为 $225\ \mu\text{s}$, T_r 为 $1\,000\ \mu\text{s}$);
 2—中性点电流,扫描时间为 $5\,000\ \mu\text{s}$ 。

图 B.16 操作冲击——单相 525 kV、33 Mvar 并联电抗器试验合格

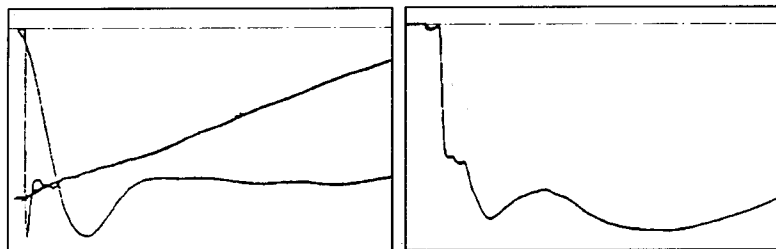


注：在同一台变压器的同一端子上对降低的雷电冲击全波(RFW)和全电压载波(FCW)进行比较。因为，对于导纳传递函数来说，载波包含了更多的高频输入，故在RFW和FCW下的传递函数之间的偏差，只在高频处出现。

其中：

- 1——降低电压全波 RFW；
- 2——全电压载波 FCW；
- 3——RFW 下的中性点电流；
- 4——FCW 下的中性点电流；
- 5——RFW 下的传递(导纳)函数；
- 6——FCW 下的传递(导纳)函数。

图 B. 17 雷电冲击——全波和载波传递函数的比较

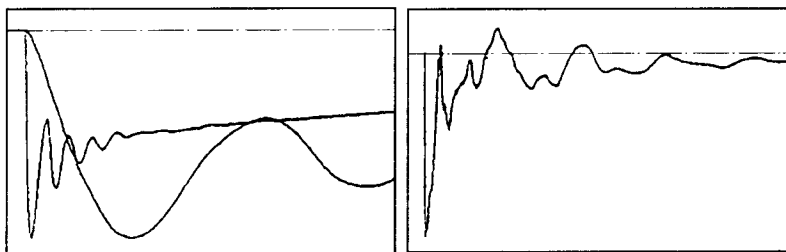


a) 外施电压

b) 中性点电流

注：按 GB/T 16927.1，通过波尾下降部分的切线，估算波形有 19% 的过冲，故幅值估算误差可能超过 10%。

图 B.18 雷电冲击全波——非标准波形的估算——数字记录仪中的内置平滑算法的影响

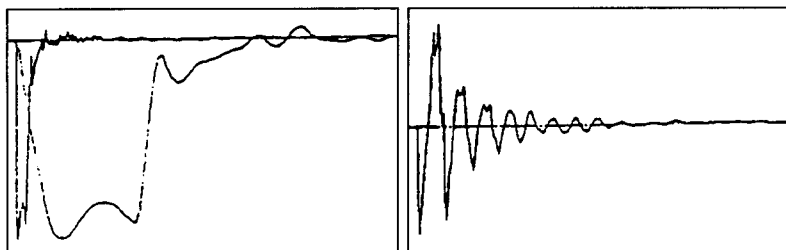


a) 外施电压

b) 中性点电流

注：根据叠加振荡的第一段波形图，用数字记录仪估算的半峰值时间为 $5 \mu\text{s}$ ，而按 GB/T 16927.1 估算则为 $50 \mu\text{s}$ 。

图 B.19 雷电冲击全波——非标准波形，叠加的振荡波幅值大于 50% 且频率小于 0.5 MHz



a) 外施电压

b) 中性点电流

注：层式绕组上的非标准截波。层间阻抗避免了截波对地电压的迅速下降，也不产生围绕零点的振荡。

图 B.20 雷电冲击截波——层式绕组的非标准截波

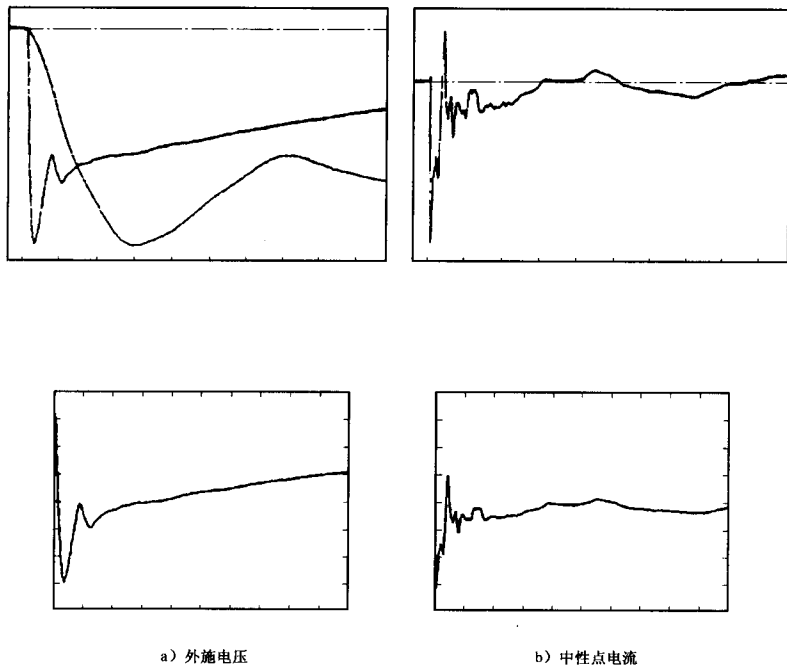
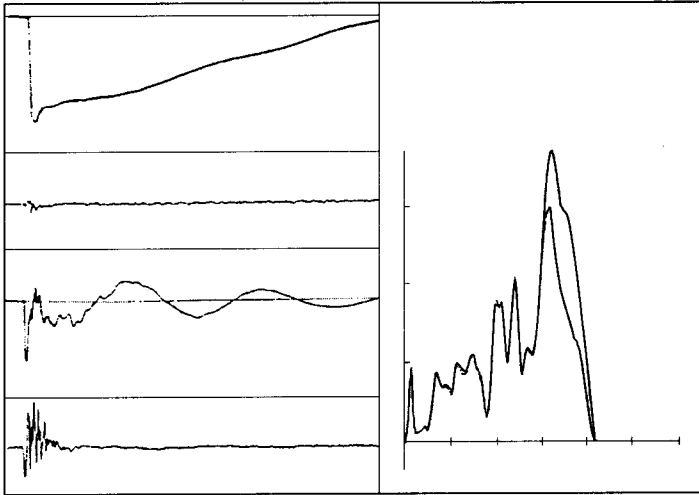
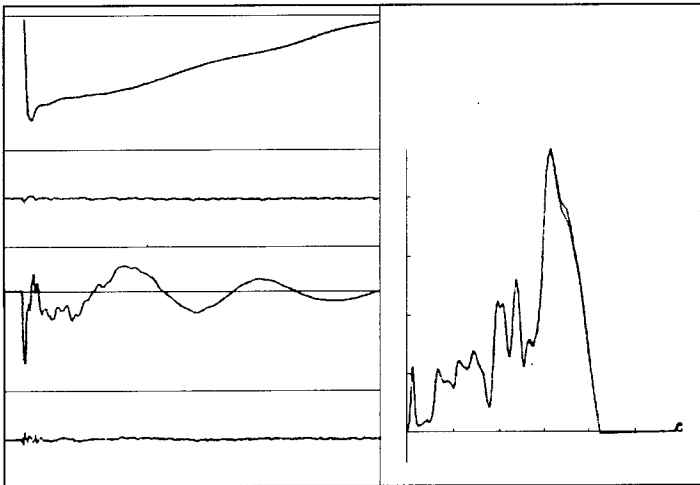


图 B.21 雷电冲击全波——非标准波形,用不同的数字记录仪对同一记录的非标准波形的比较



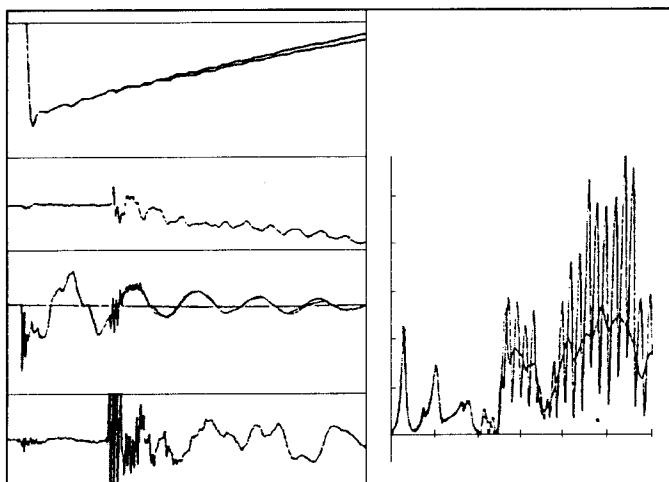
注：从低压绕组来的测量电缆对地（不是油箱和冲击发生器的地）闪络。400MVA、220/21 kV 发电机变压器（G. S. U.）在高压绕组试验。

a) 电压无指示；电流有明显的指示；传递函数有明显的指示

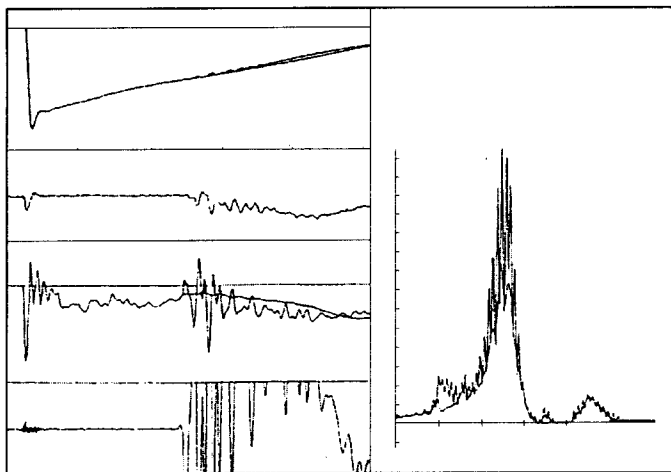


b) 闪络消除后，所有的实时曲线和传递函数曲线均完全一致

图 B.22 雷电冲击全波——由测量电缆对地闪络引起的试验电路问题



a) 300 MVA,400/110/30 kV 变压器分接开关引线间的闪络



b) 粗调分接绕组与细调分接绕组之间的闪络

注：实时响应和传递函数上都有明显的变化。

图 B.23 雷电冲击全波——分接开关的分接引线之间及粗调分接绕组与细调分接绕组之间闪络的故障数字记录