

电气设备振荡型冲击 耐压试验技术

国网宁夏电力有限公司电力科学研究院 编
吴旭涛 主编

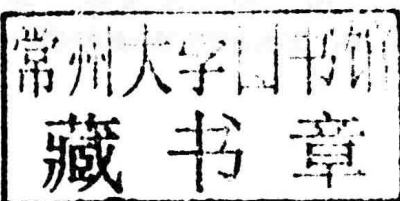


中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电气设备振荡型冲击 耐压试验技术

国网宁夏电力有限公司电力科学研究院 编

吴旭涛 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

冲击耐压试验是电气设备的重要试验项目。冲击耐压试验能够发现变压器端部绝缘缺陷，反映出 GIS 现场安装后的绝缘性能，同时还是干式空心电抗器屈指可数的绝缘检测有效手段。

本书共分四章，阐述了变压器、GIS、干式空心电抗器振荡型冲击电压试验的电压产生方法，分析了振荡型冲击电压波形的影响因素，介绍了三类设备振荡型冲击电压试验的装置构成、典型参数、试验接线及试验流程，并提供了实践案例。

本书适用于从事高压电气设备试验、检修、运行人员及相关管理人员，也可作为制造部门、科研单位相关人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电气设备振荡型冲击耐压试验技术 / 吴旭涛主编；国网宁夏电力有限公司电力科学研究院编。—北京：中国电力出版社，2017.12

ISBN 978-7-5198-1563-9

I. ①电… II. ①吴…②国… III. ①电力变压器—耐压试验 (电) IV. ① TM41-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 308287 号

出版发行：中国电力出版社

地 址：北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址：<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑：陈 丽 (010-63412348)

责任校对：郝军燕

装帧设计：郝晓燕 左 铭

责任印制：邹树群

印 刷：三河市百盛印装有限公司

版 次：2017 年 12 月第一版

印 次：2017 年 12 月北京第一次印刷

开 本：710 毫米 × 980 毫米 16 开本

印 张：8.25

字 数：129 千字

定 价：36.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

编 委 会

主 编 吴旭涛

副 主 编 李军浩 康 钧

参编人员 李秀广 郝金鹏 张庆平 马 波

何宁辉 丁 培 闫振华 周 秀

冲击耐压试验是电气设备的重要试验项目。冲击耐压试验对于变压器引线、端部及匝间绝缘具有高度敏感性，能够有效反映出 GIS 现场安装后的绝缘性能，同时还是干式空心电抗器屈指可数的绝缘检测手段。

冲击耐压试验传统上采用双指数型电压，存在试验设备体积庞大、不易移动、安装复杂、现场调波困难且电压产生效率低等问题，极大限制了试验在现场的开展。振荡型冲击电压具有产生效率高、适合现场使用、接近设备实际作用波形又便于和实验室结果比对等优点，2005 年发布的 IEC 60060-3《高电压试验技术 第三部分：现场试验的定义和试验要求》，推荐采用振荡型雷电波和振荡型操作波进行设备的现场冲击试验，我国于 2010 年等效采用了该标准（GB/T 16927.3《高电压试验技术 第 3 部分：现场试验的定义及要求》）。然而对于电力变压器，在现场采用振荡型冲击电压开展试验，尚需解决试验电压的产生、现场试验方法、试验装备等一系列问题。有鉴于此，包括国网宁夏电科院在内的国内许多单位开展了相关研究，并取得了一批成果。本书就是对这些成果的归纳和总结。

本书在理论计算、仿真研究、实际试验的基础上，阐述了变压器、GIS、干式空心电抗器振荡型冲击电压试验的电压产生方法，分析了振荡型冲击电压波形的影响因素，介绍了三类设备振荡型冲击电压试验的装置构成、典型参数、试验接线及试验流程，并提供了实践案例。通过本书，期望能够对推动振荡型冲击电压试验在现场的推广应用发挥作用，并为基于振荡型冲击电压试验

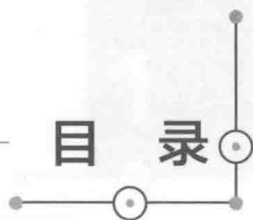
的设备缺陷、故障分析诊断奠定基础。

本书的编写得到了西安交通大学李军浩老师、国网青海电科院康钧高级工程师的大力支持和帮助，借此表示感谢。

限于作者水平，书中不妥和错误之处在所难免，恳请专家、同行和读者给予批评指正。

作 者

2017 年 10 月



前 言

1	概述	1
2	变压器振荡型冲击耐压试验技术	5
2.1	变压器振荡型操作冲击试验等效电路参数计算及分析	5
2.2	变压器振荡型操作冲击电压波形影响因素的仿真	20
2.3	变压器振荡型操作冲击电压施加方式和试验方法	33
2.4	现场试验及分析	43
3	GIS 振荡型冲击耐压试验技术	48
3.1	GIS 振荡型冲击试验等效电路和参数分析	48
3.2	GIS 振荡冲击试验的仿真研究	61
3.3	GIS 现场振荡型冲击耐压试验	73
4	干式空心电抗器振荡型冲击耐压试验技术	97
4.1	干式空心电抗器的仿真与参数计算	97
4.2	振荡型冲击耐压试验装置的设计和试验方案	110

概 述

电力发展要与国民经济、社会发展相适应，为了保证我国国民经济持续、健康、快速的发展，实现全面建设小康社会的宏伟目标，电力工业必须快速稳定发展。在我国电力系统，特别是超/特高压电力系统大规模发展的同时，全国输变电设施可靠性也在逐年提高（2008 年除外，主要原因是南方遭受百年不遇大雪）。分析报告显示，220kV 及以上电压等级输变电设施可靠性指标均保持在较高水平，且呈现提高趋势。但是，总体而言，我国供电可靠性水平与国际先进水平仍有一定差距。进一步提高电力系统供电可靠性，既是电力用户的需要，也是供电企业自身发展的目标。

电力变压器、气体绝缘全封闭组合电器（gas-insulated metal-enclosed switchgear, GIS）和干式空心电抗器是电力系统中重要的输变电设备，它们的运行可靠性直接关系到整个电网系统的安全稳定。这三种输变电设备在运行过程中都会受到电力系统过电压的威胁，这些过电压一方面来源于电力系统中的操作冲击电压，另一方面来自于雷击产生的雷电冲击电压。由于生产、运输、组装和运行等各方面因素，导致电力变压器、GIS 和干式空心电抗器自身存在绝缘缺陷或绝缘故障。这些绝缘缺陷或绝缘故障可能会在冲击电压（操作冲击电压或雷电冲击电压）的作用下发生绝缘击穿，导致设备损坏，危害电力系统的正常运行。因此，采用可靠的试验和检测手段，及早发现这三种设备存在的绝缘故障显得尤为重要。

对电力变压器、GIS 和干式空心电抗器进行冲击耐压试验可以有效地发现这三种电力设备存在的绝缘故障。传统的冲击耐压试验采用如图 1-1 和图 1-2 所示的标准双指数波形的雷电冲击和操作冲击电压，但在现场采用双指数冲击电压进行耐压试验存在一些困难，如设备庞大、不易移动、安装复杂、双指数

波形现场调波困难且电压产生效率低。这些问题极大地限制了冲击耐压试验在现场的开展和应用。针对这种情况，国际电工委员会（International Electrotechnical Commission, IEC）于 2005 年推出了 IEC 60060-3 标准，我国也于 2010 年发布了等效标准（GB/T 16927.3 《高电压试验技术 第 3 部分 现场试验的定义和要求》），该标准从波形易于现场产生的角度推荐采用振荡型冲击电压进行现场冲击试验。振荡型冲击电压波形具有产生效率高、易于现场调波、接近设备实际作用波形的优点，适合在现场进行冲击耐压试验时采用。所

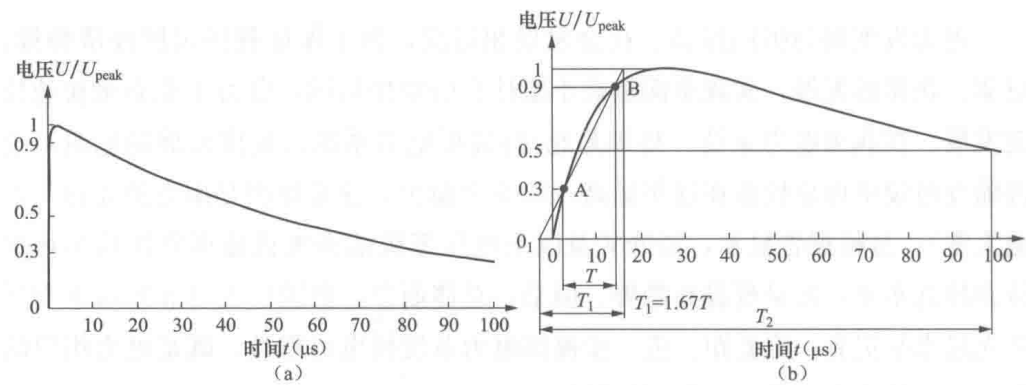


图 1-1 标准雷电冲击电压

(a) $T_1/T_2=1/50\mu s$; (b) $T_1/T_2=20/100\mu s$

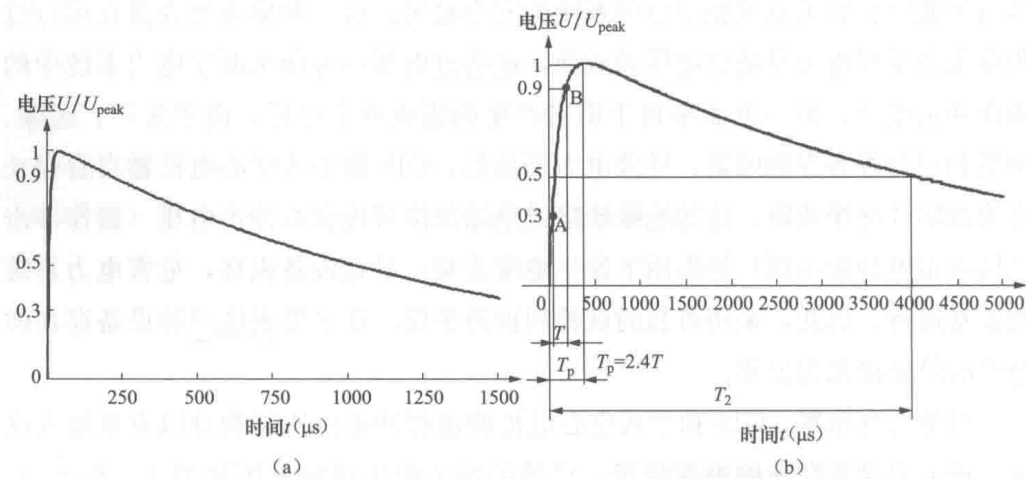


图 1-2 标准操作冲击电压

(a) $T_1/T_2=20/1000\mu s$; (b) $T_1/T_2=400/4000\mu s$

谓的振荡型冲击电压，按照 IEC 60060-3 标准可定义为“电压迅速上升到峰值，然后伴随着一定频率范围的阻尼振荡降低至零，其特性可用包络线（波形特性）和振荡频率（振荡特性）所描述”。标准规定的振荡雷电冲击电压和振荡操作冲击电压如图 1-3 和图 1-4 所示。

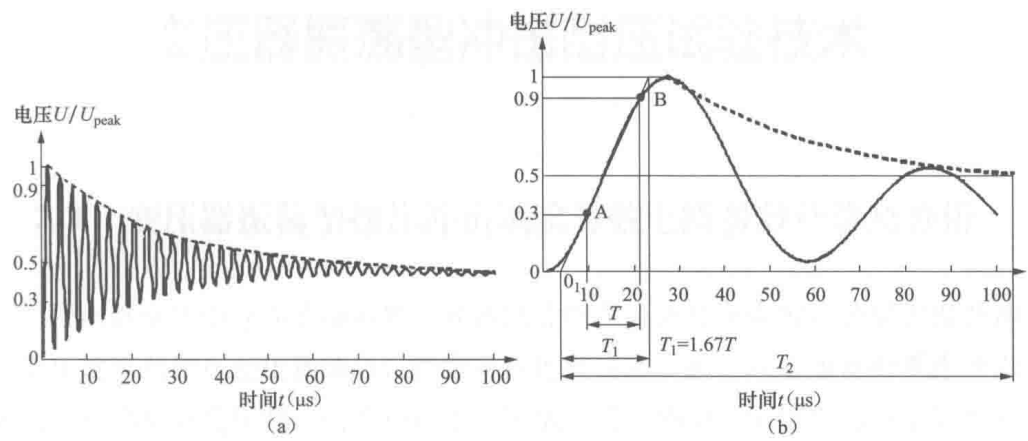


图 1-3 振荡雷电冲击电压

(a) $T_1/T_2=1/50\mu s$, 370kHz; (b) $T_1/T_2=20/100\mu s$, 16Hz

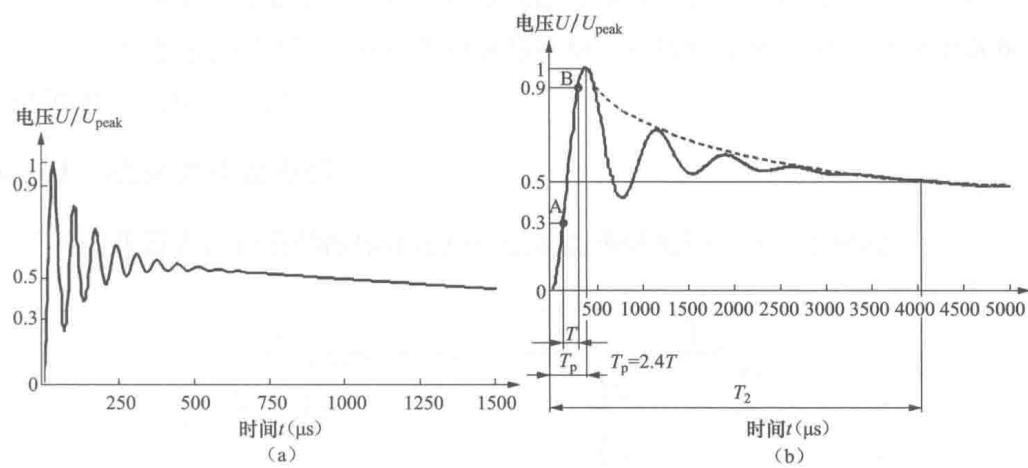
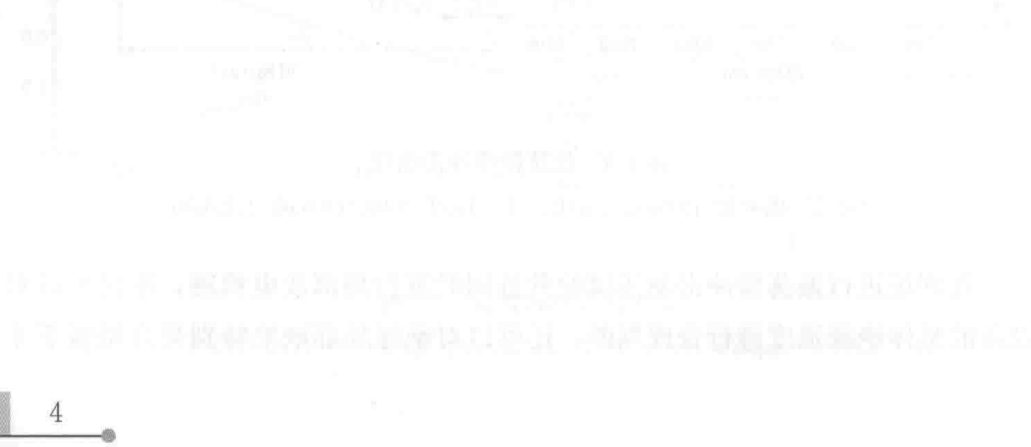
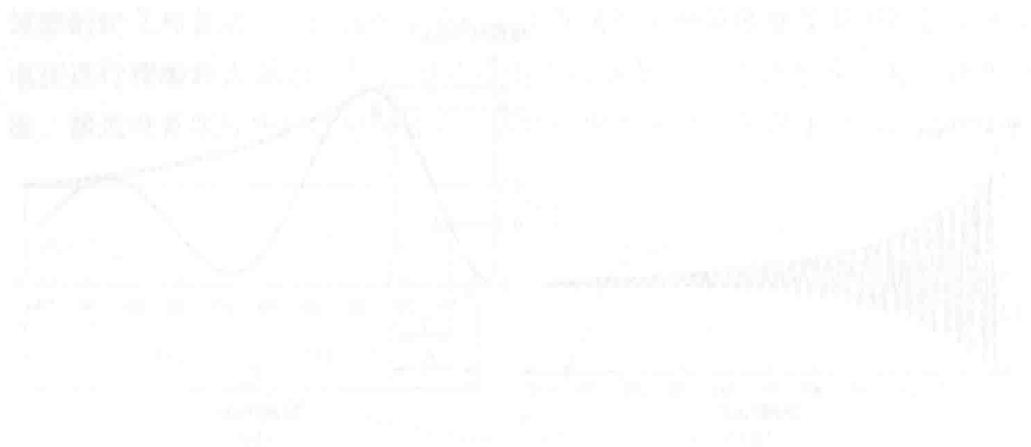


图 1-4 振荡操作冲击电压

(a) $T_1/T_2=20/1000\mu s$, 15kHz; (b) $T_1/T_2=400/4000\mu s$, 1.25kHz

在现场进行振荡型冲击耐压试验并且同时进行局部放电检测，不仅可以对设备的整体绝缘强度进行合理判断，还可以对绝缘局部缺陷特别是高场强下才

能激发的缺陷进行暴露，尽早发现绝缘以及绝缘缺陷的类型、规模，有利于对绝缘进行全面合理的评价。因此，振荡型冲击耐压试验具有显著的工程实用价值，该技术的成熟应用可以降低变压器、GIS 和电抗器现场试验后故障的发生率并提高运行的可靠性。



变压器振荡型冲击耐压试验技术

2.1 变压器振荡型操作冲击试验等效电路参数计算及分析

变压器绕组中存在的漏电感，其各部分存在多种分布电容，如果将振荡冲击电压发生器加在变压器端口，很容易获得振荡波。通常对变压器的操作冲击耐压考核都是指高压侧，因为相比于低压侧，高压侧的过电压更容易威胁到变压器的绝缘。采用振荡型操作冲击电压进行试验时，让发生器在低压侧产生振荡冲击电压，通过变压器高低压侧绕组的电磁感应作用在高压侧感应出幅值符合要求的振荡操作过电压波形，对高压侧进行考核。振荡雷电冲击电压的频率过高，无法通过电磁感应的方式施加到高压绕组，所以本部分只讨论变压器振荡型操作冲击耐压试验。

2.1.1 试验的等效电路

对变压器进行振荡型操作冲击耐压试验的等效电路如图 2-1 所示。

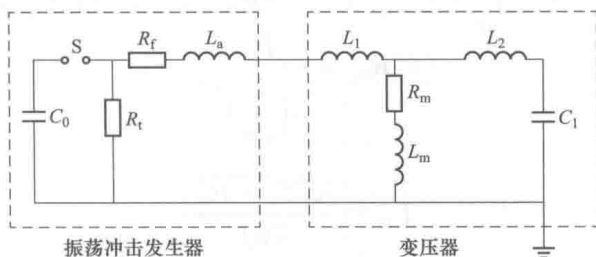


图 2-1 变压器振荡型操作冲击耐压试验的等效电路

图 2-1 中 C_0 、 R_t 、 R_f 、 L_a 构成振荡冲击波发生电路， C_0 是主电容， R_t 是波尾电阻， R_f 是波头电阻（同时还包括了调波电感的电阻）， L_a 是调波电感，右侧

其余部分是变压器的等效电路。在变压器的等效电路中, L_1 是低压侧漏电感, L_2 是高压侧漏电感, L_m 是励磁电感, C_2 是折算至低压侧的变压器高压端入口电容(本书称为高压侧等效电容)。图中没有考虑变压器高低压侧的漏电阻和励磁支路的励磁电阻, 这是因为, 高低压侧的漏电阻和励磁支路的励磁电阻的阻值在其主要起作用的回路中相对较小, 所以它们对试验波形的影响并不大, 可以忽略。变压器的所有参数均已归算到低压侧。图中的开关为冲击电压发生器的球隙。该等效电路主要用于研究高压侧的振荡冲击电压波形, 而低压侧等效电容对高压侧电压波形的影响远小于高压侧等效电容, 因此考虑高压侧等效电容而忽略低压侧等效电容。

2.1.2 变压器漏电感和励磁电感的计算方法

(1) 对于低压侧三角形联结、高压侧星形联结的三相双绕组变压器, 其折算到低压侧的漏电感和励磁电感的计算方法为

$$Z_k = \frac{U_{1N} U_k (\%) }{\frac{I_{1N}}{\sqrt{3}}} \quad (2-1)$$

$$R_k = \frac{P_k}{3 \left(\frac{I_{1N}}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad (2-2)$$

$$L_k = \frac{\sqrt{Z_k^2 - R_k^2}}{2\pi f} \quad (2-3)$$

$$Z_m = \frac{U_{1N}}{\frac{I_0}{\sqrt{3}}} \quad (2-4)$$

$$R_m = \frac{P_0}{3 \left(\frac{I_0}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad (2-5)$$

$$L_m = \frac{\sqrt{Z_m^2 - R_m^2}}{2\pi f} \quad (2-6)$$

式中 Z_k ——变压器漏阻抗, Ω ;

R_k ——变压器漏电阻, Ω ;

L_k ——变压器漏电感, H;

Z_m ——变压器励磁阻抗, Ω ;
 R_m ——变压器励磁电阻, Ω ;
 L_m ——变压器励磁电感, H;
 U_{1N} ——变压器低压侧额定电压, V;
 I_{1N} ——变压器电压侧额定电流, A;
 $U_k(\%)$ ——变压器短路电压百分数;
 P_k ——变压器短路损耗, W;
 I_0 ——变压器空载电流, A;
 P_0 ——变压器空载损耗, W;
 f ——频率, Hz。

有文献指出, 一般情况下双绕组变压器低压侧的漏电感 L_1 与高压侧折算到低压侧的漏电感 L_2 差不多大, 所以可取 $L_1 = L_2 = L_k/2$ 。

(2) 对于低压侧三角形联结, 中压和高压侧星形联结, 三相容量相等的三相三绕组变压器, 其折算到低压侧的漏电感和励磁电感的计算方法为

$$\begin{cases} P_{k1} = \frac{1}{2}(P_{k12} + P_{k13} - P_{k23}) \\ P_{k2} = \frac{1}{2}(P_{k12} + P_{k23} - P_{k13}) \\ P_{k3} = \frac{1}{2}(P_{k23} + P_{k13} - P_{k12}) \end{cases} \quad (2-7)$$

$$\begin{cases} U_{k1}(\%) = \frac{1}{2}[U_{k12}(\%) + U_{k13}(\%) - U_{k23}(\%)] \\ U_{k2}(\%) = \frac{1}{2}[U_{k12}(\%) + U_{k23}(\%) - U_{k13}(\%)] \\ U_{k3}(\%) = \frac{1}{2}[U_{k23}(\%) + U_{k13}(\%) - U_{k12}(\%)] \end{cases} \quad (2-8)$$

$$\begin{cases} Z_{k1} = \frac{U_{1N} U_{k1}(\%)}{\frac{I_{1N}}{\sqrt{3}}} \\ Z_{k2} = \frac{U_{1N} U_{k2}(\%)}{\frac{I_{1N}}{\sqrt{3}}} \\ Z_{k3} = \frac{U_{1N} U_{k3}(\%)}{\frac{I_{1N}}{\sqrt{3}}} \end{cases} \quad (2-9)$$

$$\begin{cases} R_{k1} = \frac{P_{k1}}{3 \left(\frac{I_{1N}}{\sqrt{3}} \right)^2} \\ R_{k2} = \frac{P_{k2}}{3 \left(\frac{I_{1N}}{\sqrt{3}} \right)^2} \\ R_{k3} = \frac{P_{k3}}{3 \left(\frac{I_{1N}}{\sqrt{3}} \right)^2} \end{cases} \quad (2-10)$$

$$\begin{cases} L_1 = \frac{\sqrt{Z_{k1}^2 - R_{k1}^2}}{2\pi f} \\ L_2 = \frac{\sqrt{Z_{k2}^2 - R_{k2}^2}}{2\pi f} \\ L_3 = \frac{\sqrt{Z_{k3}^2 - R_{k3}^2}}{2\pi f} \end{cases} \quad (2-11)$$

- 式中 P_{k1} ——变压器低压侧短路损耗, W;
 P_{k2} ——变压器中压侧短路损耗, W;
 P_{k3} ——变压器高压侧短路损耗, W;
 P_{k12} ——变压器高压侧开路时, 低压侧和中压侧的短损耗, W;
 P_{k23} ——变压器低压侧开路时, 中压侧和高压侧的短损耗, W;
 P_{k13} ——变压器中压侧开路时, 低压侧和高压侧的短损耗, W;
 $U_{k1}(\%)$ ——变压器低压侧短路电压百分数;
 $U_{k2}(\%)$ ——变压器中压侧短路电压百分数;
 $U_{k3}(\%)$ ——变压器高压侧短路电压百分数;
 $U_{k12}(\%)$ ——变压器高压侧开路时, 短路电压百分数;
 $U_{k23}(\%)$ ——变压器低压侧开路时, 短路电压百分数;
 $U_{k13}(\%)$ ——变压器中压侧开路时, 短路电压百分数;
 Z_{k1} ——变压器低压侧漏阻抗, Ω ;
 Z_{k2} ——变压器中压侧漏阻抗, Ω ;
 Z_{k3} ——变压器高压侧漏阻抗, Ω ;
 R_{k1} ——变压器低压侧漏电阻, Ω ;
 R_{k2} ——变压器中压侧漏电阻, Ω ;

R_{k3} ——变压器高压侧漏电阻, Ω ;

L_1 ——变压器低压侧漏电感, H;

L_2 ——变压器中压侧漏电感, H;

L_3 ——变压器高压侧漏电感, H。

Z_m 、 R_m 、 L_m 的含义和计算方法同式 (2-4)~式 (2-6)。

(3) 对于绕组容量不相等的单相自耦三绕组, 其折算至低压侧的漏电感和励磁电感的计算方法如下:

自耦变压器低压绕组的容量总是小于额定容量, 当低压绕组与另一绕组(中压或高压绕组)一起做短路试验时, 低压绕组达到额定电流时, 另一绕组流过的电流尚未达到该绕组的额定电流, 而公式中计算额定电流时, 总以 $I_N = S_N/U_N$ 为准, 这里的 S_N 为变压器的额定容量, 即变压器容量最大的绕组的容量(一般为高压绕组容量)。所以, 凡是有容量小于额定容量的绕组参与的短路试验数据, 都应先归算到额定容量下来, 再进行后续的计算。

$$\begin{cases} P_{k12} = \left(\frac{S_{N3}}{S_{N1}}\right)^2 P'_{k12} \\ P_{k13} = \left(\frac{S_{N3}}{S_{N1}}\right)^2 P'_{k13} \\ P_{k23} = \left(\frac{S_{N3}}{S_{N2}}\right)^2 P'_{k23} \end{cases} \quad (2-12)$$

$$\begin{cases} U_{k12}(\%) = \frac{S_{N3}}{S_{N1}} U'_{k12}(\%) \\ U_{k13}(\%) = \frac{S_{N3}}{S_{N1}} U'_{k13}(\%) \\ U_{k23}(\%) = \frac{S_{N3}}{S_{N2}} U'_{k23}(\%) \end{cases} \quad (2-13)$$

式中 P'_{k12} ——高压侧开路时, 低压侧和中压侧的短路损耗, W;

P'_{k23} ——变压器低压侧开路时, 中压侧和高压侧的短损耗, W;

P'_{k13} ——变压器低压侧开路时, 中压侧和高压侧的短损耗, W;

$U'_{k12}(\%)$ ——变压器高压侧开路时, 短路电压百分数;

$U'_{k23}(\%)$ ——变压器低压侧开路时, 短路电压百分数;

$U'_{k13}(\%)$ ——变压器中压侧开路时, 短路电压百分数。

P_{k12} 、 P_{k13} 、 P_{k23} 、 $U_{k12}(\%)$ 、 $U_{k13}(\%)$ 、 $U_{k23}(\%)$ 分别为以上参数折算到额定容量下的值。

P_{k1} 、 P_{k2} 、 P_{k3} 、 $U_{k1}(\%)$ 、 $U_{k2}(\%)$ 、 $U_{k3}(\%)$ 的含义和计算方法同式 (2-7) 和式 (2-8)。

$$\begin{cases} L_1 = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{k1}(\%)}{100} \frac{U_{1N}^2}{S_N} \\ L_2 = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{k2}(\%)}{100} \frac{U_{1N}^2}{S_N} \\ L_3 = \frac{1}{2\pi f} \frac{U_{k3}(\%)}{100} \frac{U_{1N}^2}{S_N} \end{cases} \quad (2-14)$$

$$Z_m = \frac{U_{1N}}{I_0} \quad (2-15)$$

$$R_m = \frac{P_0}{I_0^2} \quad (2-16)$$

式中 L_1 ——变压器低压侧漏电感, H;

L_2 ——变压器中压侧漏电感, H;

L_3 ——变压器高压侧漏电感, H;

Z_m ——变压器励磁阻抗, Ω ;

R_m ——变压器励磁电阻, Ω ;

f ——频率, Hz;

I_0 ——变压器空载电流, A;

P_0 ——变压器空载损耗, W。

L_m 的含义和计算方法同式 (2-6)。

2.1.3 变压器等效电容的计算方法

图 2-1 中的 C_2 是把变压器高压侧的一些分布电容、套管电容和分压器电容集中起来折算到低压侧得到的, 本书将其称作高压侧的等效电容, 它是变压器从低压侧看进去的入口电容的主要组成部分, 其数值和作用很接近变压器的入口电容, 变压器的低压侧同样有一个等效电容, 但根据计算结果以及文献的结论可知, 它与高压侧的等效电容相比要小很多, 对高压侧的试验波形不会有明显影响 (但对低压侧波形会有影响, 详见 2.2.4 节), 因此研究高压侧波形时