

电力变压器操作冲击试验时等效电容的计算

陈昌渔, 高胜友, 谈克雄

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 用感应法对电力变压器进行操作冲击试验时,为了预测操作冲击电压的波形是否满足要求,以及为了估计电压效率,需要先求出变压器受压时的等效电容值。文中推荐使用电压比平方折合法来计算等效电容,根据变压器理论中阻抗在原、副边间的折合原理,先将绕组对地(或其他绕组)电容换算到其顶端对地的等效电容,再将变压器高压侧的电容折合到低压侧。对单相和三相变压器的一些接线方式,文中给出了等效电容的计算方法和结果,相比其他方法文中方法更为简单和方便。

关键词: 电力变压器; 感应法; 操作冲击试验; 等效电容; 电压比平方折合法

Equivalent Capacitance Calculation of Power Transformer in Switching Impulse Test

CHEN Changyu, GAO Shengyou, TAN Kexiong

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: When the power transformer is subjected to the switching impulse test using inductive method, it is necessary to find the equivalent capacitance value of the transformer with voltage, for the purpose of predict whether the waveform of switching impulse voltage meets the requirements and estimating the voltage efficiency. This paper recommended the use of the converting method by square value of voltage-ratio to calculate the equivalent capacitance. According to the principle of equivalent impedance between the primary and secondary side of the transformer theory, the capacitance of the winding to ground(or to other winding) is first converted to its top to ground, then the capacitance of high voltage side will be equivalent to the low voltage side. For various connection modes of single phase and three phase transformers, the calculation methods of equivalent capacitance and calculation results are given. Compared with other methods, the method introduced in this paper is simpler and more convenient

Key words: power transformer; inductive method; switching impulse voltage test; equivalent capacitance; converting method by voltage-ratio square

0 引言

对超高压、特高压电力设备,操作冲击(switching impulse, SI)试验是十分重要的试验项目,GB 311.1—2012和GB 1094.3—2003分别规定了电力设备和电力变压器的SI耐受电压,GB/T 16927.1—2011和GB/T 16927.3—2010则分别规定了SI试验电压的标准波形和现场试验的SI电压波形。不少文献从不同角度出发介绍了电力变压器进行操作冲击试验的内容^[1-7]。

产生SI试验电压大致分为:①使用冲击电压发生器对变压器高压绕组直接施压;②使用感应法加

压。感应法是用已充电的电容器,通过一定的电路对变压器低压(LV)侧绕组放电,从而在高压(HV)侧绕组感应产生SI电压^[8-9]。用感应法对变压器进行SI电压试验更具优点。DL 474.6—1992给出了在现场进行变压器操作冲击感应耐压试验的实施导则,DL/T 596—2005规定了对变压器绝缘可以采用感应法进行操作冲击耐压试验。

变压器进行SI电压试验前往往需先求出变压器承受电压时的等效电容,以便算出产生的SI电压波形和峰值,估计出电压效率。设变压器高压侧端部的电容(HV绕组对地等效电容和电容分压器电容等)为 C'_2 ,它折合到低压侧的等效电容 $C_2=k^2C'_2$ (k 为

变压器的变比), 电容数值会增加很多倍, 它对 SI 电压的波形影响较大。因此, 在用感应法进行 SI 电压试验前, 对等效电容进行估算是很有价值的工作。

变压器绕组等效电容的计算有 3 种方法: ①磁势平衡法; ②电容按电压比平方倍折合法; ③功率不变转换法。磁势平衡法由东北电力学院骆济寿于 1975 年提出。清华大学陈昌渔等^[1]于 1975 年使用了电容按电压比平方倍折合法, 根据变压器理论中阻抗在原、副边间的折合原理, 先将绕组对地电容换算到出线端对地的等效电容, 再将变压器高压侧的阻抗乘以 $1/k^2$ 折合到低压侧, 因容抗是 $1/(\omega C)$, 所以电容 C 从变压器高压侧折合到低压侧, 等效电容的电容量为 $k^2 C$ 。文[2-3]中引用了磁势平衡法, 有感于磁势平衡法不够方便, 文[3]中还提出了功率不变的转换原则。文中使用文[1]中介绍的电容按电压比平方倍折合法, 对单相和三相变压器的一些接线方式, 给出等效电容的计算方法和结果。

1 单相变压器的等效电容

1.1 高压绕组对地的等效电容

在变压器 HV 绕组未接地时, 实测得到 HV 绕组的对地电容 C_H 。假设沿绕组长度的匝数和对地电容的分布是均匀的, 且设绕组长度为 l , 则绕组单位长度的实测对地电容为 C_H/l 。变压器绕组的电压分布见图 1。图 1 中电压和绕组长度都取单位值。绕组承受电压时, 绕组沿长度 y 的电压分布 u 是 y 的函数。

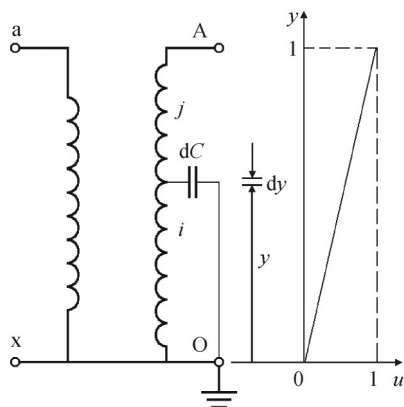


图1 变压器绕组的电压分布

Fig. 1 Voltage distribution along transformer winding

在将高压绕组对地电容折算到其顶端对地的等效电容时, 可将 HV 绕组视为一自耦变压器。设在绕组的 y 处 C 有一增量 dC (dy 间隔绕组的对地电容), $dC=(C_H/l)dy$, dC 两端的电压是 $u(y)$ 。根据电压比平方折合法, 绕组中某段 $i-j$ 的对地电容折合到绕

组顶端 A 对地的等效电容为

$$C_{i-j,e} = \int_i^j (C_H/l) [u(y)/u_A]^2 dy \quad (1)$$

如果电压和绕组长度都取单位值, 则

$$C_{i-j,e} = \int_i^j C_H u^2(y) dy \quad (2)$$

整个 HV 绕组对地电容折合到其顶端对地的等效电容可按式(1)计算, 其值为

$$C_{e2} = \int_0^1 C_H y^2 dy = C_H/3 \quad (3)$$

以 k 表示高、低压(或中压)绕组的电压比, 再按电压比平方的关系, 将 C_{e2} 折合为变压器原边(低压或中压)绕组 a 点的对地电容 C_e , 其值为

$$C_e = k^2 C_H/3 \quad (4)$$

1.2 高压绕组对低压绕组的等效电容

1.2.1 高压绕组端部出线

HV 绕组端部出线时的绕组及电压分布示意图见图 2。

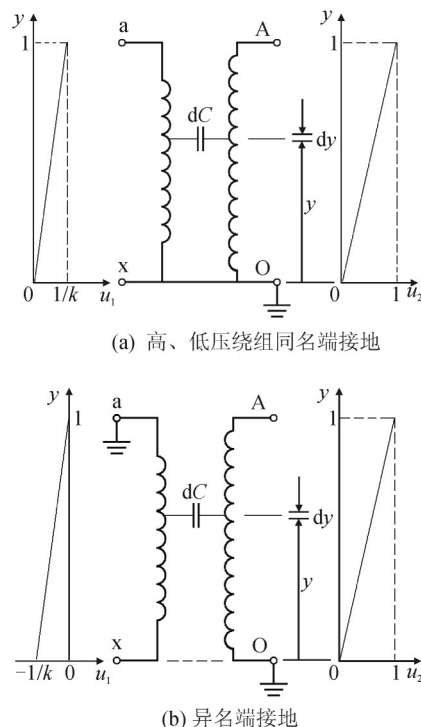


图2 变压器绕组的电压分布(HV 绕组端部出线)

Fig. 2 Voltage distribution along transformer windings (when outlet of HV winding located at end terminal)

在高、低压绕组未接地时, 实测高、低压间的电容为 C_{12} 。

高、低压绕组的电压分布分别以 $u_2(y)$ 、 $u_1(y)$ 表示。设在绕组的 y 处 C 有一增量 dC (dy 间隔高、低压绕组间的电容), dC 两端的电压是 $u_{21}(y)=u_2(y)-u_1(y)$ 。由图 2 可知, $u_2(y)=y$, 高、低压绕组同名端接地时 $u_1(y)=y/k$, 异名端接地时 $u_1(y)=(y-1)/k$ 。

同名端接地时, $u_{21}(y)=y-y/k$, 高、低压绕组间电容折合到 HV 绕组顶端对地的等效电容为

$$C_{e2} = \int_0^1 [u_{21}(y)]^2 C_{12} dy = \int_0^1 (y - y/k)^2 C_{12} dy = [(k-1)/k]^2 C_{12}/3 \quad (5)$$

再按照电压比平方的关系,将 C_{e2} 折合为LV绕组a点的对地电容 C_e ,其值为

$$C_e = (k^2 - 2k + 1) C_{12}/3 \quad (6)$$

异名端接地时, $u_{21}(y) = y - (y-1)/k$, C_{e2} 和 C_e 分别为

$$C_{e2} = \int_0^1 [y - (y-1)/k]^2 C_{12} dy = [(k^2 + k + 1)/k^2] C_{12}/3 \quad (7)$$

$$C_e = (k^2 + k + 1) C_{12}/3 \quad (8)$$

由式(6)和式(8)可知,高、低压绕组异名端接地时的等效电容比同名端接地的大得多,差值为 $k C_{12}$ 。

1.2.2 高压绕组中部出线

HV绕组中部出线时的绕组及电压分布示意图见图3^[7]。

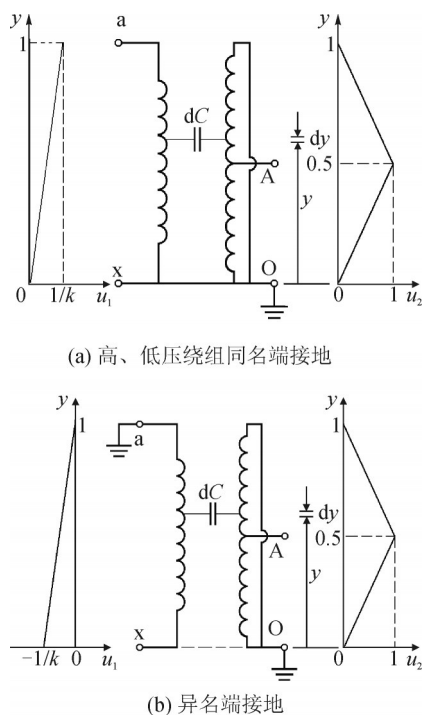


图3 变压器绕组的电压分布(HV绕组中部出线)

Fig. 3 Voltage distribution along transformer windings (when outlet of HV winding located at middle part)

由图3可知, $u_2(y)$ 是折线, $0 \leq y \leq 0.5$ 时 $u_2(y) = 2y$, $0.5 \leq y \leq 1$ 时 $u_2(y) = 2(1-y)$;高、低压绕组同名端接地时 $u_1(y) = y/k$,异名端接地时 $u_1(y) = (y-1)/k$ 。

同名端接地, $0 \leq y \leq 0.5$ 时 $u_{21}(y) = 2y - y/k$, $0.5 \leq y \leq 1$ 时 $u_{21}(y) = 2(1-y) - y/k$ 。高、低压绕组间电容折合到HV绕组顶端对地的等效电容为

$$C_{e2} = \int_0^{0.5} (2y - y/k)^2 C_{12} dy + \int_{0.5}^1 [2(1-y) - y/k]^2 C_{12} dy = (k^2/3 - k/2 + 1/3)(C_{12}/k^2) \quad (9)$$

再按照电压比平方的关系,将 C_{e2} 折合为变压器LV

绕组a点的对地电容 C_e ,其值为

$$C_e = (k^2 - 1.5k + 1) C_{12}/3 \quad (10)$$

异名端接地, $0 \leq y \leq 0.5$ 时 $u_{12}(y) = 2y - (y-1)/k$, $0.5 \leq y \leq 1$ 时 $u_{12}(y) = 2(1-y) - (y-1)/k$ 。 C_{e2} 和 C_e 分别为

$$C_{e2} = \int_0^{0.5} [2y - (y-1)/k]^2 C_{12} dy + \int_{0.5}^1 [2(1-y) - (y-1)/k]^2 C_{12} dy = (k^2/3 + k/2 + 1/3)(C_{12}/k^2) \quad (11)$$

$$C_e = (k^2 + 1.5k + 1) C_{12}/3 \quad (12)$$

由式(10)和式(12)可知,高、低压绕组异名端接地时的等效电容比同名端接地的大得多,差值为 $k C_{12}$ 。

由式(6)、(10)和式(8)、(12)可知,在其他情况相同时,绕组中部出线比端部出线的等效电容略大。

2 三相变压器的等效电容

以较简单的110 kV/11 kV三相变压器为例来分析,图4为用感应法对三相变压器进行操作冲击试验的一种接线方式。为叙述方便,将“绕组a、c串联后与绕组b并联”简称为一次侧绕组,而将“绕组A、C并联后与绕组B串联”简称为二次侧绕组。

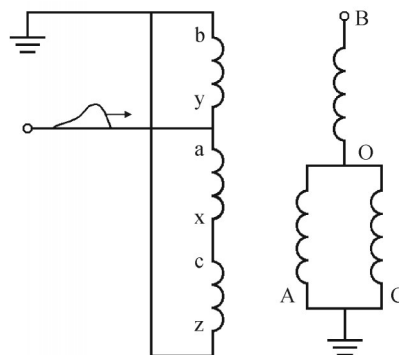


图4 三相变压器操作冲击试验的一种接线方式

Fig. 4 Equivalent circuit of one kind of connection during switching impulse test of 3-phases of transformer

设变压器每相绕组的电压比是 k 。若设试验时二次侧绕组的输出电压(B点的对地电压)为1,由图4可知一次侧绕组的输入电压应为 $(-1)/(1.5k)$ 。定义电压比 β 为二次侧绕组与一次侧绕组电压之比, β 与高、低压绕组电压比 k 的含义不同,数值也不一致, $\beta = 1.5k$ 。

2.1 高压绕组对地的等效电容

图5为二次侧绕组电压分布 $u(y)$ 的示意图, $u(y)$ 是折线, $0 \leq y \leq 0.5$ (绕组A、C)时 $u(y) = (2/3)y$, $0.5 \leq y \leq 1$ (绕组B)时 $u(y) = 1/3 + (4/3)(y-1/2)$ 。

高压绕组A、B、C各自的实测对地电容为 C_H ,而单位长度的实测对地电容为 $C_H/0.5$ 。

设绕组 y 处高压绕组与地之间的电容有一增量 $dC(dy)$ 间隔高压绕组与地之间的电容), $dC = 2C_H dy$ 。

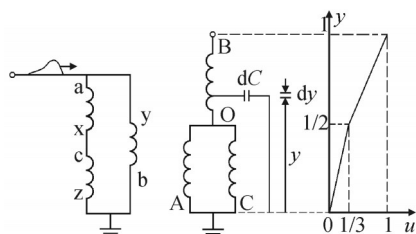


图5 试验时三相变压器的电压分布

Fig. 5 Voltage distribution along transformer windings during test of 3-phases of transformer

二次侧绕组对地电容折合到其顶端的对地等效电容 C_{e2} 为

$$C_{e2} = 2 \int_0^{1/2} 2C_H [(2/3)y]^2 dy + \int_{1/2}^1 2C_H \left[\frac{1}{3} + \frac{4}{3} \left(y - \frac{1}{2} \right) \right]^2 dy = (5/9)C_H \quad (13)$$

这样, 电容 C_{e2} 折算到一次侧绕组的对地等效电容 C_e 应为

$$C_e = \beta^2 C'_{e2} = (1.5k)^2 C'_{e2} = 1.25k^2 C_H \quad (14)$$

以上分析中, 简单地假设各相绕组的对地电容都是 C_H , 实际上 B 相的对地电容不同于 A、C 相。为了准确, 可以分别实测后再作计算。

2.2 高压绕组对低压绕组的等效电容

对三相变压器, 同样要将高压绕组对低压(或中压)绕组间的电容折合为等效电容。实测得到每相高、低压绕组间的电容为 C_{120} 。

依据图4, 经分析可得到各相高、低压绕组沿绕组轴向上的电压分布, 见图6。绕组长度和电压均已归一化。绕组的长度坐标以 y 表示, $0 \leq y \leq 1$, y 轴的正方向为从 O 指向 A、x 指向 a 等。高、低压绕组的电压分布函数为: ① A: $u_2(y) = (1-y)/3$, a: $u_1(y) = -(1+y)/(2\beta)$; ② B: $u_2(y) = (1+2y)/3$, b: $u_1(y) = (y-1)/\beta$; ③ C: $u_2(y) = (1-y)/3$, c: $u_1(y) = -y/(2\beta)$ 。

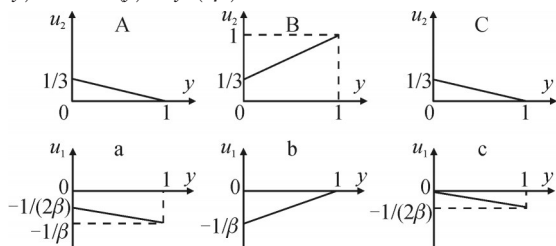


图6 绕组的电压分布

Fig. 6 Voltage distribution along transformer windings

2.3 高、低压绕组间电容的折合

先分别计算 A-a、B-b、C-c 间电容折合到二次侧顶端对地的等效电容 C_{Ae2} 、 C_{Be2} 、 C_{Ce2} , 得:

$$C_{Ae2} = C_{12} \int_0^1 \left[\frac{1-y}{3} - \frac{-(1+y)}{2\beta} \right]^2 dy = \left[\frac{4\beta^2 + 24\beta + 63}{108\beta^2} \right] C_{12} \quad (15)$$

$$C_{Be2} = C_{12} \int_0^1 \left[\frac{1+2y}{3} - \frac{y-1}{\beta} \right]^2 dy = \left[\frac{13\beta^2 + 15\beta + 9}{27\beta^2} \right] C_{12} \quad (16)$$

$$C_{Ce2} = C_{12} \int_0^1 \left[\frac{1-y}{3} - \frac{-y}{2\beta} \right]^2 dy = \left[\frac{4\beta^2 + 6\beta + 9}{108\beta^2} \right] C_{12} \quad (17)$$

再将上述电容分别折合到一次侧顶端对地的等效电容 C_{Ae} 、 C_{Be} 、 C_{Ce} , 并以 $\beta = 1.5k$ 代入, 可得

$$\begin{cases} C_{Ae} = (k^2 + 4k + 7)C_{12}/12 \\ C_{Be} = (13k^2 + 10k + 4)C_{12}/12 \\ C_{Ce} = (k^2 + k + 1)C_{12}/12 \end{cases} \quad (18)$$

这里要说明, 绕组 C-c 间电容的折合, 也可按式(4)先折合为变压器低压绕组 c-z 间的对地电容值

$$C_{c-z,e} = (k^2 + k + 1)C_{12}/3 \quad (19)$$

然后对 $C_{c-z,e}$ 乘以 1/4, 即可折合到一次侧顶端对地, 马上得到上述 C_{Ce} 的最终结果。

由以上计算结果, 可得三相高、低压绕组间电容折合到一次侧顶端对地的等效电容为

$$C_e = C_{Ae} + C_{Be} + C_{Ce} = 1.25(k^2 + k + 0.8)C_{12} \quad (20)$$

3 变压器高压绕组的纵向电容

为了降低变压器绕组在雷电冲击电压作用下电压分布的不均匀性, 可采取纠结式绕法或插入电容式绕法, 以提高绕组的纵向电容, 使绕组在雷电冲击电压作用下具有较为理想的电压分布。这种结构变压器的纵向电容较大, 不能忽略。

常用系数 αl 来表征变压器绕组在雷电冲击电压作用下的分布特性^[10]

$$\alpha l = \sqrt{C_0/C_{k0}} \quad (21)$$

式(21)中: C_0 为整个绕组总的对地电容; C_{k0} 为整个绕组总的纵向电容。

当无限长直角波电压作用于中性点接地的变压器绕组时, 沿绕组的起始电压分布见图7。

为了电压分布趋于均匀些, 可考虑取 $\alpha l \approx 2$, 这样高压绕组对地的纵向电容 $C_{k0} \approx C_0/4$ 。由此可知, 在已知 C_0 的情况下可估算出高压绕组对地的纵向电容 C_{k0} , 然后再将 C_{k0} 按电压比平方关系折算到低压侧, 其值为

$$C_e = k^2 C_{k0} \approx k^2 C_0/4 \quad (22)$$

4 结论

根据变压器理论中阻抗在原、副边间的折合原

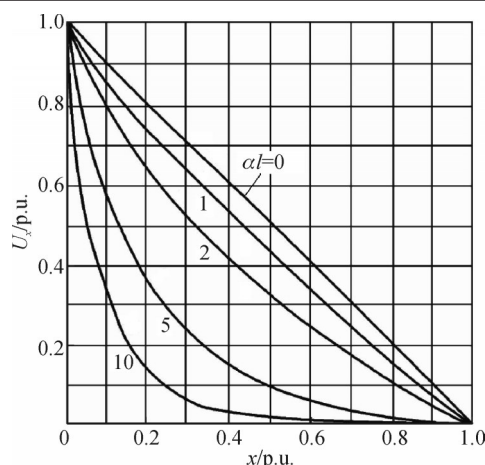


图7 直角波电压作用下变压器绕组的起始电压分布

Fig. 7 Initial voltage distribution along transformer winding subjected by rectangular wave

理,使用电容按电压比平方折合法进行等效电容折算,是在思路和运算上最为方便的方法。

1)使用电容按电压比平方折合法,经常是先将不同接线方式下绕组对地(或其他绕组)电容换算到其顶端对地的等效电容,再将变压器高压侧的电容折合到低压侧。

2)等效电容的计算公式归纳见表1。

表1 等效电容的计算公式

Table 1 The formulas of equivalent capacitance

不同情况				等效电容 C_e
高压绕组—地				$k^2 C_{H1}/3$
单相 变压器	高一	端部	同名端接地	$(k^2 - 2k + 1)C_{12}/3$
		出线	异名端接地	$(k^2 + k + 1)C_{12}/3$
	低压 绕组	中部	同名端接地	$(k^2 - 1.5k + 1)C_{12}/3$
		间 出线	异名端接地	$(k^2 + 1.5k + 1)C_{12}/3$
三相	高压绕组—地			$1.25k^2 C_{H1}$
变压器	高一—低压绕组间			$1.25(k^2 + k + 0.8)C_{12}$

注:表中三相变压器为图4所示的接线方式时。

3)在其他情况相同的情况下,绕组中部出线比端部出线的等效电容略大;高、低压绕组异名端接地时的等效电容比同名端接地的大得多。

参考文献:

- [1] 唐山供电局等三单位联合试验组. 三相电力变压器的操作波试验[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1978, 18(1): 18-32.
United Test Group of Tangshan Power Supply Bureau and Other Two Units. Switching impulse tests of three phase power transformer[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 1978, 18(1): 18-32.
- [2] 黄齐嵩. 变压器进行操作波感应耐压试验时等效电容的

计算[J]. 高电压技术, 1979, 5(3): 21-29.

HUANG Qisong. Equivalent capacitance calculation of the transformers applied switching impulse voltage by inductive method[J]. High Voltage Engineering, 1979, 5(3): 21-29.

- [3] 王敬佩. 变压器做操作波试验时等效电容的估算[J]. 高电压技术, 1979, 5(3): 30-35.

WANG Jingkan. Calculations of equivalent capacitance of transforms in switching impulse voltage tests[J]. High Voltage Engineering, 1979, 5(3): 30-35.

- [4] 朱英浩. 操作波冲击试验时应注意的技术问题[J]. 变压器, 1988, 25(6): 2-3.

ZHU Yinghao. Technical problems that should be paid attention to in switching impulse test[J]. Transformer, 1988, 25(6): 2-3.

- [5] 陈道辉. 电力变压器操作冲击试验波形计算分析[J]. 变压器, 1997, 34(8): 1-6.

CHEN Daohui. Calculation and analysis of switching impulse test shape for power transformer[J]. Transformer, 1997, 34(8): 1-6.

- [6] 李光范, 王晓宁, 李 鹏, 等. 1 000 kV 特高压电力变压器绝缘水平及试验研究[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 1-6.

LI Guangfan, WANG Xiaoning, LI Peng, et al. Insulation level and test technology of 1 000 kV power transformers[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 1-6.

- [7] 陈昌渔. 电力变压器操作冲击试验电压波形的计算[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 27-29.

CHEN Changyu. Calculations of test voltage waveform of switching impulse for power transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 27-29.

- [8] THIONE L, SPINELLI A, BOSSI A, et al. Switching impulse tests of EHV and UHV transformers[J]. IEEE Trans. on PAS, 1980, 99(2): 779-787.

- [9] 陈昌渔, 王昌长, 高胜友. 高电压试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.

CHEN Changyu, WANG Changchang, GAO Shengyou. High voltage testing technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.

- [10] 严 璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.

陈昌渔(1933—),男,教授,长期从事高电压技术和高电压试验技术方面的教学和科研工作。

高胜友(1972—),男,博士,高级工程师,清华大学高电压实验室主任,主要从事高电压试验及电力设备故障诊断方面的教学和科研工作。

谈克雄(1937—),男,教授,长期从事高电压技术和高电压试验技术方面的教学和科研工作。