

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.07.015

基于电流注入法的非对称短路开断试验 (T100a)TRV参数计算与研究

张晋波¹, 高享想¹, 张云飞², 刘浩军¹, 彭剑飞¹

(1. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077; 2. 国网临沂供电公司, 山东 临沂 276000)

摘要: 高压交流断路器开断电力系统中的非对称短路故障时, 由于短路电流是交流分量和直流分量的叠加, 导致最后电流熄弧半波为大半波或小半波, 电流过零熄弧点电源电压偏离峰值, 暂态恢复电压(TRV)峰值将低于断路器开断对称短路故障情况下的数值。通过电流零点的对称短路故障(T100s)和非对称短路故障(T100a)的电流表达式, 应用电流注入法原理, 得出以T100s的TRV参考电压为基础, T100a的TRV参考电压的修正系数, 以此来获得T100a在大、小半波开断时的TRV参考电压。研究内容为大容量试验站进行T100a试验时, 评定TRV参数是否满足标准要求的范围, 为试验时TRV调频装置 L 、 R 、 C 元件参数的调整提供了理论依据。

关键词: 非对称故障; T100a; TRV; 大半波; 小半波

Calculation and Study of TRV Parameters for Asymmetric Short-circuit Breaking Test (T100a) Based on Current Injection Method

ZHANG Jinbo¹, GAO Xiangxiang¹, ZHANG Yunfei², LIU Haojun¹, PENG Jianfei¹

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

2. State Grid Linyi Power Supply Company, Shandong Linyi 276000, China)

Abstract: When the high-voltage AC circuit-breakers breaking the asymmetrical short-circuit fault in the power system, the short-circuit current is the superposed by AC component and DC component which resulting the last current arc-extinguishing loop is major loop or minor loop. Because the current zero point deviates from peak of the power supply voltage, the TRV peak will be lower than the value of symmetrical short circuit fault breaking. Based on the principle of current injection and TRV values of T100s, according to current expression of T100s and T100a, the correction coefficients of TRV values of T100a can be calculated for major loop or minor loop. Finally, the research of this paper can help to assess the TRV parameters of T100a test and adjust the R , L , C values of frequency modulation device in high power laboratory.

Key words: asymmetrical fault; T100a; TRV; major loop; minor loop

0 引言

高压断路器开断非对称短路电流试验时^[1-7], 叠加在故障电流上的直流分量导致电流过零熄弧半波为大半波或者小半波, 电源电压偏离峰值, 暂态恢复电压(TRV)峰值 u_c 将低于断路器开断对称短路故障情况下的数值。

早期的 IEC 和国家标准只给出高压交流断路器开断对称短路故障(T100s)情况下的 TRV 参考电

压。关于非对称短路故障(T100a)情况下的 TRV 参考电压计算方法最早出现于《IEC TR 62271-08:2002 非对称短路开断试验方式 T100a 的导则》^[4] 中, IEC 标准在 2008 年发布的《IEC 62271-100:High-voltage switchgear and controlgear—Part 100:High-voltage alternating-current circuit breakers》合并了《IEC TR 62271-308:2002》的内容, 从此在 IEC 标准中关于 T100a 的 TRV 参考电压计算出现在《IEC 62271-100:2008》、《IEC 62271-100:2012》的附录中。最新版国家标准《GB 1984—2014 高压交流断路器》修订时参考

了《IEC 62271-100:2008》、《IEC 62271-100:2012》^[2-8]中关于 T100a 的 TRV 参考电压计算方法,在附录 P 中给出首开极的 TRV 修正计算公式,应用该公式可以计算出 T100a 试验时 TRV 的参考值。

文中以电流注入法为基础^[9-12],通过电流零点的对称短路故障(T100s)和非对称短路故障(T100a)的电流表达式,推导出试验方式 T100a 的两参数、四参数 TRV 修正计算表达式。此外,2008 年 IEC 与 IEEE 在四参数 TRV 上做过一次协调性的调整^[13],文中研究结论发现《IEC 62271-100:2008》、《IEC 622-71-100:2012》的附录中现有的 T100a 四参数 TRV 修正计算表达式不再适用于当前的标准版本。因此,XIHARI 将结论提交给 IEC 标准工作组,已被即将发布的 IEC 草案版采纳,T100a 四参数 TRV 修正计算表达式为新版的 IEC 标准的修订提供了重要的参考和依据。

1 电流注入法及注入短路电流表达式

1.1 电流注入法基本原理

求解高压交流断路器开断短路电流后的 TRV 的 2 种方法见图 1,假设所考虑的系统为线性电路^[10,14-15]。图 1(a)为电压响应法,通过系统的电源电压和线性电路及其元件的初始条件来求解断路器两端的 TRV。图 1(b)为基于叠加原理的电流注入法,计算时电压源短接、电流源开路,通过对系统注入极性相反的完全相同的电流,以此来求解在该注入电流激励下断路器两端的 TRV。对于线性电路系统,系统的网络函数由自身的电路拓扑决定,即

$$H(s) = \frac{r_1(s)}{e_1(s)} = \frac{r_2(s)}{e_2(s)} \quad (1)$$

式(1)中: $H(s)$ 为系统的网络函数; $e_1(s)$ 、 $e_2(s)$ 为激励函数; $r_1(s)$ 、 $r_2(s)$ 为激励作用下的响应函数。因此,对于线性电路系统,当已知注入电流和其响应 $e_1(s)$ 、 $r_1(s)$,则求解注入电流 $e_2(s)$ 激励下的电压响应数值 $r_2(s)$,直接可以通过 $r_1(s)$ 、 $e_1(s)$ 、 $e_2(s)$ 进行修正计算,不需要经过系统的网络函数计算,即

$$r_2(s) = r_1(s) \times \frac{e_2(s)}{e_1(s)} \quad (2)$$

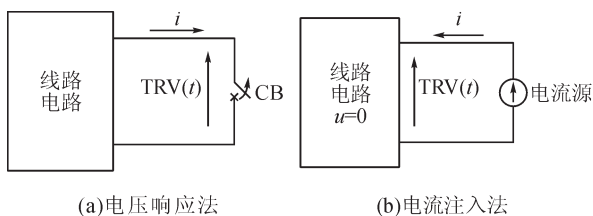


图 1 固有 TRV 求解基本原理

Fig. 1 The basic principle of solving inherent TRV

1.2 T100s 和 T100a 注入电流表达式

非对称短路电流的通用表达式为

$$i(t) = I_m \left[\sin(\omega t + a - \varphi) - \sin(a - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (3)$$

式(3)中: $I_m = \frac{\sqrt{2}U}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}}$; a 为合闸相角; φ 为阻

抗角; τ 为试验回路的时间常数。国家标准《GB 1984—2014》中规定的触头分离时刻直流分量

$$\%d_k = 100 \times e^{\frac{-(T_{op} + T_r)}{\tau}} \quad (4)$$

式(4)中: T_{op} 为制造厂声明的最短分闸时间; T_r 为继电器动作时间(0.5 周波,对于 50 Hz 为 10 ms); τ 为额定短路电流的直流时间常数。由式(4)可见,短路起始瞬间其中一相的直流分量最大且为 100%,合闸相角和阻抗角的差为 $\pm\pi/2$,当取 $a - \varphi = -\pi/2$,则式(3)可简化为

$$i(t) = -I_m \cos \omega t + I_m e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5)$$

满足式(3)的电压与短路电流波形图见图 2。短路起始时刻直流分量的标幺值为 1,短路电流的直流分量随着时间振荡衰减。由于短路电流里有衰减的直流电流,短路电流前几个过零点处的电压没有达到峰值处。

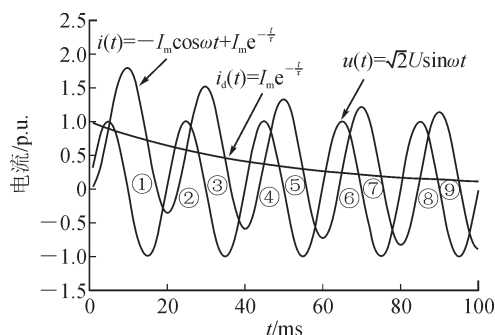


图 2 电压与短路电流波形图

Fig. 2 Waveform of voltage and short-circuit current

对于 T100a 条件下,设开断时电流零点的时刻为 t_0 ,则以 t_0 为起始时刻的注入电流表达式为

$$i_{asym}(t) = -I_m \cos \omega(t + t_0) + I_m e^{-\frac{t+t_0}{\tau}} \quad (6)$$

对于 T100s 条件下,由于没有直流分量,因此以 t_0 为起始时刻的注入电流表达式为

$$i_{sym}(t) = \pm I_m \sin \omega t \quad (7)$$

式(7)中:“+”表示电流熄弧半波为小半波;“-”表示电流熄弧半波为大半波。

2 T100a 两参数 TRV 的修正计算

对于非对称短路故障开断,注入电流的表达式

如式(6)所示, 设 t_0 时刻直流分量的标幺值为 p , 则 $\sin\omega t_0 = \pm\sqrt{1-p^2}$ 。当 $\sin\omega t_0 = \sqrt{1-p^2}$ 时, 表示短路电流在小半波末过零熄弧, 对应于图 2 中的 2、4、6、8 过零点; 当 $\sin\omega t_0 = -\sqrt{1-p^2}$ 时, 表示短路电流在大半波末过零熄弧, 对应于图 2 中的 1、3、5、7 过零点。对于对称短路故障开断, 首开极开断时注入电流的表达式如式(7)所示。

两参数参考线和时延线对规定的 TRV 的表示的图例见图 3。根据图 1(b)所示的电流注入法原理, 以及式(6)、(7)的注入电流表达式, 对于两参数 TRV, 非对称短路试验开断后的暂态恢复电压 u_r 的标幺值表达式为

$$u_r(\text{p.u.}) = \frac{-I_m p \cos\omega t \pm I_m \sqrt{1-p^2} \sin\omega t + I_m p e^{-\frac{t}{\tau}}}{\pm I_m \sin\omega t} = \frac{\sqrt{1-p^2} \mp p \frac{\cos\omega t - e^{-\frac{t}{\tau}}}{\sin\omega t}}{\sin\omega t} \quad (8)$$

则 u_c 的标幺值表达式为

$$u_c(\text{p.u.}) = \sqrt{1-p^2} \mp p \frac{\cos\omega t_3 - e^{-\frac{t_3}{\tau}}}{\sin\omega t_3} \quad (9)$$

式(9)中: “+”代表小半波; “-”代表大半波。 t_3 为规定的两参数(TRV) u_c 对应的峰值时间, 经过整理, 可以得到的表达式为

$$\begin{cases} u_{c \text{ 小半波}} = \frac{\sin[\omega t_3 - \arcsin(p)] + p \times e^{-\frac{t_3}{\tau}}}{\sin\omega t_3} \\ u_{c \text{ 大半波}} = \frac{\sin[\omega t_3 + \arcsin(p)] - p \times e^{-\frac{t_3}{\tau}}}{\sin\omega t_3} \end{cases} \quad (10)$$

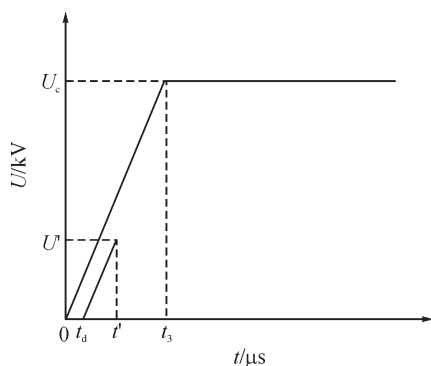


图 3 用两参数参考线和时延线对规定的 TRV 的表示
Fig. 3 Representation of a specified TRV by a two-parameter reference line and a delay line

3 T100a 四参数 TRV 的修正计算

分析 IEC 标准《IEC 62271-100:2012》和国家标准《GB 1984—2014》的附录 P 中的四参数 TRV 修

正表达式, 可以发现修正时先对第 1 参考电压 u_1 进行修正, 在此基础上再对第 2 参考电压 u_c 进行修正, 四参数参考线和时延线对规定的 TRV 的表示的图例见图 4。

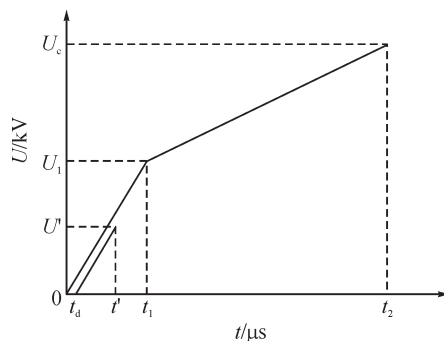


图 4 用四参数参考线和时延线对规定的 TRV 的表示
Fig. 4 Representation of a specified TRV by a four-parameter reference line and a delay line

3.1 u_1 的计算

对图 4 中四参数 TRV 的 u_1 修正计算可以按照图 3 中两参数 TRV 的 u_c 修正计算进行, 因此 u_1 的标幺值表达式为

$$\begin{cases} u_{1 \text{ 小半波}}(\text{p.u.}) = \frac{\sin[\omega t_1 - \arcsin(p)] + p \times e^{-\frac{t_1}{\tau}}}{\sin\omega t_1} \\ u_{1 \text{ 大半波}}(\text{p.u.}) = \frac{\sin[\omega t_1 + \arcsin(p)] - p \times e^{-\frac{t_1}{\tau}}}{\sin\omega t_1} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: “+”代表小半波; “-”代表大半波; t_1 为规定的四参数(TRV) u_1 对应的时间。

3.2 u_c 的计算

由于四参数 TRV 的响应电路系统为多频电路, 从图 4 中的包络线可以看出, $0 \sim t_1$ 时刻的包络线较 $t_1 \sim t_2$ 的包络线的斜率要大, 可以通过分段注入电流方法来实现, 用一个负斜率的注入电流在 $t_1 \sim t_2$ 时间段叠加在初始注入电流上来实现 $t_1 \sim t_2$ 时间段的斜率降低。

标准中对四参数 TRV 的 u_c 的修正计算最早出现于《IEC TR 62271-308:2002》非对称短路开断试验方式 T100a 的导则中, 而当时 IEC 62271-100:2001 中的 U_1 与 U_c 所满足的关系为

$$\begin{cases} u_1 = k_{pp} \times \sqrt{(2/3)} \times U_r \\ u_c = k_{at} \times k_{pp} \times \sqrt{(2/3)} \times U_r \\ u_c = k_{at} \times u_1 = 1.4 \times u_1 \end{cases} \quad (12)$$

因此, 在 u_1 与 u_c 满足式(12)时, 《IEC 62271-100:2008》、《IEC 62271-100:2012》以及《GB 1984—2014》附录 P 的 d) 中的计算公式是适应的, 且计算公式如下。

$$\begin{cases} u_{c \text{ 小半波}}(\text{p.u.}) = \frac{\sin[2\pi f t_2 - a \sin(p)] + p \times e^{-\frac{t_2}{\tau}}}{1.4 \times \sin(2\pi f t_1)} - \frac{\{\sin[2\pi f(t_2 - t_1) - a \sin(p)] + p \times e^{-\frac{(t_2 - t_1)}{\tau}}\} A}{2\pi f} \\ u_{c \text{ 大半波}}(\text{p.u.}) = \frac{\sin[2\pi f t_2 + a \sin(p)] - p \times e^{-\frac{t_2}{\tau}}}{1.4 \times \sin(2\pi f t_1)} - \frac{\{\sin[2\pi f(t_2 - t_1) + a \sin(p)] - p \times e^{-\frac{(t_2 - t_1)}{\tau}}\} A}{2\pi f} \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中: $A = \frac{2\pi f \times \sin(2\pi f t_2)}{\sin(2\pi f t_1)} \div [(1.4 - 2\pi f) \sin[2\pi f(t_2 - t_1)]]$; t_1 为规定的 u_1 对应的时间; t_2 为规定的 u_c 对应的时间。

在 2008 年的时候, IEC 与 IEEE 在四参数 TRV 上做过一次协调性的合作, IEC 与 IEEE 统一将四参数 TRV 中 u_1 与 u_c 所满足的关系协调为^[13]

$$\begin{cases} u_1 = 0.75 \times k_{pp} \times \sqrt{(2/3)} \times U_r \\ u_c = k_{at} \times k_{pp} \times \sqrt{(2/3)} \times U_r \\ u_c = k_{at} \times u_1 = \frac{1}{0.75} \times 1.4 \times u_1 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} u_{c \text{ 小半波}}(\text{p.u.}) = \frac{\sin[2\pi f t_2 - a \sin(p)] + p \times e^{-\frac{t_2}{\tau}}}{\frac{1}{0.75} \times 1.4 \times \sin(2\pi f t_1)} - \frac{\{\sin[2\pi f(t_2 - t_1) - a \sin(p)] + p \times e^{-\frac{(t_2 - t_1)}{\tau}}\} A}{2\pi f} \\ u_{c \text{ 大半波}}(\text{p.u.}) = \frac{\sin[2\pi f t_2 + a \sin(p)] - p \times e^{-\frac{t_2}{\tau}}}{\frac{1}{0.75} \times 1.4 \times \sin(2\pi f t_1)} - \frac{\{\sin[2\pi f(t_2 - t_1) + a \sin(p)] - p \times e^{-\frac{(t_2 - t_1)}{\tau}}\} A}{2\pi f} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中: $A = \frac{2\pi f \times \sin(2\pi f t_2)}{\sin(2\pi f t_1)} \div \left[\left(\frac{1}{0.75} \times 1.4 \right) - 2\pi f \right] \sin[2\pi f(t_2 - t_1)]$;

t_1 为规定的 u_1 对应的时间 t_2 为规定的 u_c 对应的时间。

4 T100a 的 TRV 参数修正计算举例

4.1 两参数 TRV 的 u_c 的修正算例

两参数 TRV 代表了 126 kV 以下断路器 T100 开断试验时的 TRV 特征, 文中以计算 40.5 kV S1 级断路器 T100a 开断试验时的预期 TRV 为例, 标准规定的 T100s 预期 TRV 标准值见表 1。假定额定频率为 50 Hz, 制造厂声明的断路器最短开断时间为 20 ms, 时间常数 τ 为 45 ms。

表 1 40.5 kV S1 级断路器 T100s 及 T100a 预期 TRV 标准值
Table 1 Standard values of prospective TRV values for class S1 circuit-breakers-rated voltage 40.5 kV

试验方式	峰值电压 u_c/kV	峰值时间 $t_3/\mu\text{s}$	修正系数
T100s	76.4	62.0	—
T100a	70.5	62.0	0.922 2

依据标准对中压断路器 T100a 试验的基本要求和推荐的程序, 在计算 126 kV 以下断路器 T100a 开断试验时的 TRV 修正时, 只需考虑大半波末开断的情况。因此, 由《GB 1984—2014》表 15 可以查得大半波末

式(14)与式(12)相比较, u_1 与 u_c 的比值关系发生了变化, 而 IEC 62271-100 附录 P 非对称短路故障试验方式 T100a 的四参数 TRV 的计算公式还是沿用式(12)所确定的 u_1 与 u_c 的关系的基础上进行的, 这显然是不合理的。因此, 需要充分考虑 2008 年以后标准中 u_1 与 u_c 的关系变化, 对式(13)进行修正, 修正后的表达式为

电流零点的直流分量百分数为 44.6, 根据式(10)可以计算得出 T100a 开断时, u_c 的修正系数及数值, 如表 1 所示。

4.2 四参数 TRV 的修正算例

四参数 TRV 代表了 126 kV 及以上断路器 T100 开断试验时的 TRV 特征, 文中以计算 550 kV 断路器 T100a 开断试验时的预期 TRV 为例, 标准规定的 T100s 预期 TRV 标准值见表 2。假定额定频率为 50 Hz, 制造厂声明的断路器最短开断时间为 20 ms, 时间常数 τ 为 45 ms。

在计算 126 kV 以上断路器 T100a 开断试验时的 TRV 修正时, 需考虑大、小半波末开断的情况。因此, 由《GB 1984—2014》表 15 可以查得大半波末电流零点的直流分量百分数为 44.6, 小半波末电流零点的直流分量百分数为 60.2。根据式(11)、(15)可以计算得出 T100a 开断时, u_1 、 u_c 的修正系数及数值见表 2。

5 结语

文中以电流注入法为基础, 通过电流零点的对称短路故障(T100s)和非对称短路故障(T100a)的电流表达式, 得出以 T100s 的 TRV 参考电压为基础, T100a 的 TRV 参考电压的修正系数, 以此来获

表 2 550 kV断路器T100s及T100a预期TRV标准值

Table 2 Standard values of prospective TRV values for 550 kV circuit-breakers

试验方式	参考电压 u_1/kV	时间 $t_1/\mu\text{s}$	峰值电压 u_c/kV	时间 $t_2/\mu\text{s}$	u_1 修正系数	u_c 修正系数
T100s	438	219	817	876	—	—
T100a(大半波)	400	219	680	876	0.911 2	0.832 3
T100a(小半波)	341	219	723	876	0.776 7	0.884 9

得 T100a 在大、小半波开断时的 TRV 参考电压。同时, 也提出了 IEC 和国家标准中计算四参数 TRV 时 $u_c(\text{p.u.})$ 的表达式的错误, 并给出了修改公式。试验的内容在大容量试验站进行, 相关的电压参数和回路参数计算为试验提供了理论依据与参考。

参考文献:

[1] 吴 钟. 非对称开断能力估算初探[J]. 高压电器, 1982, 18(2):47-52.
WU Zhong. Exploration on asymmetric breaking ability estimate[J]. High Voltage Apparatus, 1982, 18(2):47-52.

[2] GB 1984—2014 高压交流断路器[S].2014.
GB 1984—2014 High-voltage alternating current circuit-breakers[S].2014.

[3] IEC 62271-100:2012 High-voltage switchgear and control-gear—Part 100:High-voltage alternating-current circuit breakers[S].2012(Edition 2.1).

[4] IEC 62271-308:2002 High-voltage switchgear and control-gear—Part308:Guide for asymmetrical short-circuit breaking test duty T100a[S].2001.

[5] IEEE Standard C37.081a—1997 Supplement to IEEE guide for synthetic fault testing of AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis—8.3.2:Recovery voltage for terminal faults;asymmetrical short-circuit current[S].1997.

[6] 黄 实,高享想,刘浩军,等. 非对称电流开断试验 T100a 电流零点 di/dt 及 TRV 峰值 u_c 的计算[J]. 高压电器, 2015, 51(10):163-167.
HUANG Shi,GAO Xiangxiang,LIU Haojun,et al. Calculation of di/dt at current zero and TRV peak value u_c for test-duty T100a[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(10):163-167.

[7] 杨英杰,王学斌,孔祥军. 三相非对称故障开断试验探讨[J]. 高压电器, 2004, 40(5):382-384.
YANG Yingjie,WANG Xuebin,KONG Xiangjun. Discuss-

sion on asymmetrical short-circuit fault breaking test by circuit-breaker[J]. High Voltage Apparatus,2004,40(5):382-384.

[8] GB 4473—2008 高压交流断路器的合成试验[S].2014.
GB 4473—2008 Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers[S].2014.

[9] IEC 62271-101:2012 High-voltage switchgear and control-gear—Part 101:Synthetic testing[S].2012.(Edition 2.0)

[10] 王仁甫. 断流能力试验回路的时域综合[J]. 高压电器, 1990, 26(4):3-11.
WANG Renfu. Time domain synthesis of current interruption test circuit[J]. High Voltage Apparatus,1990,26(4):3-11.

[11] KAPETANOVIC M. 高压断路器-理论、设计及试验方法[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
KAPETANOVIC M. High voltage circuit breakers theory, design and test[M]. Beijing:Machine Industry Press,2015.

[12] PEELO D F. Current interruption transients calculation[M]. England:John Wiley and Sons Ltd.,2014.

[13] IEEE Standard C37. b—2008 IEEE standard for rating structure for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis-amendment 2;to change the description of transient recovery voltage for harmonization with IEC 62271-100[S].2008.

[14] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
LI Guangqi. Transient analysis of power system[M]. Beijing: China Electric Power Press,2007.

[15] 邱关源. 电路[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
QIU Guanyuan. Circuit[M]. Beijing:Higher Education Press, 2004.

张晋波(1980—),男,工程师,主要从事高压电器产品标准及检测方面的相关研究。

高享想(1986—),男,硕士,工程师,主要从事高压电器产品大容量试验检测和试验技术研究以及试验回路设计与开发工作。