

电力电缆故障冲闪测试放电回路建模

李 峰¹, 徐丙垠²

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 山东科汇电力自动化有限公司, 山东 淄博 255087)

摘要: 对电力电缆故障冲击高压闪络测试(简称冲闪测试)系统的放电响应进行了研究。在只考虑暂态低频分量信号的条件下,利用电缆的均匀传输线 T 型等效网络,建立了冲闪测试放电回路的集中参数电路模型。根据电缆的结构和材料参数,以及电缆集中参数与其分布参数之间的关系,推导了模型的电流、电压响应近似表达式,以及电流响应的衰减系数和振荡频率表达式。论证了冲闪测试放电回路串联电阻为零时电流、电压响应近似为二阶衰减振荡过程,二次脉冲法冲闪测试放电回路串联电阻不为零时电流响应是过阻尼的负指数衰减过程。模型计算与实验结果的一致性验证了建模的正确性。

关键词: 电力电缆; 故障测距; 冲闪测试; 放电回路; 二次脉冲法

中图分类号: TM 247

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)03-0046-06

0 引言

电缆发生故障后,必须通过测试查找出故障点的位置,才能修复电缆故障和恢复供电^[1-3]。查找电力电缆高阻故障多需进行冲击高压闪络测试(简称冲闪测试),也就是通过对电缆施加高压冲击信号,引起故障点击穿放电。冲闪测试的目的是为电缆故障测距和定点提供信号,或者为电缆故障测距和定点创造条件^[4-7]。研究冲闪测试放电响应是进行电缆故障测试的基础,也是设计电缆故障测试仪器和探索电缆故障测试新方法的前提,当前对这个问题的论述散见于电力电缆故障测试方面的几种专著,但均为实验波形记录,缺少理论分析^[8-10]。因此,有必要建立电力电缆故障冲闪测试放电回路的模型,为深入研究电缆故障测试技术建立基础。冲闪测试放电过程以低频分量为主,本文在只考虑低频分量信号条件下,利用均匀传输线的 T 型等效电路建立了电缆故障冲闪测试放电回路的电路模型,求解出了电流和电压的响应以及衰减系数和振荡频率等参数。

1 冲闪测试系统的结构及工作原理

冲闪测试系统由高压信号发生器和被测电缆组成,如图 1 所示^[8]。高压信号发生器首先由 220 V 交流电源经过空气开关 Q_1 、调压器 T_1 和高压变压器 T_2 产生交流高电压,然后再经过高压硅堆 V_D 和限流电阻 R 整流成直流负高压,并将能量暂时储存在脉冲电容器 C 上。放电开关 Q 一端接电容器 C 负极性端,另一端接被测电缆故障芯线。电缆多数为相-地故障,因此放电开关 Q 接被测芯线,电容器 C 正极性端与屏蔽层和铠装连接,并且需要可靠连接到大地上。测

试时,放电开关 Q 闭合,电容器 C 通过放电开关 Q 、被测电缆芯线、故障点和接地电缆屏蔽层构成的放电通路放电,构成冲闪测试放电回路。

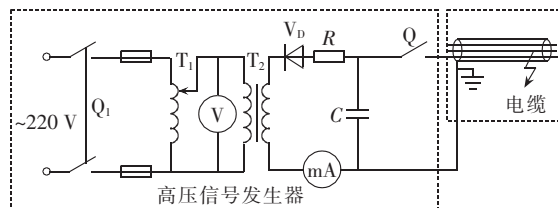


图 1 冲闪测试系统结构 1

Fig.1 Structure of impulse flashover voltage test system 1

冲闪测试系统的另一种结构形式用于二次脉冲法电缆故障测距系统^[11-12],与图 1 基本相同,区别是在放电开关 Q 和电容器 C 与限流电阻 R 的连接点之间串联一个电阻 R_z ,其取值一般为几百欧姆,如图 2 所示。测试时,放电开关 Q 闭合,电容器 C 通过电阻 R_z 、放电开关 Q 、被测电缆芯线、故障点和接地电缆屏蔽层构成放电通路放电,构成冲闪测试放电回路。

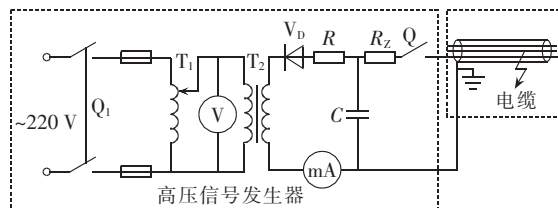


图 2 冲闪测试系统结构 2

Fig.2 Structure of impulse flashover voltage test system 2

2 建模

2.1 电力电缆的电路模型

冲闪测试过程中,在放电开关 Q 闭合或者故障点击穿时刻,相当于有阶跃信号施加到电缆上。由于

阶跃信号所含高频分量的波长远小于电缆长度或者故障距离,根据传输线理论,分析冲闪测试放电回路的电流和电压响应要采用电缆的分布电路模型。将电缆视作由许多无穷小的长度元 dx 构成的均匀传输线,每一长度元 dx 具有分布电阻 $R_0 dx$ 和分布电感 $L_0 dx$,两回路导线间具有分布电导 $G_0 dx$ 和分布电容 $C_0 dx$,构成图3所示电缆的分布电路模型^[13]。

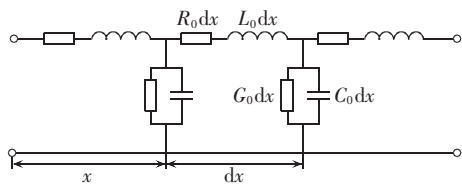


图3 电力电缆的分布电路模型

Fig.3 Distributed circuit model of power cable

冲闪测试的响应除了包含暂态高频分量,也包含暂态低频分量。如果低频信号的波长远大于电缆长度或者故障距离,在只考虑暂态低频分量的条件下,图3电路可以用一个T型等效电路代替,如图4所示^[14]。图中, R_1 、 L_1 分别是图3电路中全部分布电阻 $R_0 dx$ 和分布电感 $L_0 dx$ 串联的二等分, C_2 是全部分布电容 $C_0 dx$ 的并联, R_2 是全部分布电导 $G_0 dx$ 并联后对应的电阻。

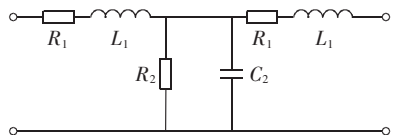


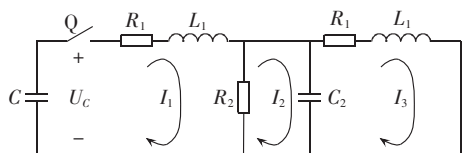
图4 电力电缆的T型等效电路

Fig.4 T-type equivalent circuit of power cable

2.2 冲闪测试放电回路建模

2.2.1 放电回路串联电阻 $R_z=0$

结合图1和图4,可以构造串联电阻 $R_z=0$ 时冲闪测试放电回路的电路模型,电路如图5所示。图中 C 是冲闪测试系统脉冲电容器, Q 是放电开关,其余部分是图4电力电缆等效电路。

图5 冲闪测试放电回路电路模型 ($R_z=0$)Fig.5 Discharge circuit model of impulse flashover voltage test system ($R_z=0$)

设电容 C 电压为 U_c , 初始值为 U_0 , 网孔电流分别为 I_1 、 I_2 和 I_3 , 同时规定电缆为零状态, 电路右端短路模拟故障点击穿后电阻为零, 开关在零时刻闭合。根据网孔法和运算法, 可以写出电路的方程:

$$\begin{aligned} \left(R_1 + R_2 + sL_1 + \frac{1}{sC}\right)I_1(s) - R_2I_2(s) &= \frac{U_0}{s} \\ -R_2I_1(s) + \left(R_2 + \frac{1}{sC_2}\right)I_2(s) - \frac{1}{sC_2}I_3(s) &= 0 \\ -\frac{1}{sC_2}I_2(s) + \left(R_1 + sL_1 + \frac{1}{sC_2}\right)I_3(s) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

求解方程组(1), 得 $I_1(s)$ 和 $U_c(s)$:

$$\begin{aligned} I_1(s) &= CU_0[s^2C_2L_1R_2 + s(L_1 + C_2R_1R_2) + (R_1 + R_2)] \div \\ &\quad [s^4CC_2L_1^2R_2 + s^3(L_1 + 2C_2R_1R_2)CL_1 + \\ &\quad s^2(2CL_1(R_1 + R_2) + C_2L_1R_2 + CC_2R_1^2R_2) + \\ &\quad s(L_1 + C_2R_1R_2 + CR_1^2 + 2CR_1R_2) + (R_1 + R_2)] \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_c(s) &= U_0[s^3CC_2L_1^2R_2 + s^2(L_1 + 2C_2R_1R_2)CL_1 + \\ &\quad s[2CL_1(R_1 + R_2) + CC_2R_1^2R_2] + \\ &\quad (CR_1^2 + 2CR_1R_2)] \div \{ (s^4CC_2L_1^2R_2 + \\ &\quad s^3(L_1 + 2C_2R_1R_2)CL_1 + \\ &\quad s^2[2CL_1(R_1 + R_2) + C_2L_1R_2 + CC_2R_1^2R_2] + \\ &\quad s(L_1 + C_2R_1R_2 + CR_1^2 + 2CR_1R_2) + (R_1 + R_2) \} \quad (3) \end{aligned}$$

式(2)(3)是4阶系统的解, 不容易求得时域表达式, 无法分析 $I_1(s)$ 和 $U_c(s)$ 的响应规律。但是, 电缆的结构和材料特性决定了参数 R_1 、 L_1 、 C_2 、 R_2 的取值有特定的关系, 可以通过分析 R_1 、 L_1 、 C_2 、 R_2 的取值寻求公式(2)(3)的近似化处理。

设 $2R_{10}$ 、 $2L_{10}$ 、 C_{20} 、 R_{20} 分别表示图4中单位长度电缆的串联电阻、串联电感、并联电容和并联电阻, l 为电缆的长度, 可得关系式:

$$R_1 = R_{10}l, \quad L_1 = L_{10}l, \quad C_2 = C_{20}l, \quad R_2 = R_{20}/l$$

其中, R_{10} 、 L_{10} 、 C_{20} 、 R_{20} 可以根据电缆的结构参数和材料参数, 通过电力电缆设计公式求出^[15]。

将上述关系式代入式(2)(3), 并忽略极小项, 结果表明, 至少在 50 km 以下时(绝大多数电力电缆都满足这一约束条件), 式(2)(3)分子的2次项、分母的3、4次项总可忽略, 且与长度无关。近似得到 $I_1(s)$:

$$I_1(s) = [CU_0(s^2l^2C_{20}R_{10} + 1)] / [s^2(2lCL_{10} + l^2C_{20}L_{10} + l^3CC_{20}R_{20}^2) + s(l^2C_{20}R_{10} + 2lCR_{10}) + 1] \quad (4)$$

计算表明, 式(4)分母多项式存在一对共轭复根, 令

$$A = l^2C_{20}R_{10}, \quad B = 2lCL_{10} + l^2C_{20}L_{10} + l^3CC_{20}R_{20}^2$$

$D = l^2C_{20}R_{10} + 2lCR_{10}$, $a = D/(2B)$, $\omega = \sqrt{1/B - a^2}$ 有

$$I_1(s) = CU_0 \frac{A}{B} \left[\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2} + \frac{2B-AD}{2AB} \frac{1}{(s+a)^2 + \omega^2} \right] \quad (5)$$

其中, a 为衰减系数; ω 为振荡频率。

根据拉普拉斯变换公式:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(s+a)^2 + \omega^2} &\leftrightarrow \frac{1}{\omega} e^{-at} \sin \omega t \\ \frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2} &\leftrightarrow \frac{1}{\omega} e^{-at} \cos \omega t \end{aligned}$$

可以得到电流响应 I_1 的时域表达式:

$$I_1(t) = e^{-at} (\alpha_1 \cos \omega t + \alpha_2 \sin \omega t) \quad (6)$$

$$\alpha_1 = CU_0 \frac{A}{B}, \quad \alpha_2 = CU_0 \frac{2B-AD}{2B\omega}$$

确定 α_1 、 α_2 、 a 、 ω 的值, 可以描述电流 I_1 的时域响应过程。

电压响应 $U_c(s)$ 与电流响应 $I_1(s)$ 特征相同, 可以类似处理, 近似表示为

$$\begin{aligned} U_c(s) &= CU_0[s(2lL_{10} + l^3C_{20}R_{20}^2) + 2lR_{10}] \div \\ &\quad [s^2(2lCL_{10} + l^2C_{20}L_{10} + l^3CC_{20}R_{20}^2) + \\ &\quad s(l^2C_{20}R_{10} + 2lCR_{10}) + 1] \quad (7) \end{aligned}$$

令

$$E=2lL_{10}+l^3C_{20}R_{10}^2, \quad F=2lR_{10}$$

有

$$U_C(s)=CU_0Y$$

$$Y=\frac{E}{B}\left[\frac{s+a}{(s+a)^2+\omega^2}+\frac{F/E-a}{(s+a)^2+\omega^2}\right] \quad (8)$$

式(4)(7)的分母多项式都存在一对共轭复根,因此在只考虑暂态低频分量信号条件下,冲闪测试放电回路(见图 1)的电流和电压响应可以近似看作是二阶衰减振荡过程。

2.2.2 放电回路串联电阻 $R_Z \neq 0$

结合图 2 和图 4,可以构造有串联电阻 R_Z 的冲闪测试放电回路的电路模型,如图 6 所示。图中 C 是冲闪测试系统脉冲电容器, Q 是放电开关, R_Z 是放电回路的串联电阻,其余部分是图 4 电力电缆等效电路。

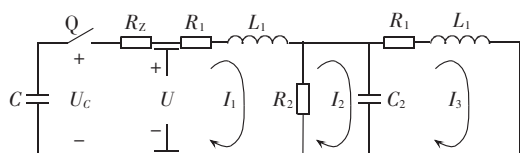


图 6 冲闪测试放电回路电路模型 ($R_Z \neq 0$)

Fig.6 Discharge circuit model of impulse flashover voltage test system ($R_Z \neq 0$)

设电容 C 电压为 U_C , 初始值为 U_0 , 网孔电流分别为 I_1 、 I_2 和 I_3 , 同时规定电缆为零状态, 电路右端短路模拟故障点击穿后电阻为零, 开关在零时刻闭合。根据网孔法和运算法, 可以写出电路的方程:

$$\left(R_Z+R_1+R_2+sL_1+\frac{1}{sC}\right)I_1(s)-R_2I_2(s)=\frac{U_0}{s}$$

$$-R_2I_1(s)+\left(R_2+\frac{1}{sC_2}\right)I_2(s)-\frac{1}{sC_2}I_3(s)=0 \quad (9)$$

$$-\frac{1}{sC_2}I_2(s)+\left(R_1+sL_1+\frac{1}{sC_2}\right)I_3(s)=0$$

由式(2), 且令

$$I_1(s)=CU_0M/N$$

方程组(9)的解可以写为

$$I_1(s)=CU_0M/[N+s^3CR_ZC_2L_1R_2+s^2CR_Z(L_1+C_2R_1R_2)+sCR_Z(R_1+R_2)] \quad (10)$$

将 $R_1=R_{10}l$, $L_1=L_{10}l$, $C_2=C_{20}l$, $R_2=R_{20}/l$ 代入式(10), 并忽略极小项, 结果表明, 至少在 50 km 以下时, 式(10)分子的 2 次项、分母的 3、4 次项总可忽略, 且与长度无关。近似得到 $I_1(s)$:

$$I_1(s)=CU_0(s^2C_{20}R_{10}+1)/\{s^2(2lCL_{10}+l^2(C_{20}L_{10}+CR_ZC_{20}R_{10})+l^3CC_{20}R_{10}^2)+s(l^2C_{20}R_{10}+2lCR_{10}+CR_Z)+1\} \quad (11)$$

令

$$A=l^2C_{20}R_{10}, \quad H=l^2C_{20}R_{10}+2lCR_{10}+CR_Z$$

$$G=2lCL_{10}+l^2(C_{20}L_{10}+CR_ZC_{20}R_{10})+l^3CC_{20}R_{10}^2$$

有

$$I_1(s)=CU_0\frac{A}{G}\left(\frac{s+1/A}{s^2+sH/G+1/G}\right) \quad (12)$$

电阻 R_Z 的值由零逐渐增大, 电流 I_1 响应依次呈现 3 种状态: 当 $H^2-4G<0$ 时, 振荡; 当 $H^2-4G=0$ 时, 临界振荡; 当 $H^2-4G>0$ 时, 过阻尼。

过阻尼响应的时域表达式为

$$I_1(t)=\beta_1e^{r_1t}+\beta_2e^{r_2t} \quad (13)$$

$$r_1=\frac{-H-\sqrt{H^2-4G}}{2G}, \quad r_2=\frac{-H+\sqrt{H^2-4G}}{2G}$$

$$\beta_1=\frac{C}{U_0}\times\frac{A}{G}\left(\frac{-H-\sqrt{H^2-4G}+2G/A}{-2\sqrt{H^2-4G}}\right)$$

$$\beta_2=\frac{C}{U_0}\times\frac{A}{G}\left(\frac{-H+\sqrt{H^2-4G}+2G/A}{2\sqrt{H^2-4G}}\right)$$

确定 β_1 、 β_2 、 r_1 、 r_2 的值, 可以完全描述电流 I_1 的时域响应过程。二次脉冲法电力电缆故障测距系统中冲闪测试放电回路串联电阻 R_Z 的取值总要满足 $H^2-4G>0$, 因此二次脉冲法电力电缆故障测距系统中冲闪测试放电回路的电流响应是过阻尼的负指数衰减过程。

电缆端头电压响应 U 可以根据图 6 电路和 I_1 求取:

$$U(t)=\left[U_0C-\int_0^t I_1(t)dt\right]/C-I_1(t)R_Z \quad (14)$$

3 模型检验

检验实验在山东科汇电力自动化有限公司电力实验室进行。设备主要有 T-302 高压信号发生器、I 号电缆(YJV 型三相 10 kV, C 相对地故障, 故障距离 123 m)、II 号电缆(YJV 型三相 10 kV, A 相对地故障, 故障距离 55 m; B 相对地故障, 故障距离 134 m)、TDS2012B 数字示波器、电流互感器和电源。实验装置框图如图 7 所示。其中高压信号发生器和被测电缆按照图 1 和图 2 连接。

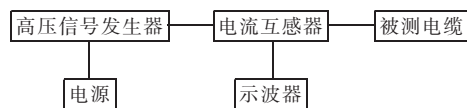


图 7 实验装置框图

Fig.7 Block diagram of experiment device

模型参数的取值按照实验设备确定, 其中电缆的参数按照 YJV 型 10 kV 电力电缆的规格尺寸和相关公式计算得到^[16]。图 5、图 6 中各元件参数取值为: $C=2\mu\text{F}$, $R_Z=314\Omega$, $R_1=0.5\times 2.293\times 10^{-3}\times l\Omega$, $L_1=0.5\times 1.896\times 10^{-7}\times l\text{H}$, $R_2=5.3\times 10^{12}/l\Omega$, $C_2=2.83\times 10^{-10}\times l\text{F}$ 。电缆故障距离 l 和高压信号发生器电压 U_0 根据实验条件确定。

模型检验的方法和步骤为: 在相同的电缆故障距离和相同的高压信号发生器电压条件下, 分别按照图 1 和图 2 电路进行冲闪测试。记录冲闪测试放电回路的电流响应, 同时计算图 1 和图 2 对应电路模型(图 5 和图 6)的电流响应, 最后将两者进行比较。

按图 1 电路模型进行实验, 电缆故障距离 $l=55\text{m}$,

高压信号发生器电压 U_0 分别为 4 kV、7 kV 和 11 kV, 实际响应与模型响应的比较如图 8~10 所示(图中曲线 1、2 分别为实际响应和模型响应曲线,下同)。

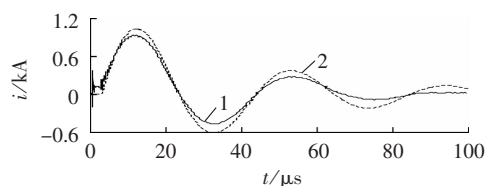


图 8 故障距离 55 m, 放电电压 4 kV 响应比较
Fig.8 Comparison between practical and model responses when fault distance is 55 m and discharge voltage is 4 kV

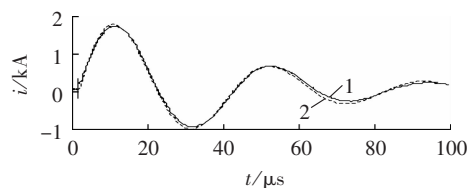


图 9 故障距离 55 m, 放电电压 7 kV 响应比较
Fig.9 Comparison between practical and model responses when fault distance is 55 m and discharge voltage is 7 kV

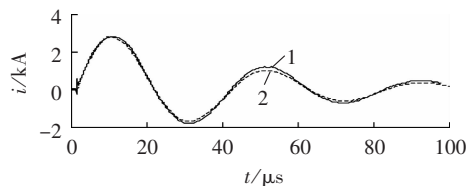


图 10 故障距离 55 m, 放电电压 11 kV 响应比较
Fig.10 Comparison between practical and model responses when fault distance is 55 m and discharge voltage is 11 kV

按照图 1 电路模型进行实验, 电缆故障距离 $l=123$ m, 高压信号发生器电压 U_0 分别为 4 kV、7 kV 和 11 kV, 实际响应与模型响应的比较见图 11~13。

按照图 1 电路模型进行实验, 电缆故障距离 $l=134$ m, 高压信号发生器电压 U_0 分别为 4 kV、7 kV 和 11 kV, 实际响应与模型响应的比较见图 14~16。

按照图 2 电路模型进行实验, 电缆故障距离 $l=55$ m, 高压信号发生器电压 U_0 分别为 10 kV、14 kV 和 24 kV, 实际响应与模型响应的比较见图 17~19。

按照图 2 电路模型进行实验, 电缆故障距离 $l=123$ m, 高压信号发生器电压 U_0 分别为 10 kV、14 kV 和 24 kV, 实际响应与模型响应的比较见图 20~22。

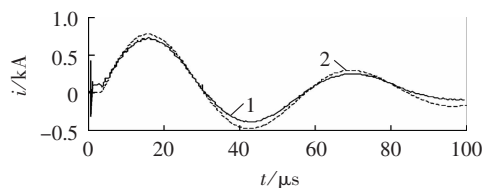


图 11 故障距离 123 m, 放电电压 4 kV 响应比较
Fig.11 Comparison between practical and model responses when fault distance is 123 m and discharge voltage is 4 kV

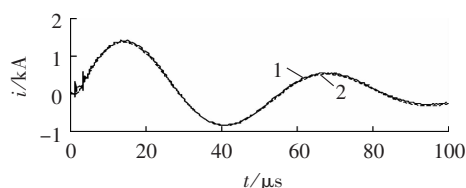


图 12 故障距离 123 m, 放电电压 7 kV 响应比较
Fig.12 Comparison between practical and model responses when fault distance is 123 m and discharge voltage is 7 kV

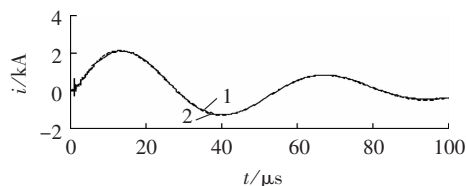


图 13 故障距离 123 m, 放电电压 11 kV 响应比较
Fig.13 Comparison between practical and model responses when fault distance is 123 m and discharge voltage is 11 kV

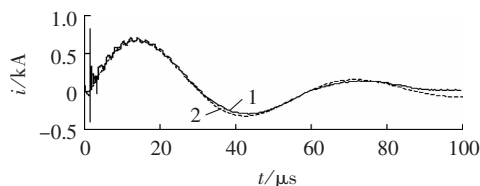


图 14 故障距离 134 m, 放电电压 4 kV 响应比较
Fig.14 Comparison between practical and model responses when fault distance is 134 m and discharge voltage is 4 kV

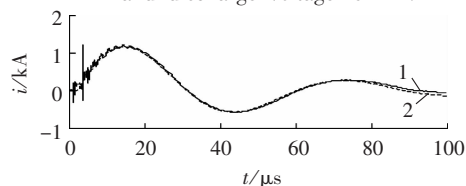


图 15 故障距离 134 m, 放电电压 7 kV 响应比较
Fig.15 Comparison between practical and model responses when fault distance is 134 m and discharge voltage is 7 kV

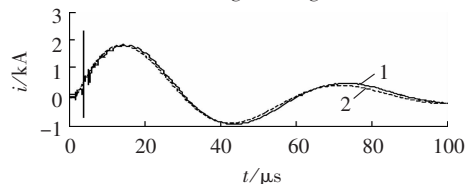


图 16 故障距离 134 m, 放电电压 11 kV 响应比较
Fig.16 Comparison between practical and model responses when fault distance is 134 m and discharge voltage is 11 kV

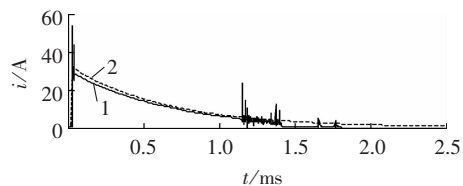


图 17 故障距离 55 m, 放电电压 10 kV 响应比较
Fig.17 Comparison between practical and model responses when fault distance is 55 m and discharge voltage is 10 kV

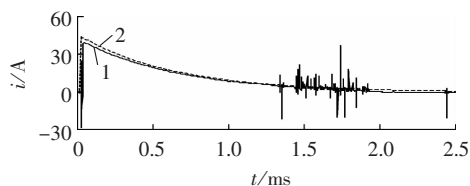


图 18 故障距离 55 m, 放电电压 14 kV 响应比较
Fig.18 Comparison between practical and model responses when fault distance is 55 m and discharge voltage is 14 kV

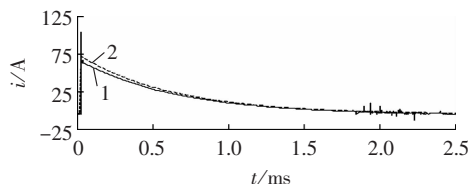


图 19 故障距离 55 m, 放电电压 24 kV 响应比较
Fig.19 Comparison between practical and model responses when fault distance is 55 m and discharge voltage is 24 kV

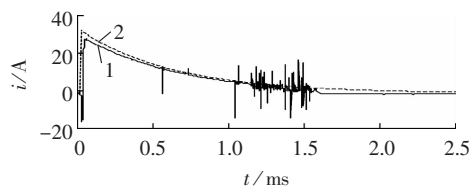


图 20 故障距离 123 m, 放电电压 10 kV 响应比较
Fig.20 Comparison between practical and model responses when fault distance is 123 m and discharge voltage is 10 kV

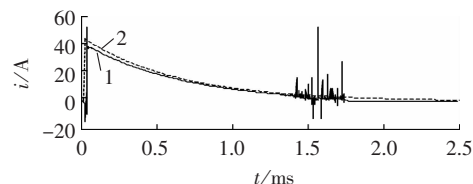


图 21 故障距离 123 m, 放电电压 14 kV 响应比较
Fig.21 Comparison between practical and model responses when fault distance is 123 m and discharge voltage is 14 kV

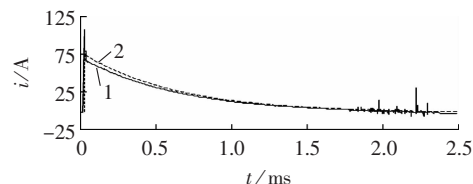


图 22 故障距离 123 m, 放电电压 24 kV 响应比较
Fig.22 Comparison between practical and model responses when fault distance is 123 m and discharge voltage is 24 kV

按照图 2 电路模型进行实验, 电缆故障距离 $l=134$ m, 高压信号发生器电压分别为 $U_0=10$ kV、14 kV 和 24 kV, 实际响应与模型响应的比较见图 23~25。

从以上各图可以看到, 实验响应信号和模型响应信号吻合良好, 说明电力电缆故障冲闪测试放电回路建模效果很好, 能够描述不同电缆长度、不同冲击电压条件下的冲闪测试放电回路响应特性。

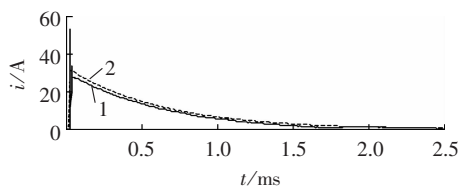


图 23 故障距离 134 m, 放电电压 10 kV 响应比较
Fig.23 Comparison between practical and model responses when fault distance is 134 m and discharge voltage is 10 kV

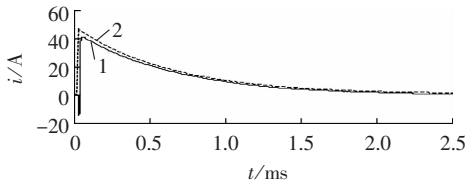


图 24 故障距离 134 m, 放电电压 14 kV 响应比较
Fig.24 Comparison between practical and model responses when fault distance is 134 m and discharge voltage is 14 kV

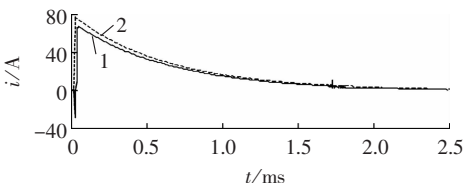


图 25 故障距离 134 m, 放电电压 24 kV 响应比较
Fig.25 Comparison between practical and model responses when fault distance is 134 m and discharge voltage is 24 kV

4 结论

a. 建立了电力电缆故障冲闪测试放电回路的模型, 给出了放电回路电流和电压响应的近似表达式以及衰减系数和振荡频率表达式, 使得冲闪测试放电过程可以定量分析。

b. 串联电阻 $R_Z=0$ 的冲闪测试放电回路电流和电压响应是二阶衰减振荡过程, 与先前相关研究结果一致。进一步分析说明, 串联电阻 $R_Z \neq 0$ 的冲闪测试放电回路电流和电压响应是负指数衰减过程, 加深了对冲闪测试放电规律的了解。

c. 建模没有考虑电缆故障点击穿后电弧电阻的非线性特征, 仅把电弧电阻作为零处理, 电缆故障点电弧电阻的特性及其对模型的影响有待继续研究。

致 谢

本文工作得到山东科汇电力自动化有限公司支持, 感谢科汇公司电力仪器研究所李化武、刘领校配合进行现场实验, 感谢官士营提供资料和实验设备。

参考文献:

- [1] 任艳霞, 刘明光, 史雪明. 电力电缆故障探测方法探讨[J]. 电力科学与工程, 2008, 24(1): 30-33.
REN Yanxia, LIU Mingguang, SHI Xueming. Survey of power cable fault detection methods[J]. Electric Power Science and Engineering, 2008, 24(1): 30-33.
- [2] 朱云华, 艾芊, 陆锋. 电力电缆故障测距综述[J]. 继电器, 2006,

- 34(14):81-88.
- ZHU Yunhua, AI Qian, LU Feng. Survey of power cable fault location[J]. Relay, 2006, 34(14):81-88.
- [3] 鹿洪刚, 覃剑, 陈祥训, 等. 电力电缆故障测距综述[J]. 电网技术, 2004, 28(20):58-63.
- LU Honggang, QIN Jian, CHEN Xiangxun, et al. Overview of power cable fault location[J]. Power System Technology, 2004, 28(20):58-63.
- [4] BASCOM E C III, von DOLLEN D W, NG H W. Computerized underground cable fault location expertise[C]//Transmission and Distribution Conference, Proceeding of the 1994 IEEE Power Engineering Society. Chicago, USA:IEEE, 1994:376-382.
- [5] WILLIS O L. A review of fault locating techniques in medium voltage power cable[C]//Petroleum and Chemical Industry Conference, Record of Conference Papers, Industry Applications Society 38th Annual. Toronto, Canada:IEEE, 1991:225-228.
- [6] LTD M. Fault finding solutions[EB/OL]. 2010[2010-03-01]. http://www.metercenter.com/biddle/FaultFinding_AG.pdf.
- [7] SUN Jiantao, WEN Xishan, WEI Xinlao, et al. Traveling wave fault location for power cables based on wavelet transform[C]//Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China:IEEE, 2007:1283-1287.
- [8] 徐丙垠, 李胜祥, 陈宗军. 电力电缆故障探测技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1999:39-56.
- [9] 刘明生. 电力电缆故障的测寻[M]. 北京:冶金工业出版社, 1985:31-39.
- [10] CLEGG B. Underground cable fault location[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1993:68-72.
- [11] 谭德清, 徐振宇. 三次脉冲法测寻电缆故障的应用[J]. 高压技术, 2004, 30(S1):50-51.
- TAN Deqing, XU Zhenyu. Application of detection of cable fault by thrice pulse method[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(S1):50-51.
- [12] 许东升, 田凤兰, 赵珩, 等. 电力电缆故障现场测距方法的研究与应用[J]. 高压电器, 2009, 45(5):136-140.
- XU Dongsheng, TIAN Fenglan, ZHAO Heng, et al. Research and application of power cable fault diagnostic method[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5):136-140.
- [13] 邱关源, 罗先觉. 电路(下册)[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:171-172.
- [14] 江缉光, 刘秀成. 电路原理(下册)[M]. 北京:清华大学出版社, 2007:295-296.
- [15] 卓金玉. 电力电缆设计原理[M]. 北京:机械工业出版社, 1999:28-35.
- [16] 机械工业部. 电线电缆产品样本(第三册)[M]. 北京:机械工业出版社, 1985:25-27.

(编辑: 柏英武)

作者简介:

李峰(1972-), 男, 山东淄博人, 博士研究生, 从事电缆故障探测技术研究和电力仪器研发工作(E-mail: lifeng_zb@163.com);

徐丙垠(1961-), 男, 山东滕州人, 教授, 博士研究生导师, 长期从事电力线路故障检测和配电自动化的研发工作(E-mail: xuby@china.com)。

Modeling of surge discharge circuit for power cable fault locator

LI Feng¹, XU Bingyin²

(1. School of Instrument Science and Photoelectric Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Zibo 255087, China)

Abstract: The current and voltage response of surge discharge circuit to impulse flashover voltage test system is analyzed. When only low frequency transient components are considered, the lumped parameter model of the surge discharge circuit of power cable fault locator is constructed based on the T-type equivalent network of uniform transmission line. According to the geometry and material specifications of power cable, as well as the relationship between its lumped and distributed parameters, the approximate expressions of current and voltage response, as well as the expressions of current attenuation coefficients and oscillation frequency of current response, are deduced. When the series resistance in surge discharge circuit is zero, the current and voltage response are approximately the second-order decaying vibration process. When the series resistance is not zero, the current response to the secondary impulse method is the over-damped negative-exponent decaying process. The results of model calculation are consistent with the experimental results, verifying the correctness of the modeling.

Key words: power cable; fault locating; impulse flashover voltage test; discharge circuit; secondary impulse method