

边界保护的理论基础

第二部分:线路边界的折、反射系数的频谱

哈恒旭,张保会,吕志来

(西安交通大学电气学院, 陕西 西安 710049)

摘要:在第一部分中,对故障产生的暂态进行了分析,发现区内外故障暂态分量的频谱差异主要与线路边界的折、反射系数的频谱有关。本文是第二部分,主要探讨了两类母线的接线情况下,线路边界的折、反射系数的频谱特征。同时,还分析了当线路上接有三相阻波器时,对线路边界折、反射系数频谱特征的影响。最后在折、反射系数频谱特征的基础上,分析了区内外故障时暂态分量频谱的具体差异。

关键词:折、反射系数; 线路边界; 阻波器; 杂散电容

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)10-0001-05

1 引言

通过第一部分中对输电线路的故障暂态分析,发现区内外故障时暂态分量的频谱特征的差异是否存在,以及在哪个频带内的差异更为明显,主要取决于线路边界的折、反射系数的频谱特征。不同故障方向时暂态分量的差异取决于线路边界的反射系数,正方向区内外故障时暂态分量的差异取决于线路边界折射系数。

本文根据母线的接线方式,把母线分为两种类型^[1],除了被研究线路以外还有其他出线的母线称为第一类母线;除了被研究线路以外没有其他出线的母线称为第二类母线。分别对两类母线的折、反射系数的频谱特性进行了分析,并分析了当线路接有三相阻波器时对母线折、反射系数的影响,最后理论上分析了区内外故障时的暂态分量差异的频谱特征。

2 折、反射系数的求取

为了方便分析阻波器对折、反射系数的影响,在求解折、反射系数时,把阻波器包含在内,当没有阻波器时,只需令折、反射系数表达式中的阻波器阻抗为零即可。

2.1 第一类母线的折、反射系数

假设除了被研究线路以外,还有 n 条出线,并假设它们的波阻抗都为 Z_c 。 C_s 为母线和变压器等元件的对地杂散电容, Z_t 为阻波器的阻抗。前行波、反行波、以及电压电流的参考方向如图 1 所示。

2.1.1 反射系数

如图 1(a) 所示,假设入射波 W_i 从被研究线路传

播到线路边界点 L ,同时产生一个反射波 W_r ,并透过母线在其它各个线路上产生折射波 W_{z1} 、 W_{z2} 、...、 W_{zn} 。根据图中所示的参考方向,入射波为被研究

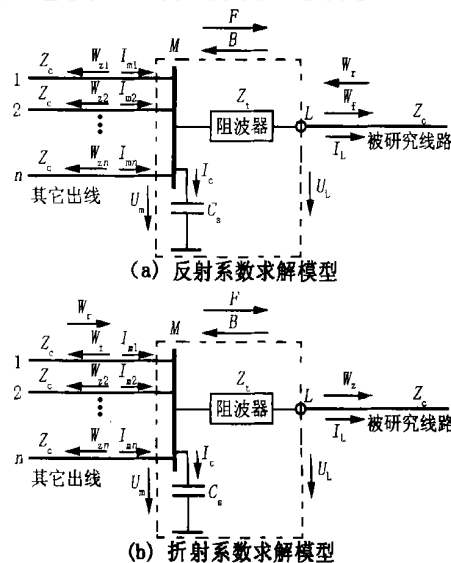


图 1 第一类母线接线

Fig. 1 The connection of line boundary class

线路在边界 L 点的反行波 $W_r = B_L$,反射波为被研究线路在边界点 L 的前行波 $W_i = F_L$,在其他各条线路上的折射波为其反行波 $W_{z1} = B_1$, $W_{z2} = B_2$, ..., $W_{zn} = B_n$ 。根据行波理论可知,在被研究线路边界点 L 处的电压电流分别为: $U_L = (F_L + B_L)/2$, $I_L = (F_L - B_L)/(2Z_c)$ 。由于在其他线路上只有反行波,因此,其他线路的边界点处的电压和电流分别为: $U_{m1} = B_1/2$, $U_{m2} = B_2/2$, ..., $U_{mn} = -B_n/2$, $I_{m1} = B_1/(2Z_c)$, $I_{m2} = B_2/(2Z_c)$, ..., $I_{mn} = -B_n/(2Z_c)$ 。由于其他各条线路的边界点都在同一点 M ,因此, $U_m =$

$U_{m1} = U_{m2} = \dots = U_{mn}$, 进而有 $B_1 = B_2 = \dots = B_n$ 。根据 KCL 定理, $I_L + I_c = I_{m1} + I_{m2} + \dots + I_{mn}$, 因此有如下方程:

$$\frac{F_L - B_L}{2 Z_c} + j\omega C_s \cdot \frac{B_1}{2} = \frac{nB_1}{2 Z_c} \quad (1)$$

根据 KVL 定理, $U_m - I_L Z_t = U_L$, 因此可得方程:

$$\frac{B_1}{2} - Z_t \frac{F_L - B_L}{2 Z_c} = \frac{F_L + B_L}{2} \quad (2)$$

方程 (1) (2) 联立可解得线路边界的反射系数:

$$K_r = \frac{W_r}{W_i} = \frac{F_L}{B_L} = \frac{Z_c - (n + j\omega C_s Z_c)(Z_c - Z_t)}{Z_c + (n + j\omega C_s Z_c)(Z_c + Z_t)} \quad (3)$$

2.1.2 折射系数

如图 1(b) 所示, 假设入射波 w_r 从其他线路 (例如线路 1) 传播到母线 M , 同时产生反射波 w_f , 一部分入射波透过母线传播到被研究线路上产生折射波 w_z , 一部分传播到其余线路中产生折射波 $w_{z2}, \dots, w_{zn}$ 。根据图中所示的参考方向, 在线路 1 中入射波即为其前行波, 反射波为其反行波, $w_r = F_1, w_f = B_1$; 在被研究线路中, 折射波为其前行波, $w_z = F_L$; 在其余的各条线路中, 折射波为其反行波, $w_{z2} = B_2, \dots, w_{zn} = B_n$ 。根据行波理论, 线路 1 在边界处的电压电流分别为: $U_{m1} = (F_1 + B_1)/2, I_{m1} = (F_1 - B_1)/(2 Z_c)$ 。由于被研究线路上只有前行波, 因此被研究线路在边界 L 处的电压和电流分别为: $U_L = F_L/2, I_L = B_L/2$ 。其余各条线路上只有反行波, 因此其余线路在边界点 M 处的电压和电流分别为: $U_{m2} = B_2/2, \dots, U_{mn} = B_n/2, I_{m2} = -B_2/(2 Z_c), \dots, I_{mn} = -B_n/(2 Z_c)$ 。根据 KCL 定理: $I_{m1} + I_{m2} + \dots + I_{mn} = I_L + I_c$, 将上述关系代入可得方程:

$$\frac{F_1 - B_1}{2 Z_c} - \frac{B_2}{2 Z_c} - \dots - \frac{B_n}{2 Z_c} = \frac{F_L}{2 Z_c} + j\omega C_s \frac{F_1 + B_1}{2} \quad (4)$$

除被研究线路外, 其它线路的边界点都是 M , 因此 $U_{m1} = U_{m2} = \dots = U_{mn}$, 即 $F_1 + B_1 = B_2 = \dots = B_n$ 代入方程 (4) 可得:

$$\frac{F_1 - B_1}{2 Z_c} - \frac{(n-1)(F_1 + B_1)}{2 Z_c} = \frac{F_L}{2 Z_c} + j\omega C_s \frac{F_1 + B_1}{2} \quad (5)$$

根据 KVL 定理, $U_m - I_L Z_t = U_L$, 可得方程:

$$\frac{F_1 + B_1}{2} - Z_t \frac{F_L}{2 Z_c} = \frac{F_L}{2} \quad (6)$$

方程 (5)、(6) 联立可解得折射系数:

$$K_z = \frac{W_z}{W_r} = \frac{F_L}{F_1} = \frac{2 Z_c}{Z_c + (n + j\omega C_s Z_c)(Z_c + Z_t)} \quad (7)$$

2.2 第二类母线的折、反射系数

第二类母线是指除了被研究线路外不再有其他出线, 如图 2 所示。 C_s 为母线和变压器等元件的杂散电容, 阻波器阻抗为 Z_t , 线路波阻抗为 Z_c 。前行波、反行波以及电压、电流的参考方向如图 2 所示。

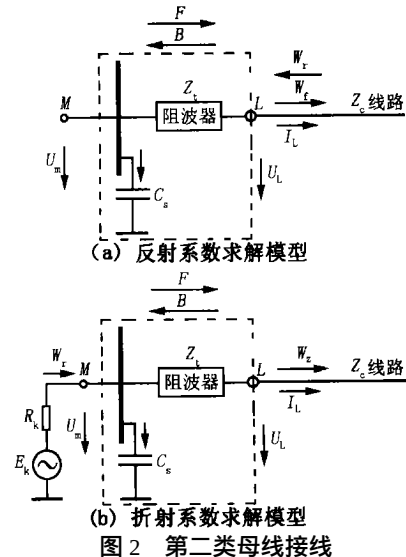


图 2 第二类母线接线

2.2.1 反射系数

如图 2(a) 所示, 入射波 w_r 从线路传播至线路边界点 L , 同时发生反射, 产生反射波 w_f , 并透过母线的杂散电容注入大地。根据图中所示的参考方向, 在线路边界 L 点, 入射波是其反行波, 反射波是其前行波, 即 $w_r = B_L, w_f = F_L$ 。在线路边界点 L 处的电压电流分别为: $U_L = (F_L + B_L)/2, I_L = (F_L - B_L)/(2 Z_c)$, 根据 KVL 定理, $U_L = -(Z_t + 1/j\omega C_s) I_L$, 因此有方程:

$$\frac{F_L + B_L}{2} = - (Z_t + \frac{1}{j\omega C_s}) \frac{F_L - B_L}{2 Z_c} \quad (8)$$

解之可得反射系数:

$$K_r = \frac{W_r}{W_i} = \frac{F_L}{B_L} = \frac{1 - j\omega C_s (Z_c - Z_t)}{1 + j\omega C_s (Z_c + Z_t)} \quad (9)$$

2.2.2 折射系数

如图 2(b) 所示, 假设故障附加电源 E_k 经过渡电阻 R_k 连接到母线 M 点, 电源产生的入射波即为该电源的电势, 即 $w_r = E_k$ 。该入射波透过母线传播到线路边界 L 点, 产生线路上的折射波 w_z , 根据图中所示的参考方向, 线路上的折射波即为其前行波, 即 $w_z = F_L$ 。则在线路边界点 L 处的电压和电流

为: $U_L = F_L/2$, $I_L = F_L/(2Z_c)$ 。根据 KVL 定理, $U_m = Z_t I_L + U_L$, $E_k - I_m R_k = U_m$, 可得方程:

$$E_k - R_k \frac{F_L}{2Z_c} - Z_t (1 + j\omega C_s R_k) \frac{F_L}{2Z_c} = (1 + j\omega C_s R_k) \frac{F_L}{2} \quad (10)$$

解之可得折射系数:

$$K_r = \frac{W_z}{W_r} = \frac{F_L}{E_k} = \frac{2Z_c}{R_k + (1 + j\omega C_s R_k)(Z_c + Z_t)} \quad (11)$$

3 折、反射系数的频谱

折、反射系数的频率特性与杂散电容的容值以及阻波器的阻抗特性有关,下面将具体分析折、反射系数频谱的频谱特征。

3.1 没有阻波器时折、反射系数的频谱

3.1.1 第一类母线

对于第一类母线,当不考虑阻波器时,影响折射系数的频谱特征的元素有两个,一是杂散电容的容值 C_s ,二是出线数 n 。假定波阻抗 $Z_c = 300 \Omega$,当出线数为定值(例如 $n=2$)不同杂散电容容值的折、反射系数的频谱如图3所示。当杂散电容为定值(取 $C_s = 0.1 \mu F$),不同出线数 n 的频谱如图4所示。

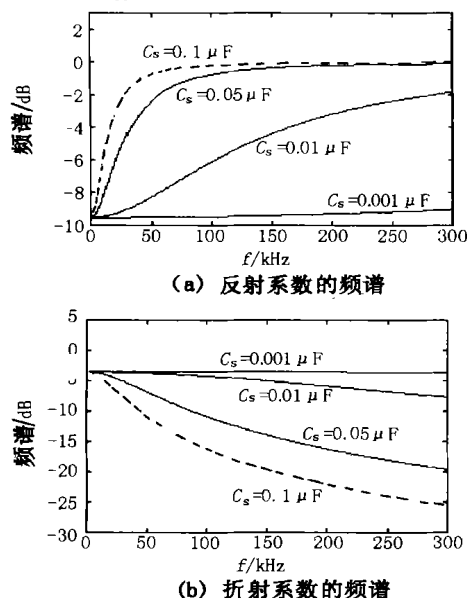


图3 第一类母线折、反射系数的频谱

Fig. 3 The spectrum of reflective and refractive coefficient of line boundary class

结合折、反射系数的表达式(3)和(7),第一类母线折、反射系数频谱有如下特征:(1)反射系数随着频率的增大从 $(n-1)/(1+n)$ 逐渐上升趋近 1;折射

系数随频率的增大从 $2/(1+n)$ 逐渐衰减到 0。(2)杂散电容的容值越大,反射系数上升得越快,折射系数衰减的也越快。(3)在高频段,出线数 n 对折、反射系数的频谱特征影响不大。

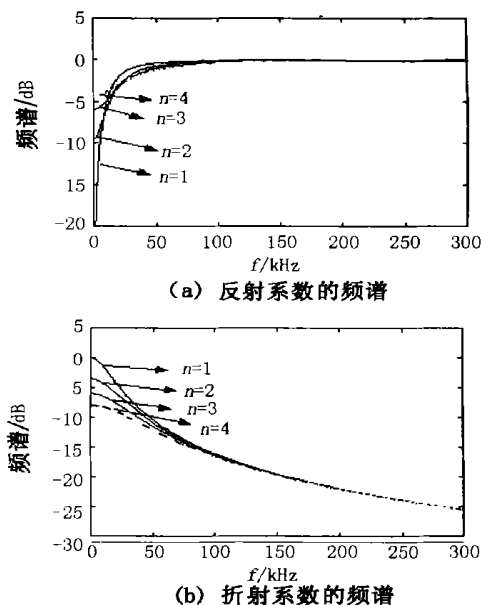


图4 其余出线数 n 对折、反射系数频谱的影响

Fig. 4 The effect of the other line number for spectrum of reflective and refractive coefficient

3.1.2 第二类母线

对于第二类母线,不考虑阻波器时,反射系数 $K_r = (1 - j\omega C_s Z_c)/(1 + j\omega C_s Z_c)$,它的模值是常数 1。而折射系数的频谱特征与杂散电容的容值和故障过渡电阻 R_k 有关。当过渡电阻一定时(设 $R_k = 50 \Omega$),不同杂散电容容值情况下的母线折射系数频谱如图5(a)所示,当杂散电容一定时(取 $C_s = 0.1 \mu F$),不同过渡电阻情况下的折射系数的频谱如图5(b)所示。

当没有阻波器时,第二类母线的反射系数的模值是常数 1,杂散电容不改变其幅频特性。折射系数由于杂散电容的作用随频率的增大从 $(2Z_c)/(R_k + Z_c)$ 衰减到 0;杂散电容越大,衰减越快,当杂散电容为零时,折射系数等于常数 $(2Z_c)/(R_k + Z_c)$ 。过渡电阻对折射系数的频谱也有很大影响,过渡电阻越大,随频率的增大衰减越快,当过渡电阻为零时,折射系数为常数值 2。

3.2 阻波器对折、反射系数频谱的影响

3.2.1 阻波器阻抗频率特性^[2]

具有阻波器线路边界的折、反射系数的频谱与阻波器的阻抗频率特性息息相关,根据调谐回路的

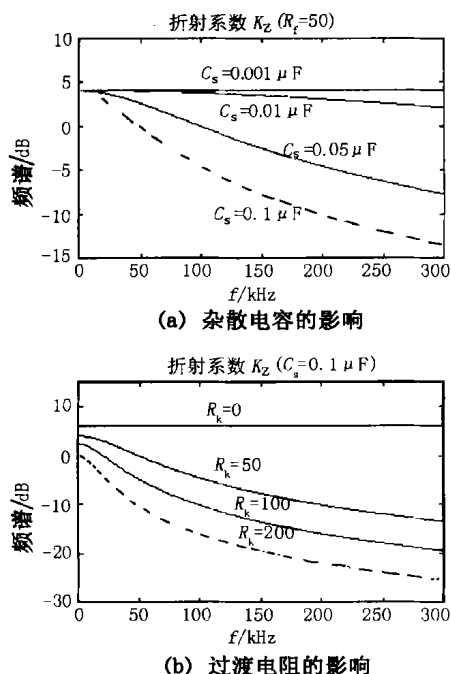


图5 第二类母线折射系数频谱

Fig. 5 The spectrum of refractive coefficient for boundary class

不同阻波器可以分为如下几种类型:单频调谐、双频调谐、固定宽带调谐、可调宽带调谐等几种类型。为了说明问题,以国产 XZK-3150-2.0/63-T6 型宽带阻波器为例,根据其提供的技术参数,阻塞阻抗 $|Z_b| \geq 800 \Omega$ 或阻塞电阻 $|R_b| \geq 570 \Omega$, 宽带频率范围为 $40 \sim 160 \text{ kHz}$, 其阻抗的频率特性如图 6 所示。

3.2.2 阻波器对折、反射系数频谱的影响

假设 $C_s = 0.1 \mu\text{F}$, 线路波阻抗为 300Ω , 当线路边界上接有上述类型的阻波器时, 两类母线的折、反射系数频谱如图 7 所示。由于阻波器在阻波频带内呈现大阻抗而在其他频带内阻抗几乎为零, 因此, 阻波器对折、反射系数的影响只体现在阻波频带内。在阻波频带内, 相比没有阻波器情况下, 反射系数有衰减(最大约为 4 dB), 折射系数有更大的衰减(约为 30 dB)。

4 区内外故障的频谱差异

4.1 不同故障方向的差异

前面对故障暂态分析可知, 不同故障方向时暂态分量的差异取决于线路边界的反射系数: 正方向故障时, $|R_1| = |B_m/F_m| = |1/K_{m,f}|$, $|R_2| = |U_m/I_m| = |(1 + K_{m,f})Z_c/(K_{m,f} - 1)|$, 如果将反射系数的表达式代入 R_2 中, 第一类母线情况下 $|R_2| =$

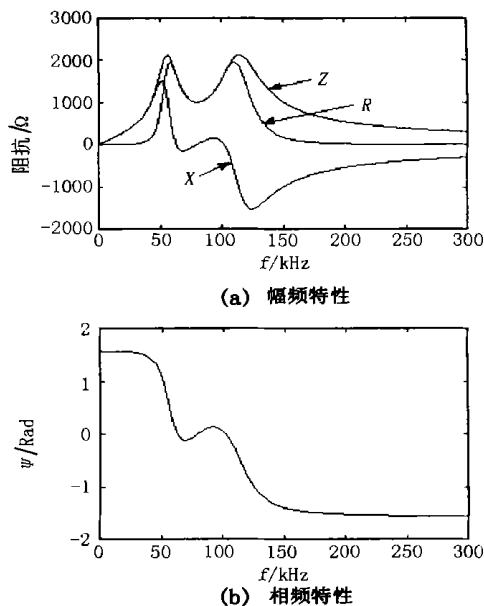


图6 某宽带阻波器阻抗的频率特性

Fig. 6 The spectrum of band width line trap

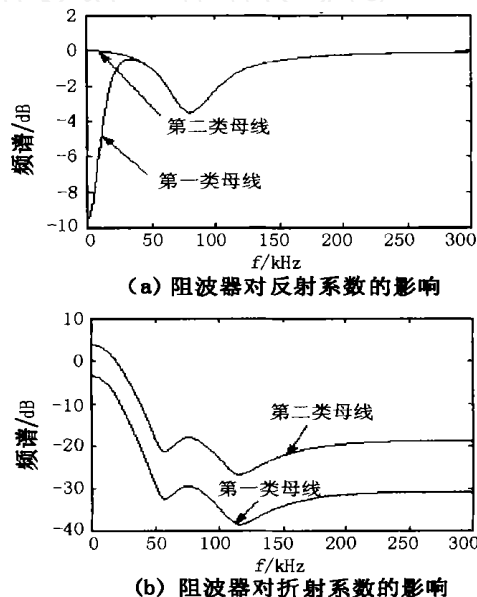


图7 阻波器对折、反射系数频谱的影响

Fig. 7 The spectrum of reflective and refractive coefficient for boundary with line traps

$|U_m/I_m| = \left| Z_t + \frac{Z_c}{n} // \frac{1}{j\omega C_s} \right|$, 第二类母线情况下 $|R_2| = |Z_t + 1/j\omega C_s|$, 刚好是从线路边界向母线看过去的等效阻抗; 反方向故障时, 在故障后的时间段 $[0, 2T]$ 内, $|R_1| = |B_m/F_m| = |A_1 K_{m,f}| = 0$, $|R_2| = |U_m/I_m| = Z_c$ 。

对于 R_1 , 由于反射系数始终小于 1, 因此正方向故障时 $|R_1| > 1$, 而反方向故障时, 在故障后的时间

段 $[0, 2T]$ 内 $|R_1| = 0$ 。在任何频带内它们的差别都足够大,当有阻波器时,由于反射系数在阻波器阻频频带内有衰减,因此相比较而言,阻波频带内的差异最为明显。对于 R_2 ,如果没有阻波器时,正方向故障时, $|R_2| = Z_c / \sqrt{1 + \omega^2 C_s^2 Z_c^2}$,反方向故障时其值为 Z_c ,因此频带取得越高,正方向故障时的 $|R_2| \ll Z_c$ 。当有阻波器时,因为阻波器阻抗在阻波频带内呈现大阻抗,因此正方向故障时, $|R_2|$ 在该频带内也呈现很大的值,因此在阻波频带内的差异最大。

4.2 正方向区内外故障差异

正方向区内外故障时暂态分量的频谱差异主要在初始行波中,具体差异取决于线路边界的折射系数。区内故障时的初始行波为 $|S_0| = |2Z_c E_k / (Z_c + R_k)|$,区外故障时 $|S'_0| \approx |K_{n,z} E_k|$ 。

区内故障时初始行波中的高频分量没有衰减,当过渡电阻为0时, $|S_0| = 2|E_k|$;区外故障时,在没有阻波器情况下,由于折射系数随频率的增大而衰减至0,高频分量有衰减,如果所选择的频带越高,这一差异就越明显(对于第二类母线,当过渡电阻为零时,由于此时折射系数为常数2,因此在这种情况下,区内外故障没有差异,因此没有阻波器的第二类母线接线的线路在区外发生金属性故障时是无法区分的)。

当有阻波器时,由于在阻波频带折射系数有很大的衰减,因此区外故障时的初始行波在阻波频带有大量的衰减,区内外故障的差异在该频带内最为明显。对于第二类母线,即使过渡电阻为零,差异也十分明显。

5 结论

通过对两类母线折、反射系数的频谱分析,发现折、反射系数具有这样的频谱特征:对于第一类母线,当没有阻波器时,反射系数随着频率的增大,从

$(n-1)/(n+1)$ 逐渐上升趋近1,折射系数从 $2/(1+n)$ 逐渐衰减趋近零;第二类母线的反射系数不随频率的变化而变化,其模值是常数1,折射系数随频率的增大从 $2Z_c/(R_k + Z_c)$ 衰减至0。阻波器对折、反射系数的频谱特征的影响主要在阻波频带内,它使得反射系数在该频带内有一定的衰减,使折射系数在该频带内有很大的衰减。

根据线路边界折、反射系数的频谱特征,区内外故障时暂态分量频谱的具体差异为:(1)正方向故障时, $|R_1| \geq 1$;反方向故障时,在故障后 $[0, 2T]$ 时间段内, $|R_1| = 0$ 。(2)正方向故障时,在没有阻波器的情况下, $|R_2|$ 在频率很高的频带内,远小于线路波阻抗 Z_c ;在有阻波器的情况下,在阻波频带内,其值远大于波阻抗 Z_c 。反方向故障时,在 $[0, 2T]$ 时间段内 $|R_2| = Z_c$ 。(3)正方向区内故障时,暂态分量频谱在任何频带内均无衰减;区外故障时,在没有阻波器的情况下,暂态分量频谱在高频频带内有衰减,频率越高衰减越大;在有阻波器的情况下,暂态分量频谱在阻波频带内的衰减很大。

参考文献:

- [1] 徐丙寅. 利用暂态行波的输电线路故障测距技术[D]. 西安:西安交通大学博士学位论文,1991.
- [2] IEEE Power Engineering Society. IEEE Guide for Power Line Carrier Application[R]. New York, USA: IEEE, 1982.

收稿日期: 2002-03-20

作者简介:

哈恒旭(1972-),男,博士,研究方向为电力系统继电保护;

张保会(1953-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护及通讯;

吕志来(1973-),男,博士,研究方向为电力系统稳定性分析。

The spectrum analysis of fault transients for transmission lines

Part II: Spectrum of reflection and refraction coefficient

HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui, LV Zhi-lai

(Dept. of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an 710049, China)

Abstract: In the first part of the whole paper, the fault-induced transients are analyzed making conclusions that the different character of transients between internal and external fault are controlled by reflection and refraction coefficient at line boundary. This paper is the second part, which presents the characteristic of reflection and refraction coefficient spectrum at line boundary. The line boundary conditions are classified two categories: Line boundary class I, which have other transmission lines connected at bus-bar except studied line, and class II, which have no other lines at bus-bar. The affect of coefficient spectrum by line traps is also described here. Based on the spectrum of reflection and refraction coefficient the different characters of fault induced transient spectrum between internal and external fault are also showed following.

Key words: reflection and refraction coefficient; line boundary; line traps; bus-bar capacitance