

近区故障线路侧波过程及暂态恢复电压的分析与研究

特高压断路器开断近区故障后，线路侧分布电容存储有一定的电场能量，将在线路侧的分布电容和分布电感之间进行电磁能量交换，在几十个微秒内形成上升率很高的锯齿波形暂态恢复电压（TRV）。通过求解无损耗均匀传输线电压方程，结合电流过零瞬间线路上初始条件，电压波的解答为初始时刻在线路上幅值大小相等、极性相同的左行波和右行波，进一步计算与讨论了左行波和右行波在线路上的波过程。应用对称分量法和单相线路上的行波解答，提出了一种以分布参数理论来计算与评估近区故障线路侧TRV峰值系数的新方法。最后，给出了在大容量试验站额定电压800 kV，额定短路电流63 kA的特高压断路器进行1/2极近区故障线路侧TRV的型式试验验证。

史宏伟¹ 叶丽慧² 高享想¹ / 1. 西安高压电器研究院有限责任公司 2. 厦门ABB开关有限公司

0 引言

近区故障为发生在架空线上，距断路器端子距离短，但还有一定距离处的（这一距离不超过几公里）短路故障。近区故障的短路电流较断路器出线端故障的短路电流小，但是断路器开断近区故障后，线路侧分布电容上存储的电场能力将分布电容与分布电感间引起波过程，形成上升率很快的起始暂态恢复电压导致断路器开断近区故障的难度^[1]。

近区故障属于单相接地故障，或者三相接地故障对应的最后开断极的工况（涵盖了首开极的工况），因此近区故障的首开极系数为1。在国际标准IEC 62271-100及国家标准GB 1984—2014中规定，对于额定电压24 kV及以上、额定短路开断电流大于12.5 kA的S2级断路器要求具有近区故障特性。对于额定电

压126 kV及以上的断路器要求具有近区故障特性。进行近区故障试验的目的是确定断路器在近区故障条件下，瞬态恢复电压由电源侧和线路侧组合时断路器开断短路电流的能力^[2-5]。

目前，高压交流断路器开断近区故障的能力通过在大容量试验站进行型式试验验证。本文将研究断路器开断近区故障时线路侧的波过程及数值解答，并结合对称分量法^[6]和波过程理论^[7]计算和评估线路侧起始阶段的暂态恢复电压。

1 近区故障及线路侧波过程

1.1 近区故障

电力系统中断路器开断近区故障的原理如图1所示。图1中， U_G 为电源电压； X_S 为电源侧电抗； X_L 为线路侧电抗；CB为断路器； I_S 为额定短路开断电流； I_L 为近区故障开断电流。

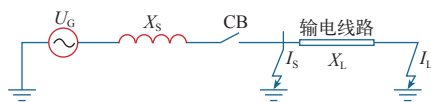


图1 近区故障示意图

不考虑断路器弧压和弧后电流的影响，断路器开断近区故障时，沿线路电压降的有效值为

$$U_L = X_L I_L = U_G - X_S I_L = U_G \left(1 - \frac{I_L}{I_S} \right) \quad (1)$$

电流过零瞬间电源电压达到最大值，断路器开断点的电压瞬时值为 $\sqrt{2}U_L$ ，故障点的电压瞬时值为0。该电压降经过在开断点和故障点之间的沿线路的一系



史宏伟/工程师

关键词/Keywords

近区故障 ·
波过程 ·
TRV ·
左行波 ·
右行波 ·

列行波来回反射, 然后衰减到零, 在线路上产生锯齿波形的振荡恢复电压。标准中定义线路侧起始暂态恢复电压第一波峰幅值

$$u_L^* = k\sqrt{2}U_L = kI_L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

式中, k 为线路侧峰值系数。根据线路侧的波阻抗 Z , 线路侧暂态恢复电压的上升率(RRRV)为

$$\frac{du_L}{dt} = Z \frac{di_L}{dt} \quad (3)$$

根据上式可以得出到达第一波峰幅值 u_L^* 的时间(单位为 μs)

$$t_L = \frac{u_L^*}{RRRV} = \frac{kI_L}{Z} \mu s \quad (4)$$

GB 1984—2014中给出近区故障线路特性的标准值波阻抗 $Z=450 \Omega$, 峰值系数 $k=1.6$, 这些参数是由线路参数和线路侧的波过程所决定的。

1.2 线路侧波过程

断路器开断近区故障后, 电源侧和线路侧变为两个独立的回路, 可分别单独进行分析。电弧过零开断瞬间, 线路侧电压沿线线性分布, 到短路点降为零电位。当短路故障开断后, 线路上的分布电容存储有电场能量, 线路上的电容将对线路上的电感放电, 电场能量转换为磁场能量; 然后, 线路上的电感将对线路上的电容充电, 磁场能量转换为电场能量。电磁能量在线路上发生周期性的交换, 并将在线路上形成振荡的电磁波。

假设输电线路为无损耗均匀传输线, 即忽略沿线分布的电阻和电导, 只考虑电感和电容, 根据电磁场理论, 可以得到电压和电流对空间坐标 x 和时间坐标 t 的二阶微分方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中, L_0 、 C_0 分别为线路上单位长度的高频电容、电感值, 求解上述方程, 可以得到电压和电流的通解为

$$u(x, t) = f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) + f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (6)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z} \left[f_1\left(t - \frac{x}{v}\right) - f_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \right] \quad (7)$$

式中, Z 为线路上的波阻抗, $Z = \sqrt{L_0 / C_0}$; v 为线路上的波速, $v = 1 / \sqrt{L_0 C_0}$ 。如图2所示, $f_1(t - x/v)$ 为沿着线路向短路点移动的右行波, $f_2(t + x/v)$ 沿着线路向开断点移动的左行波。从图2中可以看到, 右行波的电压和电流极性相同, 左行波的电压和电流极性相反。

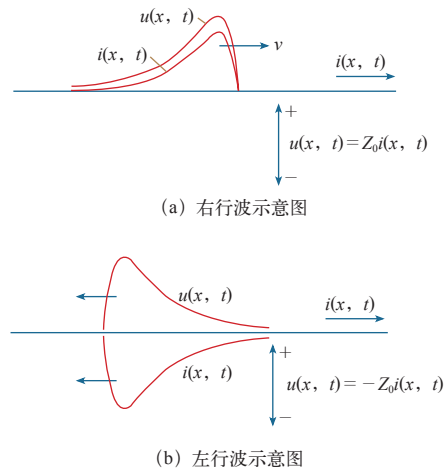


图2 电压及电流解的示意图

当短路故障开断时, 电弧在电流过零熄弧, 线路上在 $t=0$ 时, 电压和电流初始条件为

$$\begin{cases} u|_{x=0} = \sqrt{2}U_L, & u|_{x=\lambda} = 0 \\ i = 0 & x = 0 \sim \lambda \end{cases} \quad (8)$$

式中, λ 为开断点到故障点的距离。根据式(8)可以得出结论: 在 $t=0$ 时, 电压右行波和左行波沿线分布时幅值相同、极性相同, 分别为沿线分布电压值的1/2; 电流右行波和左行波沿线分布时幅值相同、极性相反, 总电流在线路上处处为零值。

根据上述结论, 电压右行波和电压左行波将在断路器开断点和故障点之间发生波过程, 当波到达断路器开断点和短路故障点这两个不连续点的时候, 由于终端阻抗不匹配会导致发生反射, 假设 Z_L 为开断点或故障点的阻抗, 根据行波理论可以得知电磁波在不连续点的反射系数为

$$r = \frac{Z_L - Z}{Z_L + Z} \quad (9)$$

2 近区故障线路侧波过程的数值解答

在进行波过程求解之前作出以下规定：①在波过程中向右移动的波称之为右行波，向左移动的波称之为左行波；②当右行波传播到故障点后发生反射将向左移动，成为左行波新的成分；③当左行波传播到开断点后发生反射将向右移动，成为右行波新的成分。因此，右行波可以理解为故障点的入射波和开断点的反射波，左行波可以理解为开断点的入射波和故障点的反射波。

断路器开断点的阻抗为 $Z_L = \infty$ ，根据式(9)可以得出，断路器开断点的反射系数为1，这表明当电磁波沿着线路到达开断点时，反射波就等于正的入射波；同理，开断点的阻抗为 $Z_L = 0$ ，故障点的反射系数为-1，这表明当电磁波沿着线路到达短路点时，反射波就等于负的入射波。因此，可以得出不同时间，电压右行波、左行波及总的电压波在线路上的分布值分别如表1~表3所示。

表1 电压左行波随着传播时间的变化在线路上的分布值

(单位: pu)

时间	线路上各点位置				
	0	$\lambda/4$	$\lambda/2$	$3\lambda/4$	λ
0	1	0.75	0.5	0.25	0
0.25	0.75	0.5	0.25	0	-0.25
0.5	0.5	0.25	0	-0.25	-0.5
0.75	0.25	0	-0.25	-0.5	-0.75
1	0	-0.25	-0.5	-0.75	-1
1.25	-0.25	-0.5	-0.75	-1	-0.75
1.5	-0.5	-0.75	-1	-0.75	-0.5
1.75	-0.75	-1	-0.75	-0.5	-0.25
2	-1	-0.75	-0.5	-0.25	0

表2 电压右行波随着传播时间的变化在线路上的分布值

(单位: pu)

时间	线路上各点位置				
	0	$\lambda/4$	$\lambda/2$	$3\lambda/4$	λ
0	1	0.75	0.5	0.25	0
0.25	0.75	1	0.75	0.5	0.25
0.5	0.5	0.75	1	0.75	0.5
0.75	0.25	0.5	0.75	1	0.75
1	0	0.25	0.5	0.75	1
1.25	-0.25	0	0.25	0.5	0.75
1.5	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5
1.75	-0.75	-0.5	-0.25	0	0.25

(续)

时间	线路上各点位置				
	0	$\lambda/4$	$\lambda/2$	$3\lambda/4$	λ
2	-1	-0.75	-0.5	-0.25	0

表3 总电压波随着传播时间的变化在线路上的分布值

(单位: pu)

时间	线路上各点位置				
	0	$\lambda/4$	$\lambda/2$	$3\lambda/4$	λ
0	2.0	1.5	1.0	0.5	0
0.25	1.5	1.5	1.0	0.5	0
0.5	1.0	1.0	1.0	0.5	0
0.75	0.5	0.5	0.5	0.5	0
1	0	0	0	0	0
1.25	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0
1.5	-1.0	-1.0	-1.0	-0.5	0
1.75	-1.5	-1.5	-1.0	-0.5	0
2	-2.0	-1.5	-1.0	-0.5	0

表1~表3中时间标么值的基值为 λ/v ，电压标么值的基值为 $\sqrt{2}U_L/2$ 。表1、表2分别描述了左行波和右行波在2.0(pu)的时间内，沿着线路上的5个典型位置的标么值。

表3描述了总的电压波在2.0(pu)的时间内，沿着线路上的5个典型位置的标么值，从表3中可以看出在时间为2.0(pu)时，线路侧的峰值电压为 $2\sqrt{2}U_L$ ，为两倍的开断点的电压瞬时值。

3 近区故障线路侧TRV峰值系数评估

上述分析了单相线路上的波过程，IEC/IEEE标准中定义近区故障为单相接地故障或开断三相接地故障的最后开断极。因此，断路器开断近区故障为开断不对称短路，假设故障相位A相，开断瞬间线路侧A相的电压有效值为 U_L ，B、C相的电压为零，根据对称分量法可以得出线路侧A相的正序、负序和零序电压分别为 $U_{a1} = U_L/3$ ， $U_{a2} = U_L/3$ ， $U_{a0} = U_L/3$ 。

因此，断路器开断近区故障的波过程可以理解为正序、负序和零序分量的波过程的叠加，而分别可以应用上文中的单相线路上的波过程进行单独计算。根据电磁理论，线路上的零序高频电抗通常大于正序高频电抗，零序分量的电压波在线路上的传播速度要低于正序和零序分量的传播

速度,当正序、分量的波过程时刻达到2.0 (pu)时,线路侧的峰值电压达到最大值,不难得出线路侧恢复电压的峰值系数 d 为

$$d = \frac{2}{3} \left(2 + \frac{Z_0}{KZ_1} \right) \quad (10)$$

式中, K 为线路上单位长度零序高频电抗与正序高频电抗的比值; Z_0 为线路的零序波阻抗; Z_1 为线路的正序波阻抗。通常, K 近似取值为3,在高压输电线路中 Z_0/Z_1 的值小于2,可以得出峰值系数 d 的值小于1.78。

特别需要说明的是,IEC/IEEE标准中基于集总参数等效电路方法,并假设正负高频电抗等于正负工频电抗的数值,得出峰值系数 d 的值小于1.6,低于上述基于波过程理论计算的值1.78。这里以分布参数的波过程计算方法不涉及正序工频电抗和正序高频电抗比值的问题,因此计算误差

相对较小,但实际上经过长期运行的经验,峰值系数 d 的值小于1.6。

4 近区故障线路侧TRV的型式试验验证

4.1 试验回路及工作原理

目前,大容量试验站采用合成试验回路进行126 kV级以上断路器的近区故障试验,国外大容量试验站进行126 kV级以下S2级的具有近区故障特性要求的断路器进行近区故障试验时采用直接试验回路进行试验。合成试验回路可以分为电流引入回路和电压引入回路,XIHARI采用如图3所示的并联电流引入法的近区故障合成试验回路,试验回路由电流源部分和电压源部分组成,且通过人工链路来模拟线路产生上升率很高的锯齿波形暂态恢复电压^[8-11]。

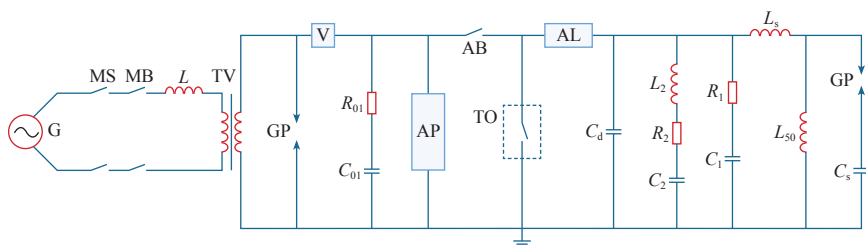


图3 近区故障合成试验回路原理图

图3中,G为短路发电机;MS为合闸开关;MB为操作开关;AB为辅助开关;TO为试品;TV为变压器;AL为人工链路;AP为延弧回路;R为电阻;L为电抗器;C为电容;GP为间隙。

试验时由短路发电机为试品提供要求的短路开断电流,在电流源短路电流过零前1 000 μs左右引入电压源回路电流,此时电流源回路和电压源回路共同向试品提供电流零前的短路电流,待电流源电流过零后,电压源电流单独作用一段时间(200~500 μs)过零熄弧,试品开断,由电压回路主电容 C_s 、 L_s 和TRV调频装置(R_1 、 C_1 和 C_d)及人工链路向试品提供开断后断口间的瞬态和工频恢复电压。

4.2 试验结果分析与讨论

图4、图5分别为额定电压800 kV、额定短路

电流63 kA的特高压断路器进行1/2极 L_{90} 、 L_{75} 试验时的成功开断示波图。图中, I 为试验电流,HFUr为暂态恢复电压, U_{cs} 为电流源电压。

根据GB 1984—2014附录A可计算得断路器断口间暂态恢复电压第一峰值 u_T 、时间 t_T ,线路侧瞬态电压第一个波峰的峰值电压 u_L^* 、时间 t_L 。理论计算值和实测值如表4所示。

由于图5b、图6b测量的锯齿波TRV波形是人工链路和TRV装置的共同作用的结果,因此需要通过实测的 u_T 、 t_T 值减去TRV装置的作用下的值,从而导出 u_L^* 、 t_L 的值。根据表4可以计算得出 L_{90} 、 L_{75} 试验方式下线路侧的上升率分别为11.4 kV/μs和9.45 kV/μs,均在标准要求的 $^{+5}_0\%$ 偏差范围内;同时,线路侧的峰值电压分别超出规定值的24.7%和23.47%,均大于标准要求的 $^{+20}_0\%$ 偏差范围,但是达到峰值的时间 t_L 同时也大于规定值,在试验时当

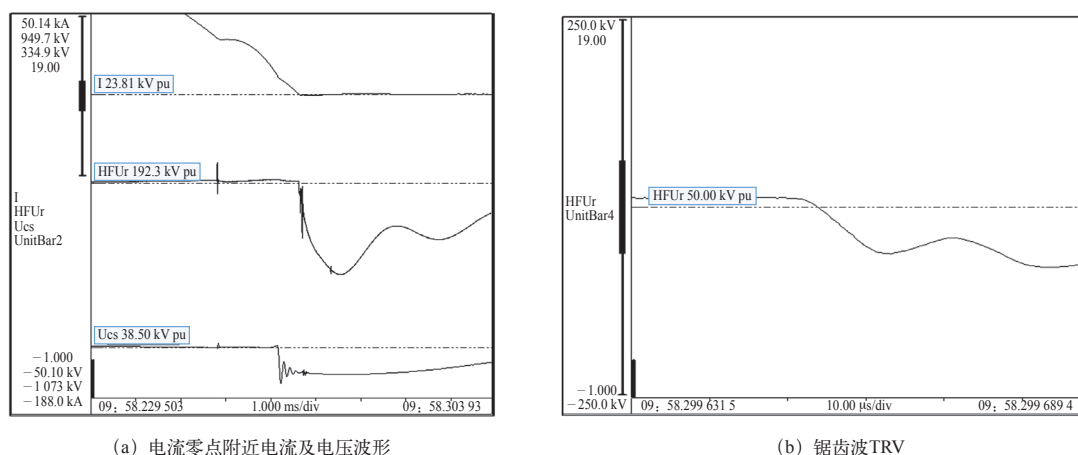


图4 L_{90} 试验方式成功开断示波图

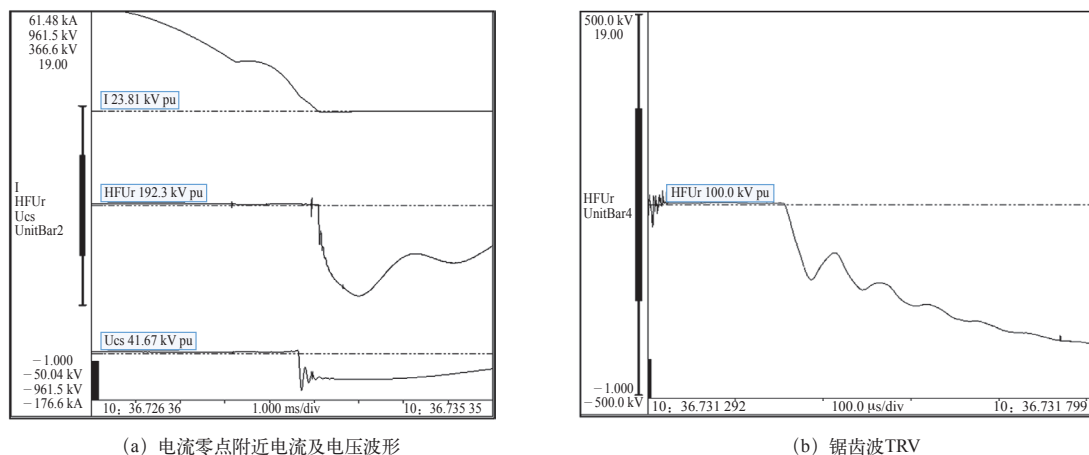


图5 L_{75} 试验方式成功开断示波图

表4 L_{90} 、 L_{75} 理论计算值和实测值

试验方式	理论计算值		实测值		导出值	
	u_{li}^*/kV	$t_{li}/\mu s$	u_{li}^*/kV	$t_{li}/\mu s$	u_{li}^*/kV	$t_{li}/\mu s$
L_{90}	52.3	4.6	-73.4	6.2	-65.0	5.7
L_{75}	131	13.8	-185	17.6	-162	17.1

满足了线路侧TRV上升率,且试验电压超出不太多的情况下,试验结果可以接受,但相对来说对被试断路器偏严格。

5 结束语

本文分析和研究了特高压断路器开断近区故障后线路侧上的波过程,主要得出以下结论。

1) 通过求解无损耗均匀传输线的二阶微分方程,并结合断路器开断近区故障线路侧电流与电压的初始条件,得出线路上的电压波为左行波和右行波的叠加,且初始时刻左行波和右行波幅值相等,

极性相同,分别为沿线路分布电压值的1/2。

2) 在研究线路侧的波过程时,右行波传播到故障点后发生反射将向左移动,成为左行波新的成分;左行波传播到开断点后发生反射将向右移动,成为右行波新的成分。针对线路上的波过程在两个不连续点之间反射,得出右行波是故障点的人射波和开断点的反射波,左行波是开断点的人射波和故障点的反射波。

3) 应用对称分量法和单相线路上的行波解答,提出了以分布参数理论来计算与评估峰值系数,相比较于IEC/IEEE标准给出的注入电流法,该方法更容易理解近区故障线路侧锯齿形TRV的成因机理。

参考文献

[1] 徐国政,张节容,钱家骊,等.高压断路器原理

- 和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [2] GB 1984—2014 高压交流断路器 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [3] IEC 62271—100: High-voltage switchgear and controlgear—part 100; high-voltage alternating-current circuit breakers [S]. 2012.
- [4] IEC 62271—306: Guide to IEC 62271—100, IEC 62271—1 and other IEC standards related to alternating current circuit-breakers [S]. 2012.
- [5] IEEE Std C37.011—2011: IEEE application guide for transient recovery voltage for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis [S]. 2011.
- [6] Colclaser, Jr R G, Buettner D E. The traveling-wave approach to transient recovery voltage [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88 (7): 1028-1035.
- [7] Pipes, Louis A. Transient analysis of symmetrical networks by the method of symmetrical components [J]. IEEE Electrical Engineering, 1940, 59 (8): 457-459.
- [8] GB 4473—2008 高压交流断路器的合成试验 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [9] IEC 62271—101: High-voltage switchgear and controlgear—part 101: synthetic testing [S]. 2012.
- [10] Ren-fu Wang. Calculation and adjustment limitation of four-parameter TRV in high power testing circuits [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2 (3): 758-764.
- [11] Mazzoleni B, Rovelli S. Experiences gained on artificial lines for synthetic testing under short line fault conditions [J]. IEEE Power Apparatus and Systems, 1972, 91 (3): 823-820.
- (收稿日期: 2016-05-14) **EA**

(上接第61页)

- [10] 孙福杰, 王章启. 高压断路器触头电寿命诊断技术 [J]. 电网技术, 1999, 23 (3): 59-61.
- [11] 郭贤珊, 王章启. 高压断路器触头电寿命预测的研究 [J]. 高电压技术, 1999, 25 (3): 43-44.
- [12] 李炜, 李玉春, 高以梅, 等. 关于真空断路器电寿命极限开断次数的研究 [J]. 高压电器, 2007, 43 (3): 222-226.
- [13] 王阳, 朴在林. 断路器电寿命在线监测的几种计算方法 [J]. 沈阳农业大学学报, 2005, 36 (1): 250-252.
- [14] 胡文平, 尹相根. 基于Matlab的高压断路器触头电寿命仿真研究 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15 (6): 9-12.
- [15] 曹荣江, 顾霓鸿. 表征真空断路器电寿命的若干判据 [J]. 电网技术, 1997, 21 (11): 26-32.
- [16] 高文胜. 基于绝缘诊断的期望寿命预测 [J]. 高电压技术, 1997, 23 (1): 57-58.
- [17] Pons A, Sabot A, Babusci G. Electrical endurance and reliability of circuit-breakers—common experience and practice of two utilities [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8 (1).
- [18] IEC Publication 271, List of basic terms, definitions and rated mathematics for reliability [M]. 2nd. Geneve: International Electrotechnical Commission, 1974: 1-53.
- [19] Pierrat L. Thermo-mechanical effects of short-circuit currents: failures by progressive degradation of sudden breakage [C]. 4th International Symp. SCCPS, Liege, 1990.
- (收稿日期: 2016-05-05) **EA**