

输电线路高频保护通道延时的行波特性分析

黄景光, 胡汉梅, 蒋秀洁

(三峡大学电气信息学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 高频保护传统分析方法仅考虑高频信号在通道中的延时效应, 没有分析电气量的行波延时效应。该文指出传统方法的不足, 分析电力系统故障后电气量和高频信号的行波特性, 综合考虑自故障发生到线路两侧高频保护完成故障判断, 故障电气量和高频信号在各环节中的延时效应, 以及最终产生的高频信号的时间差或相位差, 并分析了通道延时效应对高频保护动作特性的影响。通过分析认为: 为了避免外部故障时出现误动作, 方向高频保护应考虑2倍线路长度的通道延时效应, 相差高频保护闭锁角整定应考虑2倍线路长度的通道相位滞后效应; 线路内部发生短路故障时, 相差高频保护容易发生两侧保护相继动作; 在线路长度较大, 相差高频保护有发生两侧保护都进入闭锁区而拒动的可能。

关键词: 高频保护; 高频通道; 保护拒动; 相继动作; 行波; 延时效应

Analysis of traveling wave's channel delay effect of the transmission line HF protection

HUANG Jing-guang, HU Han-mei, JIANG Xiu-jie

(College of Electrical Engineering & Information Technology, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The classic analysis of high-frequency (HF) protection only takes account of the channel delay effect of HF signal, neglects the delay effect of electric traveling wave. This paper corrects the error and analyses the characteristics of the electric and HF signals' traveling waves after an electric failure, and takes account in the general of the effects of the electric and HF signals in all courses from the failure happening to the HF protection relays finishing detection in the both ends of the wire lines and the corresponding delays of times or phases, and analyses the channel delay effects' influence on the operating characteristics of HF protection relays. As a result, the paper declares that to avoid mal-operation when a failure happens out of protection zone the direction HF protection needs to count double channel time delay effect of the wire line and the blocking angle setting of phase differential HF protection needs to count double channel phase delay effect of the wire line; when a failure happens in a high voltage transmission line, its phase differential HF protections in the both ends may operate asynchronously but successively, and even both be blocked and fail to trip breakers if the line is long enough.

Key words: HF protection; HF channel; failure of relay trip; successive relay trip; traveling wave; delay effect

中图分类号: TM773

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)02-0015-05

0 引言

超高压输电线路动稳极限切除时间都很小, 其主保护一般采用双重化的高频保护: 方向高频(包括高频距离保护)和相差高频保护。高频保护利用高频通道传送高频信号, 综合输电线路两端电气量信息, 以判断故障是否在本线路内部, 快速切除线路内部故障。在理论上, 高频保护具有良好的选择性和速动性。在实际应用中, 超高压输电线路中90%以上的短路故障都是由高频保护切除的, 而高频保护的動作正确率也高达95%以上。但仍有误动拒动

事故发生, 一个重要的原因就是通道延时效应考虑不够^[1~3]。

高频保护通道中包括互感器、保护装置(包括数据通道、滤波器及算法、高频加工设备)和作为高频信号传输介质的输电线路等因素, 都会引起信号的延时效应, 对高频保护正确工作产生不利影响。文献[4~9]分析了高频通道各个环节的延时效应及其对保护动作特性的影响, 但只是充分分析了高频信号的通道延时效应, 没有把故障电气量作为在电力系统中传播的行波考虑, 对高频保护的通道延时效应的分析不够全面。本文将综合分析故障电

气量的行波特性和高频信号的通道延时效应,及其对高频保护,特别是相差高频保护的影响。

1 高频保护通道延时经典分析

高频通道中传送的高频信号,从作用上讲,高频信号可分为跳闸信号、允许信号和闭锁信号,而所谓“经常有”方式的闭锁信号被广泛采用。这种模式下,在外部故障时,高频信号能够可靠地闭锁两侧的保护,在内部故障时,即使高频通道因故障而破坏时,两侧高频保护也能够正确动作,同时,还能够监视运行时的通道完好性。因此,迅速收到线路对侧保护发出的高频信号,才能保证闭锁式高频保护的正确工作。为此,在电力系统发生短路故障时,闭锁式高频保护总是设置一个等待对侧高频信号的到达的时间 t_{ch} (如 20 ms)^[3],以便综合线路两端信息,正确进行故障判断,避免出现误动作。

1.1 方向高频保护

在输电线路上发生故障时,两侧方向高频保护根据本侧测量的电气量判断故障方向,并在反方向故障时发出高频闭锁信号,闭锁两侧保护。从故障发生到对侧保护收到闭锁信号,必须经过多个环节:互感器、保护装置以及输电线路,每个环节都会造成信号延时。如果不充分考虑,势必影响保护动作的选择性和可靠性。

1.2 相差高频保护

相差高频保护多以 $I_1 + kI_2$ ($k=4\sim 8$) 作为操作电流,将故障后本侧操作电流的相位信息调制在高频信号上传送到对侧,相差高频保护根据从通道中收到的高频信号的相位特征,判断故障是在线路内部还是外部,以确定保护是否动作。在理想条件下的外部故障时,两侧操作电流在互感器一次侧为同一电流,考虑到互感器的参考方向相反,相差高频保护两侧的操作电流在二次侧相位相差 180° 。但同样地,互感器、保护装置和输电线路等因素,会使两侧的高频信号相位相差偏离 180° 。在系统中发生故障,相差高频保护在收到的两侧高频信号的相位相差偏离 180° 的角度小于闭锁角 φ_0 时闭锁保护,在其它相位时开放保护。因此,我们总是希望,在线路内部故障时,相差高频保护收到的两侧高频信号的相位相差在 0° 附近,在线路外部故障时,相差高频保护收到的两侧高频信号的相位相差在 180° 附近,以便保护具有良好选择性。但通道延时效应使实际应用中的高频信号的相位特性偏离理想值,这将会影响相差高频保护的选择性,甚至会造成保护的相继动作或者误动作。

文献[4~9]普遍认为,高频通道各环节的延时效应对应于 50 Hz 的电角度为:两侧互感器相位差 $\delta_A \leq 7^\circ$ 、两侧保护装置相位差 $\delta \leq 15^\circ$ 、输电线路滞后相位 $\delta = L \times 0.06^\circ$ (其中 L 为线路长度公里数,以光速 3×10^5 km/s 在线路中传播的电磁信号的时滞为 $3.33 \mu\text{s}/\text{km}$,相当于工频 50 Hz 的电角度 $0.06^\circ/\text{km}$)。在内部故障时,还应考虑两侧操作电流的相位差,这是由于两侧系统电势相位以及系统阻抗角都不一致,其中系统电势相位差可能到达 $\delta = 70^\circ$ 、系统阻抗相位差可能到达 $\delta = 30^\circ$ 。在不对称短路时,考虑到此时操作电流以负序电流为主,而负序电源存在于故障点,所以此时不必考虑系统电势相位差。

在线路外部故障时,考虑即使存在最大可能的相位误差时,相差高频保护也应该可靠地闭锁保护,因此,相差高频保护闭锁角可以整定为:

$$\varphi_{ag} = \delta_A + \delta_r + \delta_{mar} + \delta = 37^\circ + L \times 0.06^\circ \quad (1)$$

其中: $\delta_{mar} = 15^\circ$, 为裕度角。

在线路内部对称短路时,考虑存在最大可能的相位误差时,在操作电流相位超前侧收到的高频信号的相位差最大可能到达:

$$\varphi_{ead} = \delta_s + \delta_r + \delta_A + \delta_r + \delta = 122^\circ + L \times 0.06^\circ \quad (2)$$

在操作电流相位滞后侧收到的高频信号的相位差最大可能到达:

$$\varphi_{ag} = \delta_s + \delta_r + \delta_A + \delta_r + \delta = 122^\circ - L \times 0.06^\circ \quad (3)$$

在线路内部不对称短路时,就不必考虑系统电势相位差 δ_s , 此时式 (2)、(3) 分别为:

$$\varphi_{ead} = \delta_r + \delta_A + \delta_r + \delta = 52^\circ + L \times 0.06^\circ \quad (4)$$

$$\varphi_{ag} = \delta_r + \delta_A + \delta_r + \delta = 52^\circ - L \times 0.06^\circ \quad (5)$$

所以,线路越长,相差高频保护闭锁角整定值越大,在线路内部短路时,超前侧收到的高频信号的相位差越大,其保护很可能进入闭锁区,其保护在滞后侧保护动作跳闸后才会相继动作。

2 高频保护通道延时的行波特性和分析

2.1 电力系统输电线路行波

在输电线路中的 x 点,某时刻 t 的电压、电流瞬时值应满足下列方程^[10~13]:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial x^2} [\mathbf{u}_{abc}] = [\mathbf{L}][\mathbf{c}] \frac{\partial^2}{\partial t^2} [\mathbf{u}_{abc}] \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} [\mathbf{i}_{abc}] = [\mathbf{c}][\mathbf{L}] \frac{\partial^2}{\partial t^2} [\mathbf{i}_{abc}] \end{cases} \quad (6)$$

其中: L 、 c 分别为单位长度线路的电感和电容矩阵。

对此方程进行相模变换, 把相互耦合的三相电压、电流变换为相互独立的模量, 即 α 模量、 β 模量和 0 模量:

$$\begin{cases} [\mathbf{u}_{\alpha\beta 0}] = [\mathbf{T}][\mathbf{u}_{abc}] \\ [\mathbf{i}_{\alpha\beta 0}] = [\mathbf{T}][\mathbf{i}_{abc}] \end{cases} \quad (7)$$

通常采用 Karen Bauer 变换:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

这样, 式 (6) 就变换为:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{\alpha\beta 0} \\ \mathbf{i}_{\alpha\beta 0} \end{bmatrix} = [\mathbf{Lc}] \frac{\partial^2}{\partial t^2} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{\alpha\beta 0} \\ \mathbf{i}_{\alpha\beta 0} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[\mathbf{Lc}] = \text{diag}[L_{c1} \quad L_{c1} \quad L_{c0} \quad L_{c1} \quad L_{c1} \quad L_{c0}] \quad (10)$$

式中: L_1 、 L_0 、 c_1 、 c_0 分别为线路单位长度的正序和零序电感和电容。

求解式 (9) 后得到线路中 α 、 β 、0 模量行波电压和行波电流的前行波和反行波应该满足方程:

$$\begin{cases} i_{fwd} \left(t - \frac{x}{v} \right) = \frac{1}{z} u_{fwd} \left(t - \frac{x}{v} \right) \\ i_{bwd} \left(t + \frac{x}{v} \right) = -\frac{1}{z} u_{bwd} \left(t + \frac{x}{v} \right) \end{cases} \quad (11)$$

其中, v 、 z 为对应 α 、 β 、0 模量的电磁波速和波

阻抗: $v_{\alpha\beta} = \frac{1}{\sqrt{L_1 c_1}}$, $v_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 c_0}}$, $z_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{L_1}{c_1}}$,

$z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{c_0}}$, u_{fwd} 、 i_{fwd} 、 u_{bwd} 和 i_{bwd} 分别为前行波和

反行波电压、电流, 通常行波的电磁波速接近于光速。线路上任意一点的电压、电流都是通过其前行波与反行波之和。在电力系统中某点发生故障后, 故障电气量以行波形式自故障点向系统其它传播, 行波到达系统中不同的点的时间也不同。

2.2 高频通道延时特性的行波分析

当电力系统发生故障时, 电气量的突变使故障点成为一个波源, 故障暂态量以行波的形式以接近于光速的速度向系统其它传播。系统中各点到故障点的距离不同, 行波到达的时间就各不相同。一条输电线路两侧保护检测到某次故障发生的时间也就互不相同, 在分析高频保护相位特性时, 这一点应该加以考虑。

对于一条长度为 L 的线路, 行波从一侧到达另一侧的时间为:

$$t_L = L/v \quad (12)$$

其中: v 为电磁波速。

当线路外部发生故障时, 如图 1 中 k1 点, 故障行波 S_{TW} 先到达近故障侧 N, 在时间 t_L 后, 故障行波到达远故障侧 M。同样地, 近故障侧保护在检测到故障后, 发出高频信号 S_N , 在时间 t_L 后, 高频信号 S_N 到达远故障侧, 而远故障侧保护在检测到故障后, 发出高频信号 S_M , 在时间 t_L 后, 高频信号 S_M 到达近故障侧。对于远故障侧保护, 故障行波和高频信号在线路的延时效应都是时间 t_L , 远故障侧高频保护收信机收到的高频信号中两侧信号相位差就不必考虑输电线路的延时效应。对于近故障侧高频保护来说, 收信机收到的高频信号中两侧信号相位差应该考虑 $2t_L$ 输电线路的延时效应。

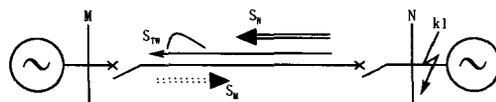


图 1 外部故障时, 高频信号的通道延时效应

Fig.1 Channel delay effect of HF signals on an external failure

当线路内部发生故障时, 如图 2 中 k2 点, 故障行波 S_{TW1} 和 S_{TW2} 分别向线路两侧 M、N 传播, 在时间 t_{L1} 和 t_{L2} 后, 到达 M、N 侧。两侧保护在检测到故障后, 发出高频信号 S_M 、 S_N , 在时间 t_L 后, 高频信号 S_M 、 S_N 到达 N、M 侧。因此, M 侧的输电线路延时效应为 $t_M = t_{L2} + t_L - t_{L1}$, 当故障靠近 M 侧时, 延时效应最大, $t_M = 2t_L$ 。同理, N 侧的输电线路最大延时效应也是 $2t_L$ 。

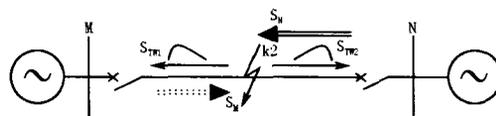


图 2 内部故障时, 高频信号的通道延时效应

Fig.2 Channel delay effect of HF signals on an internal failure

因此, 在分析高频通道的延时效应时, 互感器、保护装置及高频加工设备仍然可以按经典理论考虑, 但输电线路的延时效应应该按行波特性进行分析。

2.3 方向高频保护通道延时特性的行波分析

在系统中发生故障时, 闭锁式方向高频保护通常在保护启动后立即发出闭锁信号, 防止两侧保护误动, 然后根据本侧测量的电气量进行故障方向判断, 在判断故障发生在正方向时停止发送高频闭锁信号, 在确定两侧都停止发信后保护动作跳闸。所

以,应充分正确考虑高频通道的延时效应,确保保护不误动。闭锁式方向高频保护通道等待时间 t_{ch} 应包括两侧互感器 (t_{TA})、保护装置(包括数据通道、时间窗及算法、高频加工设备) (t_R) 等延时差绝对值的叠加,以及 2 倍的输电线路延时 (t_L) 和必要的裕度 (t_{mar}):

$$t_{ch} = t_{TA} + t_R + 2 \times t_L + t_{mar} \quad (13)$$

2.4 相差高频保护通道延时特性的行波分析

在系统中发生故障时,相差高频保护在保护启动后,必须确定对侧高频信号已经传送到本侧才能进行相位比较。相差高频保护的通道等待时间 t_{ch} 与方向高频保护相同。

在线路外部发生短路故障时,在不考虑信号相位误差的条件下,在近故障侧,本侧高频信号会超前所收到的对侧高频信号 2δ 相位角;在远故障侧,本侧高频信号与所收到的对侧高频信号的相位角相同。为防止保护误动作,相差高频保护的闭锁角为:

$$\varphi_b = \delta_{TA} + \delta_R + 2 \times \delta_L + \delta_{mar} = 37^\circ + L \times 0.12^\circ \quad (14)$$

其中:考虑两侧互感器 (δ_{TA})、保护装置 (δ_R) 等相位误差的叠加,以及 2 倍的输电线路相位差 (δ_L) 和必要的裕度 (δ_{mar})。

在线路内部对称短路时,如图 2 中 k2,在操作电流相位超前侧 (M 侧) 收到的高频信号的相位差为:

$$\begin{aligned} \varphi_{ead} &= \delta_L + \delta_R + \delta_{TA} + \delta_R + \delta_{L2} + \delta_L - \delta_{L1} = \\ &\delta_L + \delta_R + \delta_{TA} + \delta_R + 2\delta_{L2} = 122^\circ + 2\delta_{L2} \end{aligned} \quad (15)$$

在操作电流相位滞后侧 (N 侧) 收到的高频信号的相位差为:

$$\varphi_{ag} = \delta_L + \delta_R + \delta_{TA} + \delta_R - 2\delta_{L1} = 122^\circ - 2\delta_{L1} \quad (16)$$

所以,在故障靠近 M 侧时, M 侧相位差可达到:

$$\varphi_{ead} = 122^\circ + L \times 0.12^\circ \quad (17)$$

而 N 侧相位差为:

$$\varphi_{ag} = \delta_L + \delta_R + \delta_{TA} + \delta_R = 122^\circ \quad (18)$$

滞后侧收到的高频信号最大可能相位差为 122° ,超前侧收到的高频信号最大可能相位差随着线路长度增加而增加。在线路长度达到 87.5 km 时,超前侧相差高频保护进入闭锁区而相继动作;在线路长度达到 241.7 km 时,两侧相差高频保护都会进入闭锁区而拒绝动作。

在故障靠近 N 侧时, M 侧相位差为:

$$\varphi_{ead} = \delta_L + \delta_R + \delta_{TA} + \delta_R = 122^\circ \quad (19)$$

而 N 侧相位差可达到:

$$\varphi_{ag} = 122^\circ - L \times 0.12^\circ \quad (20)$$

在线路长度达到 241.7 km 时,超前侧相差高频保护进入闭锁区而相继动作,但不会出现两侧相差高频保护都进入闭锁区而拒绝动作的情形。

在线路内部不对称短路时,就不必考虑系统电势相位差 δ ,此时,两侧收到的高频信号最大可能相位差要小得多,发生相继动作或拒动的概率很小。

3 结论

高频保护作为超高压线路的主保护,对电力系统的安全稳定运行具有重要的作用。高频保护以高频信号传输线路两端的相位或相位信息,采用的仍然是模拟信号。因此,通道的延时或相位滞后效应对高频保护有不可忽视的影响。传统的分析方法对互感器、保护、输电线路等产生的高频信号的延时和相位滞后效应有全面的分析,但忽视了以行波方式传播的电气量的通道延时和相位滞后效应。本文全面分析了自故障发生时刻起到高频保护完成故障判断的全过程中,电气量行波和随后由保护发出的高频信号在各环节中产生的延时和相位滞后效应。从前文的分析可以看到,方向高频保护应充分考虑通道延时效应,避免在对侧高频闭锁信号到来之前,保护误动作。相差高频保护受通道相位滞后效应影响较大,传统方法考虑不够充分。

通过分析,有以下几点重要结论:

- 1) 方向高频保护应考虑 2 倍线路长度的通道延时效应,以避免误动作;
- 2) 相差高频保护闭锁角应考虑 2 倍线路长度的通道相位滞后效应;
- 3) 在线路长度较大,线路内部发生短路故障时,相差高频保护有发生两侧保护都进入闭锁区而拒动的可能,特别是在三相对称短路时。

本文的分析方法和结论,同样适用于允许式高频保护。

参考文献

- [1] 景胜.河南电网高频保护不正确动作原因分析与建议[J].继电器,2003,31(3):76-78.
JING Sheng. Analysis and Suggestions of High-Frequency Protection Mal-operation[J]. Relay, 2003, 31(3): 76-78.
- [2] 张国珠,邵玉槐.WXB-15 型微机高频保护误动作分析[J].太原理工大学学报,2005,36(1):79-81.
ZHANG Guo-zhu, SHAO Yu-huai. Mal-operation Analysis of WXB-15 High-frequency Protection Based on Microcomputer[J]. Journal of Taiyuan University of

- Technology, 2005, 36(1): 79-81.
- [3] 刘辉, 潘永旗, 屈静. 浅析高频保护命令载波通道传输时间的影响[J]. 继电器, 2002, 30(10): 81-82.
LIU Hui, PAN Yong-qi, QU Jing. Analysis in Effects to High Frequency Protection Command Transmission Time in Carrier Wave Channel[J]. Relay, 2002, 30(10): 81-82.
- [4] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
ZHANG Bao-hui, YIN Xiang-gen. Power System Protective Relaying [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [5] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1994.
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Principle of Power System Protective Relaying [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.
- [6] 王维俭. 电力系统继电保护基本原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
WANG Wei-jian. Basic Principle of Power System Protective Relaying [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992.
- [7] 朱石声. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
ZHU Sheng-shi. Principle and Technology of High Voltage Power Network Protective Relaying [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [8] 王梅义, 等. 超高压电网继电保护运行技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
WANG Mei-yi, et al. Operation Technology of Ultra High Voltage Power Network Protective Relaying [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1984.
- [9] 贺家李, 葛耀中. 超高压输电线路故障分析与继电保护[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
HE Jia-li, GE Yao-zhong. Fault Analysis and Protective Relaying for Ultra High Voltage Transmission Line [M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [10] 关根志. 高电压工程基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
GUAN Gen-zhi. High Voltage Engineering Fundamentals [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [11] 周泽存. 高电压技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
ZHOU Ze-cun. High Voltage Technology [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1988.
- [12] 施围. 电力系统过电压计算[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
SHI Wei. Calculation for Electric Power System Overvoltage [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988.
- [13] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
XIE Guang-run. Power System Overvoltage [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.

收稿日期: 2006-08-20; 修回日期: 2006-12-06

作者简介:

黄景光(1968-), 男, 副教授, 主要从事信号分析和电力系统继电保护研究; E-mail: huangjingguang@xinhuanet.com

胡汉梅(1965-), 女, 副教授, 主要从事电力系统绝缘与过电压研究;

蒋秀洁(1972-), 女, 讲师, 主要从事电力系统规划及自动化研究。

(上接第 14 页 continued from page 14)

4 结论

为适应电网快速发展的需要, 华中电网 500 kV 系统的线路保护整定计算从 2001 年开始使用自动整定计算程序, 该程序基本上采用简化的整定计算原则和方法, 极大地提高了整定计算工作的效率, 大大降低了因新设备投产导致大范围修改定值的可能性, 同时也保证了整定计算结果的科学性、合理性, 从未出现任何由于简化整定计算引起的电网事故。

参考文献

- [1] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
WANG Mei-yi. The Utility of Power System Network Relay Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [2] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护规定汇编(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
State Electric Power Dispatching and Communication Center. Power System Relay Protection Rules Collection, Second Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [3] 崔家佩, 孟庆炎, 等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
CUI Jia-pei, MENG Qing-yan, et al. Setting of Power System Relay Protection and Security Stability Device[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1993.

收稿日期: 2006-07-20; 修回日期: 2006-09-11

作者简介:

陈祥文(1973-), 男, 工程师, 研究方向为继电保护整定计算; E-mail: xiangwchen@163.com

柳焕章(1954-), 男, 高级工程师, 研究方向为继电保护运行管理和整定计算。