

超高压线路距离保护自整定方案的研究

陈祥文^{1,2}, 谢俊^{1,2}, 王玉龙³, 李会新^{1,2}, 金明亮^{1,2}, 谢华³

(1. 国家电网公司华中分部, 武汉 430000; 2. 柳焕章劳模创新工作室, 武汉 430000;

3. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 210000)

摘要: 超高压线路距离保护离线定值整定繁杂易错,且需配合运行方式及上下级线路或元件保护。鉴于此,文中梳理了目前距离保护的离线整定原则和缺陷,提出了可靠系数和灵敏系数选择的曲线函数,分析了不同运行方式下零序补偿系数的特点,研究单 K 值整定对保护范围带来的误差。提出了结合线路、系统原始参数以及曲线函数完成各段距离保护自整定方案,避免人为整定误差。另外用实际算例仿真表明采集相关间隔信息自动判别运行方式和计算精确的零序补偿系数来提升保护的有效保护范围,使距离保护动作性能始终处于最佳状态是行之有效的。

关键词: 可靠系数;灵敏系数;零序补偿系数;自整定;距离保护

Study on Scheme of Self-setting for Distance Protection of EHV Transmission Line

CHEN Xiangwen^{1,2}, XIE Jun^{1,2}, WANG Yulong³, LI Huixin^{1,2}, JIN Mingliang^{1,2}, XIE Hua³

(1. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430000, China; 2. Lamor Innovation Studio of Liu

Huanzhang, Wuhan 430000, China; 3. NARI-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: The offline setting calculation of distance protection of EHV transmission line is a complicated and error-prone systems engineering, and needs to be coordinated with operation mode, adjacent lines and component protection. For this reason, the offline setting principles and defects of the current distance protection is sorted out, the curve functions about reliable coefficient and sensitive coefficient is designed, and the features of zero-sequence current compensation coefficient under different operation modes is analyzed to research the error of the scope of protection under the setting with single value of zero-sequence current compensation coefficient. The scheme is proposed to complete self-setting and cooperation of each section of distance protection via the original parameters of line and system and the curve functions. It can avoid the error of human setting. In addition, the simulation results of numerical example show that the operation mode and the corresponding zero-sequence compensation coefficients can be determined and calculated automatically by collecting information of relevant device to promote the effective scope of distance protection. In this way, the operation performance of distance protection is always at its best.

Key words: reliable coefficient; sensitive coefficient; zero-sequence current compensation coefficient; self-setting; distance protection

0 引言

随着 220~750 kV 超高压线路的快速建设,输电线路的故障问题也更加严峻^[1],电网的规模、结构和运行方式日益复杂,造成传统距离保护定值越来越难整定,使得整定计算人员的工作量越来越大且复杂易错。通常一套离线计算的定值难以适用多变

的运行方式,文[2]提出了切换定值区适应零序电流补偿系数整定要求的方案。同时,某些定值如零序补偿系数的整定可能会导致接地距离保护的误动或拒动^[3]。为降低超高压线路距离保护整定难度,文[4-8]结合可靠系数等研究距离保护的自适应性和在线自整定方案,文[9-11]研究大、中、小 3 种零序补偿系数的整定方案对接地距离保护的影响。新型继电保护的发展趋势是高速化和智能化^[12],装置

可以把过度开放给用户整定计算的定值前移, 后备保护在线调整保护定值使保护范围达到最佳, 提高电网运行可靠性。

因此, 未来实现在线自整定保护装置也需要借鉴传统后备保护的离线整定的配合方式及原则并优化, 文中针对超高压线路距离保护梳理现有离线整定配合方式及原则, 研究距离保护可靠系数或灵敏系数、零序补偿系数的选择, 结合定值曲线函数和相关间隔信息来研究距离保护的自整定方案, 提高距离保护可靠性、选择性的水平, 为开发超高压线路自整定保护装置奠定理论基础和方向。

1 离线距离保护整定原则

距离保护是线路后备保护之一, 当主保护或断路器拒动时用其来切除故障的保护。故障线路的主保护拒动应由故障线路的后备保护切除故障, 不应由相邻线路的后备保护切除故障^[13]。前者考虑灵敏度, 后者考虑选择性。但实际在工程整定计算中, 距离保护常常遇到选择性与灵敏性的矛盾, 离线整定中往往对该矛盾做些取舍。

1.1 离线距离保护整定原则

1.1.1 距离 I 段

躲本线路末端故障进行整定, 则

$$Z_{\text{zli}} = K_k Z_l \quad (1)$$

式(1)中: K_k 为可靠系数, 接地距离 I 段可靠系数取值小于等于 0.7, 当线路存在互感时, 可靠系数应适当减小^[14], 相间距离 I 段取 0.8~0.85; Z_l 为线路全阻抗。

1.1.2 距离 II 段

距离 II 段一般按线路末端金属性故障有足够灵敏度, 同时与相邻线路或设备的后备保护相配合整定^[15-16], 离线整定原则如下:

1) 本线路末端故障有灵敏度整定

$$Z_{\text{zlii}} = K_{\text{lm}} Z_l \quad (2)$$

式(2)中: K_{lm} 为灵敏度; 其他同上。根据规程要求 50 km 以下, $K_{\text{lm}} \geq 1.45$; 50~100 km 线路, $K_{\text{lm}} \geq 1.4$; 100~150 km 线路, $K_{\text{lm}} \geq 1.35$; 150~200 km 线路, $K_{\text{lm}} \geq 1.3$; 200 km 以上线路, $K_{\text{lm}} \geq 1.25$ ^[11]。

2) 与相邻线路距离 I 段配合

$$Z_{\text{zlii}} = K_k Z_l + K'_k K_z Z'_{\text{zli}} \quad (3)$$

式(3)中: K'_k 为相邻线路的可靠系数; K_z 为助增系数; Z'_{zli} 为相邻线路距离 I 段定值。

3) 与相邻线路纵联保护配合

$$Z_{\text{zlii}} = K_k Z_l + K'_k K_z Z'_l \quad (4)$$

式(4)中: K'_k 为相邻线路的可靠系数; Z'_l 为相邻线路全长阻抗。

4) 躲变压器其他母线故障整定

$$Z_{\text{zlii}} = K_k Z_l + K'_k K_z Z'_T \quad (5)$$

式(5)中: K'_k 为变压器的可靠系数; Z'_T 为相邻变压器正序阻抗。

5) 当 2) 不满足灵敏度要求时与相邻线路的距离 II 段配合整定

$$Z_{\text{zlii}} = K_k Z_l + K'_k K_z Z'_{\text{zlii}} \quad (6)$$

式(6)中: K'_k 为相邻线路的可靠系数; Z'_{zlii} 为相邻线路距离 II 段定值。

1.1.3 距离 III 段

距离 III 段保护的整定原则与距离 II 段类似, 也考虑线路末端故障的灵敏度、与相邻线路距离 II 段或 III 段配合、与变压器相应保护配合的情况, 另外增加了躲系统最不利条件下的事故过负荷最小阻抗的原则^[10], 如下:

按躲最小负荷阻抗整定, 则

$$Z_{\text{zliii}} = K_k Z_{\text{FH}} \quad (7)$$

式(7)中: Z_{FH} 为系统最不利条件下的事故过负荷最小阻抗; K_k 为可靠系数, 一般取 0.7。

1.2 离线整定原则分析

根据距离保护的整定原则, 距离 I 段一般可靠性放在首位、灵敏度次位, 对于可靠系数的选择没有具体的函数选择原则, 从而会出现人为的一些误差导致距离保护误动或拒动。

距离 II 段首先考虑灵敏度、速动性次位、选择性末位。在保证灵敏度的前提下, 更强调保护的快速性, 使得人工整定过程会出现选择性混乱现象, 进而导致其他原则不满足而失配或越级动作到下级线路母线故障。灵敏度系数的选择需要更多的结合选择性要求, 同时助增系数的选取是基于离线系统多运行方式下的最小选择不能代表实时多变的系统从而给灵敏度系数的选择也带来难度。

距离 III 段将灵敏度放在首位、选择性次位、速动性末位。在保证灵敏度的前提下, 也会因为助增系数的影响导致灵敏度系数达不到规程要求, 同时会导致选择性不够准确。

另外接地距离中还需要考虑零序补偿系数, 系统中零序互感的存在导致零序补偿系数存在不稳定性, 而目前零序补偿系数在离线定值中往往是只能取一个值, 导致系统运行改变时存在接地距离保护超越或拒动的问题, 使得保护范围不够精确。

2 可靠系数和灵敏度系数的选择

2.1 可靠系数的选择

对于距离保护的可靠系数选择, 决定了线路整

定值 Z_{zd} 与线路全长阻抗值 Z_l 之间的相对误差和绝对误差。令相对和绝对误差分别见式(8)、(9)。

$$\varepsilon_1 = \frac{Z_{zd} - Z_l}{Z_l}; \quad (8)$$

$$\varepsilon_2 = Z_{zd} - Z_l. \quad (9)$$

对可靠系数 K_k 而言,为负误差,将绝对误差折算为缩短线路的公里数(负数) $\Delta L = L\varepsilon_1$ 。由于线路参数、PT、CT 和保护装置等因素组成的综合误差,一般相对误差随着线路缩短 ε_1 会变小,对于中长线路相对平稳,假设最大相对误差为 $\varepsilon_{1\max}$,则为了简化可靠系数的选择,相对误差可表示为

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1\max} \left(1 + \frac{L_b}{L} \right). \quad (10)$$

式(10)中, L_b 为与线路长度和相对误差相关的基准长度。

$$\Delta L = \varepsilon_{1\max}(L + L_b). \quad (11)$$

当线路相当短 $L = L_{\min}$ 时,取消可靠系数的选择,认为可靠系数为 0,保护范围为 0,则

$$L_{\min} + \Delta L = 0. \quad (12)$$

结合式(10)–(12)可得到可靠系数关于 $\varepsilon_{1\max}$ 和 $L_{\min}$ 的函数为

$$K_k = (1 + \varepsilon_{1\max}) \left(1 - \frac{L_{\min}}{L} \right). \quad (13)$$

$L > L_{\min}$, K_k 表示成关于 L 的反比函数。为了简化可靠系数的选择,当线路达到 100 km 时可以直接将 $K_k = 1 + \varepsilon_{1\max}$ 。

2.2 灵敏系数的选择

对灵敏系数而言,相对误差和绝对误差也可分别为式(8)、(9),它们为正误差,将绝对误差折算为超出线路的公里数 $\Delta L = L\varepsilon_1$ 。

因整定中灵敏系数存在最小值,假设最小相对误差为 $\varepsilon_{1\min}$,则为了简化可靠系数的选择,那么相对误差和绝对误差可表示为

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1\min} \left(1 + \frac{L_b}{L} \right); \quad (14)$$

$$\Delta L = \varepsilon_{1\min}(L + L_b). \quad (15)$$

式(14)、(15)中参数同上。当线路相当短接近 0 时存在最小的 $\Delta L_{\min}$,则

$$\Delta L_{\min} = \varepsilon_{1\min} L_b. \quad (16)$$

结合式(14)–(16)可得到下限灵敏系数关于 $\varepsilon_{1\min}$ 和 $\Delta L_{\min}$ 的函数

$$K_{lm} = 1 + \varepsilon_{1\min} + \frac{\Delta L_{\min}}{L}. \quad (17)$$

灵敏系数不能过大,根据式(17)可得到上限灵敏系数关于 $\varepsilon_{1\max}$ 和 $\Delta L_{\max}$ 的函数

$$K_{lm} = 1 + \varepsilon_{1\max} + \frac{\Delta L_{\max}}{L}. \quad (18)$$

式(13)、(17)、(18)将可靠系数和灵敏系数的选取简化为与线路长度的函数关系,根据曲线函数和整定规程的原则,可靠系数和灵敏系数选择避开了人为的选取而变得更加合理、简单。

3 零序补偿系数分析

单回线路的零序补偿系数仅与本线路参数有关,而多回线时因接地故障时线路间存在互感,且互感的存在可能起去磁或助磁作用^[17–18]。而目前保护普遍采用单 K 值法,从而导致接地距离在某些运行方式下的超越误动或拒动的情况。文中针对双回线不同运行方式下的零序补偿系数的选取进行研究。双回线系统见图 1。

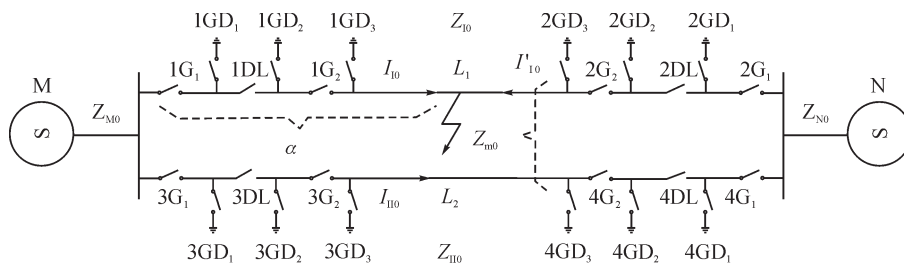


图 1 双回线系统

Fig. 1 Double-circuit transmission lines

图 1 中将 II 回线路的断路器 3DL、4DL 分位, 地刀 3GD₃ 和 4GD₃ 分位, 判为单回线运行, 一般单回线零序补偿系数为

$$K = \frac{Z_{10} - Z_{11}}{3Z_{11}}. \quad (19)$$

式(19)中, Z_{10} 、 Z_{11} 为 I 回线路零序、正序阻抗。

根据单回线零序补偿系数的构成形式及双回

线等效模型,当 I 回发生接地故障,双回线间存在互感时, I 回线 1DL 处保护的零序补偿系数表达式为^[19–22]

$$K = \frac{Z_{10} - Z_{11} + \frac{I_{10}}{I_{11}} Z_{m0}}{3Z_{11}}. \quad (20)$$

式(20)中: I_{10} 、 I_{11} 分别为 I、II 回线路零序电流;

Z_{m0} 为线路间零序互阻抗。随着 $\frac{I_{10}}{I_{10}}$ 变化, K 值也不断

变化, 令 $K' = \frac{I_{10}}{I_{10}}$, 根据不同运行方式结合电网络知识对 K' 展开分析。

3.1 双回线并列运行

当图 1 中所有地刀分位, 断路器和隔刀合位时, 图 1 系统判为双回线并列运行。根据双回线运行等效模型^[7], 在 I 回线路 α 处发生接地时

$$K' = \frac{(Z_{10} - Z_{m0})[\alpha Z_{N0} - (1 - \alpha)Z_{M0}]}{(1 - \alpha)[(Z_{10} - Z_{m0})(Z_{M0} + Z_{N0}) + Z_{10}Z_{110} - Z_{m0}^2] + (Z_{110} - Z_{m0})Z_{N0}} \quad (21)$$

式(21)中: α 为故障点占全长的百分比; Z_{N0} 、 Z_{M0} 、 Z_{110} 分别为系统 N、M 和 II 回线的零序阻抗, 其他同上。

此时 K' 与系统的零序阻抗、线路的零序阻抗、故障点位置密切相关, 当两侧系统阻抗满足一定关系时在不同短路点 K' 可以大于 0, 等于 0 和小于 0。当系统零序阻抗、线路阻抗和互感固定时, 随着故障点 α 的增大, K' 也在逐渐增大, 当 $\alpha=1$ 时 $K'_{\max} = \frac{Z_{10} - Z_{m0}}{Z_{110} - Z_{m0}}$ 。当两线路零序阻抗相同时 $K'_{\max}=1$, 双回线并列运行下最大零序补偿系数为

$$K'_{\max} = \frac{Z_{10} - Z_{11} + Z_{m0}}{3Z_{11}} \quad (22)$$

对于非故障线路而言, 当 $\alpha=1$ 时, 存在最小 $K'_{\min} = \frac{Z_{110} - Z_{m0}}{Z_{10} - Z_{m0}}$, 从而非故障线路可以通过 $K'_{\min}$ 值来闭锁相应的距离保护防止超越误动。

3.2 单回线接地检修

图 1 中将 II 回线的地刀 3GD₃ 和 4GD₃ 合位, 相应的断路器和隔刀分位则判为单回线接地检修状态。在 I 回线路 α 处发生接地故障时

$$K' = \frac{I_{10}}{I_{10}} = -\frac{Z_{m0}[\alpha Z_{N0} - (1 - \alpha)Z_{M0}]}{(1 - \alpha)(Z_{10}Z_{110} - Z_{m0}^2) + Z_{110}Z_{N0}} \quad (23)$$

式(23)中参数定义同上。

当两侧系统阻抗满足一定关系时在不同短路点 K' 可以大于 0, 等于 0 和小于 0。当系统零序阻抗、线路阻抗和互感固定时, 随着故障点 α 的增大, K' 逐渐减小, 当 $\alpha=1$ 时 $K'_{\min} = -\frac{Z_{m0}}{Z_{110}}$, 最小零序补偿系数为

$$K'_{\min} = -\frac{Z_{10} - Z_{11} - \frac{Z_{m0}^2}{Z_{110}}}{3Z_{11}} \quad (24)$$

3.3 双分裂运行

双分裂系统见图 2, 将双回线的地刀分位, 断路器和隔刀合位。

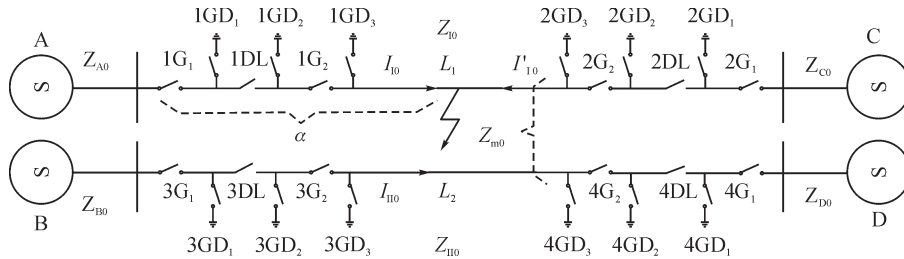


图 2 双分裂系统

Fig. 2 Double bundle transmission lines

在 I 回线路 α 处发生接地时

$$K' = -\frac{Z_{m0}[\alpha Z_{C0} - (1 - \alpha)Z_{A0}]}{(Z_{B0} + Z_{D0} + Z_{110})Z_{C0} + (1 - \alpha)[(Z_{B0} + Z_{D0})Z_{10} + Z_{10}Z_{110} - Z_{m0}^2]} \quad (25)$$

式(25)中, Z_{A0} 、 Z_{B0} 、 Z_{C0} 、 Z_{D0} 分别为系统 A、B、C、D 的零序阻抗, 当两侧系统阻抗满足一定关系时在不同短路点 K' 可以大于 0, 等于 0 和小于 0。当系统零序阻抗、线路阻抗和互感固定时, 随着故障点 α 的增大, K' 逐渐减小, 当 $\alpha=1$ 时 $K'_{\min} =$

$-\frac{Z_{m0}}{Z_{110} + Z_{B0} + Z_{D0}}$, 最小零序补偿系数为

$$K'_{\min} = -\frac{Z_{10} - Z_{11} - \frac{Z_{m0}^2}{Z_{110} + Z_{B0} + Z_{D0}}}{3Z_{11}} \quad (26)$$

3.4 单端分裂运行

一端分裂运行系统见图 3, 图 3 中双回线的地刀分位, 断路器和隔刀合位。在 I 回线路 α 处发生接地时, 对于 1DL 保护安装处而言

$$K' = -\frac{(Z_{10} - Z_{m0} + Z_{C0})Z_{M0} - \alpha[(Z_{10} - Z_{m0})Z_{M0} - Z_{C0}Z_{m0}]}{(Z_{110} + Z_{D0} + Z_{M0})Z_{C0} + (1 - \alpha)[(Z_{110} - Z_{m0})Z_{10} + Z_{10}Z_{D0} + (Z_{10} - Z_{m0})(Z_{M0} + Z_{m0})]} \quad (27)$$

当系统零序阻抗、线路阻抗和互感固定时, 随着故障点 α 的增大, K' 逐渐减小, K' 始终小于 0, 当

$\alpha=1$ 时 $K'_{\min} = -\frac{Z_{m0} + Z_{M0}}{Z_{110} + Z_{M0} + Z_{D0}}$, 最小的零序补偿系数为

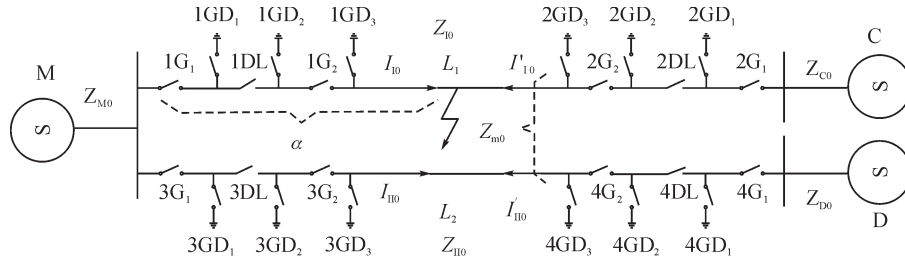


图3 单端分裂系统

Fig. 3 Single bundle transmission lines

$$K_{\min} = \frac{Z_{10} - Z_{11} - \frac{Z_{n0} + Z_{M0}}{Z_{110} + Z_{M0} + Z_{D0}} Z_{n0}}{3Z_{11}} \quad (28)$$

对于 2DL 保护安装处而言

$$K' = \frac{I'_{110}}{I_{10}} = \frac{Z_{C0}(Z_{n0} + Z_{M0}) + (1 - \alpha)(Z_{10}Z_{M0} - Z_{n0}Z_{M0} - Z_{n0}Z_{C0})}{(Z_{110} - Z_{n0} + Z_{D0})Z_{M0} + \alpha[(Z_{10} - Z_{n0})Z_{M0} + Z_{10}Z_{D0} + Z_{10}Z_{110} - Z_{n0}^2]} \quad (29)$$

当系统零序阻抗、线路阻抗和互感固定时,随着故障点 α 的减小, K' 逐渐增大, K' 始终大于 0, 当 $\alpha=0$ 时 $K'_{\max} = \frac{Z_{10} + Z_{C0} - Z_{n0}}{Z_{110} + Z_{D0} - Z_{n0}}$, 最大零序补偿系数为

$$K_{\max} = \frac{Z_{10} - Z_{11} - \frac{Z_{10} - Z_{n0} + Z_{C0}}{Z_{110} - Z_{n0} + Z_{D0}} Z_{n0}}{3Z_{11}} \quad (30)$$

对于非故障线 4DL 保护安装处而言, K' 为 2DL 处的倒数, 随 α 的减小逐渐减小, 最小为 $K'_{\min} = \frac{Z_{110} + Z_{D0} - Z_{n0}}{Z_{10} + Z_{C0} - Z_{n0}}$, 从而非故障线路可以通过 $K'_{\min}$ 值来闭锁相应的距离保护避免超越误动。

目前整定时零序补偿系数一般从式(19)、(22)、(24)考虑选择。但通过双回线下各运行方式分析, K' 不固定则零序补偿系数 K 也不固定且同一运行方式下随故障点变化而变化使得互感可能起助增或助减作用, 另外还与系统的零序阻抗、线路的零序阻抗密切相关。从而目前线路保护装置的零序补偿系数整定为单 K 值不能满足实际运行要求。当 K 取式(24)即小值时接地距离 I 段虽然保证了可靠性但双回线正常运行的保护范围会缩小, II 段灵敏度降低可能不满足要求。当 K 取式(22)即大值时接地距离 II 段灵敏度能满足, 但 I 段在单回接地检修方式下可能会超越误动。

4 距离保护自整定方案

4.1 距离 I 段保护

结合式(1)、(13), 因接地距离 I 段可靠系数小于等于 0.7, 则 $\varepsilon_{\min} = -0.3$, 相间距离 I 段可靠系数取 0.8~0.85, 则折中取 $\varepsilon_{\min} = -0.17$ 。为了简化最小线路长度的选择, 根据文[11]一般取 5 km。

接地距离 I 段

$$K_k = \begin{cases} 0 & L \leq 5 \text{ km} \\ 0.7 \left(1 - \frac{5}{L}\right) & 5 < L < 100 \text{ km} \\ 0.7 & L \geq 100 \text{ km} \end{cases} \quad (31)$$

相间距离 I 段

$$K_k = \begin{cases} 0 & L \leq 5 \text{ km} \\ 0.83 \left(1 - \frac{5}{L}\right) & 5 < L < 100 \text{ km} \\ 0.83 & L \geq 100 \text{ km} \end{cases} \quad (32)$$

根据线路长度所取可靠系数见表 1。

表 1 线路可靠系数与线路长度关系

Table 1 The relationship between reliable coefficient and line length

线路长度 L/km	接地 I 段可靠系数	相间 I 段可靠系数
5	0.00	0.00
10	0.35	0.42
50	0.63	0.75
100	0.67	0.79
>100	0.70	0.83

距离 I 段整定可由装置根据用户输入的线路参数如长度、阻抗等自行完成, 减少用户的工作量。

4.2 距离 II(III)段保护

根据灵敏系数与线路长度的关系式(17)、(18), 以及文[10]规程中规定的灵敏度系数范围。简化得到 $\varepsilon_{\min} = 0.2$, $\varepsilon_{\max} = 0.5$, $\Delta L_{\min} = 15 \text{ km}$, $\Delta L_{\max} = 100 \text{ km}$ 。下限灵敏度为 $K_{\min} = 1.2 + \frac{15}{L}$, 上限灵敏度为 $K_{\max} = 1.5 +$

$\frac{100}{L}$, 灵敏系数与线路长度的对应值见表 2。

表 2 线路灵敏系数与线路长度关系

Table 2 The relationship between sensitive coefficient and line length

线路长度 L/km	下限灵敏系数	上限灵敏系数
30	1.70	4.83
50	1.50	3.50
100	1.35	2.50
150	1.30	2.16
200	1.28	2.00
300	1.25	1.83

在装置侧实现 II 段、III 段的自整定时, 直接根据线路的长度距离 II 段灵敏度取 $K_{\min}$, 距离保护 III 段的灵敏度最大取 $K_{\max}$ 。除灵敏度外, 还涉及与相邻线路或变压器的配合, 从而装置侧需开放相邻线路或变压器的长度、阻抗参数以及相应的助增系数供用户输入。

距离保护 II 段与相邻线路配合时, 根据 I 段提出的可靠系数计算相邻线路的 I 段并进行配合整定, 满足下限灵敏度要求时时间取一个时间级差。根据变压器的阻抗参数等, 直接整定与相邻变压器的差动保护配合, 不与其后备保护配合。如果两者均不满足灵敏度下限, 则保护强行按下限灵敏度自整定, 动作时间与相邻线路距离 II 段时间配合来保证选择性防止越级动作。

距离 III 段与相邻变压器差动或相邻线路距离 II 段、距离 III 段以及负荷阻抗配合整定, 为简化相邻线路距离 II 段、距离 III 段定值, 默认相邻线定值由文中的灵敏度系数直接所得, 负荷阻抗根据保护线路的电压等级选择自然功率标准来计算, 并配合验证是否满足本线下限灵敏度要求, 如果不满足则直接按下限灵敏度整定。动作时延取配合段的最长时延, 同时躲过 1.5 s 的最长振荡周期。

距离 II、III 段在自整定方案中只需要输入本线路的参数、配合线路的参数如长度、阻抗和助增系数等以及元件的阻抗、助增系数等, 减少了人工整定工作量和人为误差, 其中将灵敏度放在首位由装置自身和各段自动配合整定从而降低失配的风险。

4.3 零序补偿系数

根据零序补偿系数的分析, 其选择涉及系统的各种运行方式、故障点位置等, 避免人为的零序补偿系数所带来的误差, 装置侧可引入相邻线路和母联的开关和刀闸位置并通过光纤通道实现两侧开关量数据交换来直接判别双回输电线路的运行方式, 同时引入相邻线路的零序电流来进行零序补偿系数的自适应实时整定使得接地距离保护的保护区更精确避免超越误动和拒动。但当根据开关量判别为单回线接地检修时因相邻线路的电流不能采集到, 为了可靠性零序补偿系数取式(24)实现。同时, 当两侧装置光纤通道故障不能判别运行方式时接地距离 I 段为了可靠性取式(24)来保证不误动, II、III 段为了灵敏度取式(22)。另外, 双回并列和分裂运行时非故障线路中零序电流比很大, 接地距离 I 段可能会超越误动, 可通过非故障回路躲过理论计算的最小零序电流比来闭锁。

为了验证零序补偿系数选取的理论正确性, 在 PSCAD 软件中建立如图 1-3 的 500 kV 等级的仿真模型, 其中系统 $Z_{M0}=Z_{A0}=Z_{D0}=30 \Omega$ 、 $Z_{N0}=Z_{C0}=Z_{B0}=24 \Omega$, 双回线路全长 300 km、正序阻抗 $Z_{I1}=Z_{II1}=5.88+j84.03 \Omega$ 、零序阻抗 $Z_{I0}=Z_{II0}=54.84+j258.15 \Omega$ 、互零序阻抗 $Z_{m0}=33+j82.92 \Omega$ 。令单回停运、单回接地检修、双回并列运行、双分裂、CD 端分裂、AB 端分裂分别为方式 1-6, 针对 1DL 处的保护仿真在 20%、70%和 100%故障点零序补偿系数与理论值的比较, 见表 3。

表 3 各运行方式下各故障点零序补偿系数理论与仿真值

Table 3 Value of zero-sequence current compensation coefficient in theory and simulation test in different operation mode and points of fault

项目		方式 1	方式 2	方式 3	方式 4	方式 5	方式 6
20%	理论 K	0.700 9-j0.145 2	0.711 2-j0.148 5	0.682 4-j0.139 3	0.709 3-j0.147 9	0.674 3-j0.136 7	0.720 8-j0.151 5
	仿真 K	0.700 9-j0.145 2	0.713 4-j0.149 2	0.684 5-j0.139 9	0.711 3-j0.148 5	0.676 3-j0.137 3	0.722 8-j0.152 2
70%	理论 K	0.700 9-j0.145 2	0.691 4-j0.142 2	0.718 8-j0.150 9	0.693 2-j0.142 7	0.658 7-j0.131 7	0.757 6-j0.163 3
	仿真 K	0.700 9-j0.145 2	0.694 1-j0.143 0	0.722 7-j0.152 1	0.696 0-j0.143 6	0.661 7-j0.132 7	0.761 3-j0.164 4
100%	理论 K	0.700 9-j0.145 2	0.587 1-j0.108 9	1.037 3-j0.252 5	0.606 4-j0.115 0	0.577 3-j0.105 7	1.047 5-j0.255 8
	仿真 K	0.700 9-j0.145 2	0.589 5-j0.109 6	1.037 3-j0.252 5	0.609 0-j0.115 9	0.580 5-j0.106 7	1.047 4-j0.255 8

为了验证不同运行方式在各故障点接地故障时不同零序补偿系数 K 下对测量阻抗影响, 令理论 K 、仿真计算 K 、式(19)、(24)、(22)分别为 K_1 、 K_2 、 $K_3=0.700 9-j0.145 2$ 、 $K_4=1.037 3-j0.252 5$ 、 $K_5=0.594 8-j0.090 2$, K_1 、 K_2 的值见表 3, 仿真故障点为 20%、70%和 100%处的测量阻抗及误差见表 4。

表 3 中各运行方式下, 取相邻线路间隔的零序电流根据式(20)计算所得的仿真值与第 3 章各运行

方式的理论公式计算所得基本一致, 误差不超过 0.02。从表 3 中看出, 在各运行方式除单回停运外都随故障点位置的变化而变化, 且零序补偿系数差异比较大, 可见目前装置采用单 K 时会测量阻抗的误差比较大。通过取相邻间隔零序电流能获取精准的零序补偿系数有效提升故障测量阻抗值的精确性。

从表 4 中可以看出, 在各运行方式中取双回线零序电流所得零序补偿系数计算出故障测量阻抗

表4 各运行方式下各故障点不同 K 时的测量阻抗及误差

Table 4 Metrical impedance and its error with different zero-sequence current compensation coefficient in different operation mode and points of fault

项目		方式 1		方式 2		方式 3		方式 4		方式 5		方式 6	
		阻抗/ Ω	误差/%	阻抗/ Ω	误差/%	阻抗/ Ω	误差/%	阻抗/ Ω	误差/%	阻抗/ Ω	误差/%	阻抗/ Ω	误差/%
20%	实际阻抗	16.85	0.00	16.85	0.00	16.85	0.00	16.85	0.00	16.85	0.00	16.85	0.00
	K_1	16.69	-0.92	16.75	-0.56	16.77	-0.43	16.74	-0.62	16.77	-0.49	16.75	-0.57
	K_2	16.69	-0.92	16.73	-0.68	16.76	-0.55	16.72	-0.74	16.74	-0.61	16.85	-0.69
	K_3	16.69	-0.92	16.85	0.04	16.59	-1.52	16.83	-0.08	16.50	-2.06	16.75	-0.57
	K_4	13.91	-17.46	14.04	-16.67	13.80	-18.11	14.02	-16.79	13.74	-18.46	14.05	-16.62
	K_5	17.84	5.91	17.99	6.80	17.73	5.18	17.97	6.67	17.63	4.61	18.15	7.70
70%	实际阻抗	58.96	0.00	58.96	0.00	58.96	0.00	58.96	0.00	58.96	0.00	58.96	0.00
	K_1	58.28	-1.17	58.37	-1.01	58.43	-0.91	58.37	-1.01	58.38	-1.00	58.43	-0.91
	K_2	58.28	-1.17	58.29	-1.15	58.32	-1.10	58.29	-1.15	58.29	-1.15	58.39	-0.98
	K_3	58.28	-1.17	58.08	-1.49	58.99	0.04	58.15	-1.39	57.12	-3.12	60.25	2.17
	K_4	49.82	-15.51	49.62	-15.85	50.04	-15.14	49.68	-15.75	48.74	-17.33	50.85	-13.77
	K_5	61.44	4.20	61.40	4.14	62.53	6.05	61.47	4.24	60.42	2.46	64.00	8.53
100%	实际阻抗	84.24	0.00	84.24	0.00	84.24	0.00	84.24	0.00	84.24	0.00	84.24	0.00
	K_1	82.93	-1.55	83.45	-0.93	82.61	-1.93	83.14	-1.30	83.14	-1.30	83.16	-1.28
	K_2	82.93	-1.55	83.39	-1.00	82.61	-1.93	83.08	-1.37	83.06	-1.39	83.03	-1.43
	K_3	82.93	-1.55	80.76	-4.13	90.15	7.02	80.93	-3.92	80.17	-4.83	90.95	7.97
	K_4	76.07	-10.93	73.72	-11.50	82.61	-1.93	73.94	-11.42	73.04	-11.73	83.25	-1.17
	K_5	85.41	1.39	83.30	-1.11	92.90	10.29	83.47	-0.91	82.75	-1.77	93.76	11.31

与实际阻抗的误差不超过 2%,同时与理论计算所得零序补偿系数下的测量阻抗基本一致,使得接地距离保护有最佳的保护范围,具有良好的选择性和灵敏性,有利于线路的安全运行和故障的快速准确切除。当采用单回接地检修末端故障时的零序补偿系数 K_5 时,测量阻抗可以保证接地距离 I 段的可靠性但导致各运行方式下的保护范围缩短,可靠系数取 0.7 整定时在故障 70%附近基本会拒动。若选取双回并列运行末端故障时的 K_4 ,则各运行方式下在 70%故障时距离 I 段基本都会超越误动。如果选择无互感的零序补偿系数 K_3 时,除单回运行外其他运行方式随系统、线路参数变化可能会出现拒动和误动现象。可见,目前整定零序补偿系数时只从 K_3 、 K_4 、 K_5 考虑时必然会导致接地距离保护可能误动或拒动。另外单回接地检修运行方式时因相邻间隔的模拟量不能获取,只能从可靠性出发选择此方式下最小的零序补偿系数整定。

5 结语

目前一套超高压线路距离保护离线整定定值难以适用多变的运行方式,使距离保护不一定能实现完全配合和正确动作。通过制定可靠系数和灵敏系数关于线路长度的曲线函数后简化了各段整定

原则,结合输入线路的参数和相邻线路的参数可以实现各段的自整定,避免人为整定误差。另外,零序补偿系数与运行方式、系统阻抗、线路阻抗和故障位置密切相关,单 K 值会影响接地距离保护动作范围。实际算例仿真表明,采集相关间隔开关量和模拟量来自动调整零序补偿系数,可消除零序互感引起的阻抗测量误差,使距离保护动作性能始终处于最佳状态,大大提升距离保护的保护区精确性。距离保护的自整定研究可以大大简化现有整定工作量和人为错误,提高保护四性(选择性、速动性、灵敏性、可靠性)。

参考文献:

- [1] 曹 斌,吴志敏,张 鹏,等. 基于 PSCAD 的 500 kV 输电线路潜供电流和恢复电压的仿真分析[J]. 高压电器, 2014,50(12):71-78.
CAO Bin, WU Zhimin, ZHANG Peng, et al. Simulation of secondary arc current and recovery voltage for 500 kV transmission line based on PSCAD[J]. High Voltage Apparatus, 2014,50(12):71-78.
- [2] 周春霞,余 越,赵 寒,等. 特高压同塔双回线路零序电流补偿系数整定对接地距离保护的影响研究[J]. 电网技术, 2012,36(12):106-111.
ZHOU Chunxia, YU Yue, ZHAO Han, et al. Influence of

- zero-sequence current compensation coefficient setting on earth-fault distance protection for double circuit UHVAC transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 106-111.
- [3] 胡志坚, 姜美玲. 不同电压等级同塔四回输电线路零序电流补偿系数整定研究[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 60-66. HU Zhijian, JIANG Meiling. Setting of zero sequence current compensation coefficient for four-circuit transmission lines in different voltage classes on same power[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 60-66.
- [4] 赵凯超, 周泽昕, 杜丁香. 不同电压等级同塔四回输电线路不同运行方式下零序互感对接地距离保护的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 193-197. ZHAO Kaichao, ZHOU Zexin, DU Dingxiang. Influence of zero-sequence mutual inductance on earth-fault distance protection for four-circuit transmission lines belonging to different voltage classes on same tower under different operation modes[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 193-197.
- [5] 杨琳. 相间距离保护 I 段可靠系数及其自适应的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012. YANG Lin. Research on reliable coefficient and its adaptability of zone I phase-to-phase distance protection[D]. Beijing: North China Electric University, 2012.
- [6] 卢晓华. 距离保护可靠系数及 I 段最小保护范围的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2005. LU Xiaohua. The research on reliable coefficient and the least protection zone of distance protection[D]. Beijing: North China Electric University, 2005.
- [7] 王增平, 刘国平, 仇向东, 等. 继电保护定值在线整定功能的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 127-130. WANG Zengping, LIU Guoping, QIU Xiangdong, et al. Realization of online relay protection setting value adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 127-130.
- [8] 赵宇. 电网后备保护在线整定方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. ZHAO Yu. The research on online setting solution for backup protection in power grid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [9] 张波, 陈福锋, 王玉婷, 等. 特高压皖电东送线路零序互感对接地距离保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 94-98. ZHANG Bo, CHEN Fufeng, WANG Yuting, et al. Impact of zero-sequence mutual inductance in UHV anhui-to-east power transfer lines on phase-earth distance protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 94-98.
- [10] 张波. 特高压输电线路继电保护原理与技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. ZHANG Bo. Research on principle and technology of relay protection for UHV transmission line[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [11] 邹晓峰, 曾平, 倪腊琴. 同杆双回线下接地距离保护 I 段动作边界计算与仿真测试[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 154-159. ZOU Xiaofeng, ZENG Ping, NI Laqin. Calculation and simulation test of trip boundary of zone I of earth-fault distance protection for double-circuit transmission lines on the same Tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 154-159.
- [12] 蒋小平, 张红菊, 马速良, 等. 特高压带高压并列电抗器线路的行波差动保护研究[J]. 高压电器, 2016, 52(2): 121-127. JIANG Xiaoping, ZHANG Hongju, MA Suliang, et al. Study on traveling-wave differential protection on UHV transmission line with high voltage shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 121-127.
- [13] 陈祥文, 柳焕章. 超高压线路简化整定计算的原则和方法[J]. 继电器, 2007, 35(2): 11-19. CHEN Xiangwen, LIU Huanzhang. Rules and methods for simplifying setting calculation of protections of extra-high voltage transmission line[J]. Relay, 2007, 35(2): 11-19.
- [14] DL/T 559—2007 220 kV~750 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S]. 2007. DL/T 559—2007 Setting guide for 220 kV~750 kV power system protection equipment[S]. 2007.
- [15] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005. ZHU Shengshi. Principle and technology of relay protection in HV power network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [16] 张永浩, 龚仁敏, 王利强, 等. 220~750 kV 电网线路后备保护整定配合探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 136-142. ZHANG Yonghao, GONG Renmin, WANG Liqiang, et al. Discussion on the coordination of backup protection relay settings in the 220~750 kV network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 136-142.
- [17] 杜丁香, 周泽昕, 李岩军, 等. 1 000 kV 交流同塔双回输电线路的电气特性仿真分析[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 20-25. DU Dingxiang, ZHOU Zexin, LI Yanjun, et al. Simulation analysis on electrical characteristics of 1 000 kV AC double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 20-25.
- [18] 曾耿晖, 蔡泽祥, 陈桥平, 等. 同塔双回线路接地故障零序电流分布特性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 212-217. ZENG Genghui, CAI Zexiang, CHEN Qiaoping, et al. Analysis on zero sequence current distribution characteristic of grounding faults occurred in double-circuit transmission

- lines on the same tower[J]. Power System Technology, 2011, 35(11):212-217.
- [19] 张 洋,王 伟,樊占峰. 基于虚拟零序电流的双回线接地距离保护原理[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 55-59.
- ZHANG Yang, WANG Wei, FAN Zhanfeng. A novel scheme of ground distance protection for double circuit line based on virtual zero sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21):55-59.
- [20] 吴麟琳. 基于频率特征的振荡识别及双回线零序问题研究[D]. 北京:华北电力大学, 2013.
- WU Linlin. Study on oscillation identification based on frequency characteristics and zero-sequence problems of parallel transmission lines[D]. Beijing: North China Electric University, 2013.
- [21] 李 炜,陈 剑,姜美玲,等. 考虑电容电流的同塔双回线接地距离保护零序电流补偿系数的整定[J]. 电网技术, 2012, 36(7):281-284.
- LI Hui, CHEN Jian, JIANG Meiling, et al. Setting of zero-sequence current compensation coefficient for ground distance relays of double-circuit transmission lines on same tower considering capacitive current[J]. Power System Technology, 2012, 36(7):281-284.
- [22] 姜宪国,刘 宇,周泽昕,等. 同塔双回线接地距离保护零序电流补偿系数分析及整定方法改进[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8):9-14.
- JIANG Xianguo, LIU Yu, ZHOU Zexin, et al. Analysis of zero-sequence current compensation coefficient and improvement of setting method for grounding distance protection of dual-loop lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8):9-14.
- 陈祥文(1973—),男,硕士研究生,高级工程师,主要从事继电保护整定计算和专业管理工作。
- 谢 俊(1980—),男,高级工程师,从事电力系统继电保护工作。
- 王玉龙(1988—),男,工程师,从事电力系统继电保护工作。
- 李会新(1973—),男,高级工程师,从事电力系统继电保护工作。
- 金明亮(1978—),男,高级工程师,从事电力系统继电保护工作。
- 谢 华(1983—),男,工程师,从事电力系统继电保护工作。

(上接第 131 页)

- preventive measures[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2001, 48(4):221-226.
- [11] PRINZ W. AC-induced corrosion on cathodically protected pipelines[J]. UK Corrosion, 1992(1):58-61.
- [12] LALVANI S B, LIN X. A revised model for predicting corrosion of materials induced by alternating voltages[J]. Corrosion Science, 1996, 38(10):1709-1719.
- [13] 林 莘,李 爽,徐建源,等. 超高压 GIS 暂态壳体电压的仿真研究[J]. 高压电器, 2011, 47(3):12-17.
- LIN Xin, LI Shuang, XU Jianyuan, et al. Simulation of transient enclosure voltage in EHV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3):12-17.
- [14] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- FENG Cizhang, MA Xikui. An introduction to engineering electromagnetic fields[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [15] 吴励坚. 大电流母线的理论基础与设计[M]. 北京:水利电力出版社, 1985.
- WU Lijian. Theoretical principle and design for large current bus[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1985.
- [16] 郭 磊,范 冕,姚裕安. 550 kV GIS 外壳感应环流特性的仿真分析[J]. 湖北工业大学学报, 2012, 27(1):74-78.
- GUO Lei, FAN Mian, YAO Yu'an. Simulation analysis on in bus enclosure the circulating current of the 550 kV GIS [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2012, 27(1):74-78.
- 李 爽(1985—),男,硕士,高级工程师,研究方向为高压开关技术、电力系统暂态计算及仿真技术。