

多端线路差动保护改进算法的研究

夏经德^{1,2}, 秦瑞敏¹, 钱慧芳¹, 高淑萍^{2,3}, 焦在滨², 何世恩^{2,4}

(1. 西安工程大学 电子信息学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049;

3. 西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054; 4. 国网甘肃省电力公司风电技术中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要:针对传统差动保护在T型以及多端线路保护中出现的问题,以两端输电线路纵向阻抗的计算方法为基础,提出了一种适用于多端线路差动保护的改进算法。所提算法以发生故障时线路各端电流故障分量的相量和作为动作量,以任意两端之间最大的电压故障分量差与该两端线路的串联正序阻抗比值作为制动量。同时,上述数据之间彼此独立且可以相互转化,确保了保护能够在系统正常运行的情况下准确区分出区内、区外故障。通过对三相输电线路合理的解耦算法,达到了消减相间电磁耦合的目的,使所提算法实现分相判别的功能。在EMTP软件中,建立了高压多端输电线路模型,仿真结果表明,所提算法具有良好的状态判别能力,整定简单、判别裕度大,可靠性高,同时能够有效抵御线路电容电流和电流互感器饱和所带来的影响,具有较好的工程推广前景。

关键词:多端输电线路;故障分量;继电保护;差动保护;纵向阻抗;解耦算法;电流互感器饱和

中图分类号:TM 77

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.12.021

0 引言

随着大规模分布式电源的接入,T型或多端的分布式电厂(包括风电场)联络线越来越多地出现在电网框架结构中,导致按常规系统配置的继电保护面临巨大挑战^[1]。因此,研究多端输电线路发生故障后保护的可靠性、选择性、灵敏性具有十分重要的意义。

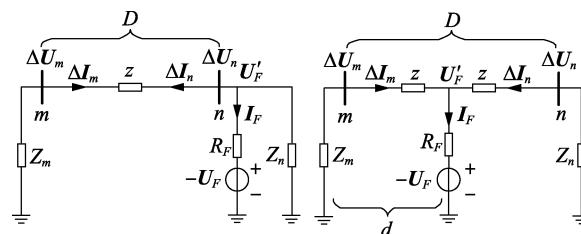
目前,T型或多端输电线路大多采用电流差动保护作为主要的保护配置^[2]。根据差动保护中差动电流和制动电流的构成形式不同,保护判据大致可分为全电流相量差动^[3]、各种形式的电流故障分量差动^[4]、零序电流差动^[5]、采样值差动^[6]、电流相位差动^[7]等不同的形式。由于长距离高压输电线路中分布电容电流的存在,目前主要通过提高动作门槛值或电容电流补偿^[8-9]的方法来消除其对电流差动保护带来的影响。但是提高制动系数和起始门槛值势必会削弱保护的灵敏度。由于多端线路发生区外故障时短路电流幅值很大,容易使近故障端的电压互感器发生饱和,使保护发生误动。目前国内外识别电压互感器饱和的方法有时差法、谐波制动法、小波检测法差分法等^[10],但上述各种方法都有一定的缺点。

针对差动保护在T型或者多端线路存在的上述问题,本文以两端输电线路纵向阻抗^[11]的计算方法为基础,提出了一种适用于多端线路差动保护的改进算法。该算法利用双端量中电压故障分量差、电

流故障分量和线路阻抗的三角平衡关系,合理地将两端线路保护的改进算法推广到T型线路。为了提高改进算法的可靠性,以三端中任意两端之间的最大电压故障分量差与该两端线路正序串联阻抗的比值作为T型线路保护的制动量,整定裕度大。通过合理解耦,本文改进算法消减了线路相间耦合对保护的影响,真正实现了其分相跳闸的功能。同时,可以通过等效T型线路对多端线路进行分析。EMTP仿真结果表明,本文改进算法不受过渡电阻的影响,抗电容电流和电流互感器暂态饱和能力强,具有良好的应用前景。

1 双端线路差动保护的改进算法

图1(a)和(b)分别为双端线路发生区外、区内故障情况下的R-L单相等效工频故障分量线路模型^[12]。图中, ΔU_m 、 ΔU_n 和 ΔI_m 、 ΔI_n 分别为线路m端、n端测量得到的工频电压和工频电流故障分量; z 为单位长度的线路阻抗; Z_m 和 Z_n 分别为线路m端和n端的等效系统阻抗; D 为被保护线路的地理距离; d 为发生内部故障时m端到故障点的距离; R_F 为故障电阻; $-U_F$ 和 I_F 分别为故障点等效工频电动



(a) 区外故障

(b) 区内故障

图1 R-L单相等效工频故障分量线路模型

Fig.1 Single-phase R-L equivalent model of power frequency fault component of two-terminal lines

收稿日期:2017-10-12;修回日期:2018-10-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377129,51777166)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377129,51777166)

势和故障电流; U'_F 为故障点线路上的实际工频电压值。

基于图 1 所示的故障网络,纵向阻抗表述为:

$$\Delta Z_{op} = \Delta U_{op} / \Delta I_{op} \quad (1)$$

其中, $\Delta U_{op} = \Delta U_m - \Delta U_n$; $\Delta I_{op} = \Delta I_m + \Delta I_n$ 。

将式(1)转化得到类似电流差动保护形式的改进算法:

$$|\Delta I_{op}| = |\Delta I_m + \Delta I_n| > \left| \frac{\Delta U_{op}}{zD} \right| \quad (2)$$

此时差动保护的改进算法可通过 ΔI_m 、 ΔI_n 和 $\Delta U_{op}/(zD)$ 构成的三角平衡关系来描述。当发生区外故障时, ΔI_m 和 ΔI_n 之差的幅值明显小于 $\Delta U_{op}/(zD)$ 的幅值,确保了发生区外故障时改进算法的可靠性。当发生区内故障时, ΔI_m 和 ΔI_n 之和的幅值明显大于 $\Delta U_{op}/(zD)$ 的幅值,确保了发生区内故障时改进算法的灵敏性。

2 T 型线路差动保护的改进算法

图 2(a) 和(b)分别为基于 R-L 线路集中参数的 T 型线路发生区外、区内单相故障时的附加网络图。图中, ΔU_p 、 ΔI_p 、 Z_p 分别为 T 型线路 p 端的电压故障分量、电流故障分量和等效系统阻抗; D_1 、 D_2 、 D_3 分别为 m、n、p 端到 T 接口的距离。

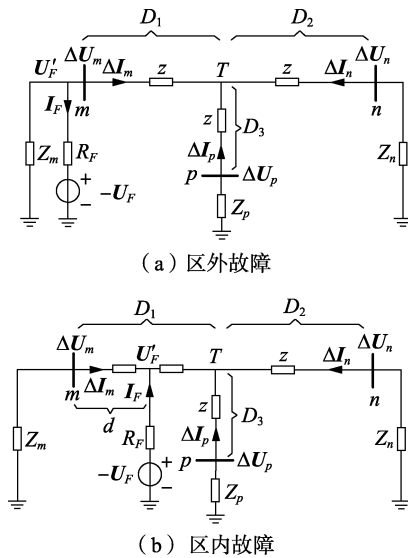


图 2 T 型线路的单相故障附加网络

Fig.2 Additional network when single-phase fault occurs in T-type transmission line

2.1 区外故障

如图 2(a) 所示,假设 T 型线路 m 端发生区外故障。理想状态下,得到线路三段电流故障分量的相量和为:

$$\Delta I_m + \Delta I_n + \Delta I_p = 0 \quad (3)$$

对于双端线路,其两端电压故障分量之差是唯一的,然而对于 T 型线路,任意两端之间的电压差有

3 种: $\Delta U_m - \Delta U_n$, $\Delta U_m - \Delta U_p$, $\Delta U_n - \Delta U_p$ 。对 3 种不同的电压故障分量差进行如下特性分析:

(1) 以 m、n 端和 m、p 端电压故障分量差分析。

$$\Delta U_m - \Delta U_n = \Delta I_m z D_1 + (-\Delta I_n) z D_2 \quad (4)$$

发生 m 端区外故障时,故障点处的电压故障分量最大,测量观测点沿线路从 m 端向 n 端移动时,电压故障分量幅值呈单调下降的趋势。线路 m、n 两端电压的相量差可以表示为线路 m-T 段和 n-T 段线路压降的和,该差值具有相对稳定的结果,其幅值关系式为:

$$\begin{aligned} |\Delta U_m - \Delta U_n| &= |\Delta I_m z (D_1 + D_2) + \Delta I_p z D_1| \geq \\ &|\Delta I_m z (D_1 + D_2)| > \\ &|(\Delta I_m + \Delta I_n + \Delta I_p) z (D_1 + D_2)| \end{aligned} \quad (5)$$

再由不等式(5)转换得到:

$$|\Delta I_m + \Delta I_n + \Delta I_p| < \left| \frac{\Delta U_m - \Delta U_n}{z(D_1 + D_2)} \right| \quad (6)$$

其中, $z(D_1 + D_2)$ 为 m-n 段线路的串联阻抗值。

同样地,当发生 m 端区外故障时,线路 m、p 端的电压故障分量差也为一个相对稳定的结果,可得到:

$$|\Delta I_m + \Delta I_n + \Delta I_p| < \left| \frac{\Delta U_m - \Delta U_p}{z(D_1 + D_3)} \right| \quad (7)$$

其中, $z(D_1 + D_3)$ 为 m-p 段线路的串联阻抗值。

由式(6)、(7)可知,发生区外故障时故障相的电流故障分量 ΔI_m ,非故障相的电流故障分量和以及 m、n 端电压故障分量差与其对应的线路串联阻抗之比,三者构成三角关系,具有明显的区外故障特性。

根据对上述 2 种电压故障分量差的分析,取二者中较大的一个作为制动量中的电压差,可以更有效地提高算法的可靠性。所以需比较 $|\Delta U_m - \Delta U_n|$ 、 $|\Delta U_m - \Delta U_p|$ 的大小以确定最终的制动量。

根据图 2(a) 所示的 T 型线路 m 端区外故障分量网络,以区外故障最严重点为参考,认为故障点与测量端非常接近,即 $U'_F \approx U_m$,对该线路进行定性分析。

$$\begin{cases} |\Delta U_m - \Delta U_n| = \left| U'_F \left(1 - \frac{Z_{nop}}{Z_{nop} + zD_1} \frac{1}{1 + zD_2/Z_n} \right) \right| \\ |\Delta U_m - \Delta U_p| = \left| U'_F \left(1 - \frac{Z_{nop}}{Z_{nop} + zD_1} \frac{1}{1 + zD_3/Z_p} \right) \right| \end{cases} \quad (8)$$

其中, $Z_{nop} = \frac{(Z_n + zD_2)(Z_p + zD_3)}{Z_n + zD_2 + Z_p + zD_3}$, 为 n 端支路和 p 端支路的并联等效阻抗。

a. 假设 $D_2 = D_3$, 当 $Z_{ns} > Z_{ps}$ 时, 有 $|\Delta U_m - \Delta U_n| < |\Delta U_m - \Delta U_p|$, 可得到关系式(7); 同理当 $Z_{ns} < Z_{ps}$ 时, 可得到关系式(6)。

b. 假设 $Z_n > Z_p$, 当 $D_2 > D_3$ 时, 有 $|\Delta U_m - \Delta U_n| >$

$|\Delta U_m - \Delta U_p|$, 可得到关系式(6); 同理当 $D_2 < D_3$ 时, 可得到关系式(7)。

(2) 线路 n, p 端的电压故障分量差分析。

$$\Delta U_n - \Delta U_p = \Delta I_n z D_2 - \Delta I_p z D_3 \quad (9)$$

按照故障点电压故障分量在线路上的分布原则, 当测量点从 n 端向 T 端移动时, 电压幅值逐渐增大, 然后从 T 端至 p 端幅值呈现单调递减的趋势。线路 n, p 两端电压的相量差可以表示为线路 $n-T$ 段和 $p-T$ 段线路压降的差, 该差值相对不稳定, 容易造成保护的误动。

当发生区外故障时, 由于三端电流故障分量相量和的幅值很小, 接近为 0, 而整定值为最大电压故障分量差 $\Delta U'_{op} = \max(|\Delta U_m - \Delta U_n|, |\Delta U_m - \Delta U_p|, |\Delta U_n - \Delta U_p|)$ 与其两端相连的线路串联阻抗之比的幅值, 其值远大于动作量, 从而保证了改进算法的可靠性, 则有:

$$|\Delta I_m + \Delta I_n + \Delta I_p| < |\Delta U'_{op} / Z'| \quad (10)$$

其中, Z' 为构成 $\Delta U'_{op}$ 对应的线路串联阻抗。

同理, 当 T 型线路发生 n 端、 p 端区外故障时, 也可得到类似于式(10)形式的关系式。

2.2 区内故障

假设区内 $m-T$ 段线路发生故障, 如图 2(b) 所示, 线路 m, n 两端的电压故障分量差的关系式为:

$$\begin{aligned} |\Delta U_m - \Delta U_n| &= |\Delta I_m z d - (\Delta I_n + \Delta I_p)(D_1 - d)z - \Delta I_n z D_2| < \\ &|\Delta I' z d - \Delta I'(D_1 - d)z - \Delta I' z D_2| < \\ &|z(D_1 + D_2)(\Delta I_m + \Delta I_n + \Delta I_p)| \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\Delta I' = \max(|\Delta I_m|, |\Delta I_n|, |\Delta I_p|)$ 。

由式(11)可转换得到关系式:

$$|\Delta I_m + \Delta I_n + \Delta I_p| > \left| \frac{\Delta U_m - \Delta U_n}{z(D_1 + D_2)} \right| \quad (12)$$

式(12)与式(2)的算法意义相同, 均为发生区内故障时, 因为各端电流故障分量和远大于线路 m, n 端电压故障分量差与对应线路串联阻抗的比值, 从而确保了该算法的灵敏性。同样根据三角平衡关系的两边之和大于第三边可知, 无论线路各侧电流故障分量和电压故障分量的取值如何变化, 都不会改变改进算法的性质和特点, 从而得到差动保护改进算法的判别式为:

$$|\Delta I'_{op}| = |\Delta I_m + \Delta I_n + \Delta I_p| > |\Delta U'_{op} / Z'| \quad (13)$$

同理, 当故障发生在 $n-T$ 或 $p-T$ 段线路内时, 与上述 $m-T$ 段线路发生故障时的分析方法相同, 都可推出式(13)形式的判别式, 在此不再进行推导。

2.3 三相线路下的 T 型线路差动保护

图 3 为 m 端发生区内 a 相单相接地故障时的 T 型线路三相故障附加网络, 图 4 为其对应的零序等效线路模型。图 3、4 中, Z_{sm}, Z_{sn}, Z_{sp} 分别为 T 型线

路 m, n, p 端的系统自阻抗; Z_{mm}, Z_{nn}, Z_{pp} 分别为 T 型线路 m, n, p 端的系统互阻抗; Z_{1m}, Z_{1n}, Z_{1p} 分别为 T 型线路 m, n, p 端的系统正序阻抗; Z_{0m}, Z_{0n}, Z_{0p} 分别为 T 型线路 m, n, p 端的系统零序阻抗; $z_{mTs}, z_{mTm}, z_{mTl}, z_{mT0}$ 分别为 $m-T$ 段单位长度线路的自阻抗、互阻抗、正序阻抗和零序阻抗; $z_{nTs}, z_{nTm}, z_{nTl}, z_{nT0}$ 分别为 $n-T$ 段单位长度线路的自阻抗、互阻抗、正序阻抗和零序阻抗; $z_{pTs}, z_{pTm}, z_{pTl}, z_{pT0}$ 分别为 $p-T$ 段单位长度线路的自阻抗、互阻抗、正序阻抗和零序阻抗; R_F, R_{F0} 分别是三相线路模型和零序等效线路模型中的故障电阻; $\Delta U_{ma}, \Delta U_{na}, \Delta U_{pa}$ 分别为 m, n, p 端的 a 相工频电压故障分量; $\Delta U_{mb}, \Delta U_{nb}, \Delta U_{pb}$ 分别为线路 m, n, p 端的 b 相工频电压故障分量; $\Delta U_{mc}, \Delta U_{nc}, \Delta U_{pc}$ 分别为线路 m, n, p 端的 c 相工频电压故障分量; $\Delta I_{ma}, \Delta I_{na}, \Delta I_{pa}$ 分别为线路 m, n, p 端的 a 相工频电流故障分量; $\Delta I_{mb}, \Delta I_{nb}, \Delta I_{pb}$ 分别为线路 m, n, p 端 b 相工频电流故障分量; $\Delta I_{mc}, \Delta I_{nc}, \Delta I_{pc}$ 分别为线路 m, n, p 端 c 相工频电流故障分量; $\Delta U_{m0}, \Delta U_{n0}, \Delta U_{p0}$ 和 I_{m0}, I_{n0}, I_{p0} 分别为线路 m, n, p 端的工频零序电压和零序电流。

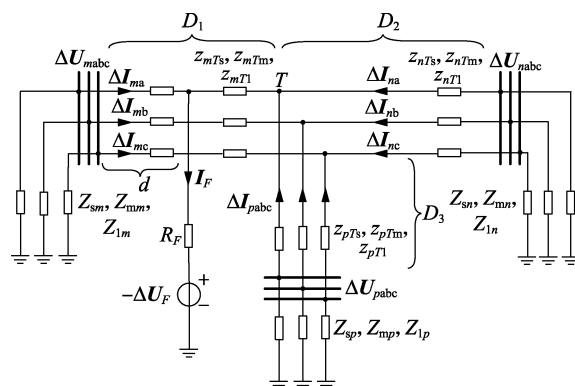


图 3 T 型线路 a 相接地的三相故障附加网络

Fig.3 Three-phase fault additional network under phase-a-to-earth fault in T-type transmission lines

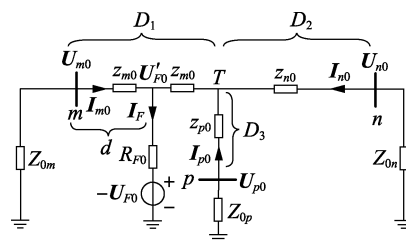


图 4 零序等效线路模型

Fig.4 Model of zero-sequence network

根据图 3 所示 T 型线路的三相故障附加网络, m, n 两端的电压故障分量之差表示为:

$$\begin{aligned} \Delta U_{m\varphi} - \Delta U_{n\varphi} &= \\ \Delta I_{m\varphi} z_{mTl} d - (\Delta I_{n\varphi} + \Delta I_{p\varphi}) z_{nTl} (D_1 - d) - \Delta I_{n\varphi} z_{nTl} D_2 &= \\ \Delta I_{m\varphi} z_{mTl} d - (\Delta I_{n\varphi} + \Delta I_{p\varphi}) z_{nTl} (D_1 - d) - \Delta I_{n\varphi} z_{nTl} D_2 + \\ 3 \Delta I_{m0} z_{mTm} d - 3 z_{mTm} (\Delta I_{n0} + \Delta I_{p0}) (D_1 - d) - 3 \Delta I_{n0} z_{nTm} D_2 & \end{aligned} \quad (14)$$

与到故障点的距离成反比, m_1 端的电压故障分量幅值最大, 只需比较 $|\Delta U_{m_{N-1}}|$ 、 $|\Delta U_{m_N}|$ 的大小即可求出相应的最大电压差。定性分析后可得到式 (20) 中的区外故障判别式。制动量的电压故障分量差为任意两端的最大电压差, 从而提高了该算法的可靠性。

根据以上分析, 多端线路差动保护的改进算法判据为:

$$I_r - I_{res} > I_{set} \quad (21)$$

$$I_r = \left| \sum_{k=1}^N \Delta I_{m_{k\varphi}} \right|, \quad I_{res} = \left| \frac{\max(\Delta U_{op\varphi\Sigma}^{m_i-m_j})}{Z_{op\varphi,k}^{m_i-m_j}} \right|$$

其中, I_r 、 I_{res} 分别为动作量、制动量; I_{set} 为差动保护改进算法的最小启动门槛, 应能躲过发生区外故障时所产生的不平衡电流, 固定设置为 100 A (一次侧电流); $i, j=1, 2, \dots, N$ 且 $i \neq j$; $\Delta U_{m_i\varphi\Sigma}$ 、 $\Delta U_{m_j\varphi\Sigma}$ 分别为 m_i 和 m_j 端的电压故障分量; $\max(\Delta U_{op\varphi\Sigma}^{m_i-m_j})$ 为任意两端之间的最大电压差; $Z_{op\varphi,k}^{m_i-m_j}$ 为 m_i 和 m_j 端之间线路的串联正序阻抗。

4 性能分析

4.1 抵御电容电流的能力

由于 T 型或多端线路发生区内故障时, 故障分量差动电流中的电容电流很小, 且干线式多端线路可以转化为 T 型线路, 因此本节以图 7 所示的 T 型线路发生 m 端区外单相接地故障附加网络为例分析改进算法抗电容电流的能力。

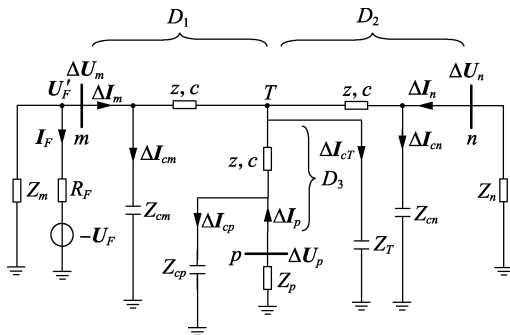


图 7 发生区外故障时带并联电容的单相接地故障附加网络

Fig.7 Additional network with shunt capacitors when external single-phase grounding fault occurs

图 7 中, ΔI_{cm} 、 ΔI_{cn} 、 ΔI_{cp} 、 ΔI_{cT} 分别为三端线路和 T 节点处的等效电容电流; Z_{cm} 、 Z_{cn} 、 Z_{cp} 分别为 T 型线路上 3 条支路的等值容抗; c 为线路单位长度的电容; 其他相关电气量含义同图 2。

T 型线路三端电容支路的电流表达式分别为:

$$\begin{cases} \Delta I_{cm} = \Delta U_m / Z_{cm} \\ \Delta I_{cn} = \Delta U_n / Z_{cn} \\ \Delta I_{cp} = \Delta U_p / Z_{cp} \end{cases} \quad (22)$$

$$Z_{cm} = 2 / (j\omega D_1)$$

$$Z_{cn} = 2 / (j\omega D_2)$$

$$Z_{cp} = 2 / (j\omega D_3)$$

线路各端的电压故障分量分别为:

$$\begin{cases} \Delta U_m = U'_F, \quad \Delta U_n = U'_F \left(1 - \frac{3Z'_n + 3zD_2 + 2zD_1}{2Z'_n + 2zD_2 + zD_1} \right) \\ \Delta U_p = U'_F \left(1 - \frac{3Z'_n + 3zD_2 + 2zD_1}{2Z'_n + 2zD_2 + zD_1} \right) \left(1 - \frac{zD_3}{Z_{pT}} + \frac{zD_3}{Z_T} \right) \end{cases} \quad (23)$$

$$Z'_n = Z_n Z_{cn} / (Z_n + Z_{cn})$$

$$Z'_p = Z_p Z_{cp} / (Z_p + Z_{cp})$$

$$Z_{pT} = (Z'_p + zD_3) / (Z'_p + zD_3 + Z_T)$$

$$Z_T = Z_{cm} Z_{cn} Z_{cp} / (Z_{cp} Z_{cn} + Z_{cm} Z_{cp} + Z_{cm} Z_{cn})$$

此时, 差动电流的不平衡量为:

$$\Delta I_{op} = \frac{\Delta U_m}{Z_{cm}} + \frac{\Delta U_n}{Z_{cn}} + \frac{\Delta U_p}{Z_{cp}} + \frac{\Delta U_T}{Z_{cT}} \quad (24)$$

其中, ΔU_T 为节点 T 的电压故障分量; Z_{cT} 为节点 T 的等值容抗。

假设 $\Delta U'_{op} = |\Delta U_m - \Delta U_n|$, 则纵向阻抗为:

$$\left| \frac{\Delta U_m - \Delta U_n}{\Delta I_m + \Delta I_n + \Delta I_p} \right| = |K_C| |zD_1 + zD_2| \quad (25)$$

$$|K_C| =$$

$$\left| \frac{Z_{cm} (Z'_p + zD_3) (3Z'_n + 3zD_2 + 2zD_1)}{z(D_1 + D_2) (Z'_p + zD_3) (2Z'_n + 2zD_2 + zD_1) - Z'_n - Z'_p - zD_2 - zD_3} \right|$$

根据式 (25), 只有当 $|K_C| > 1$ 时, 才能正确判别区内、外故障。以文献 [13] 中的 EMTP 220 kV T 型线路仿真模型为例, 可分别计算得到: $Z_{cm} \approx -j2\ 254\ \Omega$ 、 $Z_{cn} \approx -j3\ 131\ \Omega$ 、 $Z_{cp} = -j4\ 597\ \Omega$ 、 $Z_{cT} = -j1\ 889\ \Omega$ 。令 $|K_C| = 1$, 得到 n 端的系统阻抗 $|Z_n| = 306\ \Omega$, 该阻抗反映了系统的短路容量, 只有当该短路容量不小于输电线路传输的自然功率时, 才能满足系统运行方式的要求。线路的特征阻抗决定着线路传输的自然功率, 得到线路正序参数表示的特征阻抗 $|Z_{Tz}| \approx |l_1 / c_1| = 282\ \Omega$ 。又因为 $|Z_n| > |Z_{Tz}|$, 在不同运行方式下, 系统等效阻抗均满足 $|Z_n| < 306\ \Omega$ 。综上所述, 该改进算法具有较强的抗电容电流能力。

4.2 抗电流互感器饱和能力

本文理论分析和仿真验证只涉及线路单端电流互感器暂态饱和情况, 多端线路发生区外故障时, 靠近故障侧的短路电流会很大, 易导致近故障侧的电流互感器发生饱和, 所以本节重点以 T 型线路 m 端区外故障为例进行分析。

电流互感器暂态饱和后的电流波形如图 8 所示。定义导通角 θ 为电流过零点到饱和点的相角之差, $\theta \sim \pi - \theta$ 为电流互感器的暂态饱和度。

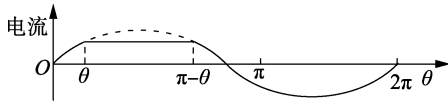


图 8 电流互感器暂态饱和后的电流波形

Fig.8 Transient saturation current of current transformer

电流互感器暂态饱和后的工频电流分量为:

$$I_{m0} = \int_{-\pi}^{\pi} \sin t \times \sin t dt = \sin \theta (\pi - 2\theta) - 2\cos \theta \quad (26)$$

当电流互感器暂态饱和度超过导通角后,电流互感器电流基波分量随着暂态饱和程度的增加呈现衰减状态。当电流互感器暂态饱和度达到 π 时,此时电流互感器饱和最严重,定性反映为电流因饱和和衰减为原来的 50%。以 m 端测得的电压为参考量,假设各段线路长度相同,正序阻抗均为 Z ,系统阻抗不代入计算,则电流互感器暂态饱和前 m 端电流故障分量为:

$$\Delta I_m = \left| \frac{\Delta U_m - \Delta U_n}{Z + Z // Z} \right| \quad (27)$$

当电流互感器暂态饱和角为 π 时,改进算法的动作量和制动量分别如式(28)、(29)所示。

$$I_r = |\Delta I_m + \Delta I_n + \Delta I_p| = |\Delta I_m / 2| = |(\Delta U_m - \Delta U_n) / (3Z)| \quad (28)$$

$$I_{res} = |(\Delta U_m - \Delta U_n) / (2Z)| \quad (29)$$

电流互感器最严重饱和的情况下, $I_{res}/I_r = 1.5$, 说明该算法至少有 1.5 倍以上的裕度。在各端线路长度相同的条件下,此时制动量中的任意两端电压差最小,制动量最小的情况下仍有 1.5 倍裕度,因此该改进算法在 T 型线路中具有较强的抗电流互感器暂态饱和能力。

5 仿真验证

5.1 仿真系统及其参数

为了验证本文所提多端线路差动保护的改进算法的性能,利用 ATP-EMTP 建立了 220 kV 6 端输电线路模型,如附录中的图 A1 所示。图中, k_1 、 k_2 、 k_3 为出口区外故障点; k_4 、 k_5 为出口区内故障点; k_6 为 T_3 - m_4 中点处故障点; k_7 为节点 T_3 处故障点。模型中电源和线路分别采用集中参数和分布参数模型表示,具体参数详见附录。

5.2 仿真结果与分析

仿真故障类型为单相接地、两相短路接地、两相短路和三相短路,仿真结果分别如表 1—3 所示。表中, I'_{res} 为文献[14]中算法的制动量; λ_1 、 λ_2 分别为文献[14]算法和本文算法的灵敏度(定义灵敏度为动作量与制动量的比值)。表 4 为文献[13]中 T 型线路 m 端发生区外故障单相接地故障时的电流互感

器饱和仿真结果,表中,×表示保护未动作。

表 1 2 种算法的单相接地故障仿真结果对比

Table 1 Comparison of simulative results of single-phase grounding fault between two algorithms

故障位置	故障类型	过渡电阻/ Ω	相序	I_r/A	I'_{res}/A	I_{res}/A	λ_1, λ_2
k_1	ag	0	a	12.4	413	1 649	0.03, 0.007
			b	2.2	8.14	414	0.27, 0.005
			c	2.2	8.14	414	0.27, 0.005
k_3	bg	100	a	2	28.57	87	0.07, 0.022
			b	11.6	301	1 423	0.04, 0.008
			c	1.146	14.3	73.1	0.08, 0.016
k_5	cg	0	a	17 383	2 172.8	1 033	8.01, 16.8
			b	0.06	0.11	17.6	0.55, 0.003
			c	0.06	0.11	17.6	0.55, 0.003
		100	a	1 138	162.3	68.6	7.02, 16.7
			b	13 726	1 715.7	798	8.02, 17.2
			c	1 126	150.6	62.5	7.5, 18.01
k_7	ag	100	a	0.09	0.131	12.6	0.68, 0.07
			b	0.09	0.131	12.6	0.68, 0.07
			c	0.09	0.131	12.6	0.68, 0.07

表 2 2 种算法的两相短路接地和两相短路的仿真结果对比

Table 2 Comparison of simulative results of double-phase ground fault and double-phase of lines between two algorithms

故障位置	故障类型	过渡电阻/ Ω	相序	I_r/A	I'_{res}/A	I_{res}/A	λ_1, λ_2
k_2	abg	0	a	15	750	2 276	0.02, 0.006
			b	15	750	2 276	0.02, 0.006
		50	a	10.6	353.3	1 678	0.03, 0.005
			b	10.6	353.3	1 678	0.03, 0.005
		0	b	14.4	363	2 188	0.04, 0.006
			c	14.4	363	2 188	0.04, 0.006
k_6	bc	50	b	5.87	97.8	640	0.06, 0.009
			c	5.87	97.8	640	0.06, 0.009
	cag	0	a	24 291	3 373	1 818	7.2, 13.36
			c	24 291	3 373	1 818	7.2, 13.36
		50	a	20 362	2 994	1 326	6.8, 15.3
			c	20 362	2 994	1 326	6.8, 15.3
k_6	ca	0	a	21 173	2 680	1 708	7.9, 12.39
			c	21 173	2 680	1 708	7.9, 12.39
		50	a	7 545	1 022	275	7.38, 27.5
			c	7 545	1 022	275	7.38, 27.5

表 3 2 种算法的三相短路故障仿真结果对比

Table 3 Comparison of simulative results of three-phase short circuit between two algorithms

故障位置	故障类型	相序	I_r/A	I'_{res}/A	I_{res}/A	λ_1, λ_2
k_1	abc	a	13.28	1 228	2 161	0.01, 0.006
		b	13.40	1 331	2 133	0.01, 0.006
		c	13.27	1 329	2 186	0.01, 0.006
k_2	abc	a	16.1	1 623	2 561	0.01, 0.006
		b	16.7	1 678	2 504	0.01, 0.006
		c	15.2	1 529	2 560	0.01, 0.006
k_4	abc	a	20 040	2 824	1 506	7.1, 13.3
		b	19 524	2 789	1 470	7.0, 13.2
		c	20 100	2 830	1 497	7.1, 13.4

表4 区外 m 端单相接地故障时电流互感器饱和和仿真结果
Table 4 Simulative results of transient saturation of current transformer when external single phase to ground fault occurs at Terminal m

故障位置	故障类型	过渡电阻/ Ω	$\theta/(^{\circ})$	I_r/A	I_{res}/A	保护动作情况
k_1	ag	0	30	144	3 856	×
			60	1 238	3 856	×
			120	2 177	3 856	×
			180	2 639	3 856	×
	100	100	30	115	2 121	×
			60	306	2 121	×
			120	519	2 121	×
			180	1 123	2 121	×

(1) 由表1—3的结果可以得出如下结论。

a. 发生区外故障时,无论故障相还是非故障相,本文判据的制动量都大于文献[14]中的制动量,可靠性更强;发生单相金属性接地时,在考虑过渡电阻的情况下,对于故障相本文算法的制动量比文献[14]算法的制动量至少提高了3倍,对于非故障相其制动量提高了50倍,保护更加可靠不动作;发生两相短路接地故障时,考虑过渡电阻情况下,对于故障相本文算法的制动量至少增大了3倍,可靠性得到提高;发生两相短路故障时,考虑过渡电阻情况下,对于故障相,本文算法的制动量比文献[14]中的制动量至少提高了6倍;发生三相短路故障时,故障相改进算法的制动量至少提高了1.5倍。

b. 发生区内故障时,本文算法具有良好的分相判别能力,故障相的制动量比文献[14]中的制动量减小了1~4倍,灵敏度相对较高。发生单相金属性接地故障时,对于故障相本文算法的灵敏度至少提高了2.1倍,对于非故障相其制动量增大了至少96倍,可靠性极大增加;发生两相短路接地和两相短路故障时,对于故障相,本文算法的灵敏度分别至少提高了1.86和1.57倍;发生三相短路故障时,对于故障相,本文算法的灵敏度比文献[14]算法的灵敏度提高了1.87倍。

c. 在没有对线路电容进行任何补偿的情况下,本文算法的仿真结果仍然具有非常高的可靠性,说明了其能够有效抵御线路电容对判据的影响。

(2) 由表4可以看出,若发生金属性故障时 m 端电流互感器发生暂态饱和,随着饱和度的增加动作量由144 A逐渐增大到2 639 A,仍有1.5倍的裕度,不会造成保护的误动;存在过渡电阻时,随着电流互感器饱和度的增加,动作量由115 A逐渐增大到1 123 A,有1.8倍的裕度,可靠性高于没有过渡电阻的情况,说明该算法具有较强的抗电流互感器暂态饱和能力。

6 结论

本文基于纵向阻抗提出了一种多端线路差动保

护的改进算法,理论分析和ATP-EMTP仿真结果表明:本文算法在发生区内故障时具有较高的灵敏性;在发生区外故障时具有较高的可靠性,并且其三角平衡关系可以承受线路阻抗、电压故障分量和电流故障分量变化的影响。本文算法结构简单、易于整定、动作灵敏,抗过渡电阻能力强,能够有效抵御线路分布电容电流和电流互感器暂态饱和,具有一定的工程应用价值。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 郑涛,赵裕童,李菁,等. 利用电压幅值差和测量阻抗特征的风电T接线路保护方案[J]. 电网技术,2017,41(5):1660-1667.
ZHENG Tao, ZHAO Yutong, LI Jing, et al. A protection scheme for teed lines with wind power based on voltage magnitude difference and measuring impedance characteristics[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1660-1667.
- [2] 何志勤,张哲,尹项根,等. 电力系统广域继电保护研究综述[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):125-130.
HE Zhiqin, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Overview of power system wide area protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 125-130.
- [3] 丛伟,张琳琳,程学启,等. 基于故障电流幅值与相位差的电流差动保护判据[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):26-30.
CONG Wei, ZHANG Linlin, CHENG Xueqi, et al. Criterion of current differential protection based on amplitude and phase difference of fault current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 26-30.
- [4] 刘静,邵能灵,李坤. T型线路电流差动保护研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):58-63.
LIU Jing, TAI Nengling, LI Shen. Differential current protection of T-type transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 58-63.
- [5] 郭雅蓉,柳焕章,王兴国. 零序电流差动保护选相元件[J]. 电力系统自动化,2017,41(2):155-159.
GUO Yarong, LIU Huanzhang, WANG Xingguo. Phase selection elements for zero sequence current differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 155-159.
- [6] 袁荣湘,陈德树,马天皓,等. 采样值电流差动保护原理的研究[J]. 电力自动化设备,2000,20(1):1-3.
YUAN Rongxiang, CHEN Deshu, MA Tianhao, et al. Study on the principle of current differential protection based on sampled values[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(1): 1-3.
- [7] 许德轩,陆于平. 电流相位变化量纵联保护方案[J]. 电工技术学报,2016,31(16):198-206.
XU Sixuan, LU Yuping. The current phase variation pilot protection method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 198-206.
- [8] 刘凯. 超/特高压线路差动保护电容电流补偿方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):94-98.
LIU Kai. Capacitive current compensation method for differential protection of EHV/UHV line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 94-98.
- [9] 毕天姝,于艳莉,黄少锋,等. 超高压线路差动保护电容电流的精确补偿方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(15):30-34.
BI Tianshu, YU Yanli, HUANG Shaofeng, et al. Novel accurate com-

- pensation method of capacitance current of UHV transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 30-34.
- [10] 陈丽艳,何奔腾. 基于差动电流与制动电流比值的抗电流互感器饱和新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 66-74.
- CHEN Liyan, HE Benteng. Novel method of current transformer saturation countermeasure based on the ratio of differential current and restraint current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 66-74.
- [11] 夏经德,索南加乐,张怿宁,等. 基于解耦后输电线路纵向阻抗的改进型纵联保护[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12): 58-65.
- XIA Jingde, SUONAN Jiale, ZHANG Yining, et al. Improved pilot protection based on longitudinal impedance of decoupled transmission line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(12): 58-65.
- [12] 陈祥和,刘在国,肖琦. 输电杆塔及基础设计[M]. 北京:中国电力出版社, 2003: 276-279.
- [13] 施世鸿,何奔腾. T型输电线路非同步数据故障测距新算法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 63-67.
- SHI Shihong, HE Benteng. Fault locating algorithm for T-type transmission line with asynchronous sampling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 63-67.
- [14] 高厚磊,江世芳. T接线路电流纵差保护新判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2001, 29(9): 6-9.
- GAO Houlei, JIANG Shifang. Study on new criterion of current differential protection for teed lines[J]. Power System Protection and Control, 2001, 29(9): 6-9.

作者简介:



夏经德

夏经德(1961—),男,江苏泰州人,高级工程师,博士,从事电力系统继电保护方面的研究(E-mail: xia.jingde@stu.xjtu.edu.cn);

秦瑞敏(1991—),男,山东济宁人,硕士研究生,从事高压线路保护方面的研究(E-mail: 596027187@qq.com);

钱慧芳(1969—),女,安徽灵璧人,副教授,硕士,从事电气工程方面的研究(E-mail: qhfqq@sohu.com)。

Study on improved algorithm in differential protection of multi-terminal line

XIA Jingde^{1,2}, QIN Ruimin¹, QIAN Huifang¹, GAO Shuping^{2,3}, JIAO Zaibin², HE Shien^{2,4}

(1. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. School of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

4. Wind Power Technology Center, State Grid Gansu Electric Power Corporation, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aiming at problems of the traditional differential protection in T-type and multi-terminal line protection, an improved algorithm for differential protection of multi-terminal line based on the calculation method of longitudinal impedance of transmission lines at both ends is proposed. The phasor sum of fault components of the currents at both ends of the line are used as the operating quantity, and the ratio between the maximum voltage fault component between the two ends of the line and the series positive-sequence impedance of the two-terminal line are used as the braking quantity. Meanwhile, the above data are independent and can be transformed to each other, which ensures that the protection can accurately distinguish the internal and external faults under the normal operation of the system. By using the reasonable decoupling algorithm in the three-phase transmission line, the electromagnetic coupling between phases are reduced, so split-phase discriminant function can be realized by the proposed algorithm. A high-voltage multi-terminal transmission line model is established with EMTP software, and the simulative results show that the proposed algorithm has good state distinguishing ability, simple setting, large discriminant margin and high reliability. Meanwhile, it can effectively resist the influence of the saturation of the line capacitance current and current transformer, and has good engineering promotion prospects.

Key words: multi-terminal transmission line; fault component; relay protection; differential protection; longitudinal impedance; decoupling algorithms; current transformer saturation

附录

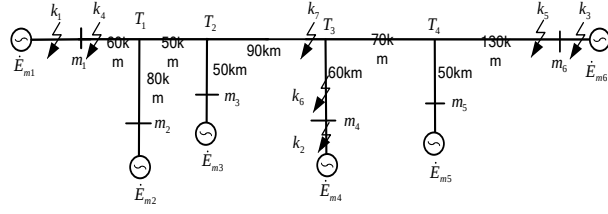


图 A1 仿真系统及故障点位置

Fig.A1 Simulated system and fault points set

a. 系统参数 (Ω):

$$Z_{m11} = 1.052 + j23.17\Omega, \quad Z_{m10} = j19.12\Omega, \quad E_{m1} = 1\angle 0^\circ \text{ p.u.};$$

$$Z_{m21} = 1.051 + j20.5\Omega, \quad Z_{m20} = j20.1\Omega, \quad E_{m2} = 1\angle -5^\circ \text{ p.u.};$$

$$Z_{m31} = 1.04 + j18.76\Omega, \quad Z_{m30} = j14.68\Omega, \quad E_{m3} = 1\angle -10^\circ \text{ p.u.};$$

$$Z_{m41} = 1.03 + j16.52\Omega, \quad Z_{m40} = j15.73\Omega, \quad E_{m4} = 1\angle -15^\circ \text{ p.u.};$$

$$Z_{m51} = 1.02 + j15.52\Omega, \quad Z_{m50} = j15.03\Omega, \quad E_{m5} = 1\angle -20^\circ \text{ p.u.};$$

$$Z_{m61} = 1.06 + j20.12\Omega, \quad Z_{m60} = j17.43\Omega, \quad E_{m6} = 1\angle -25^\circ \text{ p.u.};$$

b. 线路参数:

$$\text{正序参数: } r_1 = 0.035 \Omega/\text{km}, \quad l_1 = 0.4234 \text{ mH}/\text{km}, \quad c_1 = 0.0027 \mu\text{F}/\text{km};$$

$$\text{零序参数: } r_0 = 0.309 \Omega/\text{km}, \quad l_0 = 1.1426 \text{ mH}/\text{km}, \quad c_0 = 0.0019 \mu\text{F}/\text{km}.$$