

# T 接线路差动保护中电容电流补偿方法研究

吴心弘, 张武军, 何奔腾

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 电流差动保护的性能受线路电容电流的影响。根据 T 型输电线路的特点, 提出了两种 T 接线路差动保护的电容电流补偿方法。两种方法均基于  $\pi$  型等效网络而提出, 分别适用于不同的通道条件。理论分析和 EMTP 仿真计算表明, 采用本文的电容电流补偿方法, 能大大降低区外故障和线路空载合闸时的不平衡电流, 从而降低动作门槛, 大大提高保护的灵敏度和动作速度。

**关键词:** 电力系统; 差动保护; T 接线路; 电容电流补偿

## Study on current compensation method of differential protection for teed lines

WU Xin-hong, ZHANG Wu-jun, HE Ben-teng

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The performance of differential current protection is influenced by capacitive current. According to the feature of the teed lines connection, this paper presents two current compensation methods of differential protection. The methods based on  $\pi$  equivalent network, respectively, applicable to different access condition. The theoretical analysis and EMTP simulation indicate that the compensation method can reduce the imbalance current of external fault and unloaded switching, thereby reduce the action threshold and enhance the sensitivity and action speed of the protection greatly.

**Key words:** power system; differential protection; teed lines; capacitive current compensation

中图分类号: TM77

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)18-0006-06

## 0 引言

输电线路的各种保护中, 电流差动保护原理简单, 灵敏度高, 动作速度快, 且能适应系统振荡和非全相运行等复杂的运行状态, 具有天然的选相能力, 因而受到继电保护工作者的关注<sup>[1-3]</sup>。近年来, 随着技术的发展和进步, 采用光纤通信的工程造价大幅下降, 进一步促进了分相电流差动保护在输电线路中的推广和应用, 使其成为输电线路的主保护。

输电线路的相与相和相与地之间都含有分布电容, 分布电容的存在使线路中各侧测量电流不再满足基尔霍夫电流定律, 并使线路电流的大小和相位均发生畸变, 从而直接影响了差动保护的灵敏度和可靠性<sup>[4]</sup>。为此国内外学者做了大量的研究, 目前, 电流差动保护主要通过动作门槛值调整或电容电流补偿的方法来弥补。文献[4]分析了电容电流对差动保护的不利影响, 提出了基于输电线路  $\pi$  模型的稳态半补偿法和躲暂态的高低两套定值方案; 文献[5]中通过电压电流测量值实时计算分布电容参数值, 然后进行稳态补偿; 文献[6]基于线路  $\pi$  型等效中电

容的微分方程模型, 提出了一种电容电流的时域补偿方法, 以补偿稳态和暂态电容电流; 文献[7,8]在进行波差动保护的基础上, 提出了基于线路贝瑞隆模型的差动保护判据, 从而避开了电容电流的补偿。这些研究在理论或实际应用中改善了差动保护的性, 然而它们都是基于双端输电线路的。

随着电力负荷的增长和国内电网密度的增加, 并由于客观条件的限制, 或从节省走廊和其它投资等方面考虑, T 接线路越来越多地出现在高压和超高压电力网中, 这些线路又常常联系着大电厂和大系统, 故障发生后要求保护能够快速动作<sup>[9-12]</sup>。电流差动保护应用于 T 接线路时, 其性能同样受分布电容电流的影响, 需要进行电容电流补偿。为此, 针对 T 接输电线路, 本文基于其  $\pi$  型等效网络提出多端电压补偿和单端电压补偿两种方案, 以分别适用于不同的通道条件。理论分析和 EMTP 仿真计算表明, 采用本文的电容电流补偿方法, 能大大降低区外故障和线路空充时的不平衡电流, 从而降低动作门槛, 大大提高保护的灵敏度和动作速度。

## 1 两端线路电容电流补偿

图 1(a)所示输电线路, 电流正方向为母线指向线路, 目前常用的数字式电流差动保护动作判据为<sup>[4]</sup>:

$$|I_M + I_N| > I_0 \quad (1)$$

$$|I_M + I_N| > K |I_M - I_N| \quad (2)$$

式中:  $I_M, I_N$  分别为线路 M 侧和 N 侧电流相量;  $I_0$  为电流门槛值;  $K$  为比例制动系数( $0 < K < 1$ )。

式(1)为辅助判据, 式(2)为主判据, 两式同时满足时保护动作于跳闸。定义差动电流  $I_{op} = |I_M + I_N|$ , 制动电流  $I_{re} = |I_M - I_N|$ 。当输电线路较长或为电缆线路时, 分布电容电流较大, 因而即使线路正常, 判据也有较大的差动电流  $I_{op}$ , 使得电流门槛值抬高, 从而影响保护的灵敏度。

考虑电容电流补偿后的差动电流可表示为

$$I_{op} = |I_M + I_N - I_{cap}| \quad (3)$$

式中:  $I_{cap}$  为采用不同的方法计算得到的补偿电容电流。

输电线路  $\pi$  形等效网络如图 1(b) 示,  $U_M, U_N, I_M, I_N$  分别为两侧电压、电流, 由线路双口网络方程知, 等效串联阻抗  $Z_\pi$  和两端并联导纳  $Y_{\pi M}, Y_{\pi N}$  的表达式分别为<sup>[13]</sup>:

$$Z_\pi = Z_C \text{sh}(\gamma \cdot l) = K_Z Z_l \quad (4)$$

$$Y_{\pi M} = Y_{\pi N} = \frac{\text{ch}(\gamma \cdot l) - 1}{Z_C \text{sh}(\gamma \cdot l)} = K_Y Y_l \frac{l}{2}$$

式中:  $l$  为线路长度,  $Z_l = r_1 + j\omega l_1$ ,  $Y_l = j\omega c_1$  分别为单位长度线路阻抗和导纳(忽略电导);  $Z_C = \sqrt{Z_l / Y_l}$  为线路波阻抗,  $\gamma = \sqrt{Z_l Y_l}$  为线路传播系数;

$K_Z = \frac{\text{sh}(\gamma \cdot l)}{\gamma \cdot l}$ ,  $K_Y = \frac{\text{th}(\gamma \cdot l / 2)}{\gamma \cdot l / 2}$  分别为等效电路阻抗和导纳的修正系数。

当架空线路长度小于 1 000 km, 或电缆线路长度小于 300 km 时,  $K_Z, K_Y$  中正弦和正切双曲函数的级数收敛很快, 可取其前两项近似为<sup>[13]</sup>:

$$K_Z \approx 1 + (\gamma \cdot l)^2 / 6 \quad (5)$$

$$K_Y \approx 1 - (\gamma \cdot l)^2 / 12$$

令

$$Z_\pi = (k_r r_1 + j k_x \omega l_1) l \quad (6)$$

$$Y_{\pi M} = Y_{\pi N} = j k_b \omega c_1 \frac{l}{2}$$

式中:  $k_r, k_x, k_b$  分别为电阻, 电抗和电纳的正序修正系数, 且均为实数。联立式(4), (5), (6)得

$$k_r = 1 - \omega^2 l^2 l_1 c_1 / 3 \quad (7)$$

$$k_x = 1 - \omega^2 l^2 l_1 c_1 / 6 + l^2 r_1^2 c_1 / (6 L_1) \quad (8)$$

$$k_b = 1 + \omega^2 l^2 l_1 c_1 / 12 \quad (9)$$

当线路长度较短, 例如架空线路短于 400 km, 电缆线路短于 50~100 km 时, 各修正系数可取为 1。于是式(6)简化为

$$Z_\pi = Z_l = (r_1 + j\omega l_1) \cdot l \quad (10)$$

$$Y_{\pi M} = Y_{\pi N} = Y_l \frac{l}{2} = j\omega c_1 \frac{l}{2}$$

同理可得与式(10)对应的零序等效参数

$Z_{\pi 0}, Y_{\pi M 0}, Y_{\pi N 0}$ 。

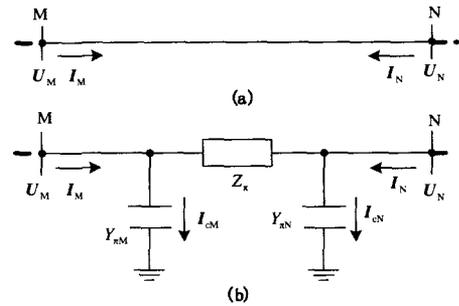


图 1 两端线路等值接线和  $\pi$  形等效网络  
Fig.1 Line equivalent connection and  $\pi$  equivalent network

由图 1(b) 计算得两侧的电容电流  $I_{cM}, I_{cN}$ , 采用半补偿法, 即按两端电压计算得(假设线路正、负序参数一致)

$$\begin{cases} I_{cM} = Y_{\pi M} U_M + (Y_{\pi M 0} - Y_{\pi M}) U_{M0} \\ I_{cN} = Y_{\pi N} U_N + (Y_{\pi N 0} - Y_{\pi N}) U_{N0} \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $U_{M0}, U_{N0}$  分别为两侧零序电压。因此可得补偿电容电流为

$$I_{cap} = I_{cM} + I_{cN} \quad (12)$$

若线路装设并联电抗器, 则需补偿的电流应为电容电流减去流过电抗器的电流。设线路 M 侧, N 侧及中间的电抗器补偿度分别为  $\beta_M, \beta_N, \beta_K$ , 将中间的电抗器平均分配到线路两侧, 有  $\beta'_M = \beta_M + 0.5\beta_K, \beta'_N = \beta_N + 0.5\beta_K$ , 于是应补偿的电容电流为

$$I_{cap} = (1 - 2\beta'_M) I_{cM} + (1 - 2\beta'_N) I_{cN} \quad (13)$$

将式(12)或(13)代入式(3)中, 可得判据补偿后的差动电流值。

## 2 T 接线路电容电流补偿

T 接线路等值接线如图 2(a) 所示, 常用的三端线路电流差动保护的判据为<sup>[14]</sup>:

$$|I_M + I_N + I_P| > I_0 \quad (14)$$

$$|I_M + I_N + I_P| > K (|I_M| + |I_N| + |I_P|) \quad (15)$$

式中:  $I_M, I_N, I_P$  分别为线路 M, N 和 P 侧电流相

量。

令  $I_{cap}$  为补偿电容电流, 则考虑电容电流补偿后的差动电流为

$$I_{op} = I_M + I_N + I_P - I_{cap} \quad (16)$$

下面在 T 接线路  $\pi$  型等效网络基础上, 分析多端电压补偿和单端电压补偿两种电容电流补偿方法。

### 2.1 多端电压补偿

将 T 接线路的每段分支线分别采用一个  $\pi$  模型等效, 可得其等效网络如图 2(b) 示<sup>[15]</sup>。考虑到 T 接线路分支段一般不会超过 400 km, 等效阻抗和导纳采用式(10)。因而, 各侧等效电容  $C_M, C_N, C_P$  分别为相应线路段电容的一半, 而分支点 T 处的电容  $C_T$  为整条线路的一半; 再将  $C_T$  按照分支线长度的反比分配到线路各侧, 线路段越短, 该侧电压与分支点电压越相近, 分配到的电容就越大。

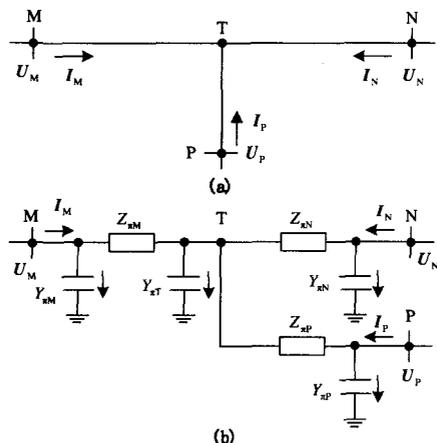


图 2 T 接线路等值接线和  $\pi$  形等效网络

Fig.2 Teed lines and its  $\pi$  equivalent network

设全线路总的正序电容为  $C_1$ , 零序电容为  $C_0$ , 则分配后各侧的正序电容为

$$\begin{aligned} C'_M &= \frac{C_1}{2} \left[ d_M + \frac{d_N d_P}{d_M d_N + d_N d_P + d_M d_P} \right] \\ C'_N &= \frac{C_1}{2} \left[ d_N + \frac{d_M d_P}{d_M d_N + d_N d_P + d_M d_P} \right] \\ C'_P &= \frac{C_1}{2} \left[ d_P + \frac{d_M d_N}{d_M d_N + d_N d_P + d_M d_P} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

其中:  $d_M, d_N, d_P$  分别为各分支线路 MT, NT 和 PT 段长度占线路总长度的比值。

若线路带并联电抗器补偿, 设线路各侧及分支点的电抗器补偿度分别为  $\beta_M, \beta_N, \beta_P, \beta_T$ , 同理将分支点的电抗器按分支线长度的反比分配到各侧, 分配后各侧的补偿度分别为

$$\begin{aligned} \beta'_M &= \beta_M + \frac{d_N d_P}{d_M d_N + d_N d_P + d_M d_P} \beta_T \\ \beta'_N &= \beta_N + \frac{d_M d_P}{d_M d_N + d_N d_P + d_M d_P} \beta_T \\ \beta'_P &= \beta_P + \frac{d_M d_N}{d_M d_N + d_N d_P + d_M d_P} \beta_T \end{aligned} \quad (18)$$

于是得到各侧等效正序电纳为

$$B_\xi = \omega(C'_\xi - \beta'_\xi \cdot C_1) \quad (19)$$

式中:  $\xi = M, N, P$ , 对应为线路各侧。

将其余两侧电压、电流一同送到本侧, 采用多端电压补偿, 可计算得线路补偿电容电流为

$$\begin{aligned} I_{cap,\varphi} &= jB_M[U_{M\varphi} + (K_C - 1)U_{M0}] + jB_N[U_{N\varphi} + \\ & (K_C - 1)U_{N0}] + jB_P[U_{P\varphi} + (K_C - 1)U_{P0}] \end{aligned} \quad (20)$$

其中:  $\varphi = a, b, c$ ;  $U_{M0}, U_{N0}, U_{P0}$  分别为线路 M, N 和 P 侧零序电压;  $K_C = c_0/c_1$ , 为线路零序正序分布电容比。

若输电线为两端线路, 则  $d_M = d_N = 0.5$ ,  $d_P = 0$ , 代入式(19)中有

$$\begin{aligned} B_M &= \omega C_1(0.25 - \beta_M) \\ B_N &= \omega C_1(0.25 - \beta_N) \\ B_P &= \omega C_1(0.5 - \beta_T) \end{aligned}$$

再将  $B_P$  分配到线路两侧, 得两侧等效正序电纳

$$\begin{aligned} B_M &= \omega C_1[0.5 - (\beta_M + 0.5 \cdot \beta_T)] \\ B_N &= \omega C_1[0.5 - (\beta_N + 0.5 \cdot \beta_T)] \end{aligned}$$

代入式(20)中有

$$\begin{aligned} I_{cap,\varphi} &= jB_M[U_{M\varphi} + (K_C - 1)U_{M0}] + \\ & jB_N[U_{N\varphi} + (K_C - 1)U_{N0}] \end{aligned}$$

对比分析发现上式与式(13)一致, 即为两端线路半补偿法时的补偿电容电流。

### 2.2 单端电压补偿

T 接线路中, 若无足够通道传送电压量, 如未更新的低速率通道, 或信道故障启用备用通道(一般通道速率较低)时, 不能获取其它侧的电压, 仅能利用本侧电压估算电容电流, 或本侧 TV 断线, 需要靠其它侧电压来估算。仍以图 2(b)的  $\pi$  形等效网络来分析, 分支点电容  $C_T$  和电抗器补偿度  $\beta_T$  不再分配到线路各侧。于是线路各侧等效正序电纳为

$$B_\xi = \omega C_1(0.5d_\xi - \beta_\xi) \quad (21)$$

其中:  $\xi = M, N, P$ 。分支点正序电纳为

$$B_T = \omega C_1(0.5 - \beta_T) \quad (22)$$

为表述直观, 接下来的分析仅考虑线路电抗, 忽略其电阻, 设  $x_1, x_0$  分别为全线路总的正序和零

序电抗。先以正序为例, 由图 2(b)得

$$\begin{aligned} U_{T1} &= U_{M1} - j d_M X_1 (I_{M1} - I_{cM1}) = U_{N1} - \\ & j d_N X_1 (I_{N1} - I_{cN1}) = U_{P1} - j d_P X_1 (I_{P1} - I_{cP1}) \end{aligned}$$

上式变形可得

$$U_{N1} + j d_N X_1 I_{cN1} = U_{M1} - j d_M X_1 (I_{M1} - I_{cM1}) + j d_N X_1 I_{N1} \quad (23)$$

由于  $U_{cN1} = -j I_{cN1} / B_N$ , 代入式(23)中并化简得:

$$I_{cN1} = \frac{B_N [j(1 - B_M d_M X_1) U_{M1} + d_M X_1 I_{M1} - d_N X_1 I_{N1}]}{1 - B_N d_N X_1} \quad (24)$$

同理得

$$I_{cP1} = \frac{B_P [j(1 - B_M d_M X_1) U_{M1} + d_M X_1 I_{M1} - d_P X_1 I_{P1}]}{1 - B_P d_P X_1} \quad (25)$$

分支点正序电容电流为

$$I_{cT1} = j B_T U_{T1} = B_T [j(1 - B_M d_M X_1) U_{M1} + d_M X_1 I_{M1}] \quad (26)$$

因此, 由式(24)~(26)得, 线路正序电容电流为

$$I_{cap1} = I_{cM1} + I_{cN1} + I_{cP1} + I_{cT1} = j \rho_{u1} U_{M1} + \rho_{M1} I_{M1} - \rho_{N1} I_{N1} - \rho_{P1} I_{P1} \quad (27)$$

式中:  $\rho_{u1}, \rho_{M1}, \rho_{N1}, \rho_{P1}$  均为实数, 表达式如下

$$\rho_{M1} = d_M X_1 \left( \frac{B_N}{1 - B_N d_N X_1} + \frac{B_P}{1 - B_P d_P X_1} + B_T \right)$$

$$\rho_{N1} = \frac{B_N d_N X_1}{1 - B_N d_N X_1}$$

$$\rho_{P1} = \frac{B_P d_P X_1}{1 - B_P d_P X_1}$$

$$\rho_{u1} = B_M + \left( \frac{1}{d_M X_1} - B_M \right) \rho_{M1}$$

设  $K_X = X_0 / X_1$ , 同理可推导得线路零序电容电流为

$$I_{cap0} = j \rho_{u0} U_{M0} + \rho_{M0} I_{M0} - \rho_{N0} I_{N0} - \rho_{P0} I_{P0} \quad (28)$$

式中:  $\rho_{u0}, \rho_{M0}, \rho_{N0}, \rho_{P0}$  亦为实数, 表达式分别为

$$\rho_{M0} = K_C K_X d_M X_1 \left( \frac{B_N}{1 - K_C K_X B_N d_N X_1} + \frac{B_P}{1 - K_C K_X B_P d_P X_1} + B_T \right)$$

$$\rho_{N0} = \frac{K_C K_X B_N d_N X_1}{1 - K_C K_X B_N d_N X_1}$$

$$\rho_{P0} = \frac{K_C K_X B_P d_P X_1}{1 - K_C K_X B_P d_P X_1}$$

$$\rho_{u0} = K_C B_M + \left( \frac{1}{K_X d_M X_1} - K_C B_M \right) \rho_{M0}$$

由此, 可得依单端电压补偿的电容电流为

$$\begin{aligned} I_{cap\phi} &= j[\rho_{u1} U_{M\phi} + (\rho_{u0} - \rho_{u1}) U_{M0}] + \\ & \rho_{M1} I_{M\phi} + (\rho_{M0} - \rho_{M1}) I_{M0} - [\rho_{N1} I_{N\phi} + \\ & (\rho_{N0} - \rho_{N1}) I_{N0}] - [\rho_{P1} I_{P\phi} + (\rho_{P0} - \rho_{P1}) I_{P0}] \end{aligned} \quad (29)$$

依式(29)可仅利用本侧电压电流及其它两侧传送来的电流计算得电容电流  $I_{cap}$ 。若本侧 TV 断线等情况下, 同样可利用其余两侧中的某侧电压来估算电容电流, 限于篇幅, 此处不再推导。

### 3 仿真分析

利用 EMTP 电磁暂态仿真程序对本文提出的方法进行了大量的仿真计算, 系统结构参考文献[16], 如图3所示。仿真系统的电压等级为 500 kV, 各侧系统阻抗分别为:  $Z_{m1} = 25.01 \angle 88^\circ \Omega$ ,  $Z_{m0} = 75.05 \angle 88^\circ \Omega$ ,  $Z_{n1} = 12.62 \angle 88^\circ \Omega$ ,  $Z_{n0} = 4.025 \angle 88^\circ \Omega$ ,  $Z_{p1} = 83.05 \angle 88^\circ \Omega$ ,  $Z_{p0} = 100.1 \angle 88^\circ \Omega$ , 各分支段线路参数相同, 均为:  $r_1 = 0.0143 \Omega/\text{km}$ ,  $l_1 = 0.8694 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $c_1 = 0.01372 \mu\text{F}/\text{km}$ ,  $r_0 = 0.0716 \Omega/\text{km}$ ,  $l_0 = 2.608 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $c_0 = 0.00857 \mu\text{F}/\text{km}$ 。各侧并联电抗器补偿度之和为 50%。保护装于 M 侧。

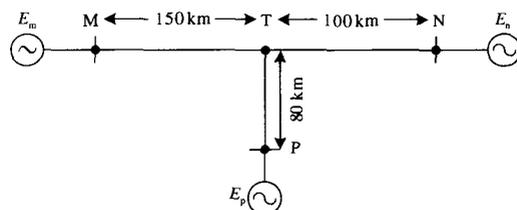


图 3 T 接线线路仿真模型

Fig.3 Simulation model of teed lines

以分布参数线路建立仿真模型, 计算各种情况下电容电流不补偿、采用多端电压补偿和本侧单端电压补偿时的差动电流, 并进行对比。本文采用全波傅氏算法, 数据每周波采样 20 点。

图 4 为区外 AG 金属性故障差动电流曲线, 其中(a)对应为 N 侧区外故障, (b)为 P 侧区外故障。图中的实线、划线和虚线分别对应不补偿差流、单端电压补偿差流和多端电压补偿差流。可见, 故障前正常运行时, 不补偿的差流为电抗器补偿后的稳态电容电流, 为 294 A; 而经单端电压或多端电压补偿后, 差流均大大降低, 分别为 6 A 和 2 A。由图 4(a)知, N 侧区外 A 相接地故障后不补偿的暂态最大差流为 332 A, 经过电容电流补偿后, 多端电压补偿和单端电压补偿的暂态最大电流分别约为 88 A 和 93 A。由图 4(b)可见, P 侧区外 AG 故障后

的暂态最大差流为 297 A, 经单端电压补偿后的最大暂态差流为 62 A, 多端电压补偿的最大暂态电流为 68 A。

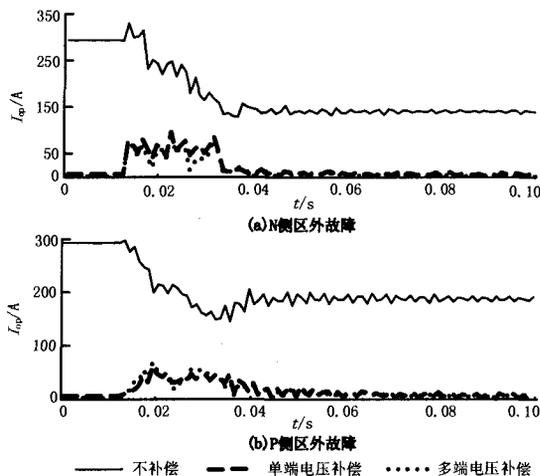


图 4 区外故障差动电流

Fig.4 Differential current of external fault

通过仿真比较可见, N 侧或 P 侧区外故障时, 故障相电压下降, 使得不补偿时的故障后稳态差流比故障前正常运行时要小。区外故障前后稳态时, 采用本侧单端电压补偿和多端电压补偿后的差动电流均很小, 几乎接近于零, 表明两种补偿方法均能很好地消除稳态电容电流。而故障暂态过程中, 由于高次谐波及非周期分量等暂态成分的存在, 二者补偿后仍有一定的暂态差流, 其中本侧单端电压补偿后的最大差流比多端电压补偿时略大, 这是因为单端补偿时不能获取其它两侧的电, 仅能利用本侧电压和线路参数来估算各侧电容电流, 因而存在一定的叠加误差, 但二者相差很小。因此, 在通道受限或某侧 TV 断线时, 采用单端电压补偿仍可获得很好的效果, 大大降低不平衡差流。

图 5 为 N、P 侧断开, M 侧空载合闸时 A 相差动电流曲线。合闸后暂态过程比较严重, 图 5 可见, 不补偿的暂态差流值较大, 最大为 485 A。由于空载合闸时电压、电流中含有大量的谐波和非周期分量, 采用单端或多端电压进行电容电流补偿后, 暂态差动电流并未完全消除, 但不平衡差流值已大大减小, 暂态最大值分别为 225 A 和 217 A。由 T 接线路差动保护判据式(14)~(15)可知, 空载合闸时比例制动判据无法发挥作用, 因此  $I_0$  的整定必须躲过空载合闸时暂态不平衡差流的最大值。可见, 若不进行电容电流补偿, 必将使得  $I_0$  值整定的较高, 而采用本文的电容电流补偿方法后, 差动保护不平衡差流大大减小, 从而可以适当降低保护门槛, 提高保护的灵敏度和动作速度。

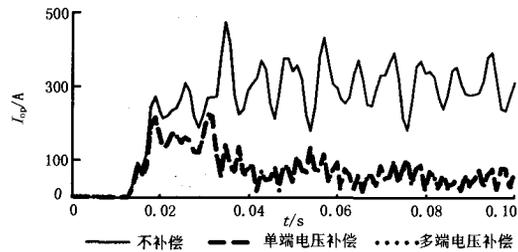


图 5 空载合闸差动电流

Fig.5 Differential current of unloaded switching

图 6 为线路 N 侧出口发生  $R_g=400 \Omega$  高阻 AG 故障时的差动电流曲线。故障前的不平衡差流与图 4 相同, 故障后电容电流不补偿时的差动电流约为 1090 A, 而采用单端电压或多端电压补偿后的动作电流分别约为 1074 A 和 1069 A, 与未补偿时相差很小。由于补偿后动作门槛值  $I_0$  的降低, 保护在区内高阻故障时能可靠灵敏动作, 且提高了保护的動作速度。

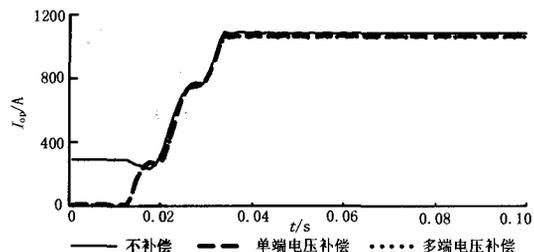


图 6 区内高阻故障差动电流

Fig.6 Differential current of internal fault with high resistance

## 4 结论

- 1) 本文基于线路  $\pi$  型等效网络, 推导了 T 接输电线路的基于单端电压补偿和多端电压补偿两种电容电流补偿方法, 可分别适用于不同的通道条件。
- 2) 理论推导和仿真验证表明, 本文的补偿方法可以大大减小区外故障和线路空充时的不平衡差动电流, 提高系统的安全性。
- 3) 电容电流补偿措施可以降低保护的動作门槛, 从而提高区内故障保护的灵敏度和動作速度。

## 参考文献

- [1] 李岩, 陈德树, 尹项根, 等. 超高压长线的分相纵差保护方案设计[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15): 49-52.
- LI Yan, CHEN De-shu, YIN Xiang-gen, et al. Scheme of the Current Differential Protection for Long UHV Transmission Line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(15): 49-52.
- [2] 高厚磊, 江世芳, 贺家李. 输电线路新型电流差动保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(8): 49-53.
- GAO Hou-lei, JIANG Shi-fang, HE Jia-li. Study on New

- Type of Current Differential Protection for Transmission Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 49-53.
- [3] 林湘宁, 刘沛. 全电流与故障分量电流比例差动判据的比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 27-31.  
LIN Xiang-ning, LIU Pei. Comparative Studies on Percentage Differential Criteria Using Phase Current and Superimposed Phase Current[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 27-31.
- [4] 伍叶凯, 邹东霞. 电容电流对差动保护的影响及其补偿方案[J]. 继电器, 1997, 25(4): 4-8.  
WU Ye-kai, ZOU Dong-xia. The Influence of Capacitance Current to Differential Protection and Its Compensation Scheme[J]. Relay, 1997, 25(4): 4-8.
- [5] 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 Tian-shu, YU Yan-li, HUANG Shao-feng, et al. Novel Accurate Compensation Method of Capacitance Current of UHV Transmission Line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 30-34.
- [6] 索南加乐, 张悛宁, 齐军, 等.  $\pi$  模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 12-18.  
SUONAN Jia-le, ZHANG Yi-ning, QI Jun, et al. Study of Current Differential Protection Using Time-domain Capacitive Current Compensating Algorithm on  $\pi$ -model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 12-18.
- [7] 郭征, 贺家李. 输电线纵联差动保护的新原理[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 1-5.  
GUO Zheng, HE Jia-li. Novel Principle of Pilot Differential Relay Protection of Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 1-5.
- [8] 郑玉平, 吴通华, 丁琰, 等. 基于贝瑞隆模型的线路差动保护实用判据[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 50-55.  
ZHENG Yu-ping, WU Tong-hua, DING Yan, et al. Applied Criterion of Current Differential Protection Based on Bergeron Model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 50-55.
- [9] 束洪春, 高峰, 陈学允, 等. T 型输电系统故障测距算法研究[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(6): 416-420.  
SHU Hong-chun, GAO Feng, CHEN Xue-yun, et al. A Study on Accurate Fault Location Algorithm of EHV T-Connection to Three Terminals[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 416-420.
- [10] Sachdev M S, Sidhu T S, Liu X. High-speed Differential Protection of Parallel Teed Transmission Lines[A]. In: Proceedings of IEEE: WESCANEX 95. Communications Power and Computing Conference[C]. Winnipeg: 1995. 95-500.
- [11] 郭征, 贺家李. 三端线路光纤保护的研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 57-59.  
GUO Zheng, HE Jia-li. Research of Relay Protection of Three-terminal Power Transmission Lines Using Optical Fiber Channel[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 57-59.
- [12] 高厚磊, 江世芳. T 接线路电流纵差保护新判据研究[J]. 继电器, 2001, 29(9): 6-9.  
GAO Hou-lei, JIANG Shi-fang. Study on New Criterion of Current Differential Protection for Teed Lines[J]. Relay, 2001, 29(9): 6-9.
- [13] 韩祯祥, 吴国炎. 电力系统分析[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.  
HAN Zhen-xiang, WU Guo-yan. Power System Analysis Second Edition[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997.
- [14] 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 Sheng-shi. The Protection Technique of High Voltage Network Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [15] Mir M, Hasan Imam M. Limits to Zones of Simultaneous Tripping in Multi-terminal Lines[A]. In: Developments in Power Protection[C]. 1989. 326-330.
- [16] CHEN Ching-shan, LIU Chih-wen, JIANG Joe-Air. Three-terminal Transmission Line Protection Using Synchronized Voltage and Current Phasor Measurements[A]. In: Transmission and Distribution Conference and Exhibition[C]. 2002. 1727-1732.

收稿日期: 2007-04-26

作者简介:

吴心弘(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护的研究; E-mail: wuxhdhr@hotmail.com

张武军(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统继电保护的研究;

何奔腾(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护和控制的研究。