

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201083

适用于含串补设备的输电线路电流差动保护新判据

李振兴^{1,2}, 包文亮¹, 陈艳霞³, 翁汉琍¹, 李振华¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 3. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075)

摘要: 串联电容补偿(即串补)设备应用到高压输电系统时增加了电流差动保护误动/拒动的可能性。针对于此, 梳理了传统电流差动保护原理、构成及传统制动特性的不足之处。分析了串补设备对传统电流差动保护的影响, 并提出了一种基于幅相特性的保护判据。该判据利用串补输电线路两端电流(或故障分量电流)的相角差及最小幅值比构成电流幅相平面, 通过对四个故障区域电流幅值及相位的分析, 制定电流差动保护的电流构成。进一步形成电流差动保护判据。仿真考虑了串补设备、过渡电阻、电容电流等对保护动作的影响, 仿真结果验证了保护的有效性。

关键词: 串联补偿设备; 电流反向; 故障分析; 电流幅相平面; 电流差动保护

New criterion for current differential protection used for a transmission line with series compensation equipment

LI Zhenxing^{1,2}, BAO Wenliang¹, CHEN Yanxia³, WENG Hanli¹, LI Zhenhua¹

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Operation and Control of Cascade Hydropower Station (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 3. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: When series capacitor compensation (that is the series compensation) equipment is applied to a high-voltage transmission line, it increases the possibility of maloperation or a miss trip of current differential protection. This paper summarizes the principle and constitution of traditional current differential protection, and the deficiency of traditional braking characteristics. The effect of series compensation equipment on traditional current differential protection is analyzed, and this paper puts forward a protection criterion based on amplitude and phase characteristics. This criterion makes use of the phase angle difference and the minimum amplitude ratio of the terminal current (or fault component current) of a transmission line with its series complement to form the current amplitude and phase plane, and through the analysis of the four stages of the current reverse region caused by the series complement equipment, the current composition of the current differential protection is formulated. Then the current differential protection criterion is further formed. The effects of series compensation equipment, transition resistance, and capacitive current are considered in the simulation. The simulations verify the effectiveness of the protection.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51807109) and the Key Project of Scientific and Technological Research Program of Hubei Education Department (No. D20171203).

Key words: series compensation equipment; current reverse; fault analysis; current amplitude and phase plane; current differential protection

0 引言

为了提高远距离输电的稳定性和输电能力, 串

补技术在超/特高压电网中得到广泛的应用^[1-11]。大串补参数可能导致系统故障时出现电流反向, 尽管串补 MOV 动作使得传统差动保护能够正确动作, 但发生高阻接地故障时, 一旦 MOV 不动作, 此时的电流反向会引起差动保护拒动, 因此对传统差动保护进行改进引起了研究者的广泛关注^[12-22]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51807109); 湖北省教育厅科学技术研究计划重点项目资助(D20171203)

纵联电流差动保护具有全线速动的优势^[23-26], 一般作为输电线路的主保护, 主要利用线路故障时两端电流同向的特点判断故障, 但含串补设备的输电线路在发生区内故障时可能存在电流反向, 电流差动保护存在误判, 影响保护的可靠性。为了解决这一问题, 学者们提出了相关的解决措施。文献[27]提出了一种简单易行的零序差动改进算法, 可靠解决了串补线路出现电流反向时, 零序差动灵敏度不足而不能快速切除故障的问题, 但为了充分考虑保护装置的整体可靠性, 此算法仅在电流反向发生时投入使用; 文献[28]建议通过使用多段折线比率制动特性、改进的标积制动特性或合理地降低比率制动系数的方法来提高分相电流差动保护的灵敏度; 文献[29]结合冀北地区万顺 500 kV 特高压输电线路模型, 研究了差动比率系数在系统不同故障下的变化趋势, 得出了过渡电阻、故障点、系统参数以及负荷变化等影响差动保护动作的结论并给出了改进建议。

本文在现有研究的基础上, 结合串补设备的电流反向影响, 利用串补输电线路两端电流(或故障分量电流)的相角差及最小幅值比构成电流幅相平面, 通过对四个故障区域电流幅值及相位的分析, 制定电流差动保护的电流构成, 进一步形成电流差动保护判据。

1 传统电流差动保护原理及构成

传统电流差动保护采用基尔霍夫电流定律构成保护原理, 包括动作部分和制动部分。动作部分基于输电线路两端电流的向量和构成差动电流, 在区内外故障时呈现幅值上的差异; 制动部分体现在制动电流的构成和多折线比率制动特性, 不同选择构成多种制动特性, 对保护动作可靠性的影响也不尽相同。以图 1 所示输电系统为例, E_m 、 E_n 为两端等值电势, 母线 M、N 为两端保护边界, i_m 、 i_n 分别为母线处的测量电流, X_L 为 MN 段线路电抗, X_C 为串补电容的容抗, α 为故障点距母线 M 的阻抗占线路阻抗的百分比。

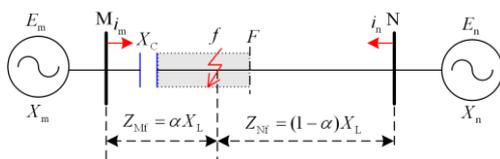


图 1 含串补的输电系统

Fig. 1 Transmission system with series complement

电流差动保护的制动电流通常可表示为

$$I_d = |\dot{I}_m + \dot{I}_n| \quad (1)$$

制动电流的构成可以有多种形式^[30], 例如:

$$I_{r1} = |\dot{I}_{\max} - \dot{I}_{\min}| \quad (2)$$

$$I_{r2} = \frac{|\dot{I}_m| + |\dot{I}_n|}{2} \quad (3)$$

$$I_{r3} = \text{Max} \{|\dot{I}_m|, |\dot{I}_n|\} \quad (4)$$

式(2)中: \dot{I}_{\max} 为两端电流中幅值较大的电流; \dot{I}_{\min} 为幅值较小的电流。

由式(2)一式(4)可知, 制动电流的构成不同, 其制动特性也存在较大差异。因为动作电流相同, 制动电流的不同反映在动作特性上体现了在横轴方向的位置不同, 在面向确定的动作特性后, 保护的灵敏度也就存在差异。

事实上, 差动保护的制动特性又主要有二折线比率制动(制动系数为 k_{res})和三折线比率制动(制动系数为 k_{res1} 和 k_{res2}), 如图 2 中折线所示。图 2 中, AB 部分三折线具有更好的动作特性, 而 BC 部分具有更强的制动特性。为了比较两种制动特性的差异, 本文基于 PSCAD 仿真构建两端串补线路仿真系统, 通过对保护区内沿线设置不同故障点、不同故障类型、不同过渡电阻等情况下的故障, 其结果表明: 当系统发生金属性短路(不含电流反向情况)的不同故障类型时, 其曲线如 F_1 所示; 随着过渡电阻的增加, 短路电流明显减小, 其差动电流与制动电流也相应减小, 其曲线如 F_2 所示; 由于串补设备的存在, 当出现电流反向时, 制动电流较大, 差动电流较小, 保护容易发生拒动, 其曲线如 F_3 所示; 在系统发生区外故障时, 特别是经高阻接地的区外故障, 此时制动电流较小, 且由于存在电容电流, 使得差动电流较大, 保护可能会发生误动, 其曲线如 F_4 所示。由曲线 F_1 — F_4 可知, 当存在电流反向或发生高阻接地故障时, 两折线制动和三折线制动出现不同程度的拒动现象。这也是制约电流差动保护工程应用的主要因素。

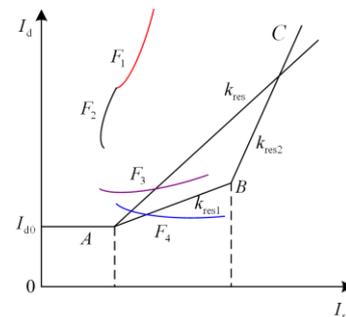


图 2 比率制动特性曲线

Fig. 2 Ratio braking characteristic curve

2 串补线路电流特性及其对电流差动保护的影响

2.1 串补线路电流特性

面向图 1 所示电网结构, 在明确串补设备会导致某一段线路发生故障时出现电流反向的情况, 将该段线路定义为电流反向区域, 如图 1 中阴影部分 MF。

1) 对称性故障

当 f 点发生三相短路故障时, M 侧阻抗若满足 $X_m + \alpha X_L < X_C$, 则电流 \dot{I}_m 会发生反向。此时计算 $\alpha = (X_C - X_m)/X_L$ 即可确定 F 位置。

2) 非对称性故障

文献[31]针对两端串补线路区内发生单相接地故障时的电流反向进行了分析, 假设图 1 f 点发生单相接地故障时, 当满足 $X_{m(0)} + \alpha X_{L(0)} < X_{C(0)}$, 电流 \dot{I}_m 会发生反向。($X_{m(0)}$ 、 $X_{L(0)}$ 、 $X_{C(0)}$ 为相对应的零序电抗) 同样地计算 $\alpha = (X_{C(0)} - X_{m(0)})/X_{L(0)}$ 可确定 F 位置。

综上所述, 当存在 $\alpha > 0$ 时即存在电流反向区域。

2.2 电流反向对电流差动保护的影响

一般地, 高压输电线路电阻 R 远小于电抗 X , R 基本可以忽略不计, 线路阻抗角接近 90° ; 当在电路上安装串补设备后, 串补电容的容抗值会抵消部分感抗, 在串补度(线路串补电容的容抗值 X_C 与线路感抗值 X_L 的百分比)较大的情况下, 线路阻抗角减小, 此时电阻不易再忽略。对于图 1 串补线路, 若 f 处发生三相短路故障, 故障点两端阻抗

$$Z_m = Z_{sm} + \alpha Z_L - jX_C = R_{sm} + \alpha R_L + j(X_{sm} + \alpha X_L - X_C)$$

$$Z_n = Z_{sn} + (1 - \alpha)Z_L =$$

$$R_{sn} + (1 - \alpha)R_L + j[X_{sn} + (1 - \alpha)X_L]$$

其中, Z_{sm} 和 Z_{sn} 分别为两端电源等值阻抗。

$$\text{令 } \frac{X_{sm} + \alpha X_L - X_C}{R_{sm} + \alpha R_L} = \lambda, \quad \frac{X_{sn} + (1 - \alpha)X_L}{R_{sn} + (1 - \alpha)R_L} = \eta \text{ 且}$$

假设两端等值电势幅值相等, 取 $\dot{E}_n = \dot{E}_m e^{j\delta}$, δ 为系统两端功角差, 通常情况下 $\delta \in (0^\circ, 30^\circ)$, 则:

$$\frac{\dot{I}_n}{\dot{I}_m} = \frac{(R_{sm} + \alpha R_L)[1 + \lambda\eta + j(\lambda - \eta)]e^{j\delta}}{[R_{sn} + (1 - \alpha)R_L](1 + \eta^2)} \quad (5)$$

则 \dot{I}_n 与 \dot{I}_m 的相位差 θ 可表示为

$$\theta = \arg\left(\frac{\dot{I}_n}{\dot{I}_m}\right) = \delta + \arctan \frac{\lambda - \eta}{1 + \lambda\eta} \quad (6)$$

$$\delta + \arctan \lambda - \arctan \eta$$

由式(6)可以看出, 在系统两端功角差一定时, 故障后两端电流相位差仅与故障点两端阻抗角有关; 由于串补设备安装在 M 侧, 故障点右侧仍为高压输电线路, 通常情况下阻抗角 $\arctan \eta \in (80^\circ, 90^\circ)$, 规定 $\theta \in (0^\circ, 360^\circ)$, 则有:

1) 当 $\lambda > 0$, 即串补侧线路阻抗呈感性时, 随着串补容抗的增大, $\arctan \lambda \in (0^\circ, 85^\circ)$, 则 $\theta \in (0^\circ, 35^\circ)$ 或 $\theta \in (270^\circ, 360^\circ)$ 。

2) 当 $\lambda < 0$, 即串补侧线路阻抗呈容性时, $\arctan \lambda \in (-90^\circ, 0^\circ)$, 则 $\theta \in (180^\circ, 310^\circ)$ 。

以图 1 串补线路为例, 假设系统发生区内故障, 令 $\dot{I}_m = I_m \angle 0^\circ$, $\dot{I}_n = x I_m e^{j\theta}$, 且 $I_{\max} = I_m$, θ 为电流 \dot{I}_n 与 \dot{I}_m 的相位差。制动电流以式(2)构成, 此时比率制动特性差动保护判据可表示为

$$\begin{cases} |I_m + x I_m e^{j\theta}| > I_{d0} \\ |I_m + x I_m e^{j\theta}| > k_1 |I_m - x I_m e^{j\theta}| \end{cases} \quad (7)$$

化简得:

$$\begin{cases} |x e^{j\theta} + 1| > \frac{I_{d0}}{I_m} \\ |x e^{j\theta} + 1| > k_1 |x e^{j\theta} - 1| \end{cases} \quad (8)$$

在不同 θ 时可绘制判据(8)的动作特性变化轨迹, 如图 3 所示, 其中实线圆为动作量变化轨迹, 虚线为制动量变化轨迹。

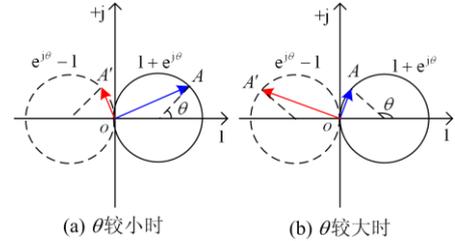


图 3 动作特性变化轨迹

Fig. 3 Trajectory of action characteristics

当无电流反向现象时, 两侧电流相位差较小, 此时如图 3(a), 动作量较大, 制动量较小, 保护能可靠动作; 若发生电流反向, θ 较大, 此时如图 3(b), 制动量很大, 动作量却很小, 保护很可能发生拒动。

3 基于幅相的电流差动保护原理

3.1 串补线路故障时幅相关系

由式(5)可知, 电流 \dot{I}_n 与 \dot{I}_m 的幅值比为

$$\frac{|\dot{I}_n|}{|\dot{I}_m|} = \frac{\sqrt{(R_{sm} + \alpha R_L)^2 + (X_{sm} + \alpha X_L - X_C)^2}}{\sqrt{[R_{sn} + (1 - \alpha)R_L]^2 + [X_{sn} + (1 - \alpha)X_L]^2}} \quad (9)$$

对于电流幅值的计算, 电阻的影响可以忽略,

即 $R \approx 0$ ，故电流幅值比可表示为

$$\frac{|i_n|}{|i_m|} \approx \frac{|X_{sm} + \alpha X_L - X_C|}{|X_{sn} + (1 - \alpha)X_L|} \quad (10)$$

由式(10)可知，区内必存在一个故障点使得在该点发生故障时两侧电流幅值比等于 1。令 $X_m + \alpha X_L - X_C > 0$ ，即假设幅值比等于 1 的故障点不在反向区域内，化简式(10)可得： $\alpha = \frac{X_L + X_C + X_n - X_m}{2\alpha X_L}$ 。 α 存在，则说明使两侧电流幅值比等于 1 的故障点在反向区域外。结合第 2 节的分析，当不存在电流反向时两侧电流相位差较小，从而考虑用相位进行约束。所以针对如图 1 所示含串补设备的输电系统，规定电流的参考方向均为由母线指向线路。已知 M 及 N 侧的电流分别为 i_m 、 i_n ，以及故障点背侧等值阻抗 $Z_m = X_m + \alpha X_L - X_C$ 。定义等值系统两侧电流幅值比 K_{amp} 、相位差 K_{ang} 如式(11)和式(12)所示。

$$K_{amp} = \frac{\text{Min}\{|i_m|, |i_n|\}}{\text{Max}\{|i_m|, |i_n|\}} \quad (11)$$

$$K_{ang} = \arg(i_m) - \arg(i_n) \quad (12)$$

式(11)中为限制 K_{amp} 的范围而选用最小值与最大值之比。由此可知 $K_{amp} \in (0, 1]$ ，并归算相位差，使式(12) $K_{ang} \in (0^\circ, 360^\circ]$ 。

根据系统的不同位置发生故障时，基于电流 i_m 、 i_n 在幅值与相位存在不同的变化，大致可分为以下四个故障区域：

1) M 背侧反方向故障。考虑到串补度一般都小于 1，在背侧反方向故障时，故障点右侧等值阻抗始终呈感性，因此反方向故障时电流 i_m 、 i_n 大小相等方向相反。背侧等值阻抗 Z_m 随故障点远离电源 E_m 而增大，电流 i_m 也会随之增大。在理想情况下 $K_{ang} = 180^\circ$ ， $K_{amp} = 1$ 。

2) 电流反向区域故障。故障点发生在电流反向区域， Z_m 呈容性，并随着正方向出口向右移动时逐渐减小，直接导致电流 i_m 逐渐增大，并呈反向。理想情况下，比值 K_{amp} 较小， K_{ang} 相差 180° ，但实际要考虑电阻的影响， K_{ang} 一般在 $90^\circ \sim 150^\circ$ 。

另外，考虑到故障点左侧容抗大于感抗，最终导致左侧等值阻抗较小，进一步使得 i_m 相对 i_n 较大，因此在反向区域发生故障时， K_{amp} 远小于 1。通过仿真，表 1 显示了串补出口处发生单相经过渡

电阻($0 \sim 300 \Omega$)故障时，两侧电流 i_m 、 i_n 以及 K_{amp} 、 K_{ang} 的变化情况。

表 1 经不同过渡电阻故障时的电流比值

Table 1 Current ratios of faults with different transition resistors

| R_g | I_m | I_n | K_{amp} | K_{ang} |
|-------|-------|-------|-----------|-----------|
| 0 | 8.8 | 1.2 | 0.14 | 167.64 |
| 25 | 6.22 | 0.61 | 0.1 | 142.77 |
| 100 | 2.45 | 0.25 | 0.1 | 49.45 |
| 150 | 1.54 | 0.45 | 0.29 | 48.23 |
| 200 | 1.02 | 0.55 | 0.54 | 48.76 |
| 300 | 0.45 | 0.67 | 0.67 | 54.22 |

由表 1 可知， I_m 随过渡电阻的增大而减小，而 I_n 不仅仅包含故障电流，而且包含负荷电流，在过渡电阻较小时故障电流相对较大，随着过渡电阻增大， I_n 逐渐减小，但当过渡电阻较大时，如表 1 中从 $R_g = 100 \Omega$ 时开始，负荷电流的影响大于故障电流，此时 I_n 反而逐渐增大。但此时相位差 K_{ang} 在 50° 附近，远离 180° 。

3) 线路区内(非反向区域)故障。随着故障点离开反向区域，在发生区内故障时两侧等值阻抗均为感抗，但由于故障点刚过反向区域，左侧等值感抗相比较电阻并不是很大，这使得两侧电流相位差仍相差较大，一般在 90° 左右。随着故障点右移，左侧等值阻抗感抗增大，两侧电流相位差趋于传统电流差动保护分析，此时 i_m 、 i_n 大小不确定，方向接近同相。

4) 正方向区外故障。故障在正方向区外时，两侧等值阻抗均呈较大感抗，同传统电流差动保护分析，在理想情况下 $K_{ang} = 180^\circ$ ， $K_{amp} = 1$ 。

综合以上四个阶段分析，随着故障位置的不同，阻抗 Z_m 、两侧电流 i_m 、 i_n 的变化规律如图 4 所示。

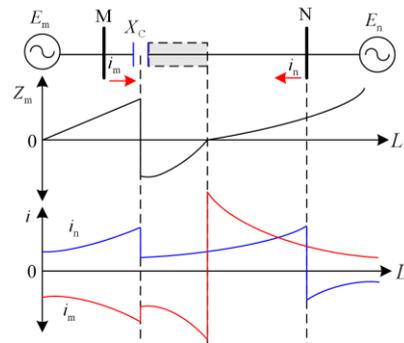


图 4 阻抗及电流随故障位置变化情况

Fig. 4 Impedance and current change with fault location

3.2 保护原理

由前文分析可知，在含串补的输电系统中：在发生区内故障时，尽管存在串补导致电流反

向的影响, 电流比值 K_{amp} 小于 1, 特别在电流反向时, K_{amp} 远小于 1; 电流相位差值 K_{ang} 接近同向, 即使出现电流反向, K_{ang} 一般也小于 150° 。

在发生区外故障时, 电流比值 K_{amp} 一般等于 1, 电流相位差值 K_{ang} 一般等于 180° 。

令 $K_{amp} \in [0,1]$ 为纵轴, $K_{ang} \in [0^\circ, 360^\circ]$ 为横轴, 构建 $K_{amp} - K_{ang}$ 电流幅相平面, 如图 5 所示。理想情况下在区外发生故障时 (K_{ang}, K_{amp}) 计算点落在图 5 点 ($180^\circ, 1$) 处, 但实际中考虑到系统阻抗的非均匀性会产生相移等因素的影响, 计算点也会偏离点 ($180^\circ, 1$), 进一步由前文分析可知, 区内故障电流反向时相位差达到 150° , 为避免此时保护的拒动性, 将制动区域设置为 $\pm 20^\circ$ 的相位误差。同样地, 将制动区域幅值比设置为 0.3 的比值误差。其保护动作特性如图 5 所示, 图中阴影部分为制动区域, 其他部分为动作区域。

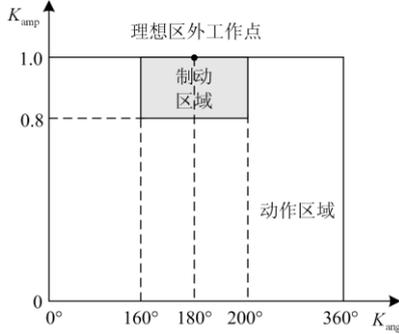


图 5 电流幅相平面

Fig. 5 Current amplitude and phase plane

由于系统发生高阻接地故障时, 线路中不仅存在故障电流, 同时还含有较大的负荷电流, 将影响保护的灵敏度。另外, 正常运行情况下的电容电流也会影响 K_{amp} 、 K_{ang} 的计算结果。结合式(11)、式(12), 为提高差动保护耐受过渡电阻能力, 本文差动保护判据中的电流可以采用电流的故障分量计算 K_{amp} 和 K_{ang} , 如式(13)。其中为限制 K_{amp} 在电流幅相平面内, 即 $K_{amp} \in (0,1]$, 选用最小值与最大值之比; 另外, 在电流特征分析与仿真过程中, 为便于叙述与轨迹描绘, 扫描的数据点均为归算至 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内的等效点(即在电流差动平面内关于 180° 对称的等效点)。

$$\begin{cases} K_{amp} = \frac{\text{Min}\{|\Delta \dot{I}_m|, |\Delta \dot{I}_n|\}}{\text{Max}\{|\Delta \dot{I}_m|, |\Delta \dot{I}_n|\}} \\ K_{ang} = |\arg(\Delta \dot{I}_m) - \arg(\Delta \dot{I}_n)| \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\Delta \dot{I}_m$ 、 $\Delta \dot{I}_n$ 分别为两端电流的故障分量。

由于高压长线路受电容电流影响较大, 为应对电容电流的影响, 本文利用基于 Π 模型的故障分量电流差动保护的相量补偿方法, 从故障分量电流中减去流过线路两端电容的故障分量电流, 即为补偿后的故障分量电流, 以图 6 来进行说明。

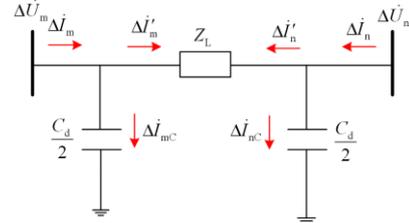


图 6 故障分量网络模型

Fig. 6 Fault component network model

图中, $\Delta \dot{U}_m$ 、 $\Delta \dot{U}_n$ 、 $\Delta \dot{I}_m$ 、 $\Delta \dot{I}_n$ 分别为线路两侧故障分量电压和故障分量电流, $\Delta \dot{I}'_{mc}$ 、 $\Delta \dot{I}'_{nc}$ 分别为流经两侧等效电容的电流, $\Delta \dot{I}'_m$ 、 $\Delta \dot{I}'_n$ 分别为补偿后两侧线路电流。令 C_d 为全线分布电容, 将全线分布电容等效为连接在线路两端的 2 个集中电容, 两侧电容分别为 $C_d/2$, 全线容抗为 $Z_{C_d} = 1/j\omega C_d$, 两侧电容容抗均为 $2Z_{C_d}$ 。

M 侧经补偿后的电流为

$$\Delta \dot{I}'_m = \Delta \dot{I}_m - \frac{\Delta \dot{U}_m}{2Z_{C_d}} \quad (14)$$

N 侧系统经补偿后的电流为

$$\Delta \dot{I}'_n = \Delta \dot{I}_n - \frac{\Delta \dot{U}_n}{2Z_{C_d}} \quad (15)$$

利用补偿后的故障分量 $\Delta \dot{I}'_m$ 、 $\Delta \dot{I}'_n$ 来计算式(13)得到电流幅值比及相位差, 进而形成保护判据如式(16)所示。

$$\begin{cases} K_{amp} < 0.7 \text{ 或 } \begin{cases} K_{amp} > 0.7 \\ 0^\circ < K_{ang} < 160^\circ \text{ 或 } 200^\circ < K_{ang} < 360^\circ \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

4 仿真实验

利用 PSCAD 搭建基于如图 1 的 500 kV 含串补输电线路模型, 保护线路 MN 长 350 km, M 端: $Z_{m1} = 21.6 \Omega$, $\varphi_{m1} = 88.6^\circ$, $Z_{m0} = 14.55 \Omega$, $\varphi_{m0} = 88.8^\circ$, 初相角 $\varphi_s = 0^\circ$ 。N 端: $Z_{n1} = 25.95 \Omega$, $\varphi_{n1} = 59.9^\circ$, $Z_{n0} = 21.24 \Omega$, $\varphi_{n0} = 61.9^\circ$, 初相角 $\varphi_s = 30^\circ$ 。

线路采用贝瑞隆分布参数模型, 其参数值如下。正序单位长度电阻和电抗分别为: $r_1 = 0.036 \Omega/\text{km}$,

$x_{L1} = 0.503 \Omega/\text{km}$ ，线路正序容抗 $X_{C1} = 302.151 \times 10^3 \Omega \cdot \text{km}$ ；零序单位长度电阻和电抗分别为： $r_0 = 0.38 \Omega/\text{km}$ ， $x_{L0} = 1.328 \Omega/\text{km}$ ，线路零序容抗 $X_{C0} = 419.34 \times 10^3 \Omega \cdot \text{km}$ 。串补电容的容抗 $X_C = 71.904 \Omega$ 。

4.1 对称性故障

针对对称性故障，仿真在线路上每隔 20 km 设置一个故障点，分别计算区内不同位置发生三相(ABC)短路时的电流幅值比与相位差，其结果如图 7 所示。

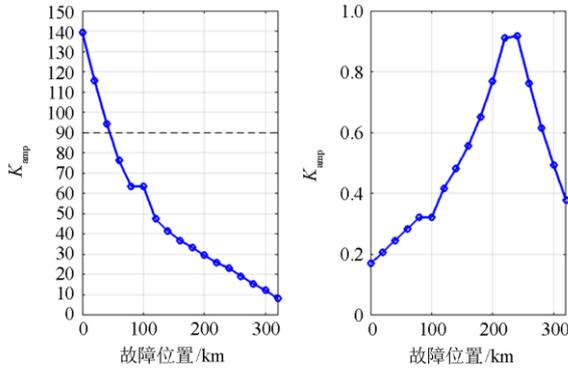


图 7 不同位置 ABC 故障时的相位差及幅值比
Fig. 7 Phase difference and amplitude ratio of ABC fault at different locations

由图 7 可知，在反向区域内发生故障时， K_{ang} 大于 90° ，即电流 i_m 发生了反向，随着故障点远离串补设备， K_{ang} 逐渐减小；在反向区域内故障时， K_{amp} 很小，接近于 0.2，保护能够可靠动作，随着故障点远离串补设备，由于 K_{ang} 逐渐减小，保护仅依靠相位差的约束就能可靠动作。

4.2 非对称性故障

仿真设置区内不同位置分别发生单相接地故障带 0Ω 、 100Ω 、 200Ω 、 300Ω 过渡电阻的短路，其幅值比与相位差的轨迹如图 8 所示。

由图 8 可知，在高阻接地故障时，保护动作轨迹相似，即在反向区域发生故障时， K_{amp} 较小，保护

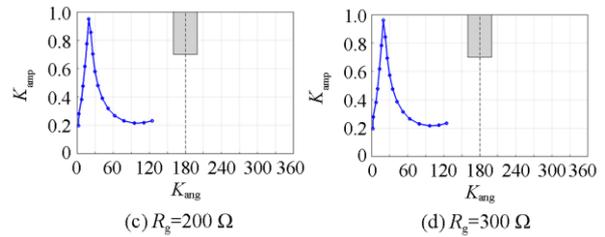
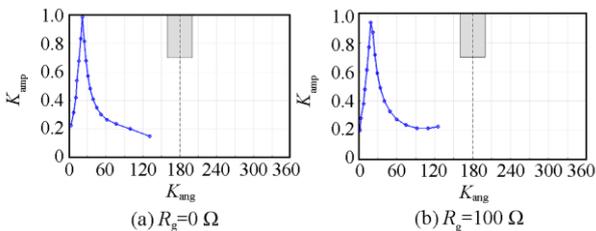


图 8 单相经不同过渡电阻故障保护动作轨迹
Fig. 8 Protection trajectory of single phase fault with different transition resistance

能可靠动作；随着故障点远离串补设备， K_{ang} 逐渐减小，轨迹远离制动区域边界，保护仅依靠相位差的约束就能可靠动作。

4.3 区外故障

为验证保护在区外故障时的可靠不动作性，仿真分别设置在 M 端、N 端区外发生单相经不同过渡电阻($0 \sim 300 \Omega$)故障，其保护动作轨迹如图 9 所示。

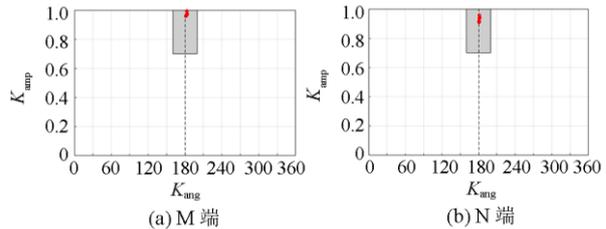


图 9 区外单相经不同过渡电阻故障保护动作轨迹
Fig. 9 Protection track of single phase fault with different transition resistance outside the zone

由图 9 可知，在系统区外发生故障时，保护动作轨迹均趋于点 $(180^\circ, 1)$ 附近，远离动作边界，保护可靠不动作。

4.4 电容电流与负荷电流的影响

为了验证电容电流对保护的影响，仿真条件设置为长线路(350 km)轻载情况，M、N、两端功角差分别设置在 0° 、 5° 。为了验证负荷电流对保护的影响，仿真条件设置为重载突增情况，三端功角差设置在 10° ，0.5 s 时突然投入大负载。区内不同位置发生单相经高阻($R_g = 300 \Omega$)接地故障及区外经不同过渡电阻($0 \sim 300 \Omega$)故障时，保护动作情况如图 10 所示。

由图 10(a)可知，轻载情况下，在反向区域发生故障时， K_{amp} 接近 0.25，此时幅值起主要约束作用，保护能够可靠动作；随着故障点远离串补设备， K_{ang} 逐渐减小，相位起主要约束作用，保护能够可靠动作。区外故障时，电容电流经补偿之后

(K_{ang}, K_{amp}) 的计算点趋近于点 $(180^\circ, 1)$, 保护可靠不动作。重载情况下, 区内故障时保护能够可靠动作, 区外故障时保护能够可靠制动, 如图 10(b)。

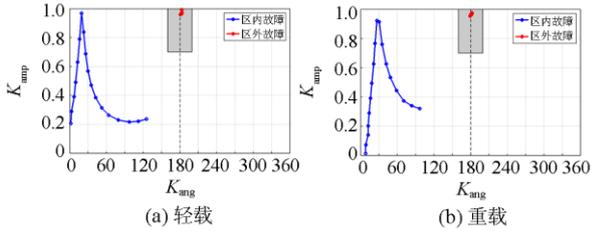


图 10 轻载和重载时保护动作轨迹

Fig. 10 Protection action trace under light load and heavy load

4.5 与传统电流差动保护的对比

以式(1)、式(2)构成传统二折线比率制动电流差动保护, 其中制动系数 k 取 0.7, $I_{r0} = 0.69 \text{ kA}$, $I_{d0} = 0.23 \text{ kA}$ 。仿真在线路上每隔 20 km 设置一个故障点, 计算在区内不同位置发生单相经高阻 ($R_g = 300 \Omega$) 故障和区外发生单相经不同过渡电阻 ($0 \sim 300 \Omega$) 故障时保护动作轨迹, 如图 11 所示。

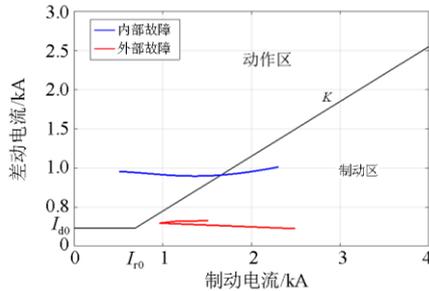


图 11 传统电流差动保护动作轨迹

Fig. 11 Protection action track of conventional current differential

由图 11 可知, 在区内发生经高阻接地故障时, 传统电流差动保护存在拒动的可能性, 结合图 8(d) 可知, 本文所提差动保护判据在同样的故障条件下均能够正常动作。

4.6 灵敏度说明

由电流差动平面可知, 当 $\frac{0.7}{K_{amp}} < 1$ 且 $\frac{160^\circ}{K_{ang}} < 1$ 时

保护不动作, 当 $\frac{0.7}{K_{amp}}$ 和 $\frac{160^\circ}{K_{ang}}$ 至少存在一个大于 1 时保护动作, 所以类比欠量保护定义改进判据的灵敏度为

$$K_{sen} = \text{Max} \left\{ \frac{0.7}{K_{amp}}, \frac{160^\circ}{K_{ang}} \right\}$$

并定义 $K_{sen} = 1$ 为灵敏度边界线。区内/外不同位置故障时改进判据的灵敏度如图 12 所示。

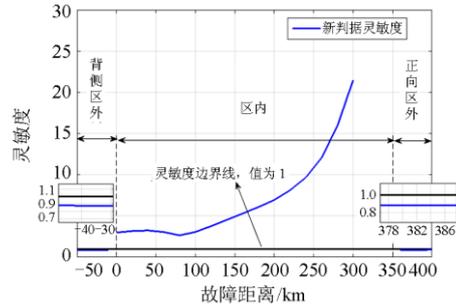


图 12 不同位置故障时保护灵敏度

Fig. 12 Protection sensitivity at different locations

由图 12 可知: 区外故障时灵敏度小于 1, 保护具有足够的制动性能; 区内故障时, 灵敏度大于 1, 且随着故障点远离串补设备, 灵敏度逐渐增大, 动作性能越好。

5 结论

本文基于电流差动保护的不同制动特性, 结合串补设备的电流反向影响, 提出了一种基于幅相特性的保护判据, 该判据基本不受电流反向、过渡电阻、电容电流等的影响, 提高了保护动作可靠性。

参考文献

- [1] 邹蕴韬, 谭亲跃, 朱建行, 等. 超高压线路串补电容的微机保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 45-49.
ZOU Yuntao, TAN Qinyue, ZHU Jianxing, et al. Microprocessor-based protection algorithm in UHV transmission lines with series compensated capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 45-49.
- [2] 张航, 滕予非, 王晓茹, 等. 计及并联补偿高抗的电力系统对次同步振荡的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 25-34.
ZHANG Hang, TENG Yufei, WANG Xiaoru, et al. Analysis of sub-synchronous oscillation of power system with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 25-34.
- [3] 杨博闻, 占颖, 谢小荣, 等. 双馈风电场接入串补输电系统引发次同步谐振的研究模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 120-126.
YANG Bowen, ZHAN Ying, XIE Xiaorong, et al. A study model for subsynchronous resonance in DFIG based wind farms connected to a series-compensated power system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 120-126.

- [4] 郑彬, 毕天姝, 项祖涛, 等. 特高压串补线路断路器短路电流过零延迟特性及对策[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 323-334.
ZHENG Bin, BI Tianshu, XIANG Zutao, et al. Zero-crossing delay characteristics of short circuit current passing through circuit breakers of UHV series compensated lines and countermeasures[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 323-334.
- [5] 商立群, 夏远洋. 基于能量比函数的串补线路行波故障测距[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5228-5234.
SHANG Liqun, XIA Yuanyang. Energy ratio function-based traveling wave fault location for series compensated line[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5228-5234.
- [6] 索南加乐, 许文宣, 何世恩, 等. 基于双端电气量的串补输电线路故障测距算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 157-164, 7.
SUONAN Jiale, XU Wenxuan, HE Shi'en, et al. A fault location algorithm for series compensated transmission lines based on two-end information[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 157-164, 7.
- [7] 焦在滨, 张梦瑶, 何世恩, 等. 基于频域模型识别的串补线路保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 186-193, 25.
JIAO Zaibin, ZHANG Mengyao, HE Shi'en, et al. A distance protection scheme of series compensated lines based on model identification in frequency domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 186-193, 25.
- [8] 索南加乐, 陈福锋, 齐军, 等. 串补线路故障点位置的模型识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 69-75.
SUONAN Jiale, CHEN Fufeng, QI Jun, et al. New method for identifying the fault location series compensated lines based on different fault models[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 69-75.
- [9] 周启文, 潘勇斌, 王德昌, 等. 500 kV 串补系统中火花间隙系统研究[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 40-44.
ZHOU Qiwen, PAN Yongbin, WANG Dechang, et al. Improvement of spark gap system for 500 kV series compensation system[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 40-44.
- [10] 戚宣威, 叶雨田, 王松, 等. 基于异构边界的串补输电线路单端量全线速动保护原理[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 226-240.
QI Xuanwei, YE Yutian, WANG Song, et al. Heterogeneous boundary based principle of full-line accelerated protection applying single-terminal information for series compensated transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 226-240.
- [11] GHORBANI A, EBRAHIMI S Y, GHORBANI M. Active power based distance protectionscheme in the presence of seriescompensators[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 57-69. DOI: 10.1186/s41601-017-0034-4.
- [12] 陈福锋, 钱国明, 宋国兵. 串联电容补偿线路行波差动保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 89-94.
CHEN Fufeng, QIAN Guoming, SONG Guobing. Study on traveling-wave differential protection for series compensated line[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 89-94.
- [13] 王玲. 含复杂串补设备区域电网的电流差动保护研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2018.
WANG Ling. Research on current differential protection of regional power system with complex series compensation equipment[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2018.
- [14] 温荣, 谭建成. 串联电容补偿线路的相差保护特性研究[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 86-90.
WEN Rong, TAN Jiancheng. Study on phase comparison protection for series compensated lines[J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 86-90.
- [15] 彭华. 同杆并架特高压线路加装串补对线路保护的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
PENG Hua. The impact of double-circuit transmission line with series capacitor compensation on line relay[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [16] 王利平, 王伟, 陈军, 等. 串联补偿输电线路稳态量电流差动保护改进算法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 98-103.
WANG Liping, WANG Wei, CHEN Jun, et al. Improvement algorithm for current differential protection using steady currents for series compensated transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 98-103.
- [17] 王为国, 尹项根, 余江, 等. 固定串补电容对输电线路继电保护影响的综述[J]. 电网技术, 1998, 22(11): 3-5.
WANG Weiguo, YIN Xianggen, YU Jiang, et al. Influence of fixed series capacitor on protective relayings for transmission line[J]. Power System Technology, 1998, 22(11): 3-5.
- [18] 谢诚, 王晓丽, 郭天兴, 等. 串补装置对系统保护的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(5): 1-5, 38.
XIE Cheng, WANG Xiaoli, GUO Tianxing, et al. Analysis of the influence of series compensator on the system protection[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29(5): 1-5, 38.
- [19] 李梅, 唐菊生. 基于综合制动判据的变压器差动保护研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 135-141.
LI Mei, TANG Jusheng. Transformer differential protection method based on the comprehensive braking criterion[J].

- Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 135-141.
- [20] 吕承, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 基于边界电流的柔性直流线路保护新方案[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 115-121.
LÜ Cheng, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Protection novel scheme for flexible DC line based on boundary current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 115-121.
- [21] 黄昱翰, 蔡泽祥, 潘天亮, 等. 面向闭环运行配电网的广域保护控制方案[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 47-52.
HUANG Yuhan, CAI Zexiang, PAN Tianliang, et al. Research on wide area protection and control scheme for closed-loop distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 47-52.
- [22] 李艳, 张安龙, 郑曦. 配电网广域保护信息建模与通信性能分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 53-60.
LI Yan, ZHANG Anlong, ZHENG Xi. Modeling and communication performance analysis of wide-area protection information flow in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 53-60.
- [23] 王廷凤, 余江, 许健, 等. 基于 5G 无线通信的配电网自适应差动保护技术探讨[J]. 供用电, 2019, 36(9): 18-21, 27.
WANG Tinghuang, YU Jiang, XU Jian, et al. Discussion on adaptive differential protection technology of distribution network based on 5G wireless communication[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(9): 18-21, 27.
- [24] 徐光福, 陈俊, 姜淼, 等. 基于 EPON 自同步的差动保护采样同步方法[J]. 供用电, 2019, 36(2): 35-41.
XU Guangfu, CHEN Jun, JIANG Miao, et al. The sampling synchronization method for differential protection based on epon self-synchronization[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(2): 35-41.
- [25] 吴奕, 顾乔根, 崔玉, 等. UPFC 系统的变压器差动保护分析[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 99-106.
WU Yi, GU Qiaogen, CUI Yu, et al. Transformer differential protection in UPFC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 99-106.
- [26] 夏家辉, 方园, 刘卜瑞, 等. 基于特征电流波宽判据的变压器差动保护方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 184-190.
XIA Jiahui, FANG Yuan, LIU Burui, et al. The transformer differential protection method based on characteristic current waveform width criterion[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 184-190.
- [27] 朱晓彤, 黄蕙, 徐晓春, 等. 串联补偿线路电流反向对差动保护的影响及对策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 151-156.
ZHU Xiaotong, HUANG Hui, XU Xiaochun, et al. Influence and countermeasures for current reversal on differential protection of series compensated lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 151-156.
- [28] 唐萃, 尹项根, 戚宣威, 等. 大串补度输电线路的电流差动保护分析与对策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 157-163.
TANG Cui, YIN Xianggen, QI Xuanwei, et al. Analysis and countermeasures of current differential protection on transmission line with high series compensation degree[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 157-163.
- [29] 李振动, 赵青春, 董杰, 等. 串联补偿对差动保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 147-151.
LI Zhendong, ZHAO Qingchun, DONG Jie, et al. Research on influence of series compensation on differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 147-151.
- [30] 金瑞, 鲍斌, 时伯年. 变压器差动保护的三种比率制动方式及其系数整定的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 81-87.
JIN Rui, BAO Bin, SHI Bonian. Research on three kinds of percentage restraint methods and their coefficient setting of transformer differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 81-87.
- [31] 李振兴, 王玲, 黄悦华, 等. 大串补线路电流差动保护拒动因素及改进保护方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 199-205.
LI Zhenxing, WANG Ling, HUANG Yuehua, et al. Analysis of current differential protection maloperation in power transmission line with high series compensation and corresponding improved protection method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 199-205.

收稿日期: 2020-09-04; 修回日期: 2020-11-09

作者简介:

李振兴(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护与稳定控制, 电气设备监测与信息检测技术; E-mail: lzx2007001@163.com

包文亮(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: bao1001@163.com

陈艳霞(1974—), 女, 博士, 正高级工程师, 主要从事继电保护及自动化技术研究的和管理工作。E-mail: chenbepc@163.com

(编辑 葛艳娜)