

两种多相补偿阻抗继电器 动作性能的数字分析

高厚磊 文 锋 王广延 山东工业大学(250014) 陈 革 山东电力局(250001)

摘要 通过在500kV典型系统上对常规和新型多相补偿阻抗继电器进行数字计算,全面分析并比较了两种继电器在振荡伴随短路发生等情况下的动作性能,最后得出有用结论并对多相补偿距离保护方案进行了探讨。

关键词 多相补偿 阻抗继电器 数字计算

引言

众所周知,多相补偿阻抗继电器由于具有许多I类阻抗继电器所没有的突出优点而受到继电保护工作者的重视,但振荡伴随短路发生时的不正确动作^[2]却使它的应用受到了较大限制。文献^[1]提出了具有新判据的新型多相补偿阻抗继电器,并对其进行了定性分析,得出了振荡伴随区外短路不误动的结论。本文通过在一典型500kV系统上,对常规和新型多相补偿阻抗继电器在振荡伴随短路发生、非全相运行及允许过渡电阻能力等方面进行计算机定量计算,全面分析并比较了它们的动作性能,得出了明确结论,从而为多相补偿阻抗继电器的应用提供了可靠依据。

1 继电器的动作判据

本文将对上述各继电器进行考察:

- (1)常规多相补偿接地阻抗继电器,简称 $J_{0\#}$
- (2)新型多相补偿接地阻抗继电器,简称 $J_{0\text{新}}$
- (3)常规多相补偿相间阻抗继电器,简称 $J_{2\#}$
- (4)新型多相补偿相间阻抗继电器,简称 $J_{2\text{新}}$

各继电器动作判据如下:

$J_{0\#}$: 继电器比较以下四量相位关系

$$\begin{cases} U'_A = U_A - (I_A + K \cdot 3I_0)Z_y \\ U'_B = U_B - (I_B + K \cdot 3I_0)Z_y \\ U'_C = U_C - (I_C + K \cdot 3I_0)Z_y \\ - I_0 \end{cases}$$

当四个量同极性时动作。

$J_{0\text{新}}$: 继电器比较以下七量相位关系

收稿日期:1995-03-31

《继电器》1995年第3期 3

$$\begin{cases} U'_A = U_A - (I_A + K \cdot 3I_0)Z_y & U''_A = U_A - (I_A + K \cdot 3I_0)Z'_y \\ U'_B = U_B - (I_B + K \cdot 3I_0)Z_y & U''_B = U_B - (I_B + K \cdot 3I_0)Z'_y \\ U'_C = U_C - (I_C + K \cdot 3I_0)Z_y & U''_C = U_C - (I_C + K \cdot 3I_0)Z'_y \\ -I_0 \end{cases}$$

当七个量同极性时动作。

$J_{2\text{新}}$: 继电器比较以下两量大小

$$\begin{cases} U'_2 = U_2 - I_2 \cdot Z_y \\ U'_1 = U_1 - I_1 \cdot Z_y \end{cases} \quad \text{当 } |U'_2| \geq |U'_1| \text{ 时动作。}$$

$J_{2\text{新}}$: 继电器比较以下各量

$$\begin{cases} U'_2 = U_2 - I_2 \cdot Z_y & U''_2 = U_2 - I_2 \cdot Z'_y \\ U'_1 = U_1 - I_1 \cdot Z_y & U''_1 = U_1 - I_1 \cdot Z'_y \end{cases}$$

当同时满足 $|U'_2| \geq |U'_1|$ 及 $|U'_2| \geq |U''_1|$ 时动作。

上述各式中:

U_A, U_B, U_C ——保护安装处各相电压相量

I_A, I_B, I_C, I_0 ——保护安装处各相电流和零序电流相量

U_1, U_2, I_1, I_2 ——保护安装处, 正、

负序电压和电流相量

K ——零序电流补偿系数

Z_y ——为与保护区对应的整定阻抗

Z'_y ——为一大整定阻抗, 它与 Z_y 的关系如图 1。

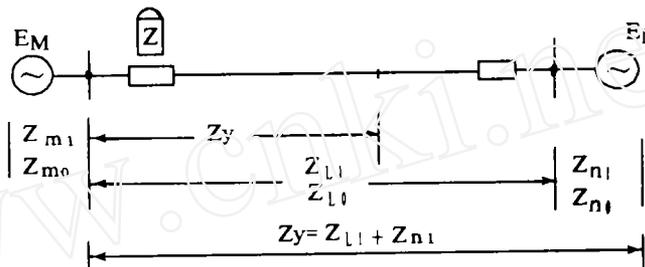
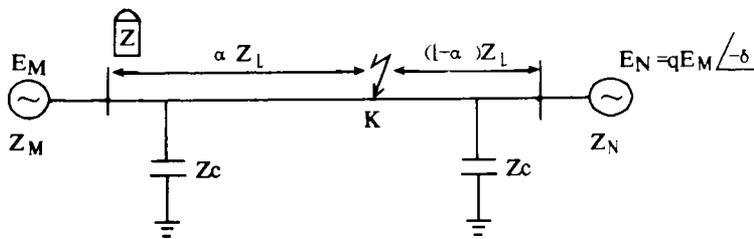


图 1 Z_y 与 Z'_y 整定示意图 (详见文献^[1])

2 计算所用系统、故障类型及数学模型

计算时采用一用 Π 型网络等值的 500kV 系统, 其等值图和参数如图 2 所示 (阻抗单位: Ω)。

由于多相补偿阻抗继电器不能反应对称短路, 因此本文主要对以下四种有代表性的故障类型进行计算分析: 振荡伴随单相接地短路 (称为 $K^{(1)}$);



$$\begin{array}{llll} Z_{M1} = 104 \angle 85^\circ & Z_{l1} = 106 \angle 85^\circ & Z_{N1} = 90 \angle 85^\circ & Z_{c1} = 1400 \angle -90^\circ \\ Z_{M2} = Z_{M1} & Z_{l2} = Z_{l1} & Z_{N2} = Z_{N1} & Z_{c2} = Z_{c1} \\ Z_{M0} = 60 \angle 85^\circ & Z_{l0} = 360 \angle 85^\circ & Z_{N0} = 200 \angle 85^\circ & Z_{c0} = 2000 \angle -90^\circ \end{array}$$

图 2 500kV 系统图及参数

振荡伴随两相不接地短路(称为 $K^{(2)}$);振荡伴随两相接地短路(称为 $K^{(1,1)}$)和非全相运行伴随振荡(称为 K_3)。上述故障类型中过渡电阻和断线形式如图 3 所示。

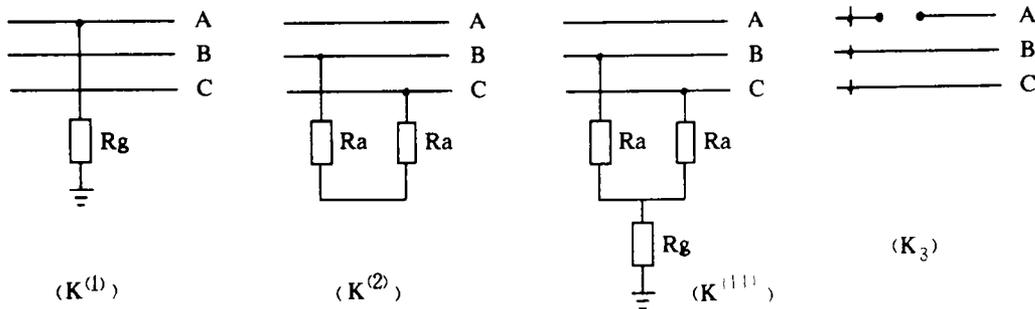


图 3 过渡电阻和断线示意图

根据故障分析知识,可对上述故障类型分别建立数学模型。由于篇幅所限,在此仅将 $K^{(1,1)}$ 数学模型的建立简述如下。假设在图 2 所示系统的 K 点发生两相接地短路($K^{(1,1)}$),根据边界条件可画出如图 4 所示的复合序网。

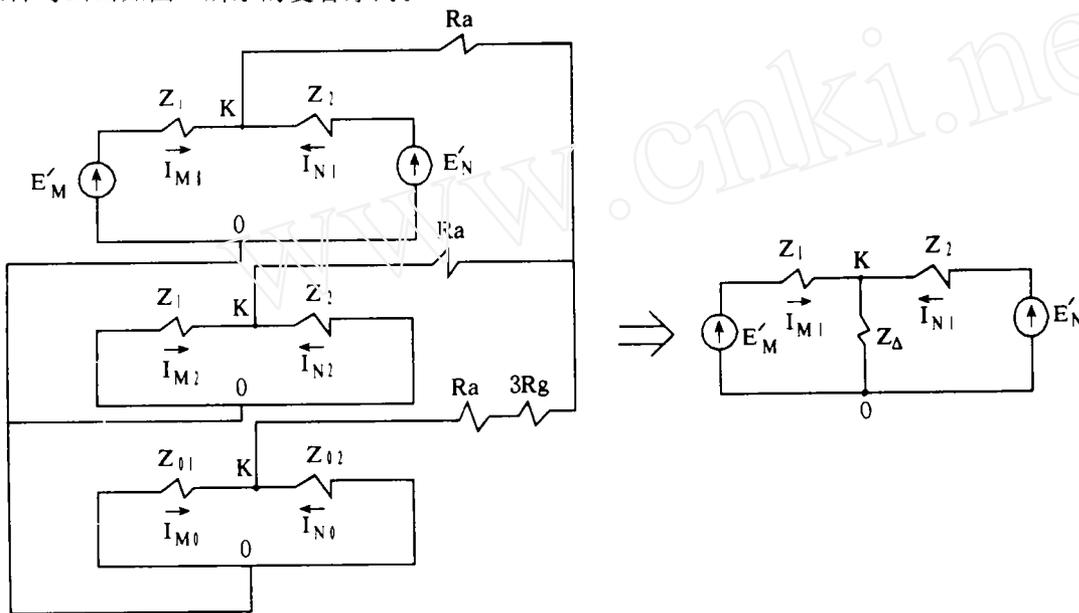


图 4 K 点 BC 两相接地短路时的复合序网图

序网中电势及各阻抗如下:

$$E'_M = \frac{Z_{C1}}{Z_{M1} + Z_{C1}} \cdot E_M, \quad E'_N = \frac{Z_{C1}}{Z_{N1} + Z_{C1}} q \angle -\delta E_M$$

$$Z_1 = \frac{Z_{M1} \cdot Z_{C1}}{Z_{M1} + Z_{C1}} + \alpha Z_{l1}, \quad Z_2 = \frac{Z_{N1} \cdot Z_{C1}}{Z_{N1} + Z_{C1}} + (1 - \alpha) Z_{l1}$$

$$Z_{01} = \frac{Z_{M0} \cdot Z_{C0}}{Z_{M0} + Z_{C0}} + \alpha Z_{l0}, \quad Z_{02} = \frac{Z_{N0} \cdot Z_{C0}}{Z_{N0} + Z_{C0}} + (1 - \alpha) Z_{l0}$$

$$Z_\Delta = \frac{\left(\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + R_a \right) \cdot \left(\frac{Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}} + R_a + 3R_g \right)}{\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} + R_a + \frac{Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}} + R_a + 3R_g} + R_a$$

由简化的复合序网可求出正序电流:

$$I_{M1} = \frac{E'_M(Z_2 + Z_\Delta) - E'_N Z_\Delta}{Z_1 \cdot Z_2 + (Z_1 + Z_2) \cdot Z_\Delta}, \quad I_{N1} = \frac{E'_N(Z_1 + Z_\Delta) - E'_M Z_\Delta}{Z_1 \cdot Z_2 + (Z_1 + Z_2) \cdot Z_\Delta}$$

再根据原复合序网可求出负序和零序电流：

$$I_{M2} = - \left(\frac{E'_M \cdot Z_2 + E'_N \cdot Z_1}{Z_1 \cdot Z_2 + (Z_1 + Z_2) \cdot Z_\Delta} \right) \cdot \frac{R_a + 3R_\kappa + \left(\frac{Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}} \right)}{\left(\frac{Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}} \right) + 2R_a + 3R_\kappa + \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)} \cdot \left(\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)$$

$$I_{M0} = - \left(\frac{E'_M \cdot Z_2 + E'_N \cdot Z_1}{Z_1 \cdot Z_2 + (Z_1 + Z_2) \cdot Z_\Delta} \right) \cdot \frac{R_a + \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)}{\left(\frac{Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}} \right) + 2R_a + 3R_\kappa + \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)} \cdot \left(\frac{Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}} \right)$$

$$I_{N2} = - \left(\frac{E'_M \cdot Z_2 + E'_N \cdot Z_1}{Z_1 \cdot Z_2 + (Z_1 + Z_2) \cdot Z_\Delta} \right) \cdot \frac{R_a + 3R_\kappa + \left(\frac{Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}} \right)}{\left(\frac{Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}} \right) + 2R_a + 3R_\kappa + \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)} \cdot \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \right)$$

$$I_{N0} = - \left(\frac{E'_M \cdot Z_2 + E'_N \cdot Z_1}{Z_1 \cdot Z_2 + (Z_1 + Z_2) \cdot Z_\Delta} \right) \cdot \frac{R_a + \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)}{\left(\frac{Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}} \right) + 2R_a + 3R_\kappa + \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)} \cdot \left(\frac{Z_{01}}{Z_{01} + Z_{02}} \right)$$

有了线路上各序电流，根据网络结构即可求出保护安装处各序电流。各序电压并最终求出判据所需要的各相电压和各相电流。在此不再赘述。

3 计算结果与分析比较

根据已经建立的四种故障类型的数学模型和继电器的动作判据，可编制一通用计算程序，

然后在 PC 机上对各种故障情况进行全面计算以考察各继电器动作性能。计算时假定继电器装在 M 侧，接地继电器 ($J_{0常}$ 、 $J_{0新}$) 用来反应 $K^{(1)}$ 和 $K^{(1,1)}$ ，相间继电器 ($J_{2常}$ 、 $J_{2新}$) 用来反应 $K^{(2)}$ 和 $K^{(1,1)}$ 。图 5 和表 1~5 为典型结果记录。表中， δ 为两侧电势摆开角， α 控制短路点的位置，

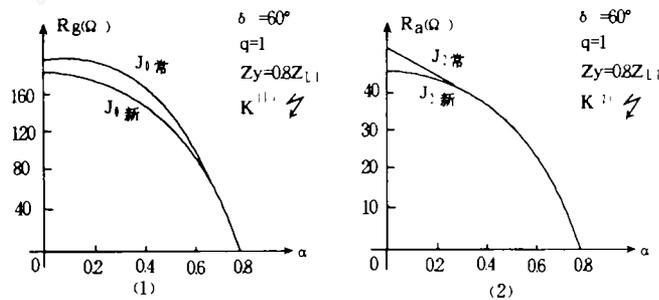


图 5 允许过渡电阻能力曲线图

q 为两侧电势幅值之比， J 表示继电器类型， K 表示故障类型。（表的阅读方法如下：若在 $Z_y = 0.8Z_{L1}$ 、 $q = 1$ 、 δ 摆到 150° 的条件下，在距 M 侧 $20\%Z_{L1}$ 处即 $\alpha = 0.2$ 发生单相接地短路，要想知道此时 $J_{0新}$ 的动作行为，首先应选择表 1，然后在第 1 列中选 $K^{(1)}$ ，在第 2 列选中 $J_{0新}$ ，在 $J_{0新}$ 所对应的那一栏里 $\alpha = 0.2$ 与 $\delta = 150^\circ$ 的交叉点即为动作结果。此时该交叉点方框里出现“—”标记，表明 $J_{0新}$ 在该故障情况下处于拒动状态。其余结果依次类推。）下面分三个方面进行讨论。

3.1 允许过渡电阻能力比较

两组典型的允许过渡电阻能力曲线如图 5 所示。曲线表明，发生不对称短路时，新型继电器同样能够允许大的过渡电阻，保留了常规继电器抗弧光电阻能力强的优点。两者的差别仅在于 $J_{0新}$ 比 $J_{0常}$ 的允许过渡电阻能力略低； $J_{2新}$ 比 $J_{2常}$ 在出口附近略有降低。计算结果还表明， δ 或 q 变化时，各继电器允许过渡电阻能力也随着改变，但仍保持前述特点。

3.2 振荡伴随短路时动作性能比较

由于多相补偿阻抗继电器在振荡伴随短路发生时的动作情况与振荡中心是否落在整定值以内有密切关系,因此计算时分别考虑了这两种情况。表1、表2示出了整定阻抗 $Z_y=0.8Z_{L1}$ 时的动作结果,此时振荡中心 $[Z_{中心}=\frac{1}{2}(Z_{L1}+Z_{m1}+Z_{n1})]$ 落在整定值以内。表3、表4示出了 $Z_y=0.4Z_{L1}$ 时的情况,此时振荡中心落在整定值以外。现将计算结果进行以下分析比较。

振荡中心位于整定值以内时,若振荡伴随短路(包括 $K^{(1)}$ 、 $K^{(2)}$ 和 $K^{(1-1)}$) 发生,则 $J_{0常}$ 、 $J_{2常}$ 均会发生区内短路拒动、区外短路误动情况,但反向短路不误动。振荡中心位于整定值以外时,若振荡伴随短路发生,则 $J_{0常}$ 只发生正反向区外短路误动情况,区内短路能够正确动作; $J_{2常}$

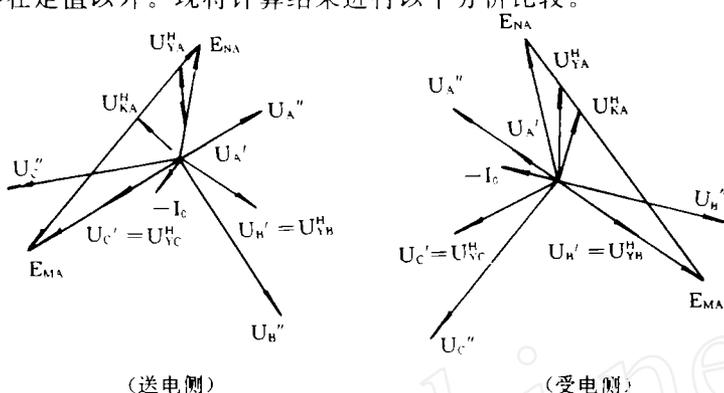


图6 振荡伴随区内A相接地时相量图

只发生反向短路误动情况,正向区内、区外短路能正确动作。上述两种情况下, $J_{0新}$ 和 $J_{2新}$ 在正反向区外短路时均可靠不动,即消除了外部短路误动问题;但振荡伴随区内短路时仍然存在拒动现象,并且比常规继电器还要严重。

振荡伴随 $K^{(1)}$ 、 $K^{(2)}$ 发生时 ($Z_y=0.8Z_{L1}$ 条件下),继电器的动作性能具有以下特点:1)各继电器的拒、误动范围基本上是以 $\delta=180^\circ$ 为中心的对称区间,即不正确动作只能在摆角较大时发生。2) $J_{0常}$ 的区内拒动范围(约 $165^\circ\sim 195^\circ$) 远小于它的区外误动范围(约 $120^\circ\sim 225^\circ$), $J_{2常}$ 的拒、误动范围基本相等(约 135°

表5 q值变化对继电器动作性能影响情况

K	J	q	条件 $R_s=4\Omega$ $R_k=7\Omega$ $Z_y=0.8Z_{L1}$																							
			区内 $\alpha < 0.8$												区外 $\alpha > 0.8$											
			δ	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	195°	210°	225°	240°	255°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	195°	210°	225°	
K ⁽¹⁾	J _{0常}	0.7																								
		1.0																								
		1.3																								
K ⁽²⁾	J _{2常}	0.7																								
		1.0																								
		1.3																								

注:“+”表示误动,“-”表示拒动,空白表示正常。

$\sim 225^\circ$)。3) $J_{0新}$ 、 $J_{2新}$ 的拒动范围 ($150^\circ\sim 210^\circ$ 、 $105^\circ\sim 255^\circ$) 分别大于 $J_{0常}$ 、 $J_{2常}$ 的拒动范围,即振荡伴随区内短路发生时新型继电器将先于常规继电器拒动。前两个特点与文献[2]的分析基本一致,后一特点可借助于图6进行分析。图6中的 U_A^h 和 U_B^h 分别为故障前整定点和故障点的电压相量。由图可知,振荡伴随区内A相接地时,在两侧电势摆到使 $J_{0常}$ 刚要拒动时 $J_{0新}$ 已经拒动 (U_A^h 、 U_B^h 、 U_C^h 分布在大于 180° 的范围),即 $J_{0新}$ 先于 $J_{0常}$ 拒动,这对两侧继电器都是一样的结论。对于 $J_{2新}$,可将其认为是I段 $J_{2常}$ 和III段 $J_{2常}$ 经“与门”后的组合继电器(见判据),其动作与否取决于定值不同的两个 $J_{0常}$ 的动作行为。由此不难推断,振荡伴随I段区内短路对 $J_{2新}$ 要先于 $J_{2常}$ 拒动。

振荡伴随 $K^{(1-1)}$ 发生时 ($Z_y=0.8Z_{L1}$ 条件下),接地和相间继电器的动作情况均比较复杂。区内短路时, $J_{0常}$ 在出口附近拒动范围很小,在末端则迅速增大; $J_{2常}$ 在出口附近拒动范围很大,随着短路点的远离而逐渐缩小。 $J_{0新}$ 、 $J_{2新}$ 虽然消除了区外误动,但区内拒动范围相对于 $J_{0常}$ 和 $J_{2常}$

都有不同程度的扩大,这使得发生 $K^{(1)}$ 故障时(即使没有振荡), $J_{0\text{新}}$ 的保护区要缩短、 $J_{2\text{新}}$ 的出口有死区。因此,不论新型继电器还是常规继电器都不能很好地保护两相接地短路。

以上结果是在 q 不变条件下得到的。表 5 所给结果表明, q 值变化时, $J_{0\text{新}}$ 和 $J_{2\text{新}}$ 的拒、误动范围将有一定变化, $J_{0\text{新}}$ 和 $J_{2\text{新}}$ 的拒动范围将有较小变化。这说明,两侧电势比值的变化对常规继电器动作性能影响较大,对新型继电器影响较小。需要指出,虽然 q 值的变化影响到有关继电器动作性能,但前述动作规律和特点基本不变。

3.3 非全相运行伴随振荡时动作性能比较

计算结果(表 1~4 中的故障类型 K_3)表明,非全相运行伴随振荡发生时,无论 PT 挂在母线侧还是线路侧,常规继电器均存在误动现象,特别是挂在母线侧时。对于新型继电器,PT 挂在母线侧时可能误动,但当 PT 挂在线路侧时能可靠不动。

4 结论与探讨

两种多相补偿阻抗继电器动作性能的数字分析结果表明,文献^[1]给出的新型多相补偿阻抗继电器能克服振荡伴随区外短路时的误动缺陷,保留了常规多相补偿阻抗继电器全相振荡不误动、允许过渡电阻能力强等优点;但振荡伴随区内短路时拒动现象的明显加重则是该继电器存在的主要缺陷,特别是新型相间继电器。

鉴于系统发生单相故障的几率远大于其它类型的故障,而 $J_{0\text{新}}$ 又能较好地解决 $J_{0\text{常}}$ 所存在的振荡伴随 $K^{(1)}$ 短路时的严重误动问题,且区内短路拒动现象只在摆角较大时才能发生,故建议采用这种新型接地继电器作为多相补偿距离保护中接地故障的测量元件,并可考虑不装设振荡闭锁。

鉴于振荡伴随区内相间短路时 $J_{2\text{新}}$ 的拒动现象严重,以致于两侧电势摆角不大($\delta < 90^\circ$)时也不能正确动作,故建议仍采用常规多相补偿相间阻抗继电器作为多相补偿距离保护中相间故障的测量元件,其振荡闭锁方案可考虑采用 LZ-96 保护中的测量 $U \cdot \cos\varphi$ 新原理^[5]。

对于两相接地短路,单靠接地或相间测量元件是不能较好予以反应的,只有两者协同工作、共同测量,才能相互弥补不足,取得满意保护效果。

建议采用正序方向阻抗继电器作为多相补偿距离保护中对称故障的测量元件。该继电器的比较量为:

$$\begin{cases} U_p = U_1 \text{ (带记忆)} \\ U_1 = I_1 Z_y - U_1 \end{cases}$$

$$\text{动作条件为: } -90^\circ \leq \arg \frac{U_p}{U_1} \leq 90^\circ$$

该继电器不仅能正确反应三相短路,而且能保护出口附近的非对称性故障。它的采用将有助于解决多相补偿阻抗继电器(指 $J_{2\text{常}}$)所存在的出口死区问题。

最后建议 PT 挂在线路侧,以保证非全相运行状态下多相补偿阻抗继电器尽可能正确工作。

参考文献

- 1 李晓明. 具有新判据的多相补偿阻抗继电器. 山东工业大学学报, 1989 第 1 期
- 2 朱声石. 两类继电器协同工作. 电力系统自动化, 1980 第 1 期
- 3 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术. 电力工业出版社, 1981 年 3 月, P246~260
- 4 华北电力学院. 电力系统故障分析. 水利电力出版社, 1986 年 11 月, P139~167
- 5 贺家李等. 超高压输电线故障分析与继电保护. 科学出版社, 1987 年 9 月, P108~111