# 同塔双回线接地距离保护应对事故过负荷的改进整定方法

金 瑞1,林湘宁2,时伯年1

北京四方继保自动化股份有限公司 仿真分析创新工作室,北京 100085;
 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:对于同塔双回线的距离保护,目前有应对事故过负荷情况的2类通用整定方法:一类是躲过系统静稳 极限运行下发生邻线断线故障时的过负荷入侵;另一类是躲过线路热稳极限运行下发生邻线跳闸故障时的 过负荷入侵,这2类通用整定方法均存在不能相互覆盖彼此盲区的缺陷。为此,首先计算出上述2种事故过 负荷情况下健全线路的测量阻抗的变化量,比较了其负荷入侵的严重程度,在此基础上提出了一种兼顾2种 过负荷情况的过负荷入侵阻抗定值的改进整定方法,并基于PSCAD/EMTDC仿真测试对比了3类整定方法 的优劣。算例分析结果表明,与已有的2类整定方法相比,所提改进方法能在保证事故过负荷不误动的情况 下兼顾较强的抗过渡电阻能力,更具合理性。

关键词:同塔双回线;整定方法;负荷入侵阻抗;距离保护;事故过负荷

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202105008

## 0 引言

中图分类号:TM 77

同塔双回线发生一回线路故障后,故障线路的 负荷会转移到相邻健全线路上,形成事故过负荷工 况。事故过负荷通常伴随着电流增大、电压降低的 特征,可能被健全线路的距离保护误判为故障而引 发相继跳闸事故。因此,同塔双回线的保护整定需 要保证事故过负荷工况下距离保护不误动。目前各 保护厂家对如何应对事故过负荷工况的理解存在分 歧:SIEMENS建议按照系统静稳极限运行时邻线断 线的情况整定负荷入侵阻抗定值,而以AREVA为代 表的国内外大部分厂家建议按照线路热稳极限运行 情况下邻线跳闸的情况整定负荷入侵阻抗定值。

由文献[1-2]的分析可知,同塔双回线的其中一 回线路发生断线故障会导致健全线路的零序保护发 生误动。而对于距离保护,只有文献[3]比较了断线 故障影响其测量阻抗的各因素的重要性,对于测量 阻抗在故障前后的变化量却少有文献提及。究其原 因,由于目前国内电网冗余度高,高压线路负载率 低,因此断线故障引起保护误动的案例数量较少,没 有引起工程界的普遍关注。但是,一方面,随着电力 需求的持续增长,电网重载情况将愈发普遍<sup>[4]</sup>;另一 方面,出于节省投资的考虑,电网架构将更加紧凑或 杆塔型材将发生改变,这势必将增加断线故障引起 邻线距离保护误动的概率,须引起重视。

实际上,正是由于对测量阻抗在故障前后的变 化量分析得不够透彻,上述2种同塔双回线接地距 离保护应对事故过负荷的整定方法均存在不足之 处。为此,本文分析并比较了邻线断线、邻线跳闸故 障下的事故过负荷后,健全线路的电气量变化,解析 了2种整定原则的优劣;在此基础上,提出了一种新 的距离保护的整定计算方法。理论分析和仿真结果 表明,本文方法能保证距离保护装置在邻线跳闸及 断线情况下不误动,并具备更高的抗过渡电阻能力。

#### 1 故障分析

按照邻线断线情况整定距离保护的设想是由 SIEMENS公司最先提出的,其建议按照系统静稳极 限运行情况下邻线单相断线故障后零序电流的变化 量计算健全线路的定值,并提供了不同线路长度下 零序电流变化量的经验值(详见附录A)。实际上, 仅考虑零序电流是片面的,其他序电流的变化量也 将影响健全线路的阻抗测量元件。因目前的文献缺 少对断线故障后的健全线路的电气量分析,本文着 重分析了发生断线故障后健全线路的序电流及阻抗 测量元件的变化。

#### 1.1 断线故障的复合序网分析

双回线的单相断线故障示意图如图1所示。图中, $E_{M}$ 、 $E_{N}$ 分别为M、N侧系统电势。根据对称分量法,断口处ff'相当于接入一组不对称的电流源。在这组不对称电流源和两侧系统电源作用下,故障线路和健全线路上都存在正序电流、负序电流和零序电流。



#### 图1 双回线路单相断线故障示意图

# Fig.1 Schematic diagram of single-phase open-line fault on double-circuit lines

以 I 回线 A 相断线故障为例,故障后的电气量 可以看成负荷分量和故障分量的叠加,即引入断口 处并联的2个幅值相等、方向相反的电流源<sup>[5]</sup>,这2 个电流源的数值等于断线故障前线路的负荷电流  $I_{\text{FH}}, I_{\text{FH}}$ 的方向根据断线故障前的负荷电流从M侧流 向N侧确定<sup>[5]</sup>。断线故障分量的复合序网图如图 2 所示。图中,假设断口位于线路出口处; $I_{\text{Ikl}}, I_{\text{Ikl}}$ ,  $I_{\text{Ik0}}$ 分别为故障线路故障相的正序、负序、零序故障 电流; $I_{\text{Ikl}}, I_{\text{Ikl}}, I_{\text{Ikl}}$ ,  $I_{\text{Ik0}}$ 分别为故障线路故障相的正序、负序、零序故障 电流; $I_{\text{Ikl}}, I_{\text{Ikl}}, I_{\text{Ikl}}$ ,  $I_{\text{Ikl}}, I_{\text{Ikl}}, I_{\text{Ikl}}, I_{\text{Ikl}}$ ,  $X_{M0}$ 分别为双回线M和N侧系统的正序、负序、零序 电抗; $U_{\text{Ikl}}, U_{\text{Ikl}}, U_{\text{Ikl}}$ , M和N侧系统的正序、负序、零序 电抗; $U_{\text{Ikl}}, U_{\text{Ikl}}, U_{\text{Ikl}}$ , M和N则为故障线路断口处的正 序、负序、零序电压; $X_{\text{LI}}, X_{\text{L2}}, X_{\text{L0}}$ 分别为单回线的正 序、负序、零序电抗; $X_{\text{Lm}}$ 为双回线零序互感电抗。本 文的研究对象是高压和超高压系统,阻抗角大,所以 计算时忽略了各元件的有效电阻。



#### 图2 断线故障分量的复合序网图

Fig.2 Composite sequence network of fault component under open-line fault

根据文献[5],可得 $U_{1k1}$ 、 $U_{1k2}$ 、 $U_{1k0}$ 和 $I_{1k1}$ 、 $I_{1k2}$ 、  $I_{1k0}$ 为:

$$U_{1k1} = U_{1k2} = U_{1k0} = \frac{jX_{1\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}} I_{FH}$$
(1)

$$I_{1k1} = -\frac{1}{jX_{1\Sigma}} U_{1k1} = -\frac{X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}} I_{FH}$$
(2)

$$I_{1k2} = -\frac{X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}} I_{FH}$$
(3)

$$I_{1k0} = -\frac{X_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}} I_{FH}$$
(4)

$$X_{1\Sigma} = X_{L1} \left( 1 + \frac{X_{S1}}{X_{L1} + X_{S1}} \right)$$
(5)

$$X_{0\Sigma} = \left(X_{L0} - X_{Lm}\right) \left(1 + \frac{X_{S0} + X_{Lm}}{X_{S0} + X_{L0}}\right)$$
(6)

其中, $X_{S1} = X_{M1} + X_{N1}$ ; $X_{S0} = X_{M0} + X_{N0\circ}$ 

#### 1.2 断线故障后健全线路的正序故障电流

断线故障分量的正序网络图如图3所示。在母 线*M*处应用基尔霍夫电流定律,结合式(2)可得:

$$I_{IIk1} = \frac{X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}} \frac{X_{S1}}{X_{S1} + X_{L1}} I_{FH}$$
(7)



图 3 断线故障分量的正序网络图

Fig.3 Positive-sequence network of fault component under open-line fault

#### 1.3 断线故障后健全线路的负序电流分量

参考健全线路的正序电流分量 *I*<sub>IIk1</sub>,可得健全 线路的负序电流分量 *I*<sub>IIk2</sub>为:

$$I_{IIk2} = \frac{X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}} \frac{X_{S1}}{X_{S1} + X_{L1}} I_{FH}$$
(8)

#### 1.4 断线故障后健全线路的零序电流分量

断线故障分量的零序网络图如图4所示。因为 零序互感阻抗可高达零序自阻抗的50%~70%<sup>[6-7]</sup>, 计算时需要考虑双回线零序互感电抗*X*<sub>Lm</sub>的影响。



#### 图4 断线故障分量的零序网络图

Fig.4 Zero-sequence network of fault component under open-line fault

在母线M处应用基尔霍夫电流定律,结合式(4) 可得:

$$\boldsymbol{I}_{\text{IIk0}} = \frac{X_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}} \frac{X_{\text{S0}} + X_{\text{Lm}}}{X_{\text{S0}} + X_{\text{L0}}} \boldsymbol{I}_{\text{FH}}$$
(9)

#### 1.5 断线故障后健全线路的相电流

断线故障后流经健全线路的相电流 *I*<sub>post</sub> 为负荷 电流 *I*<sub>FH</sub>和健全线路的各序故障电流 *I*<sub>IIk1</sub>、*I*<sub>IIk2</sub>、*I*<sub>IIk0</sub>之 和,即:

$$\boldsymbol{I}_{\text{post}} = \left(1 + \frac{2X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}} \frac{X_{\text{S1}}}{X_{\text{S1}} + X_{\text{L1}}} + \frac{X_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}} \frac{X_{\text{S0}} + X_{\text{Lm}}}{X_{\text{S0}} + X_{\text{L0}}}\right) \boldsymbol{I}_{\text{FH}}$$
(10)

若断线故障发生在线路的其他位置,分析过程 同上,本文不再赘述。

综上所述,当同塔双回线发生单相断线故障时, 健全线路将出现方向和I<sub>m</sub>相同、大小和I<sub>m</sub>呈比例 关系的正序、负序和零序电流,且正序电流增量和负 序电流增量相等。

#### 1.6 邻线跳闸故障后健全线路的相电流

另一种以AREVA为代表提出的整定方法是躲 过线路热稳极限运行情况下,邻线跳闸故障后负荷 转移的测量阻抗。邻线跳闸后,流经健全线路的只 有正序电流,没有负序电流分量和零序电流分量,则 健全线路的相电流 I'<sub>post</sub>为:

$$I'_{\text{post}} = \frac{E_M - E_N}{jX_{\text{S1}} + jX_{\text{L1}}} = \left(1 + \frac{X_{\text{S1}}}{X_{\text{S1}} + X_{\text{L1}}}\right) I_{\text{FH}}$$
(11)

根据式(10)、(11)可知,邻线断线故障和邻线跳 闸故障下,事故过负荷后的电流量都会改变健全线 路的测量阻抗,需要对比测量阻抗的变化量,选择负 荷入侵最严重的一种情形整定阻抗定值。

### 2 距离保护过负荷入侵阻抗定值的整定

带过负荷入侵阻抗功能的三段式四边形距离保 护示例见图 5。图中, $\theta_{max}$ 为系统最大功率因数角的 2倍;3个独立元件 $G_{x}$ D和H围成的四边形内部为保 护动作区域,三段区域仅通过元件H划分,各段共用 元件 $G_{x}$ D<sup>[5]</sup>。过负荷入侵区域由阻抗定值(或电阻 定值)和阻抗角度确定。



#### 图5 带过负荷入侵阻抗功能的三段式四边形 距离保护动作区域

Fig.5 Operation area of quadrilateral characteristic three-zone distance relay with load encroachment impedance function

图 5 中标出了当送端系统输送功率为P<sub>1</sub>—P<sub>4</sub> (P<sub>1</sub>>P<sub>2</sub>>P<sub>3</sub>>P<sub>4</sub>)时,负荷阻抗的分布轨迹。可以看 出,为下一级线路提供后备保护的距离保护Ⅲ段的 灵敏度较高,容易遭受负荷入侵<sup>[4]</sup>,其动作区域的确 定备受专家学者的关注<sup>[8+11]</sup>。因此需要分析发生邻 线断线故障和邻线跳闸故障时,事故过负荷情况下 距离保护Ⅲ段的抗负荷入侵能力。

过负荷分为正常过负荷和事故过负荷。正常过 负荷是指线路负荷超过规定的正常运行的最大负 荷,如超稳定极限运行、大机组失磁等。事故过负荷 是指当一个输电断面一回或多回线路发生事故或无 事故跳闸,负荷转移造成剩余运行线路严重过负 荷<sup>[12]</sup>。目前过负荷完全依赖整定计算,因此应按躲 过最严重的过负荷情况进行整定计算<sup>[13]</sup>,即故障前 线路运行在最大的正常过负荷下,之后又发生了最 严重的事故过负荷。由文献[4]可知,发生邻线断线 故障和邻线跳闸故障前,线路的最大正常过负荷应 该根据系统的静稳极限来考虑,而不以线路的热稳 极限来考虑。因为大多数情况下,静稳极限下的电 流比热稳极限下的电流小很多。

## 2.1 邻线断线和邻线跳闸故障前健全线路的测量 阻抗

发生邻线断线和邻线跳闸故障前,线路在静稳

极限下的负荷阻抗 $Z_{\rm pre}$ 为:

$$Z_{\rm pre} = \frac{U_{\rm pre}}{I_{\rm FHmax}}$$
(12)

其中, U<sub>pre</sub> 为故障前线路的测量相电压, 为了能够覆 盖各种可能的静稳极限临界场景, U<sub>pre</sub> 取为系统运行 安全规程限定的低电压门槛(90%的系统额定电 压); I<sub>FHmax</sub> 为故障前系统运行在静稳极限的情况下, 健全线路的负荷电流。

#### 2.2 故障后健全线路的测量阻抗

2.2.1 邻线断线故障后健全线路的测量阻抗

邻线断线故障后,健全线路接地距离保护装置的测量阻抗Z<sub>nst</sub>为:

$$Z_{\text{post}} = \frac{U_{\text{post}}}{I_{\text{post}} + 3K_0 I_{\parallel k0}}$$
(13)

其中, $U_{post}$ 为邻线断线故障后测量点的相电压;对于 双回线, $K_0$ 为零序补偿系数,其应根据系统运行情况 实时切换<sup>[14]</sup>,但若采用邻线零序电流补偿方式,经常 因无法取得邻线零序电流而失去补偿,实际效果会 适得其反,故不采用<sup>[5]</sup>该方式, $K_0$ 的计算公式仍然为  $K_0 = (Z_{10} - Z_{11})/(3Z_{11}), Z_{11}, Z_{10}$ 分别为单位长度线路 的正序、零序阻抗。

将式(9)和式(10)代入式(13)得:

$$Z_{\text{post}} = \left[ 1 + \frac{2X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}} \frac{X_{51}}{X_{51} + X_{L1}} + (1 + 3K_0) \times \frac{X_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}} \frac{X_{50} + X_{Lm}}{X_{50} + X_{L0}} \right]^{-1} \frac{U_{\text{post}}}{I_{\text{FHmax}}}$$
(14)

2.2.2 邻线跳闸故障后健全线路的测量阻抗

邻线跳闸退出运行后,健全线路的距离保护装置的测量阻抗Z'ng为:

$$Z'_{\text{post}} = \frac{U'_{\text{post}}}{I'_{\text{post}}} = \left(1 - \frac{X_{\text{S1}}}{2X_{\text{S1}} + X_{\text{L1}}}\right) \frac{U'_{\text{post}}}{I_{\text{FHmax}}}$$
(15)

其中,U'ng 为邻线跳闸故障后测量点的相电压。

# 2.3 邻线断线和邻线跳闸故障前、后健全线路的测量阻抗比值

邻线断线和邻线跳闸故障前,负荷阻抗(即式 (12))应按照静稳极限计算,而发生邻线断线和邻线 跳闸故障这2种暂态扰动后,系统也应接近静稳极 限。因此,对于绝大多数的情况,系统在静稳极限下 运行、静稳极限下发生邻线断线故障、静稳极限下发 生了邻线跳闸故障这3种情形下,测量电压应低于 系统的额定电压,并高于系统运行安全规程限定的 低电压门槛(90%的系统额定电压)。又因为发生 邻线断线或邻线跳闸故障后,系统总电抗变大,线 路两侧的电压功角增大、电压幅值增大,故障前后 测量电压的比值 $U_{pre}/U_{post}($ 或 $U_{pre}/U'_{post})$ 的取值范围 为(0.9,1)。 2.3.1 邻线断线故障前、后健全线路的测量阻抗 比值

邻线断线故障前、后健全线路测量阻抗的比值 *k*<sub>zcal</sub>为:

$$k_{\text{zcal}} = \frac{U_{\text{pre}}}{U_{\text{post}}} \left[ 1 + \frac{2X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}} \frac{X_{\text{S1}}}{X_{\text{S1}} + X_{\text{L1}}} + (1 + 3K_0) \frac{X_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}} \frac{X_{\text{S0}} + X_{\text{Lm}}}{X_{\text{S0}} + X_{\text{L0}}} \right]$$
(16)

当 $U_{\text{pre}}/U_{\text{post}}=1$ 时, $k_{\text{zcal}}$ 取值为 $k_{\text{zcalmax}}$ ,实际中 $k_{\text{zcal}}$ 的范围为(0.9 $k_{\text{zcalmax}}$ , $k_{\text{zcalmax}}$ )。

2.3.2 邻线跳闸故障前、后健全线路测量阻抗的 比值

邻线跳闸故障前、后健全线路测量阻抗的比值*k*'<sub>rel</sub>为:

$$k'_{\rm zcal} = \frac{U_{\rm pre}}{U'_{\rm post}} \left( 1 + \frac{X_{\rm S1}}{X_{\rm S1} + X_{\rm L1}} \right)$$
(17)

当 $U_{\text{pre}}/U'_{\text{post}} = 1$ 时, $k'_{\text{zcal}}$ 取值为 $k'_{\text{zcalmax}}$ ,实际中 $k'_{\text{zcal}}$ 的范围为(0.9 $k'_{\text{zcalmax}}$ , $k'_{\text{zcalmax}}$ )。

#### 2.4 兼顾2种事故过负荷情况的改进整定方案

根据相关导则<sup>[13]</sup>,距离保护Ⅲ段阻抗定值要按 照实际可能最不利的系统频率下的阻抗元件所遇到 的事故过负荷最小负荷阻抗整定。通过比较2种邻 线故障前、后健全线路测量阻抗的比值,按照故障后 测量阻抗最小的情形进行整定,就能保证发生这2 种邻线故障事故过负荷情形下保护不误动。

2.4.1 2种事故过负荷下健全线路测量阻抗变化的 比较

若忽略高压和超高压线路的电阻分量,式(16) 中的 $K_0$ 可表示为 $K_0 = (X_{10} - X_{11})/(3X_{11})_o$ 

为了比较邻线断线和邻线跳闸故障对健全线路 测量阻抗的影响,令:

$$m = k_{\text{zcalmax}} - k'_{\text{zcalmax}} =$$

$$-\frac{X_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma}+2X_{0\Sigma}} \left(\frac{X_{S0}+X_{Lm}}{X_{S0}+X_{L0}}\frac{X_{L0}}{X_{L1}}-\frac{X_{S1}}{X_{S1}+X_{L1}}\right) \quad (18)$$

当m = 0时, $k_{zcalmax} = k'_{zcalmax}$ ;当m > 0时, $k_{zcalmax} > k'_{zcalmax}$ , 即邻线断线故障后健全线路的测量阻抗的最小值 比邻线跳闸故障后健全线路的测量阻抗的最小值 小,当按照 $k_{zcalmax}$ 计算2种故障后健全线路的测量阻 抗Z时,既能保证邻线断线故障情况下健全线路的 保护不误动(邻线断线后健全线路的测量阻抗在 (Z,1.1Z)范围内,即有小于10%的裕度),也能保证 邻线跳闸情况下健全线路的保护不误动(邻线跳闸 后健全线路的测量阻抗的最小值比Z大);同理,当 m < 0时,按照 $k'_{zcalmax}$ 计算2种故障后健全线路的测量 阻抗时,也能保证邻线断线故障和邻线跳闸故障情 况下健全线路的保护不误动。 设 k<sub>m</sub>为双回线零序互感系数,并将 X<sub>Lm</sub> = k<sub>m</sub>X<sub>L0</sub> 代入式(18),考虑 m≥0时的系统情况,可得:

$$k_{\rm m} \ge \left(\frac{X_{\rm S1}}{X_{\rm S1} + X_{\rm L1}} \frac{X_{\rm L1}}{X_{\rm L0}} - 1\right) \left(\frac{X_{\rm S0}}{X_{\rm L0}} + 1\right) + 1 \tag{19}$$

式(19)的"≥"右侧部分是在(-∞,1)范围内的实 数, $X_{s0}/X_{L0}$ 越小, $X_{s1}/X_{L1}$ 越大,该部分越接近最大值  $X_{L1}/X_{L0}$ 。建议首先比较 $k_{m}$ 和 $X_{L1}/X_{L0}$ :若 $k_{m} \ge X_{L1}/X_{L0}$ , 则式(19)成立;若 $k_{m} < X_{L1}/X_{L0}$ ,再进一步判断式(19) 是否成立。

2.4.2 躲邻线故障的阻抗定值计算方法

若式(19)成立,则按照2.3.1节计算 $k_{\text{zcalmax}}$ 。考虑 各种测量误差和理论计算误差,定义 $k_z = K_{\text{rell}}k_{\text{zcalmax}}$ , 其中 $K_{\text{rell}}$ 为可靠系数,参考后备保护的整定原则,建 议取为1.2~1.3。根据式(12)计算出 $Z_{\text{pre}}$ 后,将 $Z_{\text{pre}}/k_z$ 作为距离保护的过负荷入侵阻抗定值。

若式(19)不成立,则按照2.3.2节计算 k'<sub>zealmax</sub>,并 按照"若式(19)成立"条件下相同的步骤计算距离保 护的过负荷入侵阻抗定值。

#### 3 仿真分析

利用 PSCAD / EMTDC 搭建如图 1 所示的双回 线系统,线路长度为 100 km。单回线路参数: $Z_{LI}$ = 0.01+j0.554  $\Omega$  / km; $Z_{L0}$ = 0.18+j1.107  $\Omega$  / km;单位长 度线路的正序容抗  $X_{CI}$ = 0.233 M $\Omega$ ·km;单位长度线 路的零序容抗  $X_{C0}$ = 0.648 M $\Omega$ ·km。M侧系统参数为:  $E_M$ = 525 $\angle$ 70° kV;系统正序阻抗  $X_{MI}$ = 0.5+j27.7  $\Omega$ ;系 统零序阻抗  $X_{M0}$ = 0.27+j1.66  $\Omega$ 。N侧系统参数为: $E_N$ = 500 $\angle$ 0° kV;系统正序阻抗  $Z_{NI}$ = 0.5+j27.7  $\Omega$ ;系统零序 阻抗  $Z_{N0}$ = 0.27+j1.66  $\Omega$ 。

同塔双回线的零序互感和线路间的几何距离、 大地电阻率及系统频率都有关,通常为线路零序自 阻抗的20%~80%<sup>[15]</sup>。针对式(19),改变零序互感 系数,在附录B表B1中得到本文所讨论的2种事 故过负荷前、后健全线路阻抗比值的测量值 $k_{zmea}$ 和 $k'_{zmea}$ ,计算其理论最大值 $k_{zealmax}$ 和 $k'_{zealmax}$ 及裕度(即 误差) $\delta = (k_{zealmax} - k_{zmea})/k_{zmea}, \delta' = (k'_{zealmax} - k'_{zmea})/k'_{zmea}; 记$ 录 2种事故过负荷前后健全线路的测量电压比值 $<math>k_u = U_{pre}/U_{post}$ 和 $k'_u = U_{pre}/U'_{post}$ 。

设置3处断线故障位置:①0 km;②50 km(线路 全长的50%);③100 km(线路全长的100%)。双回 线采用并联电抗器补偿了70%的分布电容<sup>[16]</sup>。不 同互感系数下的 $\delta_{\delta}$ "如图6所示。

由表B1和图6可得到以下结论。

(1)当 $k_{m}$ =0.22和 $k_{m}$ =0.24,即m接近0时, $k_{zeal}$ 、  $k'_{zeal}$ 最接近。当 $k_{m}$ <0.22时, $k'_{zeal}$ 更大,应根据邻线跳 闸故障情况整定距离保护的过负荷入侵阻抗定值; 当 $k_{m}$ >0.24时, $k_{zeal}$ 更大,需要按照邻线断线故障情



图6 不同互感系数 $k_m$ 下的 $\delta$ 、 $\delta'$ 

Fig.6 Values of  $\delta$  and  $\delta'$  under different values of  $k_{\rm m}$ 

况整定距离保护的过负荷入侵阻抗定值。

(2)邻线跳闸故障前后,对于不同的互感系数 k<sub>m</sub>,健全线路测量电压的比值和测量阻抗的比值都 不变,理论最大值k'<sub>zelmax</sub>的误差也不变。

(3)邻线断线前后,健全线路阻抗比值的理论最 大值 k<sub>zcalmax</sub>的误差δ是小于10%的正值,且随互感系 数 k<sub>m</sub>的增大而增大,原因是随着零序电流增大,线 路零序电阻分量影响增大;而测量电压的比值基本 不变,说明电压量适应系统方式变化的鲁棒性更强。

(4)受线路分布参数的影响,断线发生在不同位 置时,装置的测量阻抗比值略有不同。

为便于说明,下文分别将 SIEMENS 的整定方式、AREVA等的整定方式和本文所提改进整定方式 简称为整定方式1—3。非金属性故障下测量阻抗 难以反映故障点到保护安装处的距离,容易造成保 护的不正确动作,需要研究健全线路在下级线路出 口处经不同过渡电阻接地时,3种整定方式下距离 保护III段的动作行为。设置 $Z_{M}=Z_{N}=1.5+j83.1\Omega$ ,  $Z_{M}=Z_{M}=27+j166.05\Omega, k_{m}=0.6,其他参数不变。$ 

为利用 PSCAD 的多边形动作区域仿真距离保 护的动作行为,3种整定方式都以电阻定值取值 (对于整定方式2、3,需要将计算出的过负荷入侵 阻抗定值的幅值按照最大功率因数角换算成电阻定 值),即 $R_{L1}$ =72.852  $\Omega$ 、 $R_{L2}$ =151.237  $\Omega$ 、 $R_{L3}$ =103.033  $\Omega$ ( $K_{rell}$ =1.2);3 类整定方式的过负荷入侵角  $\theta$ 相同 (tan  $\theta$ =0.5)。3 种整定方式下,距离保护 III 段的动 作区域见图 7。图中,tan  $\varphi$ =1/8; $\gamma$ =60°; $\alpha$ = $\beta$ =15°; 元件 $H_3$ 按照全线路阻抗的 1.45 倍整定<sup>[13]</sup>;元件G与





#### R轴的交点取为160 $\Omega$ 。

#### 3.1 算例1

同塔双回线因其电气参数的特点,在不同运行 方式下的序电流分布回路不同,零序补偿系数对测 量阻抗的误差影响也不同<sup>[14]</sup>。在正常运行、邻线停 运、邻线挂检这3种情况下<sup>[14]</sup>,下级线路出口发生短 路故障时,作为远后备保护的距离保护Ⅲ段应具有 较高的抗过渡电阻能力。因此,本文通过逐步增加 过渡电阻值,考察3种整定方式下的距离保护能否 正确动作。表1为3种情况下,下级线路出口经不同 过渡电阻接地时,距离保护装置的测量阻抗值,对应 的距离保护的动作情况如表2所示。

#### 表1 距离保护的测量阻抗值

Table 1 Measured impedance value of

distance protection

| 过渡电阻/Ω |                | 测量阻抗 / $\Omega$ |                |
|--------|----------------|-----------------|----------------|
|        | 正常运行           | 邻线停运            | 邻线挂检           |
| 25     | 57.322+j30.893 | 29.377+j34.998  | 26.390+j30.139 |
| 50     | 92.844+j15.548 | 49.577+j25.848  | 47.085+j22.135 |
| 75     | 120.006+j8.174 | 65.088+j21.206  | 62.873+j18.213 |
| 100    | 140.980+j4.795 | 77.130+j18.877  | 75.106+j16.364 |

表2 3种整定方式下,距离保护的动作情况

Table 2 Operation of distance protection

under three setting methods

| ⇒ → 座 → 0 | 教会士士 | 动作情况 |      |      |  |  |
|-----------|------|------|------|------|--|--|
| 过彼电阻/M    | 登止刀式 | 正常运行 | 邻线停运 | 邻线挂检 |  |  |
|           | 1    | 动作   | 动作   | 动作   |  |  |
| 25        | 2    | 动作   | 动作   | 动作   |  |  |
|           | 3    | 动作   | 动作   | 动作   |  |  |
|           | 1    | 拒动   | 动作   | 动作   |  |  |
| 50        | 2    | 动作   | 动作   | 动作   |  |  |
|           | 3    | 动作   | 动作   | 动作   |  |  |
|           | 1    | 拒动   | 动作   | 动作   |  |  |
| 75        | 2    | 动作   | 动作   | 动作   |  |  |
|           | 3    | 拒动   | 动作   | 动作   |  |  |
|           | 1    | 拒动   | 拒动   | 拒动   |  |  |
| 100       | 2    | 动作   | 动作   | 动作   |  |  |
|           | 3    | 拒动   | 动作   | 动作   |  |  |

分析表2可知,对于算例1,下级线路出口发生 非金属性故障时,整定方式2的抗过渡电阻能力最 强,该整定方式下的距离保护在100Ω过渡电阻下 也能可靠动作;整定方式3的抗过渡电阻能力次之, 最多只能判别出50Ω的过渡电阻;整定方式1的抗 过渡电阻能力最弱,只能判别出25Ω的过渡电阻。 3类整定方式的抗过渡电阻能力比较结果为:整定 方式2>整定方式3>整定方式1。

#### 3.2 算例2

在正常运行和本文所讨论的2种事故过负荷情况下,距离保护装置的测量阻抗和k<sub>u</sub>值见表3(表中 ①、②、③分别对应上文设置的3种故障位置),对应 的3种整定方式下距离保护的动作情况见表4。

#### 表3 不同运行状态下的测量阻抗和 k,值

| Table 3 | Mea | sured | impeda | ance a | nd | value | of | $k_u$ |
|---------|-----|-------|--------|--------|----|-------|----|-------|
|         |     | 11.00 |        |        |    |       |    |       |

| under diffe | erent opera | ting sta | ates |
|-------------|-------------|----------|------|
|-------------|-------------|----------|------|

| 运行状态   | 测量阻抗 / $\Omega$ | $k_u$ |
|--------|-----------------|-------|
| 正常运行   | 280.641+j32.255 | _     |
| 邻线跳闸   | 159.814+j31.318 | 0.991 |
| 邻线断线 ① | 134.066+j18.650 | 0.980 |
| 邻线断线 ② | 133.994+j19.890 | 0.979 |
| 邻线断线 ③ | 134.025+j20.818 | 0.978 |

#### 表4 2种事故过负荷情况下,采用不同整定 方式的距离保护动作情况

Table 4 Operation of distance protection adopting different setting methods under two post-fault

overload conditions

| 車劫討免益信仰          | 动作情况  |        |        |  |  |
|------------------|-------|--------|--------|--|--|
| <b>爭</b> 取良贝何 用几 | 整定方式1 | 整定方式 2 | 整定方式 3 |  |  |
| 邻线跳闸             | 不动作   | 不动作    | 不动作    |  |  |
| 邻线断线             | 不动作   | 误动     | 不动作    |  |  |

分析表4可知,对于本算例,整定方式1、3能保证2种事故过负荷情况下距离保护不误动;采用整定方式2时,距离保护在邻线断线下会误动。因此3 类整定方式的抗负荷入侵能力比较结果为:整定方式1=整定方式3>整定方式2。

综上所述,在保证距离保护装置不误动的情况 下,兼顾较大过渡电阻和抗负荷入侵能力的整定方 式3更合理。

#### 3.3 算例3

为了研究整定方式3下的距离保护III段在故障 暂态过程中的动作特性,在算例1和算例2的基础上, 对仿真参数进行如下修改:线路长度延长至300 km;  $Z_{M1} = Z_{N1} = 0.15 + j8.31 \Omega; Z_{M0} = Z_{N0} = 2.7 + j16.61 \Omega; 其$ 他参数不变。将四边形特性的阻抗定值整定为线路 $阻抗的1.3 倍,动作时间整定为1.5 s<sup>[13]</sup>, <math>\theta$ 整定为 35°,  $R_{L3}$ 整定为74.46  $\Omega(K_{rel} = 1.2)$ 。

设置4种区内转区外故障,其中区内故障为下级 线路出口经15Ω过渡电阻接地短路,区外故障为邻 线退出故障和0、150km(线路全长的50%)、300km (线路全长的100%)处的邻线断线故障。仿真持续 时间为4.0s,第一次故障发生在0.2s时刻。表5为 距离保护Ⅲ段在4种转换性故障下的动作情况和平

表5 不同转换性故障下的距离保护Ⅲ段动作情况

Table 5 Operation characteristic of zone III of distance protection under different transition faults

| -         |            |      |          |                |  |  |
|-----------|------------|------|----------|----------------|--|--|
|           | t+++2      | 动作情况 |          |                |  |  |
| 故障类型      | 转换<br>时间/s | 状态 1 | 状态 2     | 平均动作<br>时间 / s |  |  |
| 区内(保留)转区外 | 1.4        | 不动作  | 0.1 s后动作 | 1.522          |  |  |
| 区内(消失)转区外 | 1.4        | 不动作  | 不动作      | _              |  |  |
| 区外(保留)转区内 | 1.6        | 不动作  | 1.5 s后动作 | 1.520          |  |  |
| 区外(消失)转区内 | 1.6        | 不动作  | 1.5 s后动作 | 1.516          |  |  |

均动作时间。仿真结果表明,距离保护Ⅲ段在区外 故障下可靠不动作,在区内故障超过整定时限时可 靠动作。

#### 4 结论

本文对2类整定双回线距离保护的方法进行了 分析及仿真,发现这2类整定方法均存在不足之处。

(1)SIEMENS 提出的按照静稳极限运行下躲邻 线断线的整定方法可能因邻线跳闸退出而导致健全 线路误动。另外,其提供的断线后电阻计算公式只 根据经验值考虑了零序电流的改变量,没有计入正 序电流和负序电流的变化。

(2)AREVA为代表的国内外厂商提出的按照热 稳极限运行下躲邻线跳闸的整定方法可能因邻线断 线而导致健全线路误动。另外,系统故障前的情形 不应按照电流值较大的热稳极限电流计算,而应按 照静稳极限电流计算。

建议按照本文所提的改进方法,根据系统实际 情况,比较邻线断线和邻线跳闸故障下的事故过负 荷情况,选择测量阻抗变化更大的情况计算距离保 护的过负荷入侵阻抗定值。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- 刘亚东,孙集伟,杨国生,等.断线故障对零序过流保护的影响 及保护新方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):130-134.
   LIU Yadong, SUN Jiwei, YANG Guosheng, et al. Impact of open-circuit fault on zero-sequence over-current protection and improved protection scheme[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7):130-134.
- [2]陈文哲,郝治国,张保会,等.同塔双回线纵向故障特征分析 及零序方向保护改进[J].电力自动化设备,2016,36(11): 133-139.
   CHEN Wenzhe, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Characteristic analysis on longitudinal fault of dual-circuit transmission line and improvement of zero-sequence directional protec-

sion line and improvement of zero-sequence directional protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 133-139.

- [3] ELMER S, ALEJANDRO G. Detailed analysis of the effect of parallel lines on the impedance seen by the traditional ground distance function[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(11): 2921-2929.
- [4]曹润彬,董新洲,何世恩.事故过负荷情况下距离保护的动作 行为分析[J].中国电机工程学报,2015,35(13):3314-3323.
   CAO Runbin, DONG Xinzhou, HE Shien. Analysis on performance of zone-Ⅲ distance protection under post-fault overload
   [J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(13):3314-3323.
- [5] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 4版. 北京:中国 电力出版社,2014:26-31,145-147,237-239.
- [6] BI T S,LI W,XU Z Y,et al. First-zone distance relaying algorithm of parallel transmission lines for cross-country grounded faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27 (4):2185-2192.
- [7] XU Z Y, LI W, BI T S, et al. First-zone distance relaying algorithm of parallel transmission lines for cross-country nonear-



thed faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26 (4);2486-2494.

- [8] DIPTAK P, BALIMIDI M, RAMIGANI J R, et al. Synchrophasor assisted adaptive relaying methodology to prevent zone-3 mal-operation during load encroachment [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23):7713-7722.
- [9] JOSE T,BISWAL M,VENKATANAGARAJU K, et al. Integrated approach based third zone protection during stressed system conditions[J]. Electric Power Systems Research,2018,161:199-211.
- [10] SHALINI S R S, ANKUSH S. Enhancing performance of widearea back-up protection scheme using PMU assisted dynamic state estimator[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10 (5):5066-5074.
- [11] TOHID G B, MAHMOUD R H, MOJTABA K. Real-time monitoring of zone 3 vulnerable distance relays to prevent maloperation under load encroachment condition[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(8):1878-1888.
- [12] 柳焕章,周泽昕.线路距离保护应对事故过负荷的策略[J]. 中国电机工程学报,2011,31(25):112-117.
  LIU Huanzhang,ZHOU Zexin. Post-fault over-load maloperation countermeasure of transmission line distance protection
  [J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(25):112-117.
- [13] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 220 kV~750 kV电网 继电保护装置运行整定规程:DL/T 559-2007[S]. 北京:中 国电力出版社,2008.
- [14] 张健康,粟小华,胡勇. 750 kV 同塔双回线接地距离保护整定 计算[J]. 电力系统自动化,2009,33(22):102-105.
   ZHANG Jiankang,SU Xiaohua,HU Yong. Setting calculation

of ground distance protection for 750 kV double circuit lines on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22):102-105.

[15] 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 zerosequence current compensation coefficient and improvement of setting method for grounding distance protection of dualloop lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8):9-14.

[16] XU Z Y,ZHANG X, HE J, et al. First-zone distance relaying algorithm of parallel transmission lines for single-phase to ground faults[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2016, 80:374-381.

#### 作者简介:



金瑞

金 瑞(1984—), 女, 山东青岛人, 工 程师, 主要研究方向为国际化电力系统继电 保护(**E-mail**: jinrui@sf-auto.com);

林湘宁(1970—),男,广西贵港人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统继电保护与控制、新能源微电网规划运行(E-mail:xiangning.lin@hust.edu.cn);

时伯年(1976—),男,江苏南通人,教 授级高级工程师,博士,主要研究方向为电

カ系统稳定及广域保护(E-mail:shibonian@sf-auto.com)。 (编辑 任思思)

# Improved setting method of distance protection under post-fault overload condition of parallel transmission lines on same tower

JIN Rui<sup>1</sup>, LIN Xiangning<sup>2</sup>, SHI Bonian<sup>1</sup>

(1. Simulation Analysis Innovation Department, Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Currently there are two universal methods of setting distance protection of parallel transmission lines for post-fault overload condition. One is setting under overload encroachment after open-line fault occurs at adjacent line during static stability limit operation. The other is setting under overload encroachment after adjacent line trips during thermal stability limit operation. Both setting methods have the disadvantage that they cannot cover each other's blind zones. Aiming at this problem, the variation of measured impedance of healthy lines under the two post-fault overload conditions is calculated, and the severity of the two post-fault overload is compared. Based on these calculations, an improved setting method of load encroachment impedance under the two conditions is proposed. The three setting methods are compared via PSCAD / EMTDC software. The result shows that compared with the current two setting methods, the proposed setting method can detect large transition resistance and prevent mal-trip under post-fault overload condition at the same time, which is more reasonable.

Key words: parallel transmission lines on same tower; setting method; load encroachment impedance; distance protection; post-fault overload

# 附录 A

SIEMENS SIPROTEC4 7SA522 说明书中的双 回线过负荷入侵电阻  $R_L$ 的整定计算公式为:

$$R_{\rm L} = \frac{R_{\rm Lprim}}{1 + \frac{I_{\rm Epole\_open}}{I_{\rm max}}} \left(1 + \frac{R_{\rm E}}{R_{\rm L}}\right) \tag{A1}$$

$$\frac{R_{\rm E}}{R_{\rm L}} = \frac{1}{3} \left(\frac{R_0}{R_1} - 1\right) \tag{A2}$$

$$R_{\rm Lprim} = \frac{U_{\rm min}}{\sqrt{3}I_{\rm Lmax}}$$
(A3)

其中,  $R_{\rm E} / R_{\rm L}$  为线路的零序电阻补偿系数;  $R_0$  为 单位长度线路的零序电阻,  $R_1$  为单位长度线路的正 序电阻;  $I_{\rm Epole\_open}$  为邻线单相断线故障后健全线路 的零序电流;  $I_{\rm max}$  为邻线单相断线故障后健全线路 的相电流;  $I_{\rm Epole\_open} / I_{\rm max}$  为邻线单相断线故障后 健全线路的零序电流和相电流的比值,对于长线路 (典型长度为 200km)建议取值为 0.4,对于短线路 (典型长度为 25km)的取值建议为 0.6;  $R_{\rm Lprim}$  为 根据系统静稳极限电流计算的测量电阻一次值;  $U_{\rm min}$  为保护安装处的最小允许运行电压,建议取 90% 的系统额定电压;  $I_{\rm Lmax}$  为系统静稳极限电流值。

实际电阻整定一次值 $R_{Lset}$ 为:

$$R_{\rm Lset} = K_{\rm rel} R_{\rm L} \tag{A4}$$

其中, K<sub>rel</sub>建议取为 0.9。

#### 附录 B

表 B1 测量阻抗比值和理论计算比值的比较

Table B1 Measured scaling factor compared with

theoretical calculated ratios

| 邻线跳闸 |           |                                  |          | 邻线断线                           |
|------|-----------|----------------------------------|----------|--------------------------------|
| km   | k'zcalmax | $k'_{\text{zmea}}, \delta', k_u$ | kzcalmax | $k_{\text{zmea}}, \delta, k_u$ |
|      |           |                                  |          | 1.437, 2.8%, 0.973             |
| 0.20 | 1.500     | 1.450, 3.5%, 0.966               | 1.477    | 21.437, 2.8%, 0.972            |
|      |           |                                  |          | 31.435, 2.9%, 0.972            |
|      |           |                                  |          | 1.447, 2.8%, 0.973             |
| 0.22 | 1.500     | 1.450, 3.5%, 0.966               | 1.488    | 21.448, 2.8%, 0.972            |
|      |           |                                  |          | 31.446, 2.9%, 0.971            |
|      |           |                                  |          | 1.458, 2.8%, 0.973             |
| 0.24 | 1.500     | 1.450, 3.5%, 0.966               | 1.499    | 21.458, 2.8%, 0.972            |
|      |           |                                  |          | 31.456, 3.0%, 0.971            |
|      |           |                                  |          | 11.468, 2.9%, 0.973            |
| 0.26 | 1.500     | 1.450, 3.5%, 0.966               | 1.510    | 21.469, 2.8%, 0.972            |
|      |           |                                  |          | 31.467, 3.0%, 0.971            |
|      |           |                                  |          | 1.479, 2.9%, 0.973             |
| 0.28 | 1.500     | 1.450, 3.5%, 0.966               | 1.522    | 21.479, 2.9%, 0.972            |
|      |           |                                  |          | 31.477, 3.0%, 0.972            |
|      |           |                                  |          | 11.490, 2.9%, 0.973            |
| 0.30 | 1.500     | 1.450, 3.5%, 0.966               | 1.534    | 21.490, 2.9%, 0.972            |
|      |           |                                  |          | 31.488, 3.1%, 0.972            |
|      |           |                                  |          | 1.548, 3.1%, 0.973             |
| 0.40 | 1.500     | 1.450, 3.5%, 0.966               | 1.597    | 21.549, 3.1%, 0.972            |
|      |           |                                  |          | 31.547, 3.3%, 0.972            |
|      |           |                                  |          | 11.615, 3.5%, 0.973            |
| 0.50 | 1.500     | 1.450, 3.5%, 0.966               | 1.671    | 21.616, 3.4%, 0.972            |
|      |           |                                  |          | 31.613, 3.6%, 0.971            |
|      |           |                                  |          | 1.694, 4.1%, 0.972             |
| 0.60 | 1.500     | 1.450, 3.5%, 0.966               | 1.763    | 21.695, 4.0%, 0.971            |
|      |           |                                  |          | 31.693, 4.2%, 0.971            |
|      |           |                                  |          | 11.794, 5.2%, 0.971            |
| 0.70 | 1.500     | 1.450, 3.5%, 0.966               | 1.887    | 21.795, 5.1%, 0.970            |
|      |           |                                  |          | 31.793, 5.2%, 0.970            |
|      |           |                                  |          | (1)1.924, 7.5%, 0.968          |
| 0.80 | 1.500     | 1.450, 3.5%, 0.966               | 2.068    | ②1.926, 7.4%, 0.967            |
|      |           |                                  |          | 31.924, 7.5%, 0.968            |