

局部同塔输电线路的零序电流保护的影响因素及对策

李斌¹, 戴冬康¹, 廖惠琴¹, 姜宪国², 杜丁香², 李仲青², 贺家李¹

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 简要介绍了局部同塔输电线路的架设方式, 对比了局部同塔输电线路、完全不同塔输电线路、完全同塔输电线路的故障特征。在此基础上, 重点研究了局部同塔输电线路不同故障位置和架设参数对零序电流保护的影响, 并提出了相应的改进措施。仿真结果证明了理论分析和所提措施的正确性和有效性。

关键词: 交流输电; 输电线路; 局部同塔; 零序电流保护; 继电保护

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.08.013

0 引言

由于土地资源日益紧张, 输电网络建设成本越来越高, 如何能在满足可靠性要求的基础上提高单位线路走廊宽度下的输电能力及降低电力建设投资, 成为国内外电网共同追求的目标, 因此同塔输电线路被大量采用^[1-2]。但同塔输电线路的架设也不可避免地引入了一些新的问题, 例如线路不平衡度的影响、相间互感对继电保护可靠性和选择性的影响等。在此问题上, 国内外学者进行了深入的研究。

文献[3]对超高压同塔双回线零序方向纵联保护误动案例进行了分析, 指出双回线外部相间不接地故障时, 双回线内部的零序环流是造成误动作的根本原因, 并提出增加负序方向元件和工频故障分量的方向元件作为改进措施。文献[4]分析了同塔双回线不同运行方式对接地距离保护测量阻抗的影响, 提出了一种新的零序补偿系数修正方法。文献[5]对双回线保护及重合闸技术进行了系统综述并指出应用中存在的问题。文献[6]提出了电流平衡式的双回线横差保护, 在避免数据交换与同步的基础上提高了保护的灵敏性。文献[7]分析了同塔多回线在不同运行方式下零序电流补偿系数及其对接地距离保护测量阻抗的影响, 提出了整定零序电路补偿系数的方法。文献[8]通过选取不同的同塔四回线相模变化矩阵, 利用变化后的各模量形成电流差动保护。此模量电流差动保护可以直接在模量下进行电容电流补偿, 计算简单, 且能对单相接地故障实现选相。文献[9]指出架设在同一出线走廊的平行双回线及相邻线路之间存在零序互感, 平行双回线会产生零序循环电流, 在相邻线路发生接地故障时该电流会造成电路平衡电流保护误动。

由于多种因素的影响, 工程实际中还大量存在

局部同塔线路的情况。局部同塔是同塔输电线路中的一种特殊架设方式。局部同塔输电线路与常见的完全同塔输电线路相比, 存在着相同的问题: 由于零序互感的存在, 发生故障时保护安装处测量的零序电流会产生变化, 零序电流的变化使得保护不能真实反映故障位置, 造成保护的误判从而导致保护的拒动或误动。局部同塔还因其特殊性, 有着不同的故障特性, 文献[10]给出了局部同塔双回线一回线故障时, 由于零序互感及双回线闭环环网的存在致使双回线某侧开关跳闸的相关案例。对于局部同塔双回输电线, 其零序电流保护的整定值计算并未考虑零序互感的影响, 所以零序电流的测量会产生偏差^[11-12], 导致零序电流保护不能真实反映故障位置, 从而引起保护的误动或拒动。

本文分析了局部同塔输电线路的多种架设方式, 根据不同架设方式的特征得到了局部同塔输电线路的等值电路; 并对比研究了局部同塔、完全不同塔输电线路和完全同塔输电线路发生单相接地故障时的故障特征。另外, 通过理论分析和仿真验证得出局部同塔输电线路的故障回线零序电流受双回线间距离、非故障线路长度和系统阻抗等因素的影响。在此基础上, 研究了局部同塔架设方式对零序电流保护的影响, 并提出了相应的改进措施。

1 局部同塔输电线路架设方式及等值电路

完全不同塔双回线路的两回线之间可以忽略互感的存在, 即不同塔的双回输电线路可以看作2条单回线处理。而单回输电线路因线路不换位等原因引起的不对称和不平衡电流问题已有很多研究成果^[15-16], 本文不再赘述。

完全同塔和局部输电线路的架设方式见图1。

图1(a)为两端共母线的完全同塔输电线路示意图, 双回线两端可能共母线, 也可能不共母线。图中虚线表示双回线两端母线的连接关系。这里以两端共母线为例进行分析, 忽略两回线的电阻, 每回线

收稿日期: 2016-01-05; 修回日期: 2016-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277130)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277130)

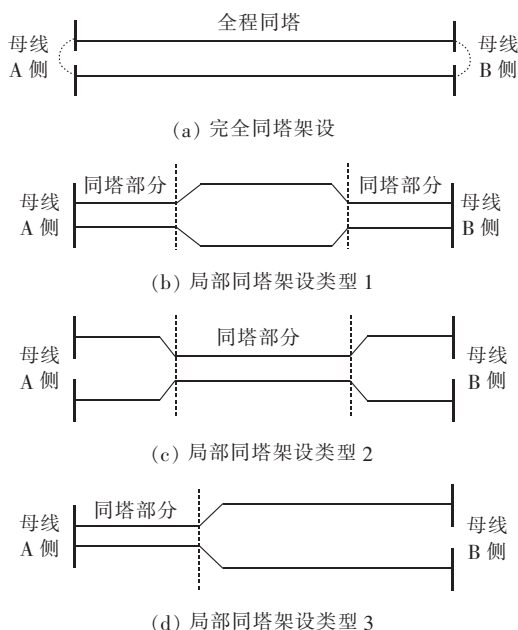


图 1 完全同塔及局部同塔输电线路的架设方式示意图

Fig.1 Schematic diagram of erection modes for power transmission lines partially and totally on same tower

的零序电压和零序电流的关系可以表示为:

$$\Delta U_{10} = j X_{10} I_{10} + j X_{m0} I_{10} \quad (1)$$

$$\Delta U_{10} = j X_{10} I_{10} + j X_{m0} I_{10} \quad (2)$$

其中, ΔU_{10} 、 ΔU_{10} 分别为 I、II 回线的零序电压; X_{10} 、 X_{10} 分别为 I、II 回线的零序阻抗; X_{m0} 为两回线间的零序互感阻抗; I_{10} 、 I_{10} 分别为流过 I、II 回线的零序电流。

将式(1)、(2)变形可得零序电压和双回线零序电流的关系如式(3)、(4)所示:

$$\Delta U_{10} = j(X_{10} - X_{m0})I_{10} + jX_{m0}(I_{10} + I_{10}) \quad (3)$$

$$\Delta U_{10} = j(X_{10} - X_{m0})I_{10} + jX_{m0}(I_{10} + I_{10}) \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得同塔双回线零序等效电路如图 2 所示。对于完全同塔输电线路在其他运行方式下的零序等效网络本文将不再讨论。

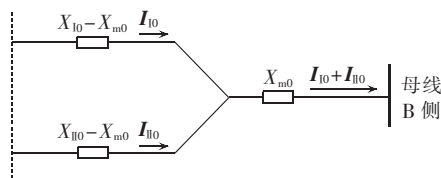


图 2 完全同塔输电线路的零序等效电路

Fig.2 Zero-sequence equivalent circuit of power transmission lines totally on same tower

局部同塔是同塔输电线路中的一种特殊架设方式。局部同塔可以理解为双回输电线路在一部分线路同塔,在另外一部分线路不同塔。局部同塔输电线路大致可以分为以下 3 种类型。

类型 1:局部同塔线路两端共母线,线路的两端同塔架设,线路的中间不同塔架设,如图 1(b)所示。

类型 2:局部同塔线路两端不共母线,中间有一部分线路同塔架设,如图 1(c)所示。

类型 3:局部同塔线路一端共母线,两回线同塔一段距离之后分开,另一端不共母线,局部同塔架设方式如图 1(d)所示。

事实上,图 1(b)所示的局部同塔架设类型 1 完全可由图 1(d)所示的类型 3 组合构成。当故障发生在图 1(b)所示线路的同塔部分或不同塔部分时,均可以将没有发生故障的局部同塔线路用图 2 所示的集中参数等效电路进行等效。因此,局部同塔的类型 1 和类型 3 具有类似的故障分析方法,只需分析其中一种类型即可。

对于图 1(c)所示的同塔类型 2,由于双回线路两端不共母线,其故障分析比较简单。当故障发生在同塔部分时,零序电流从故障点流向两端母线,在非故障线路上产生的零序互感电压极性相反,因此非故障线路上的零序电流大小和方向取决于故障点位置和互感大小等,该故障特征类似于图 1(a)所示的完全同塔线路。当故障发生在不同塔部分的某一回线上时,流经本回线的零序电流将在非故障线路上产生一致方向的纵向零序互感电压。在该零序电压作用下,非故障线路流过的零序电流将比故障发生在同塔线路段内更为严重,应对接地保护的整定计算值予以考虑。

通过以上分析可知,局部同塔类型 3 是最具典型代表性的局部同塔双回线架设方式,本文以图 1(d)所示的局部同塔类型 3 为例对其零序电流保护进行深入分析。

2 局部同塔、完全不同塔及完全同塔输电线路的接地故障特征

本文针对完全不同塔、局部同塔和完全同塔输电线路发生单相接地故障时的零序电流特征进行分析研究,局部同塔输电线路示意图如图 3 所示。

图 3 中,线路 SD 为局部同塔线路的同塔部分,线路 DN、DP 为局部同塔线路的不同塔部分;系统电压等级为 1000 kV,系统正序、零序阻抗分别为 $0.001 + j49.34 \Omega$ 、 $0.001 + j46.03 \Omega$,同塔输电线路采用鼓型架设方式,塔高 54 m,两回线间距 30 m;单回输电线路采用三角型架设方式,塔高 30 m,相邻两相的水平距离为 10 m,单位长度的线路零序自阻抗 $z_{10} = z_{10} = 1.889 \times 10^{-4} + j6.832 \times 10^{-4} \Omega$,单位长度的零序互感阻抗为 $z_{m0} = 1.757 \times 10^{-4} + j3.652 \times 10^{-4} \Omega$,输电线路采用八分裂导线 8×LGJ-630/45,分裂间距为 0.4 m;地线型号为 LBGJ-240-20AC。

对于完全不同塔、局部同塔和完全同塔输电线路

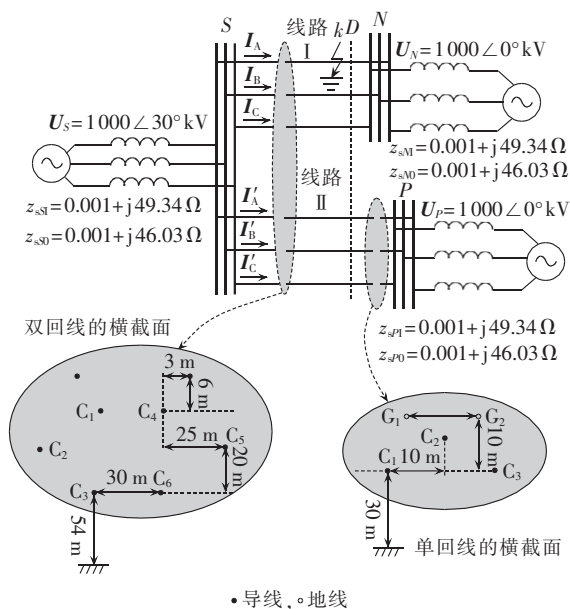


图 3 局部同塔输电线路示意图

Fig.3 Schematic diagram of power transmission lines partially on same tower

路,当双回线中的一条线路发生单相接地故障时,其零序电流的分布和计算都是不同的。为了突出局部同塔输电线路对零序电流保护的影响,下面将局部同塔线路和完全不同塔线路、完全同塔线路进行对比分析。

2.1 完全不同塔输电线路发生接地故障时的零序电流分布

对于完全不同塔的双回输电线路而言,可以认为线路 I 与线路 II 之间没有互感。当 I 回线的区内 k 点发生单相接地故障时,整个系统的零序电流的分布如图 4 所示。图中, QF₁—QF₄ 为断路器; Z_{S0} 为母线 S 侧系统零序阻抗, Z_{P0}、Z_{N0} 分别为母线 P 侧和 N 侧的零序负荷阻抗; Z_{I0}、Z_{II0} 分别为线路 I、II 的零序自阻抗, Z_{m0} 为两回线之间的零序互感阻抗; α 为故障点到母线 S 的距离 l'_{sk} 占故障线路总长 l_{SN} 的百分比; I_{I0}、I_{II0}、I_{S0} 分别为不同塔双回线系统中母线 S 流向线路 I、线路 II 和系统侧的零序电流; U_{k0} 为故障点 k 的零序电压。

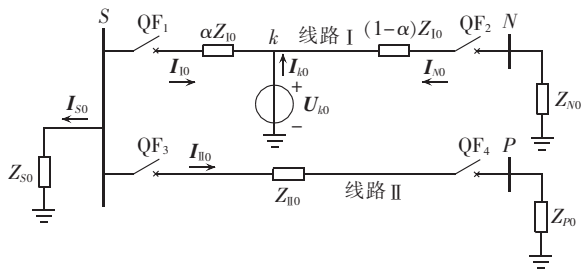


图 4 完全不同塔输电线路发生 I 回线接地故障时的零序网络

Fig.4 Zero-sequence network of power transmission lines on different towers when Line I has a grounding fault

令 $Z'_{II0} = Z_{II0} + Z_{P0}$, 根据基尔霍夫电流定律和 S 处的零序电压得:

$$I_{S0} = -(I_{I0} + I_{II0}) = \frac{I_{II0} Z'_{II0}}{Z_{S0}} \quad (5)$$

化简式(5)得:

$$F_1 = \frac{I_{II0}}{I_{I0}} = -\frac{Z_{S0}}{Z_{S0} + Z'_{II0}} \quad (6)$$

列出故障点 k 的零序电压方程为:

$$U_{k0} = I_{II0} Z'_{II0} - I_{I0} \alpha Z_{I0} \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)中得:

$$U_{k0} = -I_{I0} \frac{Z_{S0} Z'_{II0} + \alpha Z_{I0} Z_{S0} + \alpha Z_{I0} Z'_{II0}}{Z_{S0} + Z'_{II0}} \quad (8)$$

由式(6)可知,完全不同塔输电线路的零序电流之比 F_1 的模值 F_1 小于 1, 即 $|I_{II0}| < |I_{I0}|$ 。 F_1 取决于 Z_{S0} 与 Z'_{II0} , 当架设参数确定后 F_1 为定值, 所以当故障发生在线路 SN (见图 4) 内的任何位置时, 非故障回线零序电流与故障回线零序电流的模值的比值是一定的且比值小于 1, 这也就意味着完全不同塔输电线路的一回线发生故障时非故障线路零序电流始终小于故障线路零序电流。

2.2 完全同塔输电线路发生接地故障时的零序电流分布

完全同塔线路的 I 回线 k' 点发生单相接地故障时, 整个系统的零序电流分布如图 5 所示。与完全不同塔输电线路不同的是, 完全同塔输电线路中 I 回线的 k' 点发生单相接地故障, 故障点两侧会产生同方向的零序电流, 因为零序互感的存在, 故障点两侧的零序电流会在线路 II 上产生如图 5 中所示的互感零序电压 U_0 、 U'_0 (虚线表示)。

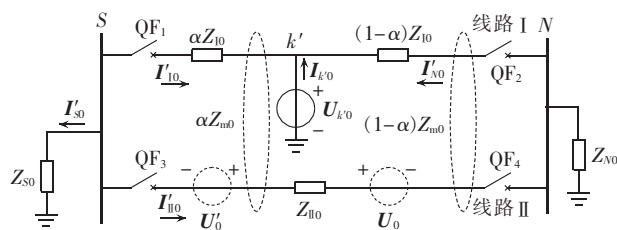


图 5 完全同塔输电线路发生 I 回线接地故障时的零序网络

Fig.5 Zero-sequence network of power transmission lines totally on same tower when Line I has a grounding fault

图中, I_{I0} 、 I_{II0} 、 I_{S0} 分别为完全同塔输电系统中由母线 S 流向线路 I、线路 II 和系统侧的零序电流; I_{N0} 为母线 N 流向线路 I 的零序电流; k' 点为故障点, 其他参数的定义与图 4 相同。

已有文献指出, 完全同塔输电线路 I 回线的 k' 点发生单相接地故障的情况下, 当故障点 k' 从母线 S 向母线 N 移动时, 非故障线路的零序电流 I_{II0} 与故障点电流 $I_{k'0}$ 的模值比值会单调增加, 而故障线路

零序电流 I_{I0} 与故障点电流 $I_{k'0}$ 的模值比值将单调减小^[11]。事实上,对于完全同塔输电线路一回线故障,故障点两侧零序电流 I_{I0} 、 I_{N0} 会在相邻线路感应出方向相反的零序电压 U_0 、 U'_0 ,零序电压的大小与故障回线流过的零序电流和两回线之间的零序互感阻抗有关。 k' 点发生单相接地故障时,其两侧的零序电流大小与系统参数和故障位置有关,为简化分析,假定 k' 点两侧系统参数相同,因此当故障点 k' 位于线路 I 中点时,故障点两侧的零序电流相等且两回线之间的零序互感相等,此时 U_0 、 U'_0 可以完全抵消,非故障回线将不受零序互感影响;当故障点 k' 由线路 I 的中点向母线 N 移动时,零序电流 I_{I0} 将会减小但是故障点左侧线路(Sk' 段)与相邻线路之间的零序互感阻抗将会增大,因此零序互感电压 U'_0 可能增大也可能减小,定量分析比较困难,考虑故障最严重情况即线路末端发生故障,此时非故障线路只受到来自一个方向的零序互感影响,其情况与局部同塔输电线路一致。

此外因为零序互感的存在,完全同塔输电线路故障回线零序电流将受到非故障线路零序电流的影响。以图 5 所示模型进行分析,设定 S 端、N 端系统阻抗相等,两回线的零序自阻抗相同,由以上分析可知当故障点 k' 位于线路 I 的中点时,非故障线路零序电流将不受零序互感影响,并且由于系统的对称性,此时非故障线路零序电流为零,所以故障回线将不受非故障线路的影响;当故障点 k' 位于线路 I 末端时,非故障线路只受到来自一个方向的零序互感影响,与完全不同塔情况相比,非故障线路零序电流将变大,所以完全同塔输电线路的故障线路零序电流比完全不同塔输电线路的故障线路零序电流大。为定量分析最严重情况下两回线零序电流变化,有必要深入研究局部同塔线路接地故障时的零序电流分布。

2.3 局部同塔输电线路发生接地故障时的零序电流分布

局部同塔输电线路的 I 回线发生单相接地故障时,整个系统的零序电流分布如图 6 所示。图中, Z'_{m0} 为局部同塔输电线路同塔部分两回线之间的零序互感阻抗(即 SD 段零序互感阻抗); Z''_{m0} 为母线 S 到故障点 $k_i(i=1,2)$ 的零序互感阻抗; I''_{I0} 、 I''_{II0} 、 I''_{S0} 分别为局部同塔输电系统中母线 S 流向线路 I、线路 II 和系统侧的零序电流; $I''_{k'0}$ 、 I''_{N0} 分别为故障点零序电流和由母线 N 流向故障点的零序电流。

当故障发生在局部同塔输电线路的同塔部分,即 k_1 点时,故障点至保护安装处的零序互感 Z''_{m0} 与整个同塔部分的互感 Z'_{m0} 之间的关系可用下式表示:

$$Z''_{m0} = \frac{l_{Sk_1}}{l_{SD}} Z'_{m0} = \frac{l_{SN}}{l_{SD}} \frac{l_{Sk_1}}{l_{SN}} Z'_{m0} = \frac{\alpha}{c} Z'_{m0} \quad (9)$$

其中, l_{Sk_1} 、 l_{SD} 、 l_{SN} 分别为母线 S 到故障点、同塔末端和母线 N 端的长度; α 为故障点到母线 S 的距离占故障线路总长的百分比,即 $\alpha = (l_{Sk_1}/l_{SN}) \times 100\%$; c 为同塔长度占输电线路总长的百分比,即 $c = (l_{SD}/l_{SN}) \times 100\%$ 。

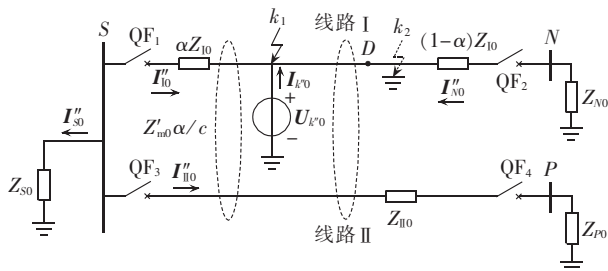


图 6 局部同塔输电线路的同塔部分发生接地故障时的零序网络

Fig.6 Zero-sequence network of power transmission lines partially on same tower when line on shared tower has a grounding fault

由式(9)可知,当故障发生在同塔部分时, Z''_{m0} 随故障距离变化而变化。此时, $l_{Sk_1} < l_{SD}$,即 $|Z''_{m0}| < |Z'_{m0}|$ 。当故障发生在不同塔部分时,故障点到保护安装处的零序互感阻抗就是同塔部分的互感阻抗,即 $Z''_{m0} = Z'_{m0}$ 。因此下面分别讨论故障发生在 k_1 、 k_2 点时故障回线零序电流的变化特征。

(1) 故障发生在局部同塔双回线的同塔部分。

当故障发生在 k_1 点时,故障点两侧的零序电流关系为:

$$I''_{N0} = \frac{\beta_2}{\beta_1} I''_{I0} = \beta I''_{I0} \quad (10)$$

其中, $\beta_1 = I''_{I0}/I''_{k'0}$ 、 $\beta_2 = I''_{N0}/I''_{k'0}$ 为零序电流分支系数。

根据基尔霍夫电流定律和 S 处的零序电压得:

$$I''_{S0} = -(I''_{I0} + I''_{II0}) = \frac{I''_{II0} Z'_{II0} + I''_{I0} \frac{\alpha}{c} Z'_{m0} - \beta I''_{I0} \left(1 - \frac{\alpha}{c}\right) Z'_{m0}}{Z_{S0}} \quad (11)$$

列出故障点 k_1 的零序电压方程:

$$U_{k'0} = I''_{II0} Z'_{II0} + I''_{I0} \frac{\alpha}{c} Z'_{m0} - I''_{II0} \frac{\alpha}{c} Z'_{m0} - I''_{I0} \alpha Z'_{I0} - \beta \left(1 - \frac{\alpha}{c}\right) Z'_{m0} I''_{I0} \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可得:

$$U_{k'0} = -I''_{I0} \times \left[\frac{Z_{S0} Z'_{II0} + \alpha Z'_{I0} Z_{S0} + \alpha Z'_{I0} Z'_{II0} - 2 \frac{\alpha}{c} Z'_{m0} Z_{S0} - \left(\frac{\alpha}{c}\right)^2 (Z'_{m0})^2}{Z_{S0} + Z'_{II0}} + \frac{\beta \left(1 - \frac{\alpha}{c}\right) Z'_{m0} \left(Z_{S0} + \frac{\alpha}{c} Z'_{m0}\right)}{Z_{S0} + Z'_{II0}} \right] \quad (13)$$

则由式(8)和(13)可以得出在完全不同塔和局

部同塔 2 种架设情况下,双回输电线路发生故障时的零序电流关系(即 I''_{10} 与 I_{10} 之间的关系)为:

$$\gamma = \frac{I_{10}}{I''_{10}} = 1 - \left[2 \frac{\alpha}{c} Z'_{m0} Z_{s0} + \left(\frac{\alpha}{c} \right)^2 (Z'_{m0})^2 - \beta \left(1 - \frac{\alpha}{c} \right) Z'_{m0} \left(Z_{s0} + \frac{\alpha}{c} Z'_{m0} \right) \right] \div (Z_{s0} \alpha Z_{10} + Z_{s0} Z'_{10} + \alpha Z_{10} Z'_{10}) = 1 - \varepsilon \quad (14)$$

(2)故障发生在局部同塔双回线的不同塔部分。

当故障发生在 k_2 点时有 $Z'_{m0} = Z''_{m0}$, 式(11)可写成如下形式:

$$I''_{s0} = -(I''_{10} + I''_{10}) = \frac{I''_{10} Z'_{10} + I''_{10} Z'_{10}}{Z_{s0}} \quad (15)$$

利用上述推导过程可得此时双回输电线路在完全不同塔和局部同塔 2 种架设情况下,发生故障时的零序电流关系为:

$$\gamma = \frac{I_{10}}{I''_{10}} = 1 - \frac{Z_{s0} Z'_{m0} + Z_{s0} Z'_{m0} + Z'_{m0} Z'_{m0}}{Z_{s0} \alpha Z_{10} + Z_{s0} Z'_{10} + \alpha Z_{10} Z'_{10}} = 1 - \varepsilon \quad (16)$$

由式(14)、(16)可得局部同塔双回输电线路在同塔部分和非同塔部分发生故障时,其故障回线的零序电流 I''_{10} 与完全不同塔情况下故障回线零序电流 I_{10} 的关系式不同。

显然,局部同塔与完全不同塔输电线路的零序电流之间的关系与 Z'_{m0} 、 Z'_{10} 、 Z_{s0} 有关。假定 Z'_{m0} 、 Z'_{10} 、 Z_{s0} 阻抗角近似相等。事实上,各个阻抗之间满足以下关系:

$$Z''_{m0} = \frac{\alpha}{c} Z'_{m0} < Z_{10}, \quad Z''_{m0} = \frac{\alpha}{c} Z'_{m0} < Z'_{10} \quad (17)$$

将式(17)代入式(14)、(16)得 $|\varepsilon| < 1$, 则可知 $0 < |\gamma| < 1$, 这表明局部同塔输电线路发生单相接地故障时故障线路产生的零序电流要比完全不同塔输电线路故障时故障线路零序电流大,这就有可能导致当线路发生区外故障时保护误动。

2.4 零序电流保护误动影响因素分析及改进方案

由式(14)可得,当故障发生在 k_1 点且参数 Z'_{m0} 、 Z'_{10} 、 Z_{s0} 为定值时,局部同塔输电线路与完全不同塔输电线路故障回线零序电流的比值随着 α 的增大呈近似线性增加。这就意味着当完全不同塔输电线路和局部同塔输电线路 k_1 点发生相同类型的故障时,故障位置越靠近同塔末端(即 α/c 越接近于 1),完全不同塔输电线路故障回路的零序电流与局部同塔输电线路故障回路的零序电流差别越大,当故障发生在局部同塔输电线路同塔末端时差别达到最大。

当故障发生在 k_2 点时,由式(16)可知 $|\varepsilon|$ 是 α 的单调递减函数,于是 $|\gamma|$ 是 α 的单调递增函数。这就意味着当完全不同塔输电线路和局部同塔输电线路 k_2 点发生相同类型的故障时,故障位置距离同塔末端越远(即 α 越大),完全不同塔输电线路故障回路的零序电流与局部同塔输电线路故障回路的零序

电流差别越小(即 $|\gamma|$ 越大),则故障发生在局部同塔输电线路同塔末端时两零序电流差别最大。

综上所述,当局部同塔输电线路发生单相接地故障时,故障位置处于局部同塔输电线路同塔末端会造成完全不同塔输电线路故障回路的零序电流与局部同塔输电线路故障回路的零序电流差别最大(即 $|\gamma|$ 最小),这就意味着零序电流保护测量偏差将会达到最大值,最容易引起零序电流保护的误动,因此保护整定值需要依据此时的偏差值进行修正。

以上讨论了故障位置对局部同塔输电线路故障回线零序电流保护的影响,下面分析改变局部同塔输电线路同塔长度对零序电流保护的影响。

当故障发生在局部同塔输电线路同塔末端时, Z'_{m0} 、 αZ_{10} 的值将随着同塔长度的增长线性增加,将式(16)中 ε 的分子、分母同时除以 Z'_{m0} , 可以看出 $|\gamma|$ 将随着同塔长度的增加而减小。这就意味着当局部同塔输电线路的同塔部分长度增加时,完全不同塔输电线路故障回路的零序电流与局部同塔输电线路故障回路的零序电流差别会变大。当同塔部分的长度等于双回线路全长时,两零序电流的差别达到最大,零序电流保护测量偏差将会达到最大值,因此零序电流保护的整定值需要根据局部同塔输电线路同塔部分的长度进行修正。

另外从式(14)和(16)可知,当输电线路发生区内故障时,其架设参数也会影响局部同塔和完全不同塔输电线路故障回线的零序电流的比值。例如通过减小局部同塔双回线之间的架设距离来增大 Z'_{m0} , 或者缩短局部同塔输电线路非故障线路长度使 Z'_{10} 变小,都将使完全不同塔输电线路故障回路的零序电流与局部同塔输电线路故障回路的零序电流差别变大,导致零序电流保护更容易误动。

通过以上分析可知,对于局部同塔输电线路,当接地故障发生在同塔末端时零序互感会对保护产生最严重的影响。因此局部同塔输电线路零序电流保护的整定计算可以采用考虑零序互感之后的零序电流测量量作为整定值,将同塔末端故障时的信息量作为边界条件,即:

$$\begin{cases} I''_{10} = I_{10} / \gamma' \\ \gamma' = 1 - \frac{Z_{s0} Z'_{m0} + Z_{s0} Z'_{m0} + Z'_{m0} Z'_{m0}}{Z_{s0} c Z_{10} + Z_{s0} Z'_{10} + c Z_{10} Z'_{10}} \end{cases} \quad (18)$$

其中, γ' 为同塔末端故障,即 $\alpha=c$ 时, γ 的取值。

高压输电线路一般采用零序电流 I 段和 II 段保护作为主保护,零序过电流保护作为后备保护。根据零序电流 I 段(速断)保护整定原则,即躲开下级出口处故障时出现的最大零序电流,引入可靠系数 K_{rel} (一般取为 1.2~1.3)。因此对于局部同塔输电线路零序电流 I 段保护,其最大零序电流可以通过将完全不

同塔输电线路下级出口故障时的最大零序电流(I_{10})除以 γ' 得到(即 I_{10}''),于是局部同塔输电线路零序电流 I 段保护的整定值为:

$$I_{set}^I=K_{rel} |I_{10}| / |\gamma'| \tag{19}$$

因此,对于局部同塔输电线路,当其 I 回线发生单相接地故障时,零序互感的存在将使局部同塔双回输电线的两回线的零序电流增加,这就可能导致线路零序电流保护的误动作。为了减小误动作的可能性,提出对于局部同塔输电线路的零序电流保护的整定应该采用考虑零序互感之后的零序电流测量量作为整定值,新整定值如式(19)所示。另外对于超高压双回输电线路,当线路同塔部分的双回线之间的零序互感阻抗约为每回线零序自阻抗的 70% 时,此时零序互感影响更为严重,下面结合工程实践中的参数对局部同塔输电线路在不同情况下的故障特征进行仿真。

3 仿真验证

3.1 局部同塔线路故障位置对故障线路零序电流影响的仿真

定量分析完全不同塔输电线路与局部同塔输电线路发生接地故障时零序电流的变化。

定义零序电流偏差为:

$$|\Delta I_{10}| = \left| \frac{I_{10} - I_{10}''}{I_{10}''} \right| \times 100\% \tag{20}$$

利用 PSCAD 搭建仿真模型。局部同塔输电线路模型参数如图 3 所示,完全不同塔输电线路模型参数采用图 3 中非同塔部分线路的参数。图 3 中 k 点发生 A 相接地故障,同塔部分的双回输电线路各回线理想换位,非同塔部分的输电线路理想换位,线路 SN、SP 长度均为 100 km,SD 长度为 60 km。

对于发生在局部同塔输电线路同塔部分的故障,当故障位置距离母线 S 端分别为 20 km、40 km、60 km 时,完全不同塔与局部同塔输电线路故障回线零序电流的变化仿真结果如表 1 所示。

表 1 同塔部分的不同位置发生故障时,局部同塔输电线路的零序电流误差

Table 1 Difference of zero-sequence current of power transmission lines between partially and none on same tower for different fault locations of line on shared tower

故障位置	I_{10}''/A	I_{10}/A	$ \Delta I_{10} /\%$
距离 S 端 20 km	$4.99\angle-166.43^\circ$	$4.05\angle-164.18^\circ$	19.1
距离 S 端 40 km	$4.26\angle-166.41^\circ$	$3.04\angle-163.87^\circ$	28.9
距离 S 端 60 km	$3.72\angle-166.60^\circ$	$2.36\angle-163.92^\circ$	36.8

从表 1 可以看出,当故障位置靠近同塔线路末端时,局部同塔与完全不同塔输电线路故障回线零序电流偏差逐渐变大。

对于发生在局部同塔输电线路非同塔部分的故障,当故障位置距离母线 S 端分别为 60 km、75 km、85 km 时,完全不同塔与局部同塔输电线路故障回线零序电流的变化仿真结果如表 2 所示。

表 2 不同塔的不同位置发生故障时,局部同塔输电线路的零序电流误差

Table 2 Difference of zero-sequence current of power transmission lines between partially and none on same tower for different fault locations of line on separate tower

故障位置	I_{10}''/A	I_{10}/A	$ \Delta I_{10} /\%$
距离 S 端 60 km	$3.72\angle-166.89^\circ$	$2.36\angle-163.92^\circ$	36.8
距离 S 端 75 km	$2.92\angle-166.22^\circ$	$1.98\angle-163.96^\circ$	32.8
距离 S 端 85 km	$2.51\angle-166.72^\circ$	$1.74\angle-163.72^\circ$	30.8

从表 2 可以看出,当故障位置远离同塔末端时,局部同塔与完全不同塔输电线路故障回线零序电流偏差逐渐变小。

3.2 局部同塔线路同塔长度对故障线路零序电流影响的仿真

当故障发生在局部同塔输电线路的同塔末端时,设定同塔部分的线路长度以 10 km 为梯度从 20 km 变化到 80 km,仿真模型如图 3 所示,观察完全不同塔与局部同塔输电线路故障回线零序电流差别大小的变化(即式(16)中 γ 的模值变化)。

图 7 为由式(16)计算得到的 $|\gamma|$ 与仿真得到的 $|\gamma|$ 随同塔长度变化的曲线。从图中可以看出计算得到的 $|\gamma|$ 与仿真结果差别不大。此外,当局部同塔输电线路的同塔线路长度增长时, $|\gamma|$ 逐渐变小,完全不同塔输电线路故障回路的零序电流与局部同塔输电线路故障回路的零序电流差别会变大。并且 $|\gamma|$ 基本呈线性变化,这就意味着完全不同塔与局部同塔输电线路故障回线零序电流的模值比值与同塔长度成正比。

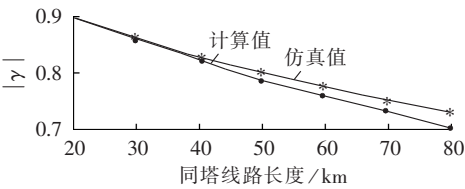


图 7 同塔线路长度不同时,局部同塔输电线路的 γ 的模值

Fig.7 Curve of $|\gamma|$ vs. length of line on shared tower for power transmission lines partially on same tower

3.3 新整定值的可靠性仿真与理论验证

为了验证新整定值的可靠性,设定零序电流 I 段保护的保护区为线路全长的 80%。未改进前的整定值与新整定值分别通过完全不同塔输电线路和局部同塔输电线路末端故障时测量的最大零序电流与可靠系数的乘积得到。仿真时设定局部同塔输电

线路的同塔部分长 50 km,局部同塔与完全不同塔输电线路总长均为 100 km。对完全不同塔和局部同塔输电线路在距离母线 S 不同位置处,发生单相接地故障时的故障回线零序电流变化进行仿真,结果见图 8。

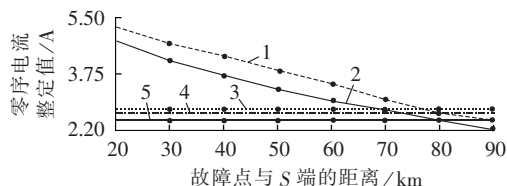


图 8 零序电流速断保护的整定

Fig.8 Setting of zero-sequence instantaneous overcurrent protection

图 8 中,曲线 1、2 分别为不同故障位置下,局部同塔与完全不同塔输电线路的故障回线零序电流;曲线 3、4 分别为新整定值的理论计算值和仿真值;曲线 5 为未改进之前的整定值。从图 8 可以看出,如果局部同塔输电线路采用未改进前的整定值,线路末端(保护范围之外)发生故障时,保护安装处测量的电流将超过整定值而引起保护误动,而采用新的整定值后保护能够可靠不误动,从而验证了新整定值的可靠性,此外通过比较曲线 3、4 还可以得出理论计算的整定值与仿真结果偏差较小。

根据对式(14)、(16)的分析可知,当局部同塔输电线路同塔部分发生故障时,随着故障点靠近同塔末端, $|\gamma|$ 将近似线性变小;当故障点位于非同塔部分时,随着故障点远离同塔末端, $|\gamma|$ 将近似线性变大。利用图 8 中的仿真数据得 $|\gamma|$ 的图形见图 9。

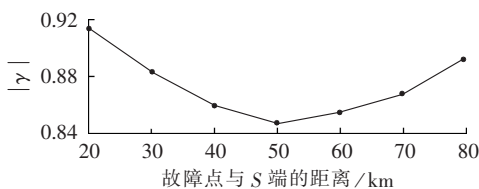


图 9 故障支路 γ 的模值

Fig.9 Curve of $|\gamma|$ vs. fault location for faulty line

由图 9 可以看出,局部同塔输电线路同塔与非同塔部分故障时, $|\gamma|$ 的变化规律与式(14)、(16)的理论分析一致。

工程实践中局部同塔输电线路广泛存在,以上研究及仿真验证表明局部同塔情况下发生接地故障时的零序电流幅值会明显大于不同塔双回输电线路和两端共母线的同塔输电线路。为了避免局部同塔线路零序电流保护的误动,必须对其零序电流保护按照式(19)进行定值折算和校验。

4 结论

本文分析了单相接地故障时局部同塔架设输电

线路的故障特性,并与完全不同塔和完全同塔输电线路的故障特征进行对比。仿真结果表明:局部同塔与完全不同塔输电线路发生同种类型故障时,2 种情况下故障线路零序电流差别的大小与故障位置有关;当故障发生在局部同塔输电线路同塔部分时,故障位置靠近同塔末端,该零序电流差别会变大;当故障发生在非同塔部分时,故障位置远离同塔末端,该零序电流差别会变小。这就意味着该零序电流差别会在同塔末端故障时达到最大值。另外,该零序电流差别会随着局部同塔线路输电线路同塔长度变化而变化;当故障发生在同塔线路末端时,同塔线路长度越长零序电流差别越大。该零序电流差别跟局部同塔输电线路架设参数也有关系:减小局部同塔输电线路同塔双回线之间的间距或者缩短双回线非故障线路长度都会使零序电流差别变大。

参考文献:

- [1] 龚有军,朱普轩,曾嵘. 750 kV 同塔同窗同相序紧凑型输电技术的可行性研究[J]. 电网技术,2008,32(13):50-54.
GONG Youjun,ZHU Puxuan,ZENG Rong. Feasibility study of two compact 750 kV circuits with same phase sequence in the same tower window [J]. Power System Technology,2008,32(13): 50-54.
- [2] DAHAB A A,AMOURA F K,ABU-ELHAIJA W S. Comparison of magnetic-field distribution of noncompact and compact parallel transmission line configurations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,2(3):2114-2118.
- [3] 李斌,李学斌,丁茂生,等. 同杆双回线环流对方向纵联保护的影响与改进[J]. 电力系统自动化,2011,35(8):103-107.
LI Bin,LI Xuebin,DING Maosheng,et al. Influence of circulating current in same-pole double-circuit transmission lines on directional pilot protection and its improvement [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(8):103-107.
- [4] 张健康,栗小华,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.
- [5] 康小宁,梁振锋. 同杆平行双回线路保护及自动重合闸综述[J]. 继电器,2004,32(23):72-76.
KANG Xiaoning,LIANG Zhenfeng. Survey on the protective relaying and autoreclosure for double-circuit lines on the same pole [J]. Relay,2004,32(23):72-76.
- [6] EIISA M M,MALIK O P. A new digital directional transverse differential current protection technique [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1996,11(3):1285-1291.
- [7] 张颖,邵能灵. 同塔四回线接地距离保护的分析[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(12):1-6.
ZHANG Ying,TAI Nengling. Analysis of ground distance protection for quadruple-circuit transmission lines on the same tower [J]. Power System Protection and Control,2010,38(12):1-6.
- [8] 张琦兵,邵能灵. 同塔四回输电线路的模量电流差动保护[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(18):33-43.
ZHANG Qibing,TAI Nengling. Mode-current differential protection

- of quadruple-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18):33-43.
- [9] 康小宁,梁振锋,索南加乐. 相邻线路零序互感对平行双回线电流平衡保护的影响及改进措施[J]. 继电器, 2005, 33(20):1-4.
- KANG Xiaoning, LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale. Influence of zero-sequence mutual inductance to transverse differential current protection and approaches to the improved measures[J]. Relay, 2005, 33(20):1-4.
- [10] 郭润生,何彩红,邳建杰. 相邻线路零序互感对线路零序纵联方向保护的影响[J]. 继电器, 2004, 32(9):71-73.
- GUO Runsheng, HE Caihong, ZHI Jianjie. Influence of zero-sequence mutual inductance to pilot protection in parallel lines[J]. Relay, 2004, 32(9):71-73.
- [11] 曾耿晖,蔡泽祥,陈桥平,等. 同塔双回线路接地故障零序电流分布特性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(11):213-215.
- ZENG Genghui, CAI Zexiang, CHEN Qiaoping, et al. Analysis on zero sequence current distribution characteristic of grounding faults occurred in double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology, 2011, 35(11):213-215.
- [12] 班连庚,王晓刚,白宏坤,等. 同塔架设的 220 kV/500 kV 输电线路感应电流与感应电压仿真分析[J]. 电网技术, 2009, 33(6):46-49.
- BAN Liangeng, WANG Xiaogang, BAI Hongkun, et al. Simulative analysis of induced voltages and currents among multi circuit

- 200 kV and 500 kV transmission lines on same tower[J]. Power System Technology, 2009, 33(6):46-49.
- [13] 丁洪发,段献忠. 不换位输电线路产生的不对称问题及解决方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19):24-28.
- DING Hongfa, DUAN Xianzhong. Unbalance issue caused by untransposed transmission lines and its solution[J]. Power System Technology, 2004, 28(19):24-28.
- [14] 陈锦根,徐青山,唐国庆,等. 计及线路不平衡时线模解耦不完全误差的行波单端测距新方法[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(9):54-57.
- CHEN Jinggen, XU Qingshan, TANG Guoqing, et al. Single-end fault locating considering errors due to incomplete decoupling of unsymmetrical lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(9):54-57.

作者简介:



李 斌

李 斌(1976—),男,天津人,教授,博士,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: libin-tju@126.com);

戴冬康(1992—),男,河北邢台人,硕士研究生,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: daidongkang@126.com)。

Influencing factors of zero-sequence current protection and countermeasures for power transmission lines partially on same tower

LI Bin¹, DAI Dongkang¹, LIAO Huiqin¹, JIANG Xianguo², DU Dingxiang², LI Zhongqing², HE Jiali¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The erection modes of power transmission lines partially on same tower are briefly introduced and the fault characteristics are compared among power transmission lines totally, partially and none on same tower, based on which, the influences of fault location and erection parameters on the zero-sequence current protection for the power transmission lines partially on same tower are researched and the improving measures are proposed. The simulative results show the correctness and effectiveness of theoretical analysis and the proposed countermeasures.

Key words: AC power transmission; power transmission lines; partially on same tower; zero-sequence current protection; relay protection

(上接第 81 页 continued from page 81)

Probabilistic power flow algorithm considering source-side and load-side responses

ZHOU Jing, WANG Ke, SHI Fei, FENG Shuhai

(China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to effectively consider the impact of source-side and load-side responses on the power flow distribution, according to the random injection probability model and the response probability model, the probabilistic power flow model based on the cumulant method is improved in two aspects: the allocation of unbalanced power reference between schedulable conventional unit and flexible load, the calculation of random response. Since the traditional model applies a single balance machine to bear the unbalanced power of whole system, the power flow calculated by it has larger error. The improved model avoids this defect to better reflect the actual power flow distribution. An algorithm is presented to solve the model. Simulation and analysis for an actual power grid verify the validity and practicability of the improved algorithm.

Key words: source-side and load-side responses; probabilistic power flow; cumulant; random injection; response variable; balance machine