

单电源多级串供型输电线路距离保护 误动原因分析及改进

王宏宇¹,李永丽¹,张云柯¹,王伟康¹,曾治安²,曹磊³

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072;2. 国网重庆市电力公司,重庆 400011;

3. 国网河北省电力有限公司,河北 石家庄 050021)

摘要:结合一起单电源多级串供型输电线路距离保护误动的事例,详细探讨了保护误动的原因,分析指出:输电线路在保护安装处近区发生区外单相接地故障时,由于分布电容的影响,判断故障方向的负序方向元件将落入正向区内,引起保护误动。为解决上述问题,在传统负序方向元件判据的基础上提出了一种基于正序电流和负序电流之间相位关系的故障方向判据,并给出了正方向的动作区间。经PSCAD/EMTDC仿真,验证了该方向判据不受过渡电阻的影响,解决了保护安装处近区发生区外故障时距离保护误动的问题。

关键词:单电源;距离保护;继电保护;多级串供;分布电容;负序方向元件

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202011023

0 引言

距离保护因其具有受系统运行方式影响小、保护范围明确等优点,在110 kV及以上电压等级的输电线路保护中占据着极为重要的地位^[1-4]。多边形特性距离保护以其耐过渡电阻能力强、具有躲负荷和方向判别功能而作为多级串供型输电线路的主保护。为消除保护动作死区,常在多边形动作特性基础上叠加一个包括坐标原点的小矩形特性区,同时投入负序方向元件以判断故障方向^[5]。

我国西部有些地区由于电网建设滞后,用电分散,且沿线无可靠电源,不得不采用多级串供型长距离输电线路,且输电线路常处于轻载运行的状态^[6]。文献[7]指出,在单电源多级串供型长距离输电线路中,当保护安装处近区发生区外单相接地故障时,测量阻抗落入小矩形动作区,负序方向元件由于分布电容的影响判定为正方向故障,导致保护误动作,但该文献对误动原因并未进行具体分析,也未给出具体的改进方法。

用于单电源输电线路的多边形特性距离保护为实现保护出口发生故障时准确判别故障方向,常采用正序电压和零序电流比相的方向元件,该方向元件在短距离输电线路中适用,但在长距离输电线路中会受到分布电容的影响,不能正确判断故障方向^[8]。在超高压输电线路中,分布电容的存在可能

会使保护误动^[9-11],为了消除分布电容对保护的影响,常采用电容电流补偿的方法:文献[12-13]提出了一种计算电容电流相量的补偿算法,该算法有效降低了保护动作电流,防止区外短路故障下保护误动;文献[14]从行波的角度分析了分布电容电流形成的机理,在此基础上提出了基于电流行波的分布电容电流时域补偿算法;文献[15]从线路两侧负序电流相位的角度研究了特高压分布电容对负序方向保护的影响,提出了一种基于精准贝瑞隆模型的电容电流补偿算法,解决了特高压长线路发生外部故障时保护误动的问题。但上述方法均针对双端电源输电线路,且需要线路两端的电气量。

本文对多级串供型长距离输电线路在现场出现保护安装处近区发生区外单相接地故障时保护误动的原因进行了分析,并针对该现场出现的问题,在传统负序方向元件判据的基础上,基于正序电流与负序电流的相位关系特性,提出了一种新的距离保护方向判据,分析了在故障点不同过渡电阻的情况下对方向判据的影响,并采用PSCAD/EMTDC仿真软件对该方向判据进行了仿真验证。

1 多级串供型输电线路距离保护

我国西部如青海省和西藏、新疆等自治区,地域广阔,人烟稀少,自然条件比较恶劣,为保证各族人民的生产和生活用电,不得不采取长距离供电方式。我国电网规划建设始终坚持“经济发展、电力先行”的思路,但青藏地区的用电地区较为分散,同时部分区域发展相对缓慢,电源建设速度慢于电网建设速度,电网投资建设过早或者负荷释放过慢,导致部分110 kV输电线路轻载运行,逐渐形成了“长线路、轻负载、多级串供”的输电模式。

收稿日期:2019-12-22;**修回日期:**2020-09-22

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(适应灵活可控源接入的新型城市电网继电保护关键技术研究及应用)

Project supported by the Science and Technology Project from Headquarters of State Grid Corporation of China (Research on Key Protection Technologies for New-type Urban Distribution Network with Controllable Sources and Loads)

现有电网中多级串供型输电线路常采用单电源向多座变电站供电,两变电站之间的输电线路较长,且各变电站所供负载较轻,如图1所示^[7],图中 S_1 — S_3 为保护。

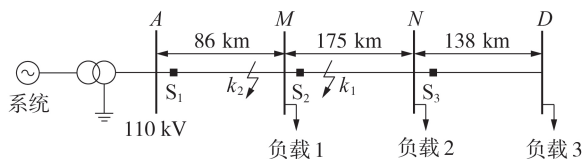


图1 多级串供型输电线路示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-stage series transmission lines

多级串供型输电线路通常采用多边形特性距离保护作为主保护,保护动作特性如图2所示。图中, X_{zd} 为线路阻抗定值折算到X方向的电抗分量; R_{zd} 按躲过本线路可能出现的最大负荷阻抗整定。多边形上边的下倾角如果选择适当,可提高区外经高阻接地的故障的超越能力。

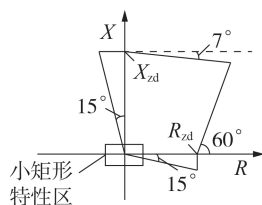


图2 多边形特性距离保护动作特性

Fig.2 Action feature of polygon distance protection

现有的多边形特性距离保护为解决出口动作死区的问题,在原有的多边形动作特性区域叠加了一个包括坐标原点的小矩形特性区。当三相短路故障的测量阻抗落入小矩形特性区内时,采用记忆电压判别方向。当不对称故障的测量阻抗落入小矩形特性区内时,需要采用单独的方向元件来判别方向。负序方向元件由于其灵敏度高,能在所有类型的不对称故障下做出反应,在现场应用最为广泛。

在线路发生不对称故障的情况下,保护测量阻抗落入多边形距离保护特性区内且在小矩形特性区外时,距离保护动作;当保护测量阻抗落入小矩形区内时,采用负序方向元件判别故障方向。负序方向元件若判定为正方向故障,则距离保护动作;若判定为反方向故障,则距离保护不动作。

负序方向元件的正方向故障判据为:

$$0^\circ \leq \arg\left(\frac{3I_2}{3U_2}\right) \leq 180^\circ \quad (1)$$

负序方向元件的反方向故障判据为:

$$-180^\circ \leq \arg\left(\frac{3I_2}{3U_2}\right) < 0^\circ \quad (2)$$

其中, I_2 为保护安装处的负序电流; U_2 为保护安装处

的负序电压。

2 误动原因分析

在实际工程中,对于多级串供型输电线路,当保护安装处近区发生区外单相接地故障时,距离保护可能误动^[6]。为分析上述情况下保护误动的原因,选取图1中线路AM段的点 k_2 (距离变电所M 2 km,模拟保护安装处近区发生区外故障)发生单相接地故障。将线路参数进行T型等效,多级串供型输电线路的负序等效网络图如图3所示。图中,规定线路首末两端电流的正方向为母线流向线路; Z_{C2} 为分布电容C的负序等效阻抗; U_{C2} 为分布电容处负序电压, $U_{C2} = I_{C2} Z_{C2}$; I_{C2} 为流过分布电容的负序电流; I_{M2} 为流过保护 S_2 的负序电流; U_{F2} 为故障点处负序等效电压源; U_{M2} 为保护 S_2 处的负序电压; Z_{M2} 、 Z_{N2} 分别为变电所M系统侧和变电所N负载侧的负序等效阻抗; Z_{L2} 为线路MN的负序等效阻抗。

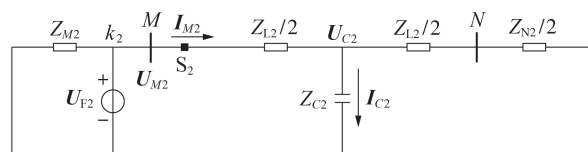


图3 负序等效网络示意图

Fig.3 Schematic diagram of negative-sequence equivalent network

由电路定理可知,此时 I_{M2} 为:

$$I_{M2} = I_{C2} \left(1 + \frac{Z_{C2}}{Z_{L2}/2 + Z_{N2}} \right) \quad (3)$$

为了便于分析,令 $Z_{L2} = R_{L2} + jX_{L2}$ 、 $Z_{C2} = -jX_{C2}$ 、 $Z_{N2} = R_{N2} + jX_{N2}$,可得到流过保护 S_2 的负序电流与流过分布电容的负序电流的比值为:

$$\frac{I_{M2}}{I_{C2}} = \frac{R_{L2} + jX_{L2} + j(X_{L2} + 2X_{N2} - 2X_{C2})}{R_{L2} + 2R_{N2} + j(X_{L2} + 2X_{N2})} \quad (4)$$

令 $R_2 = R_{L2} + 2R_{N2}$ 、 $X_2 = X_{L2} + 2X_{N2}$,式(4)可化简为:

$$\frac{I_{M2}}{I_{C2}} = \frac{R_2^2 + X_2^2 - 2X_2 X_{C2} - j2R_2 X_{C2}}{R_2^2 + X_2^2} \quad (5)$$

根据式(5)可得到 I_{M2} 与 I_{C2} 的相位关系为:

$$\arg\left(\frac{I_{M2}}{I_{C2}}\right) = \arg\left(\frac{R_2^2 + X_2^2 - 2X_2 X_{C2} - j2R_2 X_{C2}}{R_2^2 + X_2^2}\right) \quad (6)$$

假设输电线路中 U_{M2} 和 U_{C2} 的相位相同^[16],分以下2种情况进行讨论。

(1)分布电容容抗 X_{C2} 的大小满足:

$$X_{C2} < (R_2^2 + X_2^2)/(2X_2) \quad (7)$$

此时式(5)的实部大于0, I_{M2} 和 I_{C2} 的相位关系满足 $-90^\circ < \arg(I_{M2}/I_{C2}) < 0^\circ$ 。如图4(a)所示,在这种情况下保护安装处的负序电流的相位超前于负序电压的相位,从保护安装处到多级串供型输电线路

末端的等效阻抗呈容性,此时负序方向元件的判据落入正方向区内从而导致距离保护误动。

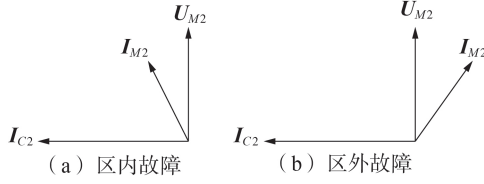


图4 发生区内、区外故障时的负序电压、负序电流相位图

Fig.4 Phase diagram of negative-sequence voltage and current under internal and external faults

(2) 分布电容容抗的大小满足:

$$X_{C2} > (R_2^2 + X_2^2) / (2X_2) \quad (8)$$

此时式(5)的实部小于0, I_{M2} 和 I_{C2} 的相位关系满足 $-180^\circ < \arg(I_{M2}/I_{C2}) < -90^\circ$, 如图4(b)所示, 在这种情况下保护安装处的负序电流的相位滞后于负序电压的相位, 从保护安装处到多级串供型输电线路末端的等效阻抗呈感性, 此时负序方向元件的判据落入反方向区内, 距离保护正常不动作。

若将图3中 Z_{N2} 视为负荷阻抗, 功率因数为0.9。根据实例工程的输电线路参数, 可以估算输电线路的线路长度与负荷大小的关系^[12]。在输电线路的线路长度为100 km条件下, 当负荷 $S < 3.72 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 时, 线路的容抗满足式(7), 保护安装处的负序方向元件在这种情况下会误动; 当负荷 $S > 3.72 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 时, 线路的容抗满足式(8), 保护安装处的负序方向元件在这种情况下不会误动。

通常在正常输电线路长度和所接负载大小合理运行的单电源输电系统中, 线路较短, 线路的分布电容容抗很大, 而负荷阻抗相对较小, 此时线路容抗很容易满足 $X_{C2} > (R_2^2 + X_2^2) / (2X_2)$, 在这种情况下保护安装处近区发生区外单相接地故障时, 负序方向元件会正确判断方向。而多级串供型输电线路的输电线路较长, 分布电容容抗较小, 当其负载很轻时, 负荷等效阻抗远远大于系统阻抗和线路阻抗。故分布电容容抗易满足 $X_{C2} < (R_2^2 + X_2^2) / (2X_2)$, 在保护安装处近区发生区外单相接地故障时, 负序方向元件会判定为正方向故障, 负序方向元件动作, 导致保护误动。

由上述分析可知, 在单电源多级串供型输电线路中, 在保护安装处近区发生区外发生单相接地故障时, 多级串供型输电线路长度较长, 分布电容较大, 同时负载较轻, 导致负序方向元件判定为正方向, 引起保护误动。

3 基于正序电流和负序电流相位关系的方向判据

由上述分析可知, 在多级串供型输电线路中, 在保护 S_2 近区发生区外单相接地故障时, 由于从保护

安装处到多级串供型输电线路末端的等效阻抗呈容性, 所以传统的负序方向元件将不能正确判断方向。而在单电源输电线路中, 无论对于区内故障还是区外故障, 其保护安装处的正序电流均由系统电源提供, 方向为由母线流向线路。保护安装处的负序电流在发生区内故障时, 方向为线路流向母线, 在发生区外故障时, 方向为母线流向线路, 即正序电流和负序电流的方向并不会受从保护安装处到多级串供型输电线路末端等效阻抗性质的影响。

因此, 对于多级串供型输电线路, 在发生单相接地故障时可以利用正序电流与负序电流的相位关系来判断故障的方向。下面通过分析单相接地故障的复合序网图, 给出保护安装处近区发生区内和区外单相接地故障时正序电流与负序电流的具体相位关系。

3.1 保护 S_2 近区区内单相接地故障

当在保护 S_2 近区发生区内单相接地故障时, 其正、负、零序网络分别如附录A图A1—A3所示。由于近区故障的故障点距离保护安装处的长度远小于线路的长度, 故可忽略故障点位置的影响。由单相接地故障的边界条件可得复合序网图如图5所示。图中, Z_1, Z_2, Z_0 分别为故障点右侧的正、负、零序等效阻抗, 具体公式分别见附录A式(A1)—(A3); E_s 为系统电源; R_G 为故障点处的过渡电阻; Z_{M1}, Z_{M0} 分别为变电所 M 系统侧的正、零序阻抗; I_{M1}, I_{M0} 分别为流过保护安装处的正、零序电流; I_{F1}, I_{F2}, I_{F0} 分别为流过故障支路的正、负、零序电流; U_{F1}, U_{F0} 分别为故障点处等效正、零序电压源。

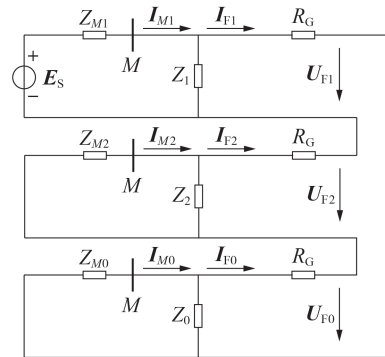


图5 保护 S_2 近区区内单相接地故障复合序网图

Fig.5 Composite sequence network diagram of internal single-phase grounding fault near protection S_2

故可得到流过保护 S_2 处的正序电流和负序电流分别如式(9)和式(10)所示。

$$I_{M1} = I_{F1} \left(1 + \frac{Z_{M2} // Z_2 + Z_{M0} // Z_0 + 3R_G}{Z_1} \right) \quad (9)$$

$$I_{M2} = I_{F2} \frac{Z_2}{Z_{M2} + Z_2} \quad (10)$$

单相接地故障下故障点的正、负序电流满足:

$$I_{F1} = I_{F2} \quad (11)$$

可得保护 S_2 处正序电流和负序电流的比值为:

$$\frac{I_{M1}}{I_{M2}} = \frac{(Z_{M2} // Z_2 + Z_{M0} // Z_0 + 3R_G + Z_1)(Z_{M2} + Z_2)}{Z_1 Z_2} \quad (12)$$

考虑到多级串供型输电线路中轻负载的特点,故障点右侧的等效阻抗远大于系统等效阻抗和线路阻抗,即:

$$\begin{cases} Z_2 \gg Z_{M2} \\ Z_0 \gg Z_{M0} \end{cases} \quad (13)$$

则有:

$$\begin{cases} Z_{M2} // Z_2 + Z_{M0} // Z_0 \approx Z_{M2} + Z_{M0} \\ Z_{M2} + Z_2 \approx Z_2 \end{cases} \quad (14)$$

在分析中假设故障点右侧的正序等效阻抗等于负序等效阻抗,即 $Z_1 = Z_2$,则可得到正序电流与负序电流的相位关系为:

$$\arg\left(\frac{I_{M1}}{I_{M2}}\right) = \arg\left(\frac{Z_{M2} + Z_{M0} + Z_1 + 3R_G}{Z_1}\right) \quad (15)$$

假设故障点右侧的正序等效阻抗 Z_1 的阻抗角为 θ_N , $Z_{M2} + Z_{M0}$ 的阻抗角为 α_N , $Z_{M2} + Z_{M0} + Z_1 + 3R_G$ 的阻抗角为 β_N ,并规定感性阻抗的阻抗角为正值、容性阻抗的阻抗角为负值。则可得:

$$\arg\left(\frac{Z_{M2} + Z_{M0} + Z_1 + 3R_G}{Z_1}\right) = \beta_N - \theta_N \quad (16)$$

当发生金属性接地故障时, $R_G = 0$,此时假设 $\arg(Z_{M2} + Z_{M0} + Z_1) = \beta_{N0}$,则可得:

$$\arg(I_{M1}/I_{M2}) = \beta_{N0} - \theta_N \quad (17)$$

当 $R_G \rightarrow \infty$ 时有:

$$\arg(I_{M1}/I_{M2}) = -\theta_N \quad (18)$$

当过渡电阻 R_G 从0开始增大时,可得如下结论:

(1)若 $\beta_{N0} > 0$,则 β_N 会随着过渡电阻的增大而减小,当 $R_G \rightarrow \infty$ 时, $\beta_N = 0^\circ$,故此时 $\arg(I_{M1}/I_{M2})$ 的取值范围为 $[-\theta_N, \beta_{N0} - \theta_N]$;

(2)若 $\beta_{N0} < 0$ (在轻载长输电线路中 Z_1 可能会呈容性,阻抗角为负值,故可能会出现 $\beta_{N0} < 0$ 的情况),则 β_N 会随着过渡电阻的增大而增大,当 $R_G \rightarrow \infty$ 时, $\beta_N = 0^\circ$,此时 $\arg(I_{M1}/I_{M2})$ 的取值范围为 $[\beta_{N0} - \theta_N, -\theta_N]$;

(3)若 $\beta_{N0} = 0^\circ$,则 β_N 不受过渡电阻的影响, $\arg(I_{M1}/I_{M2})$ 始终为 $\beta_{N0} - \theta_N$ 。

由附录B式(B1)和式(B2)可知, $\beta_{N0} - \theta_N$ 的取值范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$ 。当故障点右侧的正序等效阻抗 Z_1 呈感性和容性时, θ_N 的取值范围分别为 $(0^\circ, 90^\circ]$ 和 $[-90^\circ, 0^\circ)$ 。故可知当保护 S_2 近区发生区内单相接地故障时,保护 S_2 处的正序电流与负序电流的相位

关系始终满足:

$$-90^\circ \leq \arg(I_{M1}/I_{M2}) \leq 90^\circ \quad (19)$$

3.2 保护 S_2 近区区外单相接地故障

保护 S_2 近区发生区外单相接地故障时,其正、负、零序网络分别如附录C图C1—C3所示。由单相接地故障的边界条件可得到复合序网图如图6所示。

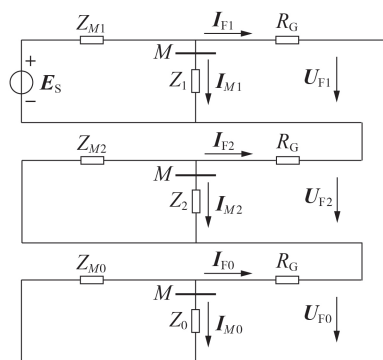


图6 保护 S_2 近区区外单相接地故障复合序网图

Fig.6 Composite sequence network diagram of external single-phase grounding fault near protection S_2

此时流过保护 S_2 处的正序电流和负序电流分别如式(20)和式(21)所示。

$$I_{M1} = I_{F1} (Z_{M2} // Z_2 + Z_{M0} // Z_0 + 3R_G) / Z_1 \quad (20)$$

$$I_{M2} = -I_{F2} Z_{M2} / (Z_{M2} + Z_2) \quad (21)$$

发生单相接地故障时故障点的正、负序电流满足式(11),可得到保护 S_2 处的正序电流和负序电流的比值为:

$$\frac{I_{M1}}{I_{M2}} = -\frac{(Z_{M2} // Z_2 + Z_{M0} // Z_0 + 3R_G)(Z_{M2} + Z_2)}{Z_{M2} Z_1} \quad (22)$$

由式(13)—(15)则可得正序电流与负序电流的相位关系为:

$$\arg\left(\frac{I_{M1}}{I_{M2}}\right) = -180^\circ + \arg\left(\frac{Z_{M2} + Z_{M0} + 3R_G}{Z_{M2}}\right) \quad (23)$$

假设变电所 M 系统侧负序等效阻抗 Z_{M2} 的阻抗角为 θ_M , $\arg(Z_{M2} + Z_{M0} + 3R_G) = \beta_{M0}$ 。故可得:

$$\arg\left(\frac{Z_{M2} + Z_{M0} + 3R_G}{Z_{M2}}\right) = \beta_{M0} - \theta_M \quad (24)$$

当发生金属性接地故障时, $R_G = 0$,此时假设 $\arg(Z_{M2} + Z_{M0}) = \beta_{M0}$,则可得:

$$\arg(I_{M1}/I_{M2}) = -180^\circ + \beta_{M0} - \theta_M \quad (25)$$

当 $R_G \rightarrow \infty$ 时有:

$$\arg(I_{M1}/I_{M2}) = -180^\circ - \theta_M \quad (26)$$

当过渡电阻 R_G 从0开始增大时,由于 $Z_{M2} + Z_{M0}$ 呈感性,故 $\beta_{M0} > 0$, β_M 会随着过渡电阻的增大而减小;当 $R_G \rightarrow \infty$ 时, $\beta_M = 0$ 。故此时 $\arg(I_{M1}/I_{M2})$ 的取值范围为 $[-180^\circ - \theta_M, -180^\circ + \beta_{M0} - \theta_M]$ 。

由于变电所 M 系统侧负序等效阻抗 Z_{M2} 和零序

等效阻抗 Z_{M0} 都呈感性, θ_M 的取值范围为 $(0^\circ, 90^\circ]$, β_{M0} 的取值范围为 $(0^\circ, 90^\circ]$, 故可得 $\beta_{M0} - \theta_M$ 的取值范围为 $(-90^\circ, 90^\circ)$ 。故当保护 S_2 近区发生区外单相接地故障时, 保护 S_2 处的正序电流与负序电流的相位关系满足:

$$-270^\circ < \arg(I_{M1}/I_{M2}) < -90^\circ \quad (27)$$

由上述分析可知, 单电源多级串供型输电线路在保护安装处近区发生区内单相接地故障时, 保护安装处的正序电流与负序电流的相位关系随着故障点过渡电阻的变化始终在区间 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 内, 而在保护安装处近区发生区外单相接地故障时, 保护安装处的正序电流与负序电流的相位关系随着故障点过渡电阻的变化始终在区间 $(-270^\circ, -90^\circ)$ 内。本文根据此特性在原有距离保护发生近区故障时负序方向元件判据的基础上, 提出了一种发生单相接地故障时基于保护安装处的正序电流与负序电流相位关系的方向判据。当多边形特性距离单相接地故障的保护测量阻抗落入小矩形区时, 其正方向判据为:

$$\begin{cases} 0^\circ \leq \arg\left(\frac{3I_{M2}}{3U_{M2}}\right) < 180^\circ \\ -90^\circ \leq \arg\left(\frac{I_{M1}}{I_{M2}}\right) \leq 90^\circ \end{cases} \quad (28)$$

当且仅当同时满足式(28)中2个式子时, 本文所提方向判据判定为正方向故障, 否则判定为反方向故障。

综上所述, 本文所提出的基于保护安装处正序电流与负序电流的相位关系的判据适用于多级串供型输电线路在保护安装处发生近区单相接地故障时的故障方向判定。理论分析表明, 该判据不受从保护安装处到多级串供型输电线路末端的等效阻抗性质(容性或感性)和故障点过渡电阻的影响, 能够有效地判断出区内、区外故障, 保证系统安全稳定运行。

4 仿真实验

采用 PSCAD / EMTDC 仿真软件搭建如图1所示的多级串供型输电系统, 采样频率为 20 kHz, 系统电源电压为 220 kV, 等效电源阻抗为 $Z_s = 9 + j40 \Omega$, 变压器容量为 240 MV·A, 变比为 220 kV / 110 kV。输电线路的正序电阻为 $0.1948 \Omega / \text{km}$, 正序电感为 $1.3497 \text{ mH} / \text{km}$, 正序电容为 $0.00868 \mu\text{F} / \text{km}$, 零序电阻为 $0.4602 \Omega / \text{km}$, 零序电感为 $3.6403 \text{ mH} / \text{km}$, 零序电容为 $0.00616 \mu\text{F} / \text{km}$ 。线路 AM 段长度为 86 km, 线路 MN 段长度为 175 km, 线路 ND 段长度为 138 km。母线 M、N、D 均接入负荷, 大小为 5.6 MV·A, 功率因数为 0.9。

分别设置故障点 k_1 和故障点 k_2 来验证在保护安装处近区区内和区外发生单相接地故障时, 故障点

经不同过渡电阻对保护 S_2 处的传统负序方向元件判据 $\arg(I_{M2}/U_{M2})$ 和本文方向判据 $\arg(I_{M1}/I_{M2})$ 的影响。设置单相接地故障点 k_1 在线路 MN 段距变电所 M 2 km 的位置, 单相接地故障点 k_2 在线路 AM 段距变电所 M 2 km 的位置。

4.1 保护 S_2 近区区内单相接地故障

表1为保护 S_2 近区发生区内单相接地故障经不同过渡电阻时传统负序方向元件判据 $\arg(I_{M2}/U_{M2})$ 和本文方向判据 $\arg(I_{M1}/I_{M2})$ 的仿真结果。

表1 不同过渡电阻的区内故障仿真结果

Table 1 Simulative results of internal fault with different transition resistances

过渡电阻 / Ω	传统判据仿真结果		本文判据仿真结果	
	$\arg\left(\frac{I_{M2}}{U_{M2}}\right) / (^\circ)$	动作情况	$\arg\left(\frac{I_{M1}}{I_{M2}}\right) / (^\circ)$	动作情况
0	109.44	正确动作	13.61	正确动作
10	109.43	正确动作	14.02	正确动作
30	109.43	正确动作	14.80	正确动作
50	109.44	正确动作	15.50	正确动作
80	109.42	正确动作	16.44	正确动作
100	109.44	正确动作	16.99	正确动作
200	109.43	正确动作	19.19	正确动作
300	109.44	正确动作	20.72	正确动作

从表1中可以看出, 传统负序方向元件判据 $\arg(I_{M2}/U_{M2})$ 的值不受过渡电阻的影响, 在保护安装处近区发生区内单相接地故障时, 传统负序方向元件能够正确动作; 本文方向判据 $\arg(I_{M1}/I_{M2})$ 在保护 S_2 近区发生区内单相接地故障时, 其值落入正向区内, 能够正确动作, 且随着过渡电阻增大, 测得的角度也增大, 会趋近于故障点右侧的等效正序阻抗抗角的负值, 与第3节论述的结论相符。

4.2 保护 S_2 近区区外单相接地故障

表2为保护 S_2 近区发生区外接地故障经不同过渡电阻时传统负序方向元件判据 $\arg(I_{M2}/U_{M2})$ 和本

表2 不同过渡电阻的区外故障仿真结果

Table 2 Simulative results of external fault with different transition resistances

过渡电阻 / Ω	传统判据仿真结果		本文判据仿真结果	
	$\arg\left(\frac{I_{M2}}{U_{M2}}\right) / (^\circ)$	动作情况	$\arg\left(\frac{I_{M1}}{I_{M2}}\right) / (^\circ)$	动作情况
0	25.67	误动作	-183.19	正确不动作
10	25.66	误动作	-192.41	正确不动作
30	25.64	误动作	-206.02	正确不动作
50	25.52	误动作	-214.77	正确不动作
80	25.53	误动作	-223.01	正确不动作
100	25.61	误动作	-226.74	正确不动作
200	25.51	误动作	-235.56	正确不动作
300	25.52	误动作	-239.13	正确不动作

文方向判据 $\arg(I_{M1}/I_{M2})$ 的仿真结果。

从表2中可以看出,传统负序方向元件的判据 $\arg(I_{M2}/U_{M2})$ 的值不受过渡电阻的影响,但在保护安装处近区发生区外单相接地故障时,由于故障点右侧的等效阻抗呈容性,负序方向元件判据测得的角度会落入正向区内,导致负序方向元件误动作;本文方向判据 $\arg(I_{M1}/I_{M2})$ 在保护安装处近区发生区外单相接地故障时,不受故障点右侧的等效阻抗性质的影响,会落入反向区内,正确不动作,且随着过渡电阻的增大,本文方向判据测得的角度也将减小,趋近于 $-180^\circ - \theta_M$,与第3节论述的结论相符。

4.3 本文方向判据的适应性分析

由3.1节和3.2节的分析可知,基于正序电流和负序电流相位关系的方向判据是基于单电源多级串供型输电线路处于轻载运行的情况下进行的分析。因此现根据实际工程中输电线路的参数,分别在保护安装处近区发生区内和区外单相接地故障时对本文方向判据进行适应性计算。图7给出了在保护安装处近区区内和区外故障2种情况下,本文方向判据 $\arg(I_{M1}/I_{M2})$ 随过渡电阻和负荷变化的变化趋势。

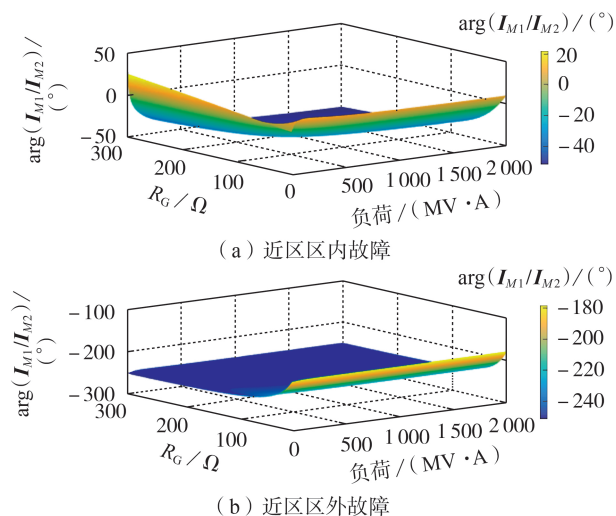


图7 保护安装处近区故障下 $\arg(I_{M1}/I_{M2})$ 的变化趋势

Fig.7 Trend diagram of $\arg(I_{M1}/I_{M2})$ under fault near protection installation location

由图7(a)可知,随着过渡电阻 R_G 在 $0 \sim 300 \Omega$ 范围内变化,负荷在 $0 \sim 2000 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 范围内变化,保护处正序电流与负序电流的相位差 $\arg(I_{M1}/I_{M2})$ 始终在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 范围内,利用本文提出的方向判据能够正确地判断出正方向故障。由图7(b)可知,随着过渡电阻 R_G 在 $0 \sim 300 \Omega$ 范围内变化,负荷在 $0 \sim 2000 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 范围内变化,保护处正序电流与负序电流的相位差 $\arg(I_{M1}/I_{M2})$ 始终在 $(-270^\circ, -90^\circ)$ 范围内,利用本文提出的方向判据能够正确地判断出反方向故障。

5 结论

本文对多级串供型输电线路的距离保护进行了研究,并结合一起多级串供型输电线路在保护安装处近区发生区外故障时保护误动的事例,对多边形特性距离保护中的传统负序方向元件判据进行了分析,指出了误动的原因是多级串供型输电线路在保护安装处近区发生区外故障时,测量阻抗落入小矩形特性区内,此时判别故障方向的负序方向元件由于长距离输电线路的分布电容容抗过小,从保护安装处到多级串供型输电线路末端的等效阻抗呈容性,负序方向元件所测量的角度会落入正向区内,导致距离保护误动作。

在传统负序方向元件判据的基础上,本文研究了基于保护处正序电流与负序电流的相位关系特性,提出了一种适用于多边形特性的距离保护方向判据,该方向判据不受被保护线路等效阻抗性质的影响。经PSCAD/EMTD仿真验证可知,该判据不受过渡电阻的影响,能够有效保证保护不误动以及线路安全稳定运行。我国西部如青海省和西藏、新疆等自治区,在电网发展上存在多级串供型输电线路架构,本文研究的结论及改进方法对上述地区的电网建设过程具有一定的借鉴意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 贺家李,李永丽,董新洲. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社,2010:98-100.
- [2] 樊艳芳,侯俊杰,晁勤,等. 一种抗暂态超越的集群风电送出线时域方程模型误差修正距离保护[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):10-18.
FAN Yanfang, HOU Junjie, CHAO Qin, et al. Time-domain equation model deviation correction distance protection for cluster wind power transmission line with anti-transient ability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1):10-18.
- [3] 朱声石,崔柳,董新洲. 不受电力系统振荡影响的距离保护[J]. 中国电机工程学报,2014,34(7):1175-1182.
ZHU Shengshi, CUI Liu, DONG Xinzhou. Distance protection that insensitive to power swing[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7):1175-1182.
- [4] 华煌圣,刘育权,王莉,等. 基于联锁的110 kV区域电网线路保护原理及其应用[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):169-174.
HUA Huangsheng, LIU Yuquan, WANG Li, et al. Interlock-based line protection principle and its application in 110 kV regional grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1):169-174.
- [5] 孙长文. 110 kV线路自适应距离保护策略的研究与实现[D]. 武汉:武汉大学,2004.
SUN Changwen. Research and realization of adaptive distance protection strategy in 110 kV transmission lines[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [6] 陈晓芳. 阿拉善盟长距离输电线路保护特殊问题分析及对策[D]. 保定:华北电力大学,2012.
CHEN Xiaofang. Alashan protection of long distance transmission line special problem analysis and countermeasure[D].

- Baoding: North China Electric Power University, 2012.
- [7] 薛俊茹,温广,董开岩.一起串供长线路保护误动原因分析[J].青海电力,2010,29(4):55-57.
- XUE Junru, WEN Guang, DONG Kaiyan. Reason analysis of a protection malfunction for collusion long lines[J]. Qinghai Electric Power, 2010, 29(4): 55-57.
- [8] 杨奇逊,黄少锋.微型机继电保护基础[M].3版.北京:中国电力出版社,2007:67-70.
- [9] 宋璇坤,申洪明,黄少锋,等.特高压分布电容对电流差动保护的影响分析及对策[J].电力自动化设备,2018,38(1):169-172,192.
- SONG Xuankun, SHEN Hongming, HUANG Shaofeng, et al. Effect of distributed capacitance on differential current protection and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 169-172, 192.
- [10] 邓翔天,袁荣湘,肖振锋,等.基于瞬时功率理论的输电线路分相电流差动保护[J].电力自动化设备,2014,34(11):82-89,94.
- DENG Xiangtian, YUAN Rongxiang, XIAO Zhenfeng, et al. Split-phase differential current protection based on instantaneous power theory for power transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11): 82-89, 94.
- [11] 刘凯,索南加乐,邓旭阳,等.基于故障分量正序、负序和零序综合阻抗的线路纵联保护新原理[J].电力自动化设备,2010,30(4):21-25.
- LIU Kai, SUONAN Jiale, DENG Xuyang, et al. Principle of pilot line protection based on integrated impedance of fault component[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4): 21-25.
- [12] 丁蕾,房鑫炎.基于电容电流半补偿的高压电力电缆分相电流差动保护研究[J].电网技术,2005,29(4):45-49.
- DING Lei, FANG Xinyan. Research on capacitance current compensation based differential current protection for high voltage power cable[J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 45-49.
- [13] 刘凯.超/特高压线路差动保护电容电流补偿方法[J].电力自动化设备,2011,31(8):94-98.
- LIU Kai. Capacitive current compensation method for differential protection of EHV/UHV lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 94-98.
- [14] 苏斌,董新洲,孙元章.适用于特高压线路的差动保护分布电容电流补偿算法[J].电力系统自动化,2005,29(8):36-40,59.
- SU Bin, DONG Xinzhou, SUN Yuanzhang. Distributed capacitive current compensation algorithm for current differential relay of UHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 36-40, 59.
- [15] 薛士敏,贺家李,李永丽.特高压输电线路分布电容对负序方向纵联保护的影响[J].电网技术,2008,32(17):94-97.
- XUE Shimin, HE Jiali, LI Yongli. Influence of distributed capacitance on negative sequence directional pilot protection for UHV transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(17): 94-97.
- [16] 王莉,曹甦惠,常黎,等.分布电容对输电线路负序方向纵联保护的可靠性影响研究[J].通信电源技术,2015,32(6):216-217.
- WANG Li, CAO Kuihui, CHANG Li, et al. Study on the influence of distributed capacitance on the reliability of the negative sequence directional protection of transmission line[J]. Telecom Power Technology, 2015, 32(6): 216-217.

作者简介:



王宏宇

王宏宇(1995—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:595899221@qq.com);

李永丽(1963—),女,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:lyltju@163.com)。

(编辑 任思思)

Analysis and improvement of mal-operation in distance protection of multi-stage series transmission line with single power source

WANG Hongyu¹, LI Yongli¹, ZHANG Yunke¹, WANG Weikang¹, ZENG Zhian², CAO Lei³

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

2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400011, China;

3. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Based on a case of mal-operation in distance protection of multi-stage series transmission line with single power source, the cause of mal-operation of protection are discussed in detail, which points out: when the external single-phase grounding fault near protection installation location of the transmission line, due to the influence of distributed capacitance, the negative-sequence direction component judging the fault direction will fall into the forward zone, causing the mal-operation of protection. In order to solve the above problems, a fault direction criterion based on the phase relation between positive-sequence current and negative-sequence current is proposed based on the traditional criterion of negative-sequence direction component, and the action interval of positive direction is given. The PSCAD/EMTDC simulation verifies that the proposed direction criterion is not affected by the transition resistance, and solves the problem of mal-operation of the distance protection when the external fault occurs near protection installation location.

Key words: single power source; distance protection; relay protection; multi-stage collusion; distributed capacitance; negative-sequence direction component

附录 A

当在保护 S_2 近区发生区内单相接地故障时，可以得到正、负、零序网络分别如附录图 A1—A3 所示。

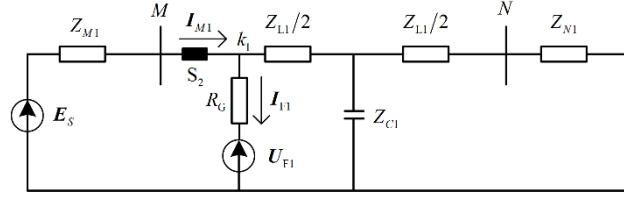


图 A1 近区区内单相接地故障正序网络图

Fig.A1 Positive-sequence network diagram of internal single-phase grounding fault
near protection installation location

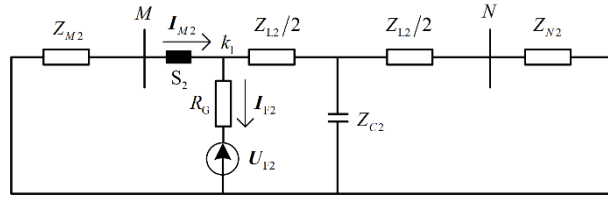


图 A2 近区区内单相接地故障负序网络图

Fig.A2 Negative-sequence network diagram of internal single-phase grounding fault
near protection installation location

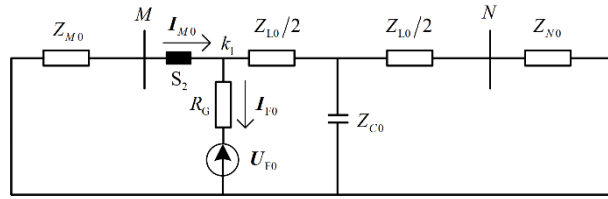


图 A3 近区区内单相接地故障零序网络图

Fig.A3 Zero-sequence network diagram of internal single-phase grounding fault
near protection installation location

可令 Z_1 、 Z_2 、 Z_0 分别代表故障点右侧的正、负、零序等效阻抗，则：

$$Z_1 = \frac{Z_{L1}}{2} + (\frac{Z_{L1}}{2} + Z_{N1}) // Z_{C1} \quad (A1)$$

$$Z_2 = \frac{Z_{L2}}{2} + (\frac{Z_{L2}}{2} + Z_{N2}) // Z_{C2} \quad (A2)$$

$$Z_0 = \frac{Z_{L0}}{2} + (\frac{Z_{L0}}{2} + Z_{N0}) // Z_{C0} \quad (A3)$$

由于单相接地故障的边界条件满足：

$$U_{F1} + U_{F2} + U_{F0} = 0 \quad (A4)$$

故可得到复合序网图如图 5 所示。

附录 B

当在保护 S_2 近区发生区内单相金属性接地故障，且故障点右侧的正序等效阻抗 Z_1 呈容性时， $Z_{M2} + Z_{M0} + Z_1$ 、 $Z_{M2} + Z_{M0}$ 和 Z_1 的相量图如图 B1 所示，其中 $Z_{M2} + Z_{M0}$ 呈感性且相位超前于 Z_1 ，所以此时 $Z_{M2} + Z_{M0} + Z_1$ 的相位也是超前于 Z_1 ，故 $\beta_{N0} - \theta_N > 0^\circ$ 。 $\gamma = \alpha_N - \beta_{N0}$ ，由 3 个相量构成了一个矢量三角形，满足：

$$\frac{\sin \gamma}{|Z_1|} = \frac{\sin(\beta_{N0} - \theta_N)}{|Z_{M2} + Z_{M0}|} \quad (B1)$$

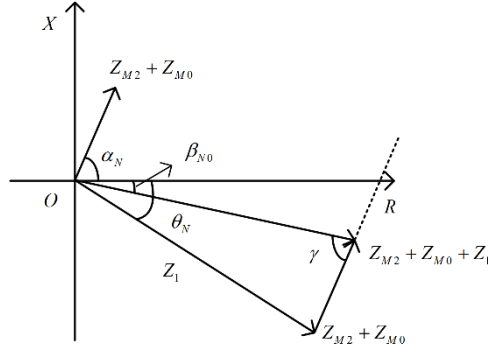


图 B1 相位分析图

Fig.B1 Phase analysis diagram

在多级串供型输电线路轻负载运行状态下， $|Z_1| \gg |Z_{M2} + Z_{M0}|$ ，故可得：

$$\sin(\beta_{N0} - \theta_N) < \sin \gamma \quad (B2)$$

三角形中的角如果满足 $\sin(\beta_{N0} - \theta_N) < \sin \gamma$ ，则必然有 $\beta_{N0} - \theta_N < \gamma$ 。若 $\gamma < 90^\circ$ ，则可得 $\beta_{N0} - \theta_N < 90^\circ$ ；若 $\gamma > 90^\circ$ ，则必然有 $\beta_{N0} - \theta_N < 90^\circ$ 。故可得故障点右侧的正序等效阻抗 Z_1 呈容性时， $\beta_{N0} - \theta_N$ 的取值范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$ 。当故障点右侧的正序等效阻抗 Z_1 呈感性时其分析过程同理， $\beta_{N0} - \theta_N$ 的取值范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$ 。

附录 C

当在保护 S_2 近区发生区外单相接地故障时，可以得到正序、负序、零序网络分别如图 C1—C3 所示。

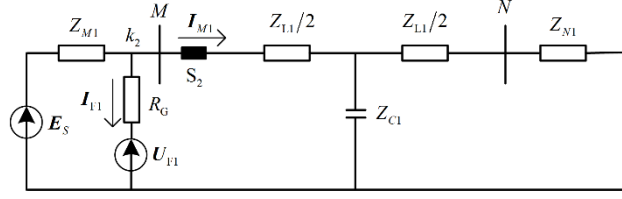


图 C1 近区区外单相接地故障正序网络图

Fig.C1 Positive-sequence network diagram of external single-phase grounding fault near protection installation location

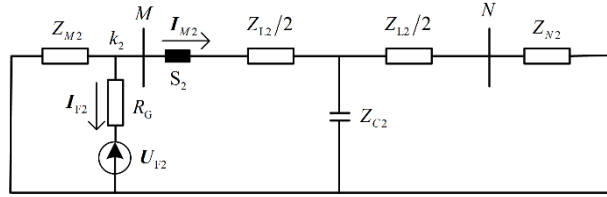


图 C2 近区区外单相接地故障负序网络图

Fig.C2 Negative sequence network diagram of external single-phase grounding fault near protection installation location

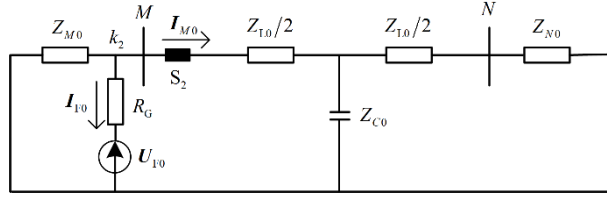


图 C3 近区区外单相接地故障零序网络图

Fig.C3 Zero-sequence network diagram of external single-phase grounding fault near protection installation location

则有：

$$Z_1 = \frac{Z_{L1}}{2} + (\frac{Z_{L1}}{2} + Z_{N1}) // Z_{C1} \quad (C1)$$

$$Z_2 = \frac{Z_{L2}}{2} + (\frac{Z_{L2}}{2} + Z_{N2}) // Z_{C2} \quad (C2)$$

$$Z_0 = \frac{Z_{L0}}{2} + (\frac{Z_{L0}}{2} + Z_{N0}) // Z_{C0} \quad (C3)$$

由于单相接地故障的边界条件满足：

$$U_{F1} + U_{F2} + U_{F0} = 0 \quad (C4)$$

故可得到复合序网图如图 6 所示。