

断线故障对零序过流保护的影响及保护新方法

刘亚东¹, 孙集伟², 杨国生¹, 周泽昕¹, 郭艳凤³, 牛艳利³

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 华北电力调度控制中心, 北京 100053;

3. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

摘要: 在电网运行中发现, 线路断线故障有可能会引起相邻线路零序过流保护的误动, 特别是重负荷下的多回线路, 断线故障后引起的同断面相邻线路零序过流末段保护同时误动会加剧事故扩大。通过理论和仿真分析, 研究了重载线路发生断线故障的故障特性, 及其对零序过流保护的影响, 提出了适应线路断线故障的零序过流保护新方案, 并通过实际保护装置的 RTDS 试验验证其有效性。

关键词: 继电保护; 零序过流保护; 重载; 断线故障; 故障特性

中图分类号: TM 772

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.019

0 引言

输电线路可能发生的故障通常分为横向(短路)和纵向(断路)2类, 鉴于横向故障的发生次数和对系统的危害均远大于纵向故障^[1], 目前线路的零序保护原理及定值一般主要考虑横向故障, 较少考虑发生概率较小的纵向故障^[2-4]。出于简化计算的考虑, 作为线路接地故障后备保护的零序电流最后一段保护基本都按相同动作值、相同时限且不带方向整定。但目前在实际运行中, 可能存在这样的情况: 当某重载运行线路中的一回线发生单相断线故障后, 不仅故障线路中存在较大的零序电流, 在同一系统内的其他线路中也会出现零序电流, 尤其是在与故障线路同塔并架的双回线路中的非故障线路上, 有可能流过较大的零序电流。显而易见, 当非故障线路的零序电流达到或超过零序保护末段定值时, 不仅故障线路会跳闸, 非故障线路也会同时跳闸, 造成双回线路断开, 损失大量功率, 还有可能加剧事故的扩大。

由于电网日趋复杂, 线路传输容量增大, 多回并列线路和重载运行线路增多。系统地分析多回并列线路和重载线路发生断线故障后的故障特性, 研究其对零序过流保护的影响, 提出考虑断线故障的零序过流保护方案, 对提高继电保护的运行可靠性、防止断线事故扩大有积极意义。

1 重载线路断线故障的故障特性

依据经典的故障分析方法, 对线路发生纵向故障的情况进行分析^[1,5-8]。假设 A 相出口 q 、 k 间发生单相断线故障, 此时的断线故障系统如图 1 所示。图中, E_S 、 E_R 分别为 M 、 N 侧系统电势; M 、 N 为故障线路 M 侧、 N 侧母线; I_{qkA} 、 I_{qkB} 、 I_{qkC} 分别为断线后的 A、B、C 相电流。

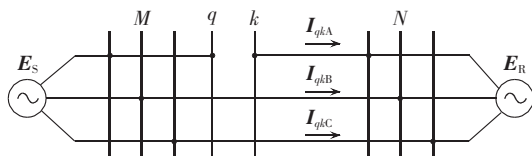


图 1 断线故障系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of power system with open-circuit fault

对于断相线路, 有边界条件:

$$\begin{cases} I_{qkA} = I_{qk1} + I_{qk2} + I_{qk0} = 0 \\ U_{qk1} = U_{qk2} = U_{qk0} \end{cases} \quad (1)$$

其中, I_{qk1} 、 I_{qk2} 、 I_{qk0} 分别为 A 相的正、负、零序电流; U_{qk1} 、 U_{qk2} 、 U_{qk0} 分别为 $q-k$ 断口的正、负、零序电压。

则可得到断线故障序网图如图 2 所示。图中, E_{SA} 、 E_{RA} 分别为 M 、 N 侧系统 A 相电势; X_{Si} 、 X_{Ri} 分别为 M 侧、 N 侧系统电抗; X_{Li} 为线路电抗; $\sum jX_i = jX_{Li} + jX_{Ri} + jX_{Si}$; i 取 1、2、0 时分别表示正、负、零序。

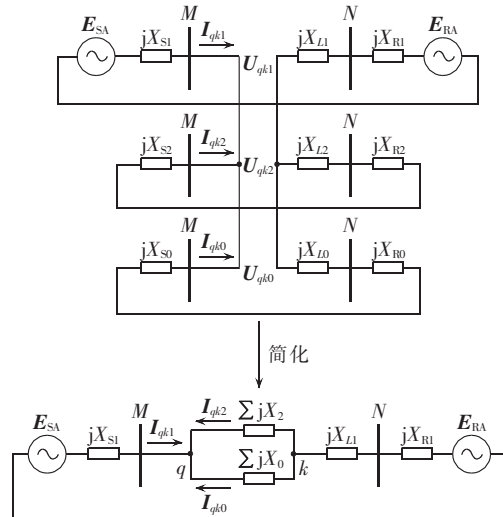


图 2 断线故障序网图

Fig.2 Sequence networks of open-circuit fault

1.1 零序电流特性

根据图 2 可得到各序电流之间的关系见式(2)。

$$\begin{cases} I_{qk1} = \frac{E_{SA} - E_{RA}}{\sum jX_1 + (\sum jX_2 // \sum jX_0)} \\ I_{qk2} = -I_{qk1} \frac{\sum jX_0}{\sum jX_2 + \sum jX_0} \\ I_{qk0} = -I_{qk1} \frac{\sum jX_2}{\sum jX_2 + \sum jX_0} \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum jX_1 = jX_{L1} + jX_{R1} + jX_{S1}$$

由图 2 及式(2)均可看出,线路发生断线故障后,该线路的零序电流与负序电流同相位,均与正序电流的相位相差 180° 。

考虑到断线前 A 相负荷电流为:

$$I_{FH} = \frac{E_{SA} - E_{RA}}{\sum jX_1} \quad (3)$$

且 $\sum jX_1 = \sum jX_2$, 则式(2)可改写为:

$$\begin{cases} I_{qk1} = \frac{I_{FH}(\sum jX_1 + \sum jX_0)}{\sum jX_1 + 2\sum jX_0} \\ I_{qk2} = \frac{-I_{FH}\sum jX_0}{\sum jX_1 + 2\sum jX_0} \\ I_{qk0} = \frac{-I_{FH}\sum jX_1}{\sum jX_1 + 2\sum jX_0} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知,发生断线故障后零序电流的方向与负荷电流 I_{FH} 的方向相反,大小与 I_{FH} 的大小成正比。此外,受系统正序和零序阻抗的影响,系统零序阻抗增大、零序电流减小,系统正序阻抗增大、零序电流增大。

1.2 双回线路零序电压、电流与零序功率方向特性

以双回线路为例分析多回并列线路的断线故障^[9-13]。假设双回线路的母线 M 、 N 两侧系统中性点均接地,双回线路的一回线发生单相断线故障,此时的零序网络如图 3 所示。图中, $jX_{S'0}$ 、 $jX_{R'0}$ 分别为双回线路 M 、 N 侧系统的零序电抗;断线处的零序电势 U_{qk0} 在回路中产生零序电流, I_{qk0} 为断相线路的零序电流, I_{S0} 为 M 侧系统零序电流, I_{20} 为并列线路零序电流。为简化计算,假设双回线的参数相同。

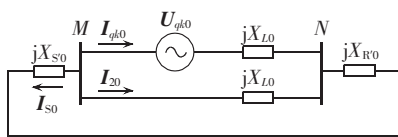


图 3 断线故障双回线零序网络图

Fig.3 Zero-sequence network of dual-circuit transmission line with open-circuit fault

1.2.1 零序电压、电流

I_{qk0} 、 I_{S0} 和 I_{20} 之间的关系如式(5)所示。

$$-I_{qk0} = I_{S0} + I_{20} \quad (5)$$

故障线路两侧母线的零序电压是零序电流在两侧系统零序阻抗上产生的压降,如式(6)所示,断线点两侧和故障线路两侧母线的电压均为反相位。

$$\begin{cases} U_{M0} = I_{S0} jX_{S'0} \\ U_{N0} = -I_{S0} jX_{R'0} \end{cases} \quad (6)$$

双回线路的零序电压和电流的分布如图 4 所示。图中, jX_{M0} 、 jX_{N0} 分别为故障线路断线点 M 、 N 侧的零序电抗。

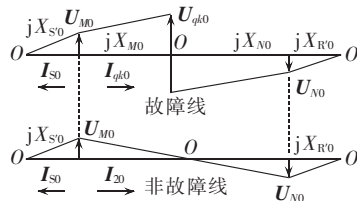


图 4 双回线断线故障零序电压分布图

Fig.4 Zero-sequence voltage distribution of dual-circuit transmission line with open-circuit fault

图 4 所示的零序电压分布使得双回线路内出现零序环流。故障线路中零序电流大小与断线前负荷电流大小之比为 $\sum X_1 / (\sum X_1 + 2\sum X_0)$; 非故障线路与系统回路共同分流故障线的零序电流。

上文都是在未考虑并列线路互感情况下的简单分析,实际并列线路(特别是同塔并架双回线路)是存在互感的,实际电网中有的同塔并架双回线路的零序互感抗与零序电抗的比值高达 0.6,因此需要考虑零序互感的影响。不考虑和考虑零序互感情况下的非故障线路的零序电流分别如式(7)和(8)所示。对比可知,由于双回线路间零序互感的影响,断线后流过双回线路的零序电流会增大。

不考虑零序互感情况:

$$I_{20} = \frac{U_{M0} - U_{N0}}{jX_{L0}} = I_{S0} \frac{X_{S'0} + X_{R'0}}{X_{L0}} \quad (7)$$

考虑零序互感情况:

$$I_{20} = \frac{U_{M0} - U_{N0} - jX_M I_{qk0}}{jX_{L0}} = I_{S0} \frac{X_{S'0} + X_{R'0} + X_M}{X_{L0} - X_M} \quad (8)$$

其中, X_M 为双回线路间零序互感抗。

1.2.2 零序功率方向

由式(5)、(6)、(8)可知,对于故障线路两侧,零序电压超前电流的功率方向为:

$$\begin{cases} \varphi_{1MP} = \arg\left(\frac{U_{M0}}{I_{qk0}}\right) = \arg\left[\frac{-jX_{S'0}(X_{L0} - X_M)}{X_{S'0} + X_{R'0} + X_{L0}}\right] \\ \varphi_{1NP} = \arg\left(\frac{U_{N0}}{-I_{qk0}}\right) = \arg\left[\frac{-jX_{R'0}(X_{L0} - X_M)}{X_{S'0} + X_{R'0} + X_{L0}}\right] \end{cases} \quad (9)$$

因为线路零序电抗 X_{L0} 大于双回线路间零序互感抗 X_M , 所以故障线路 M 、 N 两侧的零序功率方向均为 -90° , 在零序功率方向动作区内。同理,对于故障线路的上、下级线路同侧的零序功率方向也处于动作区内。

而非故障线路的零序电流方向与故障线路相反,则其电压超前电流的功率方向如式(10)所示。

$$\begin{cases} \varphi_{2MP} = \arg\left(\frac{U_{M0}}{I_{20}}\right) = \arg\left[\frac{jX_{S'0}(X_{L0} - X_M)}{X_{S'0} + X_{R'0} + X_M}\right] \\ \varphi_{2NP} = \arg\left(\frac{U_{N0}}{-I_{20}}\right) = \arg\left[\frac{jX_{R'0}(X_{L0} - X_M)}{X_{S'0} + X_{R'0} + X_M}\right] \end{cases} \quad (10)$$

由于线路零序电抗 X_{L0} 大于双回线间零序互感抗 X_M , 双回线路的非故障线路 M 、 N 侧的功率方向均为 90° , 在零序功率方向动作区外。

2 重载线路断线故障的仿真分析

利用 PSCAD 搭建双回输电线路仿真模型如图 5 所示。发生断线故障前负荷电流与断路器 B_2 处规定的电流正方向(箭头方向)相同, 考虑两侧系统中性点接地与不接地 2 种方式和线路 L_1 的不同负载, 在断路器 B_2 处设置 A 相断线故障。

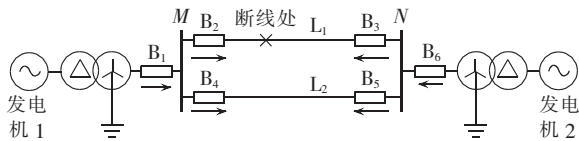


图 5 双回线输电仿真系统
Fig.5 Dual-circuit transmission system for simulation

考察故障线路附近零序电流与零序功率方向分布情况。各断路器处零序电流与零序功率方向如表 1、2 所示。表中, $3I_{0B1}—3I_{0B6}$ 为各断路器处 3 倍零序电流, 零序电流的正负表示了零序电流的方向, 与保护安装处规定的正方向相同为正, 否则为负, 同一条线路两端的零序电流受对地电容的影响而略有差别; 线路重载程度为线路传输功率与自然功率的比值; 零序功率方向在 $-100^\circ\pm 90^\circ$ 范围内为正, 否则为负^[2]。

表 1 两侧变压器中性点均接地时的零序电流分布
Table 1 Zero-sequence current distribution when neutral-points of transformers at both sides are grounded

重载程度	$3I_{0B1}/A$	$3I_{0B2}/A$	$3I_{0B3}/A$	$3I_{0B4}/A$	$3I_{0B5}/A$	$3I_{0B6}/A$
1.0	-540	-639	+648	+102	-102	+546
1.5	-768	-912	+921	+144	-147	+777
2.0	-1017	-1206	+1221	+192	-195	+1029
零序功率方向	+	+	+	-	-	+

表 2 两侧变压器中性点均不接地时的零序电流分布
Table 2 Zero-sequence current distribution when neutral-points of transformers at both sides are not grounded

重载程度	$3I_{0B1}/A$	$3I_{0B2}/A$	$3I_{0B3}/A$	$3I_{0B4}/A$	$3I_{0B5}/A$	$3I_{0B6}/A$
1.0	0	-402	+405	+402	-405	0
1.5	0	-570	+576	+570	-576	0
2.0	0	-756	+762	+756	-765	0
零序功率方向	—	+	+	-	-	—

如仿真结果数据所示, 发生断线故障后双回线路两侧变压器中性点接地时的故障线路和上下级线路, 以及双回线路两侧变压器中性点不接地时的双回线路的零序电流幅值都超过了规程^[14]建议的零序过流保护末段定值 300 A。结合第 1 节的理论推导和仿真, 对断线故障特征总结如下。

a. 零序电流分布。断线故障发生后, 故障线、与故障线路并列线路以及上下级线路中均产生零序电

流, 零序电流分布与线路两侧系统中性点接地情况有关; 如果线路两侧系统均为接地系统就会对零序电流分流, 使得并列线路零序电流幅值减小; 如果两侧系统都不接地, 则并列线路与故障线路中的零序电流大小几乎相同, 只受线路对地电容电流的影响。

b. 零序电流幅值:对于纵向故障, 零序电流源位于故障线路上, 该回线路零序电流最大, 零序电流大小受断线前负荷电流大小影响, 与负荷电流大小成正比关系, 如图 6 所示。而流过并列线路以及两侧系统的零序电流大小则与并列线路的阻抗、两侧系统的接地情况及零序阻抗的分布和大小有关。因此重载运行的线路发生单相断线故障时, 不仅故障线路的零序电流保护可能会动作, 与故障线路并列的线路以及两侧的接地系统的零序电流均有超过零序过流保护末段定值的可能。

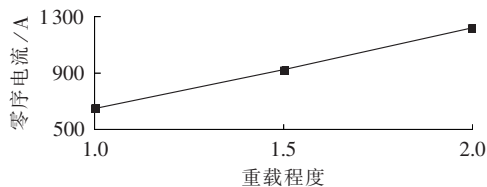


图 6 断线后零序电流与断线前线路负荷的关系
Fig.6 Relation between zero-sequence current after open-circuit fault and line load before open-circuit fault

c. 零序电流方向:断线后故障线路零序电流方向与故障前负荷电流方向相反, 可通过并列线路、线路两侧的接地系统形成零序环流。

d. 零序功率方向:双回线路一回单相断线后, 故障线路及上下级线路同向的零序功率方向为正向, 而并列非故障线路零序功率方向为反向。

e. 零序互感的影响:零序互感对同走廊健全线路(尤其是同塔并架线路)的零序电流有一定的影响, 在线路两侧系统零序阻抗一定的前提下, 零序互感越大, 健全线路的零序电流越大, 这种情况下发生断线故障, 零序电流更容易达到零序过流保护末段定值。如图 7 所示, 随着双回线间的零序互感的增加, 断线后双回线路中的零序电流增大, 流向系统的零序电流减小。

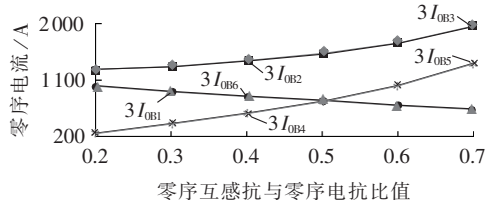


图 7 双回线断线后零序电流与零序互感的关系
Fig.7 Relation between zero-sequence mutual inductance and zero-sequence current after open-circuit fault of dual-circuit transmission system

3 断线故障对零序过流保护的影响

文献[14]中规定零序电流保护最末一段的动作电流定值一般应不大于 300 A(例如零序电流 IV 段和反时限零序电流启动值)。文献[15]中也规定零序电流保护的启动值一般应不大于 300 A,定时限动作时间不小于 3.5 s。在实际工作中,为简化计算,同一系统中按双重化原则配置保护的同一电压等级线路零序电流定时限最后一段通常取相同定值,且不经零序功率方向元件控制。

下面考虑 4 种断线情况对零序过流保护的影响。

a. 对于采用单相重合闸的 500 kV 线路,重合闸时间大多整定为 1 s 左右,小于线路零序电流定时限保护最后一段的动作时间,不会对相邻线路保护造成影响。

b. 由于线路断路器单相偷跳或单相偷合而造成的纵向故障,通常由“开关位置不对应”保护(即“非全相保护”)解决,该保护利用断路器辅助接点的不对应状态作为判据,动作时限也小于线路零序电流定时限保护最后一段的动作时间。

上述 2 种较为常见的线路纵向故障,都与线路断路器相关,保护的判据较容易获取,对于一次系统断线或二次系统断线也能较明确地加以区分,均采用在时间定值上“躲开”的方式防止并列非故障线路零序电流定时限最后一段误动。

c. 当断相故障发生在线路上时,较为常见的是断线处的导线接地,此时由于伴随有接地故障发生,线路纵联保护、后备接地距离保护或零序保护大多能够切除故障,因此一般不会对相邻线路产生影响。

d. 值得注意的是输电导线上发生与断路器无关的纯纵向故障。此种故障可能发生在线路耐张塔、转角塔的引流线处,或是在紧凑型线路的两间隔棒之间,除此之外,线路隔离开关自行断开(脱落)、站内出线设备引线脱落等在特殊情况下也有可能造成纯纵向故障。当然,根据长期的运行经验,线路发生纯纵向故障是非常罕见的,但是,由前文所做的分析可知,一旦重载线路发生了断线且不接地的故障,除本线路中必然会有零序电流外,有零序通路的上下级线路、多回线路的并列线路必然也会由此产生零序电流。鉴于前文所提到的整定原则,以及同一电压等级线路零序电流定时限最后一段通常取相同值的整定惯例,可能存在重载线路发生纵向故障时出现同一断面多条线路零序后备保护同时动作的情况,如果因此发生大功率转移,后果不堪设想。

4 考虑断线故障的零序过流保护

解决断线情况下非故障线路零序过流保护误动的问题并不复杂,只要能够保证断相线路先于其他健全线路的零序过流保护动作跳开三相,便可避免正

常线路零序过流保护误动问题。

利用线路分相纵联差动保护互传线路两侧全电流,可以较为准确地判断被保护线路是否发生断相故障。判断重载情况下发生断线故障的新型零序过流保护方案的逻辑如图 8 所示。

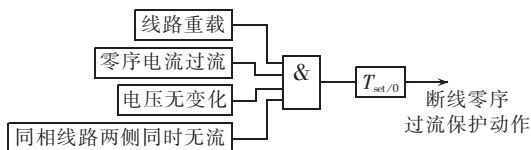


图 8 零序过流保护新方案逻辑图

Fig.8 Logic diagram of improved zero-sequence protection scheme

a. 线路重载,重载判据如式(11)所示。

$$I_L > I_{Lset} \quad (11)$$

其中, I_L 为负荷电流; I_{Lset} 为重载电流定值。若潮流较小,则断线时零序电流必然较小,零序过流后备保护不会动作。

b. 线路零序电流过流,判据如式(12)所示。

$$3I_0 > 3I_{0set} \quad (12)$$

其中, $3I_0$ 为零序电流; $3I_{0set}$ 为零序过流定值,可采用零序过流保护末段定值。

c. 线路电压无变化,判据如式(13)所示。

$$\Delta U < 0.04 U_e \quad (13)$$

其中, ΔU 为电压变化量; U_e 为额定电压。

d. 同相线路两侧同时无流,判据如式(14)所示。

$$I_{M\varphi} < 0.04 I_e, I_{N\varphi} < 0.04 I_e \quad \varphi = A, B, C \quad (14)$$

其中, $I_{M\varphi}$ 、 $I_{N\varphi}$ 分别为同相线路 M、N 侧电流; I_e 为线路额定电流。

如果条件 **a**、**b**、**c**、**d** 同时满足,则表明线路发生断线故障且零序过流,具备保护动作的条件,动作时限 $T_{set/0}$ 按躲过重合闸时间、断路器三相不一致保护动作时间中较大者整定,而且需要小于零序过流保护最末一段的时间定值。

上述判据最根本的出发点在于考虑线路两侧不会在同一时刻发生电流互感器二次断线,因此将重载线路两侧同相电流互感器同时无流作为线路一次无流的重要判据。对于“串供”形式的上下级线路,虽然由于无法区分是哪一级线路发生故障而导致故障线路的上一级或下一级线路陪跳,但受事故影响的范围并没有因此而扩大。

在某超高压线路保护装置中实现该保护方案,RTDS 仿真结果表明其在非断线故障情况下可靠不误动,在本线路发生纯断线故障且零序过流时,先于相邻线路零序过流保护末段动作跳开三相,避免其发生误动,验证了仿真结果和新方案的有效性。

5 结论

本文通过理论计算和仿真分析了断线故障的零

序电流分布特征、零序功率方向特性,得到如下结论。

a. 零序电流分布特征:发生断线故障后故障线路、中性点接地的上下级线路、双回线路的并列线路均有零序电流。

b. 零序电流幅值特征:发生断线故障后的零序电流大小受断线前负荷电流大小影响,与断线前负荷电流成正比关系,重载线路断线后零序电流幅值更大;中性点接地的上下级线路会对并列线路的零序分流,使其零序电流幅值减小。

c. 零序电流方向特征:断线后故障线路零序电流方向与故障前负荷电流方向相反,在双回线路中会出现零序环流。

d. 零序功率方向特征:发生接地系统单相断线后故障线路、上下级线路的零序功率方向均为正;而并列非故障线路的零序功率方向为负。

e. 零序互感的影响特征:随着双回线路间的零序互感的增加,断线后双回线内的零序电流增大,流向系统的零序电流减小。

因此,在线路重载情况下发生断线故障可能会引起中性点接地的上下级线路、并列线路的零序过流保护误动。为避免这种情况,利用线路分相纵联差动保护互传线路两侧全电流,判断被保护线路是否发生断相故障,提出了适应线路断线故障的新型零序过流保护方案,并通过实际保护装置的 RTDS 仿真结果验证了新方案的有效性。

参考文献:

- [1] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 3 版. 北京:中国电力出版社, 2010:114-124.
- [2] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社, 2005:46-55.
- [3] 赖庆辉,陈福锋,许庆强,等. 纵联零序方向元件的特殊问题分析及解决方案[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12):88-91.
LAI Qinghui, CHEN Fufeng, XU Qingqiang, et al. Analysis of pilot zero-sequence directional protection special problems and solutions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12): 88-91.
- [4] 汪萍,陈久林. 纵联零序方向保护误动原因分析及其对策[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(7):122-125.
WANG Ping, CHEN Jiulin. Analysis of longitudinal zero sequence direction protection misoperation and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(7):122-125.
- [5] 阳家书,李国友,孙建华. 一次 110 kV 线路单相断线故障的继电保护动作分析[J]. 继电器, 2007, 35(22):58-60.
YANG Jiashu, LI Guoyou, SUN Jianhua. Analysis of relaying operation on a single phase breakoff fault of 110 kV transmission line[J]. Relay, 2007, 35(22):58-60.
- [6] 袁浩,王琰,倪益民,等. 高压线路保护非全相运行状态下的考虑[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20):103-107.
YUAN Hao, WANG Yan, NI Yimin, et al. Consideration for high voltage line protection under open-pole operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20):103-107.
- [7] 孙旭娜,张慧芬,田质广. 接地点在变电站侧断线接地复故障分析[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2013, 27(1):26-33.
SUN Xuna, ZHANG Huifen, TIAN Zhiguang. Analysis of single-phase line-broken with earth fault at substation side[J]. Journal of Jinan University(Science & Technology), 2013, 27(1):26-33.
- [8] 张慧芬,桑在中. 架空线单相断线接地复故障分析[J]. 中国电力, 2013, 46(2):65-71.
ZHANG Huifen, SANG Zaizhong. Analysis of single-phase grounding fault with line-broken on overhead transmission lines[J]. Electric Power of China, 2013, 46(2):65-71.
- [9] 陈曦,傅锦发,樊征臻,等. 线路非全相运行及其再故障零序方向保护的動作特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6):82-88.
CHEN Xi, FU Jinfa, FAN Zhengzhen, et al. Action features analysis on zero-sequence directional protection of line open phase running and sound phase grounding[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6):82-88.
- [10] 陈少华,梁志雄,孙何洪. 电力网超高压平行双回线路弱电强磁现象仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22):1-7.
CHEN Shaohua, LIANG Zhixiong, SUN Hehong. Simulation and research of weak current and strong magnetic phenomenon in EHV parallel double lines[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22):1-7.
- [11] 毛鹏,茹锋,江林,等. 复故障情况下线路保护中方向元件动作为分析[J]. 电网技术, 2006, 30(2):87-90, 96.
MAO Peng, RU Feng, JIANG Lin, et al. Action behavior analysis on directional element of line protection under multiple faults[J]. Power System Technology, 2006, 30(2):87-90, 96.
- [12] 毛鹏,董肖红,杜肖功,等. 输电线路复故障情况下选相元件研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1):53-56.
MAO Peng, DONG Xiaohong, DU Xiaogong, et al. Study of faulted phase selector element for duplicate faults of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 53-56.
- [13] 彭向阳,胡卫,毛先胤,等. 输电线路架空地线接地方式对线路零序参数的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(5):1302-1309.
PENG Xiangyang, HU Wei, MAO Xianyin, et al. Impacts of overhead ground wire grounding modes on zero-sequence parameters of transmission line[J]. Power System Technology, 2014, 38(5):1302-1309.
- [14] 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.
- [15] 国家电网公司. 国家电网继电保护整定计算技术规范:GDW 422—2010[S]. 北京:中国电力出版社, 2010.

作者简介:



刘亚东

刘亚东(1981—),男,河北保定人,工程师,博士,研究方向为继电保护技术(E-mail: ydliucn@163.com);

孙集伟(1956—),男,天津人,教授级高级工程师,长期从事继电保护专业技术工作;

杨国生(1977—),男,甘肃武威人,高级工程师,硕士,长期从事继电保护专业技术研究和管理工作。

(下转第 141 页 continued on page 141)

TCT 式并联电抗器控制绕组匝间故障保护方案

张芬芬, 郑 涛, 刘连光

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 基于对晶闸管控制变压器(TCT)式并联电抗器的本体结构和控制绕组匝间短路故障特性分析,提出一种针对其控制绕组匝间故障保护的新方案。该方案综合利用控制绕组匝间故障时网侧零序电压低、补偿绕组零序电流大的特点,采用主判据和辅助判据相结合的方式,主判据采用零序过电流保护元件,采取两段式的整定方式以兼顾匝间故障下保护的灵敏度和容量调节过程中的可靠性;辅助判据由网侧零序高电压闭锁元件构成,并增加闭锁判据,保证 TCT 式并联电抗器在系统非全相运行、区外不对称故障、电抗器空投、容量调节等暂态过程中保护可靠不误动。基于仿真测试结果确定了所提方案的具体整定方法,并对灵敏度进行了校验,分析计算的结果证明了所提方案的可行性和有效性。

关键词: 晶闸管控制变压器式并联电抗器; 控制绕组; 匝间故障; 保护方案; 暂态特性; 灵敏度分析

中图分类号: TM 472; TM 772

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.020

0 引言

采用并联电抗器补偿输配电系统长线路的容性无功是常用方法。随着全球能源互联战略的提出,一方面,采用超/特高压技术建设远距离、大功率输电线路的需求越来越大^[1-2];另一方面,新能源发电的大规模集中接入会使得超/特高压输电电路上潮流变化更加频繁,加剧了无功电压控制的难度。现有的固定电抗器已难以满足大电网容性无功补偿的需求,而补偿容量可控的电抗器将成为有效解决超/特高压输电系统中无功与电压控制难题的关键技术之一^[3-5]。其中,晶闸管控制变压器 TCT (Thyristor-Controlled Transformer) 式并联电抗器是一种新型的可控电抗器,其兼具分级式可控电抗器响应速度快^[6]和磁控式可控电抗器容量平滑可调^[7]的优点,是未来超/特高压电网并联电抗器技术可能的发展方向^[8]。

TCT 式并联电抗器本质上属于高漏抗变压器,其漏抗可达 100% 额定阻抗,其铁芯具有较大的过载能力,不易饱和。采用 TCT 式并联电抗器来解决超/特高压输电系统的无功电压问题比其他电抗器更具优势。匝间故障保护是可控电抗器保护的重点和难点。与固定电抗器、常规电力变压器相比,TCT 式并联电抗器的结构复杂,其高漏抗的设计使控制绕组匝间故障时的故障特征不明显,且运行中需根据系统无功需求调节工作容量,这些结构和工作原理上的特殊性使得 TCT 式并联电抗器控制绕组匝间故障在保护配置上面临更多的难题。目前针对可控并联电抗器保护方案的研究主要集中于磁控式^[9-11]和分级式^[12-14]电抗器,而对 TCT 式并联电抗器的研

究较少,其控制绕组匝间短路故障保护是尚未解决的难题之一,故有必要对其展开研究。文献[14]针对分级式可控并联电抗器,提出用控制绕组自产零序过流保护反映控制绕组匝间短路故障,但其存在灵敏性低、动作慢等缺点。固定电抗器匝间短路一般采用由电抗器首端自产零序电流、零序电压组成的零序功率方向的保护方案^[15];而 TCT 式并联电抗器发生控制绕组匝间故障时,因补偿绕组采用三角形连接形式分流了大部分的零序电流,导致网侧零序功率方向保护灵敏度不足。文献[16]给出了 TCT 式并联电抗器的整体保护配置方案,针对控制绕组匝间故障,指出其是因为高漏抗的结构导致基于磁平衡的纵联电流差动保护灵敏度不足。

综上所述,考虑到 TCT 式并联电抗器的特殊结构和运行方式,目前尚无针对其控制绕组匝间故障的有效保护方案,本文从不同工况下的电气量出发,提出在控制绕组匝间故障情况下,综合利用零序电压、零序电流等电气量特征,采取主、辅判据相结合的方式,能有效解决 TCT 式并联电抗器控制绕组匝间故障保护灵敏度不足的问题。

1 TCT 式并联电抗器控制绕组匝间故障特征及其他工况影响分析

1.1 TCT 式并联电抗器的结构及参数

典型的 TCT 式并联电抗器结构如图 1 所示,其由网侧绕组、控制绕组和补偿绕组构成。网侧绕组连接高压输电系统,末端经中性点直接接地(用作母线高抗)或经小电抗接地(用作线路高抗);控制绕组通过反并联的晶闸管阀组构成相控式交流调压电路^[17],通过调节晶闸管触发角 α ,改变一个周期内控制绕组电流的平均值,从而平滑地调节电抗器的工作容量;

收稿日期:2016-05-20;修回日期:2017-03-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677069)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677069)