

「电力系统」

750 kV输电线路单相接地故障实测与仿真计算分析

文/国网甘肃省电力公司电力科学研究院 梁福波 智 勇 邢延东 乾维江

以750 kV甘新联网工程为背景,使用电磁暂态仿真程序对750 kV甘新联网输电线路进行了单相接地故障进行了重现,重点对不同补偿度下潜供电流和恢复电压进行了仿真,并且通过仿真计算结果和实测数值的对比分析,给出了最佳补偿效果的中性点小电抗值,并对系统运行提出了相关建议。

由于超高压输电线路电压等级高、输送距离长、相间电容大,因此线路故障时的潜供电流较大、恢复电压较高,单相重合闸难以在无电流间隔时间内可靠地熄灭潜供电流。影响潜供电流持续时间的因素很多,持续时间既与输电线路的电气参数、线路是否装设高抗、装设高抗的容量及中性点小电抗数值、线路输送的功率尤其是无功等有关。

甘肃河西750 kV武胜—河西—酒泉—敦煌—哈密输变电工程作为西电东送的重要通道,在系统投运前的调试中,通过人工接地试验实测750 kV潜供电流幅值、持续时间和恢复电压等系统特性,稳定特性影响系统的安全稳定运行。该试验为750 kV输变电的投运提供了第一手的实测资料,能够更全面地了解750 kV系统的特性,对于系统运行和新建750 kV线路提供了宝贵的经验。

输电线路单相人工接地试验简介

敦哈线全长349 km,线路两侧各配置一组420 Mvar电抗器,根据试验前的仿真计算,确定了试验时由哈密变向敦煌变送负荷500 MW,人工接地短路点选择在距离敦煌变4 km处,在线路L1相接地点采用人工遥控发射装置形成单相瞬时接地故障,在两侧变电站测量短路电流、潜供电流和恢复电压以及其他相关数据。故障持续时间30 ms,在故障发生20 ms后两端均切除故障相,单相重合闸时间整定为600 ms,在0.765 s后单相重合闸成功系统恢复正常运行。

潜供电流和恢复电压的产生机理

单相重合闸切除单相瞬时接地故障后,由于健全相和故障相之间存在电容耦合和互感耦合,接地点仍会流过持续电流,这就是潜供电流;潜供电流熄灭后,瞬时故障处的电压叫恢复电压,如图1所示。

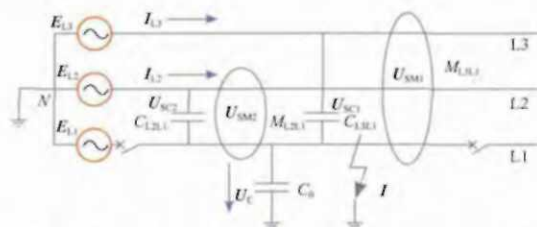


图1 超高压输电线路潜供电流和恢复电压产生示意图

由于耦合而产生的潜供电流和恢复电压可以分为两部分:通过电容耦合而产生的静电分量和通过相间互感耦合而产生的电磁分量。如图1所示,故障发生后,L1相恢复电压的静电分量和电磁分量可由式(1)和式(2)表示

$$U_{SC} = U_{SC1} + U_{SC2} = E_{L3} \frac{C_{L3L1}}{C_{L3L1} + 0} + E_{L2} \frac{C_{L2L1}}{C_{L2L1} + 0} \quad (1)$$

$$U_{SM} = U_{SM1} + U_{SM2} = j\omega M_{L3L1} I_{L3} + j\omega M_{L2L1} I_{L2} \quad (2)$$

在装设高抗的线路中,线路电容和高抗形成振荡回路,在恢复电压刚出现的暂态过程中,自由分量的振荡频率与经相间耦合的工频强制分量频率不同导致恢复电压呈现拍频振荡。在不考虑自由分量衰减时,恢复电压 U_c 可用式(3)表述

$$U_C = -2U_0 \sin\left(\frac{\omega_1 - \omega_0}{2}t + \frac{\varphi_1 - \varphi_0}{2}\right) \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_0}{2}t + \frac{\varphi_1 + \varphi_0}{2}\right) + (U_1 - U_0) \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (3)$$

式中, U_1 和 U_0 、 ω_1 和 ω_0 、 φ_1 和 φ_0 分别为工频强制分量(下标1)和自由分量(下标0)的幅值、自然角频率和初相角。式(1)中第二项幅值很小,恢复电压 U_C 主要取决于第一项,振荡主频率 f_m 和拍频频率 f_s 分别为

$$f_m = \frac{\omega_1 + \omega_0}{4\pi}, f_s = \frac{\omega_1 - \omega_0}{4\pi} \quad (4)$$

当恢复电压中自由分量衰减为零后,稳态恢复电压即为工频强制分量。

单相接地短路故障仿真

1. 仿真系统模型

单相接地短路故障仿真系统包括敦煌变、哈密变和敦哈 I 线,敦哈 II 线停运,线路两侧各 420 Mvar 并联电抗器,中性点小电抗阻抗值分别为 502.37 Ω 、559.79 Ω 、617.83 Ω ,进行人工接地短路时中性点小电抗阻抗值为 559.79 Ω 。

2. 恢复电压实测与计算分析

图2和图3分别为敦煌变计算和实测的恢复电压波形,从图中可以看出,故障相恢复电压拍频最大幅值实测与计算基本相同,实测和计算恢复电压最大幅值分别为62.6 kV和67.3 kV,两者的拍频低谷幅值差别略大。分析恢复电压波形发现,在初始阶段振荡主频率和拍频频率的实测与计算结果完全相同,分别为50.11 Hz与7.1 Hz,但实测恢复电压的拍频主频率上升速率比计算结果略快一些,即实际系统中的损耗比仿真计算时大,使得自由分量衰减得更快一些。

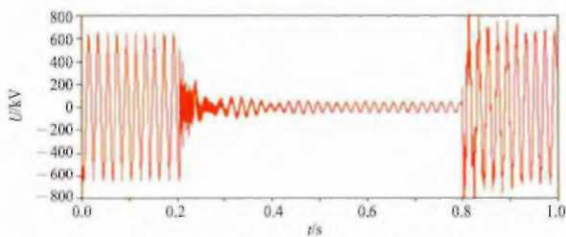


图2 恢复电压波形 (计算值)

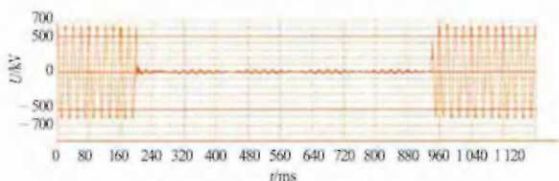


图3 恢复电压波形 (实测值)

3. 潜供电流实测与计算分析

从图4和图5为敦煌变计算和实测的潜供电流波形中可以看出,潜供电流以工频分量为主。750 kV敦哈线单相重合闸期间潜供电流持续时间约为11 ms。

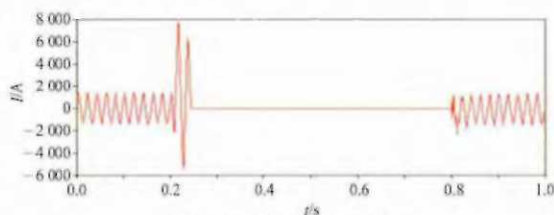


图4 潜供电流 (计算值)

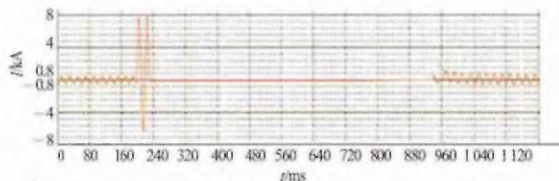


图5 潜供电流 (实测)

从波形中可以看出,潜供电流中存在明显的高频分量,但衰减很快,仍以工频分量为主。750 kV敦哈线单相重合闸期间潜供电流持续时间约为11 ms,考虑潜供电弧重燃情况也未超过120 ms。目前运行工况下,750 kV线路单相重合闸整定时间为600 ms应能保证其动作成功。

在三个中性点小电抗下振荡主频率基本没有偏离工频,因此恢复电压振荡幅值不大。恢复电压幅值在拍频的低谷明显下降,低于工频强制分量,有利于潜供电流熄灭,因此对限制潜供电流的燃弧时间也非常有效。对恢复电压抑制效果最佳的是当中性点小电抗为559.79 Ω 时,恢复电压稳态峰值42.394 kV。

结束语

1) 潜供电流中的高频分量使其数值增大。系统中非线性元件在一定条件下会产生谐波,以及单相接地故障清除后非全相运行和暂态过程中产生不同频率的振荡是导致潜供电流中存在高次谐波的原因;高抗中性点小电抗阻抗按工频频率确定,对高次谐波限制效果差是潜供电流中高次谐波分量相对较大的原因。

2) 综合以上仿真分析,建议暂将高抗中性点小电抗的抽头放在559.79 Ω 档,以便取得限制潜供电流和恢复电压的最佳效果。更合理准确的抽头档位可在实际的短路试验后确定。EA

(收稿日期:2014.10.23)

[责任编辑:朱金凤]