

750 kV 输电线路保护与单相重合闸动作的研究

李 斌¹, 李永丽¹, 贺家李¹, 郑玉平², 盛 鵬¹, 郭 征¹

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津市 300072; 2. 国电南瑞继保电气有限公司, 江苏省南京市 210003)

摘要: 阐述了 750 kV 输电线路的电容效应、互感效应以及合闸过电压的问题, 指出单相接地故障时若采用三相重合闸将不可避免地产生较高过电压。指出了 750 kV 输电线路单相重合闸的应用前提是避免并联电抗器补偿给单相重合闸可能带来的谐振过电压问题, 分析并提出了并联电抗器中性点小电抗的正确取值范围。针对并联电抗与线路电容之间的电磁振荡对故障断开相恢复电压的影响, 研究了单相瞬时性故障恢复电压的拍频振荡特点, 并提出了 750 kV 输电线路的单相重合闸方案与重合过电压的抑制方法。

关键词: 超高压输电线; 单相重合闸; 过电压; 恢复电压

中图分类号: TM773; TM762.2

0 引言

750 kV 输电线路是电力系统的重要组成部分, 它将起到功率传送和系统联络的重要作用^[1,2]。自动重合闸技术作为保证电力系统安全供电和稳定运行的一种有效措施, 在国内外的电力系统中都得以广泛应用。由于超高压及以上输电线路的故障以单相瞬时性故障为主要形式, 因此, 采用单相自动重合闸以消除瞬时性故障并快速恢复供电是超高压输电线路广泛采取的保护方式。750 kV 输电线路额定电压的增高, 使杆塔和档距中绝缘距离加大, 变电所户外配电装置相间距离和尺寸也随之增大。据俄罗斯电力部门的数据统计, 750 kV 线路上单相接地的故障的故障率高达 90% 以上, 且大多数线路的绝缘闪络具有瞬时的特点^[3]。因此, 单相自动重合闸在 750 kV 输电线路具有广阔的应用前景。

然而, 由于运行电压的提高, 750 kV 系统中过电压与绝缘成为突出问题。尤其是重合过电压更是成为 750 kV 电网绝缘水平的决定性因素^[4], 因此对重合闸操作提出了新的要求。

本文详细分析并提出了 750 kV 输电线路可能出现谐振过电压问题及其相应的抑制措施, 建立了 750 kV 输电线路应用单相自适应重合闸的理论依据。为提高 750 kV 输电线路的重合成功率, 本文研究了单相重合闸期间断开相电压的拍频振荡现象, 针对单相重合闸的操作顺序、时间等方面提出了新的具体的单相重合闸方案。

1 750 kV 长距离输电线的电容效应及互感效应

750 kV 输电线路距离长, 由分布参数特性可知, 空载长线电容效应将引起线路电压升高。

$$\dot{U}_2 = K_p \dot{E} \quad (1)$$

式中: $\dot{U}_2$, $\dot{E}$ 分别为线路末端电压与电源电压; K_p 为电容效应引起的工频电压升高系数。

当线路发生不对称接地故障时, 短路电流的互感效应将使得健全相电压升高。

$$\dot{U} = K^{(1)} \dot{E}' \quad (2)$$

式中: $\dot{U}$, $\dot{E}'$ 分别为故障后健全相电压和故障前正常运行时的相电势; $K^{(1)}$ 为单相接地故障时的电压升高系数。

理论分析与仿真计算表明, 由电容效应及不对称故障时的互感效应引起的健全相工频电压升高在 750 kV 系统内是不容忽视的。因此, 750 kV 输电线路两端保护的跳合闸操作应相互配合, 将线路过电压限制在一定水平以下。由于重合闸操作时线路残压不能完全泄漏, 因此三相重合闸过电压要比计划性合闸过电压严重得多。理论分析表明, 对于单相故障采用三相重合方式时, 无论故障性质是瞬时性或是永久性, 由于健全相残压较高, 三相重合时都将产生不能允许的严重过电压^[5]。

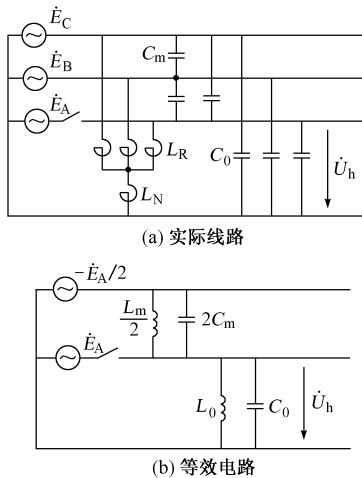
对于单相重合闸, 当单相接地故障属永久性故障时, 继电保护切除故障相后, 该相残余电荷通过故障点完全泄漏, 故不成功的单相重合闸不会产生很高的重合过电压; 当单相瞬时性接地故障时, 在故障消失后, 健全相的耦合作用将使故障相产生一定的

恢复电压,只要并联电抗补偿度远离谐振点,故障相残压就相对较小,应用单相自动重合闸就可以显著降低重合过电压。与三相重合闸比较,单相重合闸不仅提高了输电的稳定性,更减小了重合过电压。因此,单相重合闸在 750 kV 系统中的应用更具重要意义。

2 采用单相重合闸应避免谐振过电压

2.1 谐振过电压

为了保证远距离 750 kV 输电线电压水平在允许范围内,750 kV 线路上必须装设并联电抗器。定义并联电抗器的容量 Q_L 与空载长线电容无功功率 Q_C 的比值 $K = Q_L / Q_C = X_{C1} / X_{LR}$,称为补偿度。目前俄罗斯 750 kV 输电线路的并联补偿度往往高达 90% 以上^[3]。然而,并联电抗器在抑制电容效应的同时,却可能引起断开相出现谐振过电压,如果这种谐振过电压或健全相的工频过电压超过允许值,将不能应用单相重合闸。对于带并联电抗器补偿的线路,因故障而单相断开后静电耦合回路如图 1 所示。



C_m, C_0 分别为线路相间电容与相对地电容; L_R, L_N 分别为并联电抗器电感与中性点电感; L_m, L_0 分别为并联电抗器的等效相间电感与相对地电感

图 1 单相故障断开后的静电耦合回路
Fig. 1 Electrostatic coupling circuit after single-phase trips

由图 1 可得断开相上的工频恢复电压 $\dot{U}_h$ 为:

$$\dot{U}_h = -\dot{E}_A \frac{jX_0}{jX_m + 2jX_0} \quad (3)$$

式中: $X_0 = -\frac{X_{L0}X_{C0}}{X_{L0} - X_{C0}}$; $X_m = -\frac{X_{Lm}X_{Cm}}{X_{Lm} - X_{Cm}}$; $X_{Lm} = \omega L_m$; $X_{Cm} = 1/(\omega C_m)$ 。

若并联电抗器不带中性点小电抗, $L_N = 0$, 则 $L_0 = L_R, L_m = \infty$ 。故 X_m 呈容性,而在一定的线路参数及并联补偿度的情况下, X_0 可能呈感性。显然,当 $X_m = -2X_0$ 时电路将发生串联谐振,断开相

将出现较高的电容耦合电压,甚至大于正常运行电压。当该过电压倍数大于一定值时,线路绝缘子将不能承受该电压。这种情况下绝对不允许采用单相重合闸,只能是三跳三合。我国超高压电网曾发生过这种情况,其结果直接导致单相重合失败。采用并联电抗器带中性点小电抗的补偿方式可以有效解决该问题。

2.2 并联电抗器中性点小电抗的选择

一般中性点小电抗的取值按对相间电容近似全补偿设计,隔断了相间联系。这种情况不仅使得断开相电压很低,也对抑制潜供电流大有好处^[6]。

设并联电抗器的补偿度为 K ,按照对线路相间电容全补偿原则,可得中性点电抗为:

$$X_N = \frac{X_{LR}^2}{X_{Cm} - 3X_{LR}} = \frac{1}{\omega C_1 K \left(K \frac{C_1}{C_m} - 3 \right)} \quad (4)$$

可见,中性点小电抗的选取取决于线路参数和并联补偿度。

在并联电抗器全补偿条件下, $K = 1$, 有 $X_{LR} = X_{C1}$ 。中性点小电抗按式(4)取值,即满足 $X_{Lm} = X_{Cm}$ 。则并联电抗器的对地感抗为:

$$X_{L0} = X_{LR} + 3X_N = X_{LR} + \frac{3X_{LR}^2}{X_{Cm} - 3X_{LR}} = X_{C0} \quad (5)$$

由图 1 可知,此时断开相恢复电压回路是 2 个并联谐振回路的串联,则恢复电压的大小是一个不确定的值,反而增大了出现工频谐振过电压的危险。因此,对于带并联电抗器补偿的超高压、特高压线路,应当避免并联电抗器的全补偿的运行方式。

可见,小电抗的不同取值,可能使相间阻抗或相对地阻抗出现谐振。设使相间阻抗谐振时的中性点小电抗取值为 X_{Nm} ,使相对地阻抗谐振时中性点小电抗取值为 X_{N0} 。显然,当 $X_N < X_{Nm}$ 时, $X_{Lm} > X_{Cm}$, 相间阻抗呈容性;当 $X_N > X_{Nm}$ 时, $X_{Lm} < X_{Cm}$, 相间阻抗呈感性。当 $X_N < X_{N0}$ 时, $X_{L0} < X_{C0}$, 相对地阻抗呈感性;当 $X_N > X_{N0}$ 时, $X_{L0} > X_{C0}$, 相对地阻抗呈容性。

一般输电线路的并联电抗补偿为欠补偿方式,此时 $K < 1$, 有 $X_{LR} > X_{C1}$ 。则由式(5)可知,当小电抗取值为 X_{Nm} 时,有 $X_{L0} > X_{C0}$,从而证明 $X_{N0} < X_{Nm}$ 。可见,在欠补偿运行条件下,当中性点电抗的取值 $X_N < X_{N0} < X_{Nm}$ 时,相间阻抗呈容性,相对地阻抗呈感性;当 $X_N > X_{Nm} > X_{N0}$ 时,相间阻抗呈感性,相对地阻抗呈容性。显然,只有当 $X_{N0} < X_N < X_{Nm}$ 时,相间阻抗和相对地阻抗才都呈容性,断开相电压才可避免出现串联谐振过电压,有效限制断开相电压大小,有利于加速潜供电流的熄灭和降低单相重

合闸的过电压。

同理可知,在并联电抗器过补偿条件下,只有当小电抗的取值满足 $X_{N0} > X_N > X_{Nm}$ 时,相间阻抗和相对地阻抗才都呈感性,从而达到限制潜供电流和谐振过电压的目的。

综上所述,由于小电抗器的生产分级标准化以及输电线路换位不完全的影响,小电抗按式(4)的补偿原则不可能精确调谐,因此需要正确选择中性点小电抗的取值范围。并联电抗器带中性点小电抗的并联补偿方式不仅有利于限制过电压,远离谐振状态,而且还有利于潜供电弧的熄灭,便于采用快速重合闸。

3 750 kV 输电线单相重合闸方案

3.1 单相瞬时性故障恢复电压的分析

单相重合闸仅仅切除、重合故障相,能够显著改善 750 kV 输电线路重合过电压。如果是单相永久性接地故障,在断路器跳闸后,由于故障点始终存在,线路电容对地可靠放电,可近似认为故障线路上不存在残压,故重合时不会产生很高的过电压。

如果是单相瞬时性接地故障,在故障点熄弧后,对于无并联电抗器补偿的线路,恢复电压包括健全相对故障相的工频静电耦合分量和电感、互感耦合分量。其中静电耦合分量起主要作用^[7]。然而,750 kV 线路一般都带有并联电抗器补偿,由于线路电容与并联电抗之间的电磁能量振荡,使得断开相恢复电压由自由振荡分量与工频分量叠加而成。

利用拉普拉斯变换求解图 1(b),设 $\dot{E}_A/2 = \cos(\omega t + \theta)$,潜供电流 $\dot{I}_f$ 在某时刻熄弧,可近似分析恢复电压的变化过程为:

$$U_h(t) = \left[\frac{2C_m}{C_0 + 2C_m} + \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \left(\frac{2L_0}{2L_0 + L_m} - \frac{2C_m}{C_0 + 2C_m} \right) \right] \cdot \cos(\omega t + \theta) - \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \left(\frac{2L_0}{2L_0 + L_m} - \frac{2C_m}{C_0 + 2C_m} \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} \cos(\omega_0 t + \varphi) = U_1 \cos(\omega t + \theta) + U_2 \cos(\omega_0 t + \varphi) = U(\omega_1 t) \sin(\omega t + \theta - \delta) \quad (6)$$

式中: U_1 , ω , θ 和 U_2 , ω_0 , φ 分别为工频分量和自由分量的标幺幅值、角频率和初相角; $\omega_1 = \omega - \omega_0$;

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\frac{L_0 L_m (C_0 + 2C_m)}{2L_0 + L_m}}}$$

$$U(\omega_1 t) = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1 U_2 \cos(\omega_1 t + \phi)}$$

$$\delta = \arctan \frac{U_2 \sin(\omega_1 t + \phi)}{U_1 + U_2 \cos(\omega_1 t + \phi)}$$

$$\phi = \theta - \varphi$$

由式(6)可见,瞬时性故障断开相恢复电压主要由 2 个不同频率的信号合成,其幅值随时间变化,即恢复电压的拍频特性。

3.2 恢复电压拍频特性的计算与 EMTP 仿真

本文的仿真模型是 750 kV 输电线路,如图 2 所示^[5]。

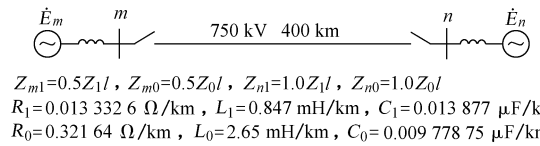


图 2 某 750 kV 输电系统

Fig. 2 750 kV transmission system

在单相重合闸期间,断开相恢复电压的自由分量的形成实际上就是由于各储能元件所存储的电磁能量的衰减振荡过程。由文献[5]理论分析和现场试验资料说明,恢复电压中自由分量幅值一般接近或高于工频分量幅值。因此自由分量对断开相电压瞬时值变化有很大影响。

以图 2 所示线路为例,在不同的并联电抗器补偿度条件下,可以计算单相重合闸期间恢复电压中的自由分量的频率,如表 1 所示。

表 1 自由分量的频率

Table 1 Frequency of free component

并联补偿度/(%)	f_0 /Hz	并联补偿度/(%)	f_0 /Hz
60	37.3	80	44.1
65	39.1	85	45.6
70	40.8	90	47.1
75	42.5	95	48.6

可见,通常 $\omega_0 < \omega$,且二者非常接近。正是由于恢复电压中自由分量与工频分量的叠加,使得恢复电压呈拍频振荡波形,由于自由分量的衰减时间常数一般在 1 s 左右,因此拍频振荡特性在单相重合闸期间内始终存在。恢复电压的幅值包络线 $U(\omega_1 t)$ 的振荡周期较长,其最大、最小值分别近似为 $U_1 + U_2$ 和 $|U_1 - U_2|$ 。图 3 是单相瞬时性故障的 EMTP 仿真电压波形。

通过仿真波形以及国外某些 750 kV 输电线单相重合录波图,可以看出恢复电压的拍频特性使断开相电压的大小连续变化。而且在一定情况下,拍频电压的峰值可能很高。

由式(3)可知,恢复电压中的工频分量与电源电

势总是反相。可见,若单相重合闸在恢复电压拍频的峰值时刻重合,即断开相线路侧电压 $U(\omega_1 t) = U_1 + U_2$,此时电源电势近似为 $e(t) = -E_m$ 。即合闸时刻断路器两侧电压反相,单相重合将产生较高的合闸过电压,可能导致重合失败。

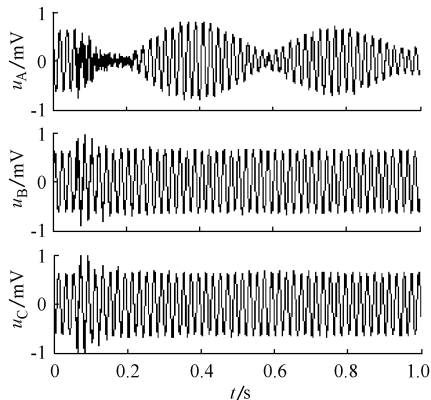


图3 带并联电抗器输电线路单相瞬时性故障的EMTP仿真波形

Fig. 3 EMTP simulation wave of single-phase transient fault in transmission line with shunt reactors

3.3 单相重合闸新方案的提出

考虑到瞬时性故障情况在重合闸重合时,电源电势与断开相恢复电压之间的瞬时电压差对合闸过电压有重大影响。为了尽可能减小重合过电压,应使合闸时两触头间的电压差最小,首先要避免在拍频电压包络线的最大值时合闸,即在其最小值时合闸。重合闸装置可以实时监测断开相电压,确定合闸时间。

假设断路器合闸操作的固有动作时间为 τ (约为几十 ms),恢复电压幅值包络线的振荡周期为 T (几百 ms)。重合闸装置在未重合阶段,实时监测拍频恢复电压幅值包络线的变化,计算得到 $U(\omega_1 t)$ 从最小值变化到最大值时的时间 $T/2$,在拍频恢复电压达到峰值时,延时 $T/2 - \tau$ 的时间后发出重合令,实现重合闸在拍频恢复电压的最小值附近重合,从而避免了很高的单相重合过电压。在 750 kV 输电线路,这种自适应重合闸与判断瞬时性或永久性故障的自适应重合闸同样重要。

4 结语

750 kV 输电线路绝缘子能够承受的过电压裕度较低,因此 750 kV 线路继电保护与自动装置的动作必须考虑限制过电压。本文针对 750 kV 输电线路分布参数特性,阐述了空载长线的电容效应及互感效应。从过电压的角度分析了单相重合闸在处理 750 kV 输电线路单相接地故障中的巨大优势。根

据 750 kV 输电线路广泛应用并联电抗器的实际情况,本文分析了单相重合闸应用的前提条件并提出了并联电抗器中性点小电抗的正确取值范围,这不仅有利于限制过电压,远离谐振状态,而且还有利于潜供电弧的熄灭,提高重合成功率。最后,本文分析计算了单相重合闸期间恢复电压的拍频振荡特性,提出了 750 kV 输电线路单相重合闸的新方案。理论分析与 EMTP 仿真测试表明,本文提出的单相重合闸方案有利于 750 kV 输电线路的可靠供电与安全操作。

参考文献

- 1 贺家李,李永丽,郭征,等(He Jiali, Li Yongli, Guo Zheng, et al). 特高压输电线路继电保护配置方案:(一)特高压输电线路的结构与运行特点(Relay Protection for UHV Transmission Lines: Part One Construction and Operation Characteristics). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(23):1~6
- 2 贺家李,李永丽,李斌,等(He Jiali, Li Yongli, Li Bin, et al). 特高压输电线路继电保护配置方案:(二)保护配置方案(Relay Protection for UHV Transmission Lines: Part Two Disposition of Relay Protection). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(24):1~6
- 3 亚历山大罗夫(Александров Г. Н.). 超高压送电线路的设计(Design of EHV Transmission Lines). 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1987
- 4 Li Yongli, Li Bin, Sheng Kun. Analysis, Control and Depression of Operational and Transient Over-voltages of 750 kV Power Systems. In: Proceedings of the 4th International Conference on Power Transmission & Distribution Technology. Changsha: 2003. 1230~1237
- 5 李斌,李永丽,贺家李,等(Li Bin, Li Yongli, He Jiali, et al). 750 kV 输电线路保护与三相重合闸动作的研究(The Study on Protective Relay and Three-phase Reclosure of 750 kV Transmission Lines). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2004, 28(12)
- 6 要焕年,曹梅月(Yao Huannian, Cao Meiyue). 电力系统谐振接地(Resonant Ground Connection of Power System). 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 2000
- 7 李斌,李永丽,黄强,等(Li Bin, Li Yongli, Huang Qiang, et al). 单相自适应重合闸相位判据的研究(The Study on Phase Criterion for Single-pole Adaptive Reclosure). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(22)

李斌(1976—),男,博士研究生,研究方向为 750 kV 输电线路继电保护与重合闸。E-mail: libin_tju@eyou.com

李永丽(1963—),女,教授,博士生导师,中国电机工程学会继电保护专委会委员,研究方向为电力系统故障分析与继电保护。E-mail: yonglili@etang.com

贺家李(1925—),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会名誉理事,俄罗斯工程院外籍院士,研究方向为电力系统故障分析与继电保护。E-mail: jlh86222@yahoo.com

