

一种超高压输电线路恢复电压的精确计算方法

薛明军, 陈福锋, 姚亮

(国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032)

摘要:在超高压输电线路单相重合闸的成功取决于故障处潜供电弧能否快速自熄,恢复电压和潜供电流是影响潜供电弧的决定性因素。分析了影响恢复电压的主要因素,对不带并联电抗线路提出了利用系统和线路参数以及负荷电流,精确计算恢复电压的方法,并通过EMTP仿真数据证明了该方法的正确性,该仿真结果可以用到高压输电线路保护装置中的自适应重合闸判据中。

关键词:超高压;输电线路;恢复电压;潜供电流;瞬时性故障

中图分类号:TM726.1

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2014)05-0059-03

输电线路由于分布在户外,受自然条件的影响最为显著,因此发生故障的几率较高。根据运行经验,高压输电线路超过70%的故障为单相接地故障,而其中80%以上又为瞬时性故障。瞬时性故障及时重合断路器有利于连续供电和电网的稳定运行^[1]。高压输电线路发生单相接地故障时,健全相对故障相的耦合使得故障相存在较大的恢复电压和潜供电流,影响单相重合闸的成功。对于高压输电线路,存在带并联电抗器和不带并联电抗器2种情况。后者故障时恢复电压可能比前者高,盲目重合断路器将对系统造成更大的危害^[2,3],因此对不带并联电抗器线路恢复电压的研究尤为重要。

近年来国内外学者在恢复电压方面进行了大量的研究,提出了很多恢复电压的相关应用,如文献[4-6]利用故障后恢复电压的幅值或相位特征来判别故障是否为永久性故障,从而完成自适应重合闸判据;文献[7-9]利用恢复电压的大小来判别线路是否需要装设并联电抗器或快速接地开关来减小恢复电压。潜供电流与恢复电压幅值的大小是超高压输电线路潜供电弧能否自熄的决定因素,为保证单相自动重合闸的成功,需将恢复电压和潜供电流限制在一定数值以下,因此恢复电压计算方法的精确性显得尤为重要。文中通过对线路两侧断路器单相跳开后的非全相运行电路进行较精确求解,提出利用系统与线路参数以及运行负荷来计算线路的恢复电压的方案。

1 路恢复电压

系统发生单相接地故障后,随着故障相两端断路器的跳开,瞬时性故障电弧熄灭后,故障点消失,电路转非全相运行,故障相通过与健全相的电容耦合和电磁耦合使得断开相仍存在较高恢复电压,其端电压由电容耦合电压和电磁耦合电压叠加组成,对不带并

联电抗器线路可以进行 π 型等效计算,如图1所示,图中 C_m 为线路互感电容, C_0 为线路对地电容, Z_s 为线路自阻抗。

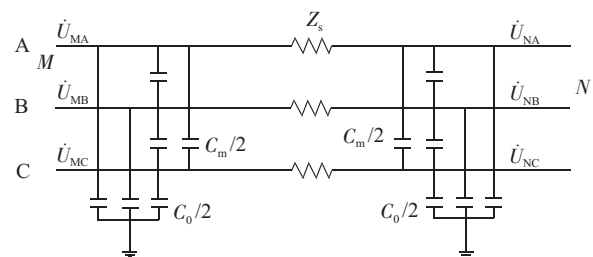


图1 线路 π 型等值模型

以A相瞬时性故障为例进行分析,两端A相断路器跳开后,取电路进入稳定状态后的恢复阶段进行分析,当瞬时性故障电弧熄灭后,故障点消失,此时可以将图1的 π 型等值电路简化为图2,其中 \dot{U}_{xl} 为健全相(B和C)对于断开相(A相)的电磁感应电压, \dot{U}_{xl} 与健全相电流成正比, Z_M 为线路互阻抗。单位长度的电磁耦合电压可以表示为^[10-13]:

$$\dot{U}_{xl} = (\dot{I}_{MB} + \dot{I}_{MC}) \dot{Z}_M \quad (1)$$

其中 \dot{Z}_M 为单位长度线路相间互感阻抗。

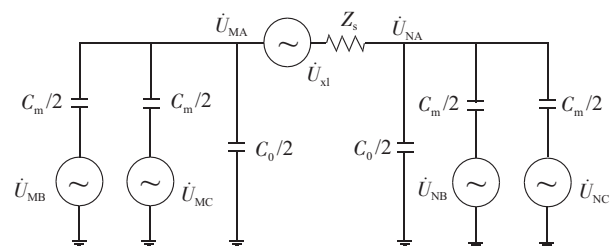


图2 A相断开后等值电路

1.1 瞬时性故障断开相端电压的计算

由于线路自阻抗 Z_s 相对于线路容抗值小得多,可以忽略不计,利用戴维南定理将图2简化为图3所示^[1]。

由图3简化等值电路可知:M端电压 \dot{U}_{MA} 可用如下

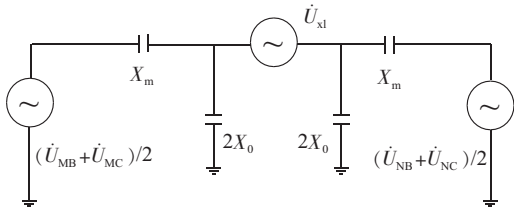


图3 A相断开后简化等值电路

公式表示:

$$\dot{U}_{MA} = k_1 (\dot{U}_{MB} + \dot{U}_{MC})/2 + k_2 (\dot{U}_{NB} + \dot{U}_{NC})/2 + k_3 \dot{U}_{xl} \quad (2)$$

式中: k_1, k_2, k_3 为图中电路相应的等值阻抗比值, 其值分别为:

$$k_1 = k_2 = \frac{2X_0 // 2X_0 // X_m}{2X_0 // 2X_0 // X_m + X_m} \quad (3)$$

$$k_3 = \frac{2X_0 // X_m}{2X_0 // X_m + 2X_0 // X_m} = \frac{1}{2} \quad (4)$$

A相断开时, BC两相运行时零序电流可以用式(5)来表达^[14-17]:

$$3\dot{I}_{M0} = \dot{I}_{MB} + \dot{I}_{MC} = 3 - \dot{I}_{MA} / \left(1 + 2 \frac{\dot{Z}_{0\Sigma}}{\dot{Z}_{1\Sigma}}\right) \quad (5)$$

式中: \dot{I}_{MA} 为系统正常运行时 M 侧 A 相负荷电流; $\dot{Z}_{0\Sigma}$, $\dot{Z}_{1\Sigma}$ 分别为断线端口的零序和正序综合阻抗。

$$\begin{cases} \dot{Z}_{0\Sigma} = \dot{Z}_{M0} + \dot{Z}_0 + \dot{Z}_{N0} \\ \dot{Z}_{1\Sigma} = \dot{Z}_{M1} + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_{N1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\dot{Z}_{M0}, \dot{Z}_{N0}, \dot{Z}_0$ 分别为 M 侧系统、N 侧系统和线路的零序阻抗; $\dot{Z}_{M1}, \dot{Z}_{N1}, \dot{Z}_1$ 分别为 M 侧系统、N 侧系统和线路的正序阻抗。N 侧的 B 相、C 相电压可以用 M 侧的电压来表示:

$$\begin{cases} \dot{U}_{NB} = \dot{U}_{MB} - \dot{I}_{MB} \cdot \dot{Z}_s - \dot{I}_{MC} \cdot \dot{Z}_M \\ \dot{U}_{NC} = \dot{U}_{MC} - \dot{I}_{MC} \cdot \dot{Z}_s - \dot{I}_{MB} \cdot \dot{Z}_M \end{cases} \quad (7)$$

非故障相受故障的影响不大, 其电压特征量变化很小, 一般计算中, 可认为故障前后不变。则有:

$$\dot{U}_{MB} + \dot{U}_{MC} = -\dot{U}_{MA} \quad (8)$$

将式(1)、(5)、(7)、(8)带入到式(2)中, 恢复电压的表达式可以整理为:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{MA} = & -k\dot{U}'_{MA} - \frac{k}{2} 3\dot{I}_{M0} (\dot{Z}_s + \dot{Z}_M) + \frac{3}{2} \dot{I}_{M0} \dot{Z}_M = \\ & -k\dot{U}'_{MA} - k_s \dot{I}'_{MA} \dot{Z} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\dot{U}'_{MA}, \dot{I}'_{MA}$ 分别为系统正常运行时的 A 相 M 端电压和电流; k, k_s 值分别为:

$$k = k_1 = \frac{X_0}{2X_0 + X_m} = \frac{\omega C_m}{2\omega C_m + \omega C_0} = \frac{C_1 - C_0}{2C_1 + C_0} \quad (10)$$

$$k_s = \frac{3}{2} (\dot{Z}_M - k\dot{Z}_M - k\dot{Z}_s) / \left(1 + 2 \frac{\dot{Z}_{0\Sigma}}{\dot{Z}_{1\Sigma}}\right) \quad (11)$$

式中: C_1, C_0 分别为线路的正序电容和零序电容。线路断开两相恢复电压向量如图4所示。

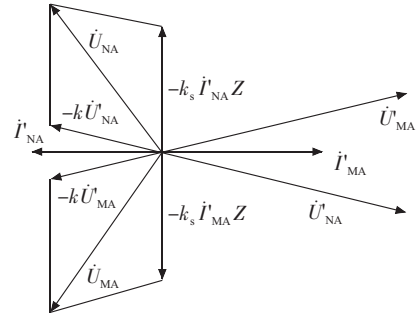


图4 恢复电压向量

1.2 永久性故障断开相端电压

永久性故障时, 故障点的电压同样可看成是电容耦合电压与电感耦合电压在该点产生的电压的叠加。但电弧熄灭后, 故障点依然存在, 电路中端电压中电容耦合电压很小, 只有电磁耦合电压。因此相对瞬时性故障时, 永久性故障端电压要小得多。

1.3 恢复电压分析

根据以上分析, k 值与线路的正序电容和零序电容有关, 即与输电线路的导线布置方式有关, k_s 则与系统和线路的阻抗参数都有关系, 同时恢复电压还与系统的电压等级和输送功率有关, 系统电压等级越高, 恢复电压越高; 系统输送功率越大, 恢复电压越高。因此, 高电压大功率输送线路需要架设并联电抗器来减小恢复电压的影响, 从而提高单相重合闸的成功率。

从上述分析知, 还可将此恢复电压计算公式应用到高压数字式线路保护装置中去, 将 k 和 k_s 值作为定值来开放, 对于一个确定的线路, 可以利用线路和系统参数来完成整定, 单相故障跳开后进入稳态阶段后, 利用保护安装处测量得到的线路电压与式(8)正常运行时估算的恢复电压进行比较, 误差在一定范围内就判别为瞬时性故障, 否则为永久性故障, 据此来构成自适应重合闸判据。但当现场无法获取精确的线路参数时, 则需要评估参数误差对该判据的影响, 是否会造成该判据误动。

2 仿真实验

2.1 仿真系统及其参数

为验证文中提出的估值计算的准确性, 采用仿真模型对所提方法进行了分析验证。模型采用简单的 500 kV 两机系统, 如图5所示, M, N 为保护安装处。

每公里线路参数为 $R_1 = 0.022 \Omega, R_0 = 0.183 \Omega, L_1 =$

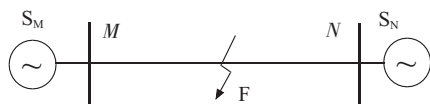


图5 仿真系统

$0.28 \Omega, L_0=0.86 \Omega, C_1=0.013 \mu\text{F}, C_0=0.0092 \mu\text{F}$ 。M 侧系统: $Z_{m1}=0.66+8.4j, Z_{m0}=1.13+14.38j$ 。N 侧系统: $Z_{n1}=1.1+14j, Z_{n0}=2.21+28.1j$ 。

2.2 仿真结果及其分析

采用 EMTP 分别针对不同线路长度和不同功角的恢复电压进行仿真, 线路长度分别为 50 km, 100 km, 150 km 和 200 km 时, 两端电源相角差分别为 $60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ 时, 模拟在线路中点发生 A 相瞬时性故障, 断路器在 100 ms 跳开, M 端恢复电压的计算值和实际值如表 1 所示。表中计算的恢复电压为故障跳开后 500 ms 时刻的值, 采样频率为 2000 kHz。

表 1 仿真结果对比

恢复电压 /kV	线路长度 /km				
	50	100	150	200	
60°	实际值	79.5	80.2	76.1	74.6
	计算值	78.9	80.0	75.7	74.1
	误差 /%	-0.75	-0.25	-0.53	-0.67
45°	实际值	77.3	77.8	71.2	69.2
	计算值	76.8	77.1	70.8	68.8
	误差 /%	-0.62	-0.90	-0.56	-0.58
30°	实际值	73.8	74.1	65.1	61.7
	计算值	73.4	73.6	64.6	61.2
	误差 /%	-0.54	-0.67	-0.77	-0.81

由表 1 可以看出, 此计算方法与实际值相对误差小于 1%, 对高压输电线路, 恢复电压的大小与线路长度, 输送负荷都存在一定的关系, 文中提出的利用系统参数和线路正常运行工况来估算恢复电压的方案具有很高的准确度, 仿真结果与理论分析一致。

图 6 是 A 相瞬时性故障时 A 相恢复电压随时间变化的曲线, 由图可见, 恢复电压进入稳态阶段需要一段时间, 而这个时间跟线路的参数有关系, 现场运行中单相重合闸的时间一般较长, 保证了有足够的稳态数据窗去执行该判据, 该判据可以在故障切除后 300 ms 之后再投入, 以躲过恢复电压的暂态过程。

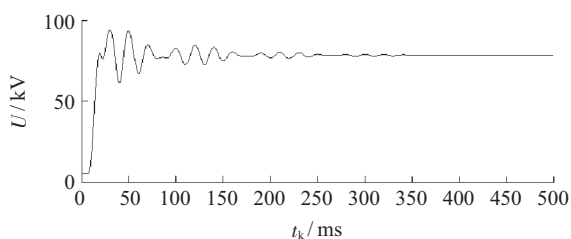


图 6 A 相瞬时性故障恢复电压

3 结束语

分析了影响恢复电压的主要因素, 简化了在线路不带并联电抗器的单相接地故障下断路器跳开后非全相运行时的等效电路, 提出了利用系统参数和负荷电流来精确估算线路恢复电压的计算方法并论证之, 最后通过 EMTP 仿真结果证明了该计算方法的准确性, 此方法原理简单、计算量小, 可用于各种不带并联电抗器的超高压输电线路中。

参考文献:

- [1] 商立群, 白维祖, 程刚. 带并联电抗器的线路单相自适应重合闸故障判别原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 81-84.
- [2] 商立群, 施围. 同杆双回输电线路的潜供电流与恢复电压[J]. 高压技术, 2003, 29(10): 22-25.
- [3] 郭征, 贺家李, 王俊. 特高压长线路单相自适应重合闸的新原理[J]. 高压技术, 2009, 35(5): 1005-1008.
- [4] 林莘, 柏娜, 徐建源. 超高压线路上潜供电弧熄灭特性的分析[J]. 高压技术, 2006, 32(3): 7-12.
- [5] 孙秋芹, 王冠, 李庆民. 特高压双回线路耦合效应的计算与分析[J]. 高压技术, 2009, 35(4): 737-742.
- [6] 刘浩芳, 王增平, 徐岩. 带并联电抗器的超/特高压输电线路单相自适应重合闸故障性质识别判据[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 29-34.
- [7] 林军, 郑荣进. 利用中性点电抗器实现高压输电线路单相自适应重合闸[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 89-92.
- [8] 王增平, 刘浩芳, 徐岩. 基于改进型相关法的单相自适应重合闸新判据[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 49-55.
- [9] 索南加乐, 孙丹丹, 付伟. 带并联电抗器输电线路单相自动重合闸永久故障的识别原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 11(26): 75-84.
- [10] 索南加乐, 邵文权, 宋国兵. 带并联电抗器输电线路永久性故障识别新方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 80-85.
- [11] 李志红. 输电线路单相瞬时性故障的判别研究[J]. 继电器, 2007, 35(26): 102-106.
- [12] 程玲, 吴剑波. 自适应单相重合闸的研究现状及展望[J]. 继电器, 2006, 35(26): 246-250.
- [13] 程玲, 徐玉琴, 宋祜霖. 基于电弧特性的特高压输电线路单相自适应重合闸[J]. 继电器, 2007, 35(22): 18-22.
- [14] 葛耀中. 在单相自动重合闸过程中判别瞬时和永久故障的方法[J]. 西安交通大学学报, 1984, 18(2): 23-32.
- [15] 范越, 施围. 输电线路单相自动重合闸中电压判据的修正[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 44-47.
- [16] 王海蓉, 袁兆强, 鲁明芳, 等. 电力系统自适应重合闸技术[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(3): 81-84.
- [17] 宋亮亮, 汪萍, 袁宇波, 等. 双重化配置线路保护的重合闸功能运行分析[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(1): 18-21.

作者简介:

薛明军(1983), 男, 湖北荆州人, 工程师, 从事高压继电保护研究开发工作;

5 结束语

较传统的采样频率频率转换方法而言,零相位滤波算法有地解决了高阶 FIR 滤波器带来的群延迟较大的问题,极大地提高了保护动作的快速性,同时在区外故障时转换后的误差电流能够满足保护精度的要求,不会造成区外故障时的误动作,有效地实现了测量环节和智能保护装置之间频率的快速统一,理论分析和仿真实验证明了文中所提算法的可行性与有效性。

参考文献:

- [1] 李九虎,郑玉平,古世东,等. 电子式互感器在数字化变电站的应用[J]. 电力系统自动化,2007,31(7):94-98.
- [2] 周斌,张何. 基于电子式互感器的变电站智能设备采样接口技术[J]. 江苏电机工程,2007,26(2):37-39.
- [3] 刘文,杨慧霞,祝斌. 智能电网技术标准体系研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(10):120-126.

- [4] 陆玉军,徐勇,薛军,等. 智能变电站中低压母线保护设计[J]. 江苏电机工程,2014,33(3):21-25.
- [5] 杨经超,尹项根,陈德树,等. 采样值差动保护动作特性的研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(9):71-77.
- [6] 刘静,邵能灵,李坤. T型线路电流差动保护研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):58-63.
- [7] 宗孔德. 多采样率信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,1996:105-110.
- [8] 徐光福,陆于平,吴崇昊,等. 多采样率信号处理在数字化变电站差动保护中的应用[J]. 电力系统自动化,2007,31(21):44-48.
- [9] 胡广书. 数字信号处理理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社,2003:74-82.
- [10] 丛伟,张琳琳,程学启,等. 基于故障电流幅值与相位差的电流差动保护判据[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):26-30.

作者简介:

薛蓉(1987),女,江苏江都人,硕士,从事电力工程设计工作。

Research on the Impacts of Multi-Rate Conversion Algorithm on Differential Protection

XUE Rong

(Nanjing Electric Power Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: In the smart substation, data collected from any place is available for the entire substation' is required by data acquisition of merging unit. Therefore, the digital interface of merging units should possess the sampling rate conversion function and meet the demand of differential protection. This paper studies the mechanism of sampling rate conversion with cascade connection of decimation and interpolation. Also, the impacts of sampling rate conversion on differential current of differential protection is analyzed. To reduce group delay of high order Finite Impulse Response (FIR) in sampling rate conversion, a zero phase filtering algorithm is designed. Combining this algorithm with decimation and interpolation algorithm, the data from ECTs with different sampling rates can be converted to the same one. This achieves a unified sampling rate and improves the action speed of differential protection.

Key words: sampling rate conversion; differential current; group delay; zero phase filtering

(上接第 61 页)

陈福锋(1979),男,江苏宜兴人,高级工程师,从事继电保护研究开发工作;

姚亮(1979),男,江苏南京人,高级工程师,从事继电保护研究开发工作。

An Accurate Method for Recovery Voltage Calculation on Extra High Voltage Transmission Lines

XUE Mingjun, CHEN Fufeng, Yao Liang

(Guodian Nanjing Automation Co. Ltd., Nanjing 210032, China)

Abstract: Single phase adaptive reclosing technology improves the reliability and the stability of the power system. A successful reclosing is depended on quick and automatic extinction of the secondary arc. The factors affecting the secondary arc are recovery voltage and secondary arc current. The paper proposes a method to calculate the accurate recovery voltage of transmission line without series capacitor by using system and line parameters. Then the main factors affecting recovery voltage are detailed discussed. It shows that recovery voltage is related to transmission line voltage rate, transmitted power, conductor spatial arrangement and line parameters. Simulation results from Electro-Magnetic Transient Program (EMTP) validates the proposed method.

Key words: extra high voltage; transmission line; recovery voltage; secondary arc current; transient fault