

超高压线路潜供电弧电压的频率特性分析

舒亮, 贾磊, 郑士普, 孙冬慧, 施围
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对潜供电弧状态对超高压线路单相自动重合闸影响的问题, 提出了一种基于故障相电压谐波情况的电弧状态判断方法. 该方法在分析了一次及二次电弧的特性及不同补偿度下电弧熄灭后系统振荡特性的基础上, 通过引入总谐波畸变(THD)来反映故障相电压谐波含量的变化. 对不同补偿度的系统运用 EMTP 进行了仿真, 结果表明电弧熄灭后, 故障点电压的 THD 值将显著降低, 为利用故障点电压的谐波情况来判断电弧状态提供了依据.

关键词: 超高压线路; 补偿度; 单相自动重合闸; 潜供电弧; 总谐波畸变

中图分类号: TM762.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)06-0712-05

Frequency Characteristics of Arc Voltage on Extra High Voltage Transmission Line

Shu Liang, Jia Lei, Zheng Shipu, Sun Donghui, Shi Wei
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Considering the importance of the status of secondary arc to the single-phase auto-reclosure of extra high voltage transmission line, a novel approach based on the harmonic of faulted phase is proposed to determine the arc status, where the characteristics of the prime and secondary arcs and the oscillation of the faulted phase with different compensation levels are analyzed, then the total harmonic distortion (THD) is introduced to reflect the harmonic content of the faulted phase. The EMTP simulations at different compensation levels indicate that after the arc extinction, the THD of the faulted phase gets distinctly low to judge arc status.

Keywords: extra high voltage transmission line; compensation level; single-phase auto-reclosure; secondary arc; total harmonic distortion

超高压输电线路是我国电力传输系统的重要组成部分, 其安全稳定运行直接关系系统的可靠性, 由于超高压输电线路的故障大多数为单相瞬时性故障^[1], 因此广泛采用单相自动重合闸来恢复线路供电. 但是, 由于潜供电弧的影响, 使弧光通道去游离时间增加, 绝缘强度恢复时间增长, 给判断单相自动重合闸的故障性质、确定合闸时间带来困难^[2]. 目前, 判断故障性质的主要方法为电压判据, 即断开相电压中存在电容耦合电压, 由于并联电抗器补偿的存在, 使判据的准确性受到影响. 针对电压判据的一些问题, 本文研究了超高压输电线路在不同补偿度

下故障相电压的频率特性, 分析了应用频率特性判别潜供电弧状态的可行性.

1 潜供电弧电压的分析

1.1 潜供电弧产生发展的过程

如图 1 所示, 当线路发生单相接地故障时, 设为 C 相. 由于继电保护以及断路器自身的动作延迟, 故障相线路两侧的断路器 KC1、KC2 并不会立即断开, 线路仍然带故障运行, 此时的故障相与地之间的电弧称为一次电弧, 故障相电流将大于正常时的值, 电压较高但远低于正常值. 随后断路器动作, 故障相

两侧断路器 KC1、KC2 断开,而 A、B 两相仍然正常运行.由于相与相之间存在相间电容和互感,健全相通过相间电容以及线路电感之间的耦合向故障相传递能量,此时的接地电弧称作潜供电弧^[3],也称为二次电弧.故障相的电压由耦合程度决定,一般小于一次电弧时的电压,电流也小于一次电弧时的值.若是永久性故障,则电弧一直存在,否则故障消失后,电弧通道逐渐去游离,电弧将会熄灭,这与故障点的气象条件、线路输送的电流、线路长度等有关^[4].电弧熄灭后,故障相电压升高,自动重合闸装置检测到后,线路重合,恢复正常运行.

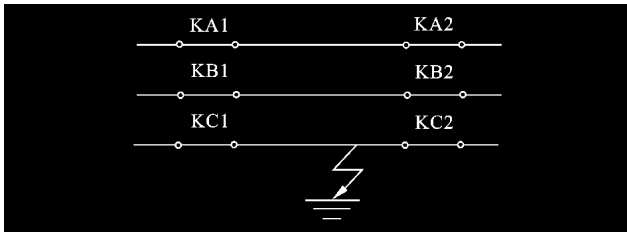


图1 潜供电弧的发展过程

因此,潜供电弧的状态、如何判断电弧是否熄灭以及区分永久性与暂时性电弧对于自动重合闸是否成功有很大影响.

1.2 一次电弧及潜供电弧特性分析

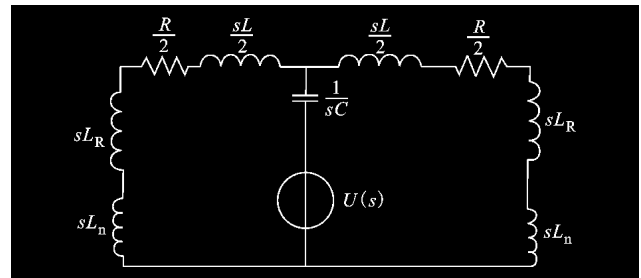
目前,在自动重合闸基础上发展起来的自适应重合闸理论,利用故障相电压存在耦合电压这一特点区分暂时性和永久性故障,应用较广.然而,在潜供电弧产生发展过程中的暂态现象以及含有的谐波分量为我们区分潜供电弧的不同状态提供了信息.

文献[5-7]均指出,由于一次电弧时电流很大,因而一次电弧具有较稳定的特性,而潜供电弧则具有极强的随机特性,它的状态随着电弧长度的变化而改变,其特性往往使用具有较长电弧、较低电流的电弧特性描述.电弧存在熄灭重燃的过程加剧了电弧的非线性特性.国外学者在大量研究的基础上提出了电弧的数学模型^[6],将电弧用非线性电阻表示,用微分方程描述其特性.经过实践检验,证明该模型是可行的^[5-7].研究表明,潜供电弧伏安特性类似于铁磁体的磁滞特性,因而表现在断开相电压上,除了线路间的电容、电磁耦合分量外,还有很强的谐波分量.

电弧熄灭后,若线路无并联电抗器补偿,线路对地电容中的能量迅速释放,不会引起振荡^[8].为了限制工频过电压,超高压线路往往会装设并联电抗器,当电弧熄灭时,线路电容与并联电抗器形成振荡回路,对于两端都有并联电抗器时,其等效电路如图2

所示.其导纳函数为

$$H(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1}{(sL_n + sL_R + R/2 + sL/2)/2 + 1/(sC)} = \frac{4sC}{(2(L_R + L_n) + L)Cs^2 + RCs + 4} \quad (1)$$



R :线路电阻; L :线路电感; L_R :并联电抗器电感值;

L_n :电抗器中性点电感值; C :线路电容

图2 振荡回路等效电路

式(1)的极点为带并联电抗器的线路恢复电压中自由分量的拉普拉斯表达式

$$s = -\frac{R}{2(L + 2L_R + 2L_n)} \pm j \frac{((4L + 8L_R + 8L_n)C - (RC/2)^2)^{1/2}}{(L + 2L_R + 2L_n)C} \quad (2)$$

s 实部为恢复电压衰减系数,虚部为其自由振荡频率.

由式(2)可知,恢复电压衰减系数随 L_R 增大而减小,振荡频率随其增大而减小.又补偿度 K 与 L_R 的关系为

$$K = \frac{U^2(\omega L_R)^{-1}}{U^2 \omega C l} = \frac{1}{\omega^2 C L_R l} \quad (3)$$

因此,自由振荡频率随补偿度 K 增大而增大.潜供电弧熄灭后,线路并联电抗器的存在使断开相中仍然存在一定的谐波分量,但是其振荡频率为一定值,另外由于中性点小电抗器的存在,加剧了恢复电压衰减,谐波情况较潜供电弧阶段要轻.

2 故障相电压的仿真分析

2.1 仿真系统及其参数

离散傅里叶变换在电力系统中被广泛应用于谐波分析,其形式为^[9]

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (4)$$

式中: $x(n)$ 为采样值; N 为采样点数; k 为谐波次数.

设 $U_k = |X_k|$,谐波分量总和 D 定义为^[10]

$$D = \left(\sum_{k=2}^N U_k^2 \right)^{1/2} \quad (5)$$

总谐波畸变(THD)经常运用于电子线路中,用于描述波形的失真,其定义为^[10]

$$\sigma_{\text{THD}} = \frac{D}{U_1} \times 100\% \quad (6)$$

从 THD 的定义可知,由于潜供电弧伏安特性呈现极明显的非线性特性,故而在电弧熄灭前,故障点电压含有较强的谐波分量, D 较大,THD 会较大.若是永久性故障,THD 会一直保持较大值,若为瞬时性故障,电弧熄灭后,电路中不存在非线性元件,只有线路对地电容放电的自由分量,当这一自由分量衰减之后,线路中只存在工频分量, D 几乎接近为 0,THD 也接近为 0.

本文对一个线路进行了大量的仿真,仿真的系统如图 3 所示^[11].

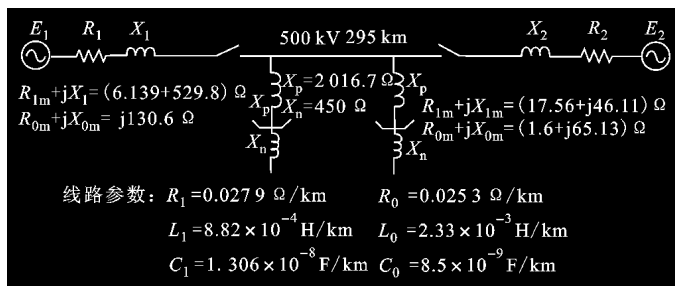


图3 仿真模型

本文采用文献[6]提出的数学模型表现电弧特性,应用 EMTP 的 MODELS 语言予以实现.假设系统在 0.025 s 时发生单相接地故障,电弧被投入系统中,线路断路器于 0.075 s 左右跳开,当电弧电流过零时电弧熄灭.考虑系统 3 种不同补偿情况下,即不带并联电抗器、仅末端带并联电抗器、两端都带并联电抗器时,C 相末端发生接地故障时,THD 值的变化.

2.2 仿真结果及分析

根据以上条件,仿真结果如图 4~图 9 所示,仅末端带并联电抗器时,其补偿度为 41%,两端都带并联电抗器时,补偿度为 82%.

由以上仿真中故障相电压波形及其 THD 图可知,系统正常运行时,THD 很低,接近于 0.随着系统发生接地故障,系统从稳态进入一个暂态的过渡过程,THD 值升高,过渡过程结束后,一次电弧的燃烧较为稳定,THD 值降低.随后,线路断路器断开,系统又经历一次过渡过程,THD 值又迅速升高,然后进入二次电弧阶段,由于二次电弧的长度会因周围环境影响而改变,非线性特性很强烈,THD 值一

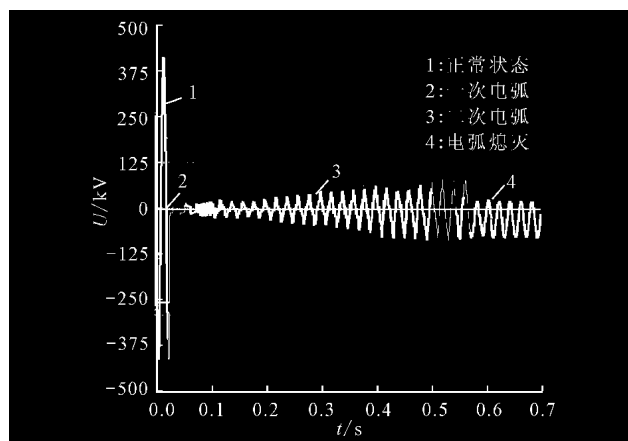


图4 不带并联电抗器的故障相电压波形

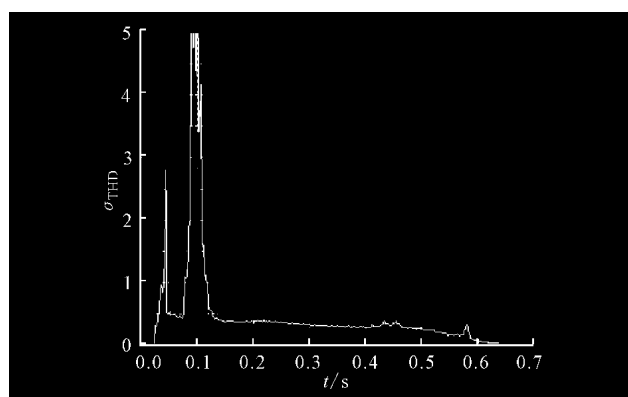


图5 不带并联电抗器时的故障相电压 THD

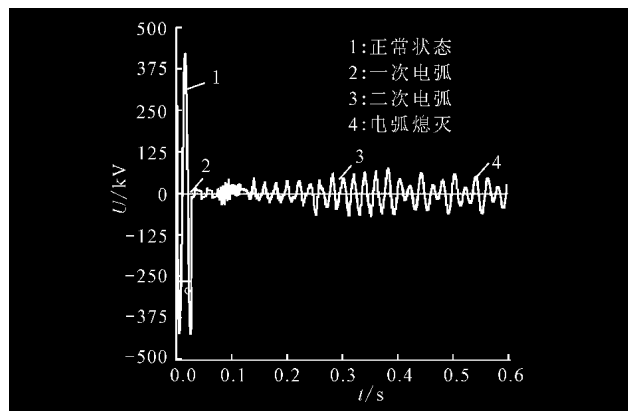


图6 末端带并联电抗器的故障相电压波形

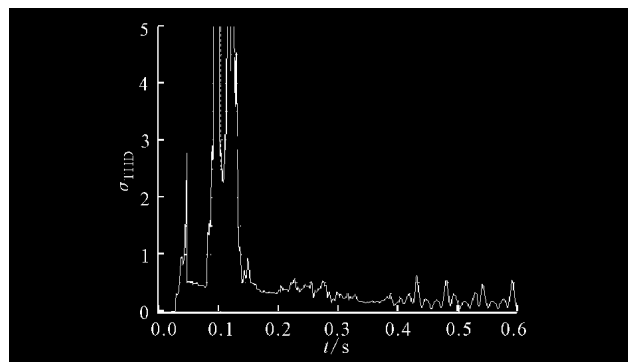


图7 末端带并联电抗器的故障相电压 THD

直较高.所以,在一次和二次电弧阶段,故障相电压中谐波电压占主要地位,而且二次电弧阶段也远高

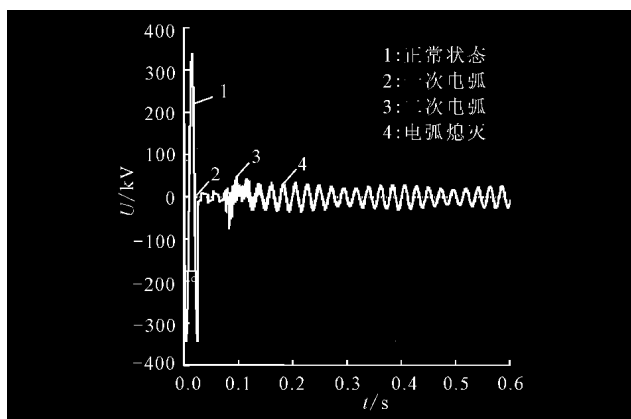


图8 两端都带并联电抗器的故障相电压波形

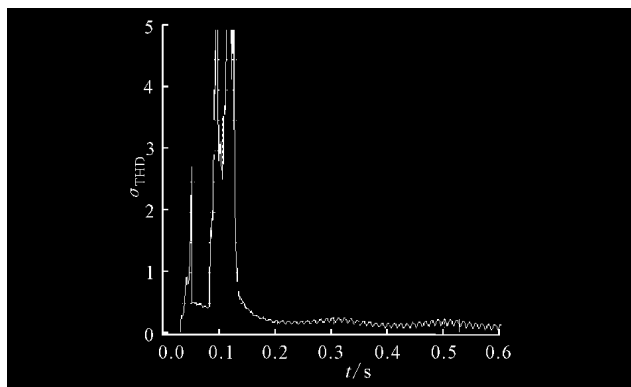


图9 两端都带并联电抗器的故障相电压 THD

于一次电弧阶段.在电弧熄灭后,THD有一个突变,迅速降低,这是由于系统从一个暂态的非线性阶段进入相对稳定的阶段,谐波含量大大减少.

随着补偿度的不同,故障相电压的THD情况也不一致.在没有并联电抗器补偿时,电弧燃烧时间较长,电弧熄灭后,故障相电压THD值很小,接近于0.从恢复电压波形上可以看出,恢复电压主要是工频分量,外加一个直流分量,这是由于此时恢复电压由相间电容和电磁耦合所致,主要为工频分量,而且存在零序分量.

仅末端有并联电抗器补偿时,恢复电压波形上除了工频分量外,有一个频率低于工频周期的电压叠加于工频分量之上.这是由于电弧熄灭后,并联电抗器与线路电阻和电容形成RLC振荡造成的,由式(2)可得,其振荡频率 $f=31\text{ Hz}$.对电弧熄灭后的故障相电压做傅里叶分析,如图10所示,可知故障相电压中确实含有此振荡频率.

在两端都有并联电抗器时,由式(2)可得 $f=43\text{ Hz}$,接近于工频频率,故其恢复电压波形近似于正弦波,表现在其THD图上,有小幅的振荡.对恢复电压做傅里叶分析,如图11所示,由于补偿度较高,相间耦合的工频电压分量较低,主要为振荡频率分量.

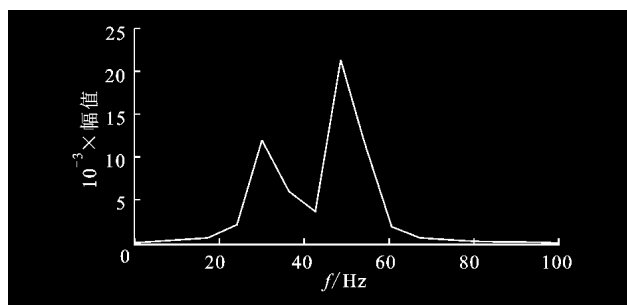


图10 末端带并联电抗器的线路故障相恢复电压频率特性

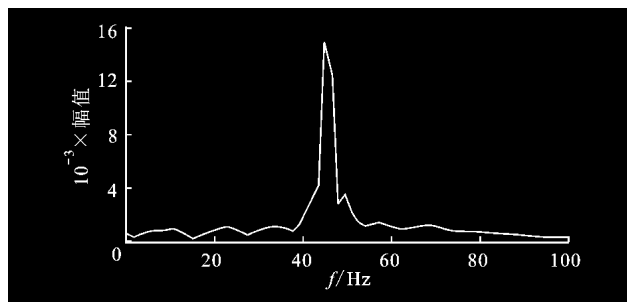


图11 两端带并联电抗器的线路故障相恢复电压频率特性

3 结 论

由于潜供电弧具有强烈的随机性,给线路接地故障状态用其他方法判断带来困难,而谐波信息由系统本身参数决定,可以作为判断故障状态的依据.本文分析了不同补偿度时故障相电压中的谐波情况,并分析了故障电压和故障相恢复电压中谐波来源及频率特性.系统正常运行时,谐波含量很低,发生接地故障后,由于电弧的非线性特性,导致故障相电压中含有大量谐波,通过引入THD变量,可以清楚的表征其谐波特性.电弧熄灭后THD值的降低,可以为判断电弧状态提供参考依据.经仿真结果验证,该方法准确可靠.

参考文献:

- [1] 索南加乐,孙丹丹,付伟,等.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,2006,26(11):75-81.
Suonan Jiale, Sun Dandan, Fu Wei, et al. Identification of permanent faults for single-phase auto-reclosure on transmission lines with shunt reactors [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 75-81.
- [2] 贺家李,宋从矩.电力系统继电保护原理[M].北京:中国电力出版社,1994.
- [3] 林莘,何柏娜,徐建源.超高压线路上潜供电弧熄灭特性的分析[J].高电压技术,2006,32(3):7-9.
Lin Xin, He Baina, Xu Jianyuan. Analysis of secondary arc extinction characteristics on UHV line extinguish

- [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 7-9.
- [4] 商立群, 施围. 超高压同杆双回输电线路中熄灭潜供电弧的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 60-63.
Shang Liqun, Shi Wei. Study of the secondary arc extinction at EHV double circuit transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 60-63.
- [5] Kizilcay M, Ban G, Prikler L, et al. Interaction of the secondary arc with the transmission system during single-phase autoreclosure [C]//Proceedings of IEEE Bologna Power Tech Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2003: 23-26.
- [6] Johns A T, Aggarwal R K, Song Y H. Improved technique for modeling fault arcs on faulted EHV transmission systems [J]. IEE Proc-Gener, Transm Distrib, 1994, 141(2): 148-154.
- [7] Dudurych I M, Gallagher T J, Rosolowski E. Arc effect on single-phase reclosing time of a UHV power transmission line [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 854-860.
- [8] 李斌, 李永丽, 盛鹏, 等. 带并联电抗器的超高压单相自动重合闸的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 52-56.
Li Bin, Li Yongli, Sheng Kun, et al. The study on single-pole adaptive reclosure of EHV transmission lines with the shunt reactor [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 52-56.
- [9] 姜建国, 曹建中, 高玉明. 信号与系统分析基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [10] 杨天宇, 韩冰, 曲通海. 一种基于傅立叶变换的实用工频谐波分析方法[J]. 黑龙江电力技术, 2003, 25(5): 352-354.
Yang Tianyu, Han Bing, Qu Tonghai. Practical industrial frequency harmonics analysis based on Fourier transformation [J]. Heilongjiang Electric Power, 2003, 25(5): 352-354.
- [11] 施围. 电力系统过电压计算[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.

(编辑 杜秀杰)