

# 超高压架空线—电缆混合线路合闸过电压特性仿真分析

石逸雯<sup>1</sup>, 徐 星<sup>1</sup>, 屠幼萍<sup>2</sup>, 陈向荣<sup>1</sup>, 裘立峰<sup>3</sup>, 周文俊<sup>3</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院(浙江省电机系统智能控制与变流技术重点实验室), 浙江 杭州 310027; 2. 华北电力大学高电压技术与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206; 3. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司 浙江 杭州 310000)

**摘 要:**随着城市的发展与供电需求的增大, 架空线—电缆混合线路以其结构灵活等优点得到越来越广泛的应用, 混合线路的合闸操作所引起的过电压已成为系统安全可靠运行的重要影响因素。在此背景下, 采用 PSCAD 仿真软件对某地区 220 kV 超高压架空线—电缆混合线路合闸过电压特性进行研究, 通过建立过电压仿真模型, 仿真分析混合线路合闸操作时产生的合闸过电压特性, 探讨影响合闸过电压的影响因素。结果表明: 考虑三相不同期性时, 合闸过电压比三相同期合闸过电压幅值增加了 10%~20%; 合闸过电压与合闸相角有关, 且合闸过电压幅值与合闸电阻大小呈反比关系; 通过合闸时间的配合, 合闸电阻分级投入, 使能量逐级释放, 在此基础上发现采用多级合闸电阻可更有效地限制操作过电压。研究工作为超高压架空线—电缆混合线路的设计提供了参考依据。

**关键词:**超高压; 架空线—电缆混合线路; 合闸过电压; 合闸电阻

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.021 中图分类号:TM866 文章编号:1673-9140(2022)01-0178-08

## Simulation analysis of closing overvoltage characteristics of overhead-cable hybrid lines with extra high voltage

SHI Yiwen<sup>1</sup>, XU Xing<sup>1</sup>, TU Youping<sup>2</sup>, CHEN Xiangrong<sup>1</sup>, QIU Lifeng<sup>3</sup>, ZHOU Wenjun<sup>3</sup>

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Electrical Machine Systems, College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Key Laboratory of High Voltage & Electromagnetic Compatibility, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. Zhejiang Huayun Power Engineering Design Consulting Company, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** With the development of city and its power supply demand increase, the overhead-cable hybrid line have become more and more widely application due to its flexible structure. The overvoltage caused by the closing operation of the hybrid line has become an important factor affecting the safe and reliable operation of the power system. In this paper, PSCAD simulation software is employed to study the closing overvoltage characteristics of 220 kV extra high voltage (EHV) overhead-cable hybrid lines in a certain area. An overvoltage simulation model is established, and the closing overvoltage characteristics generated during the closing operation of the hybrid line are simulated and analyzed. Finally, the affecting factors of the closing overvoltage are discussed. The results show that, the overvoltage amplitude of three-phase non-synchronous closing is 10%~20% larger than that of three-phase synchronous closing.

收稿日期:2020-12-16; 修回日期:2021-05-19

基金项目:浙江华云电力工程设计咨询有限公司科技项目(2019C01D01P04); 浙江大学“百人计划”(自然科学 A 类)

通信作者:陈向荣(1982-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事先进电气材料与高压绝缘测试技术研究; E-mail: chenxiangrong\_gxh@zju.edu.cn

The closing overvoltage is related to the closing phase angle, and the closing overvoltage amplitude is inversely proportional to the closing resistance. Through the coordination of the closing time, the closing resistors are input in stages to release energy systematically. Thereby, it is found that the application of multi-level closing resistance can limit the operating overvoltage more effectively. The proposed research provides a reference for the design of EHV overhead-cable hybrid line.

**Key words:** extra high voltage; overhead-cable hybrid lines; closing overvoltage; closing resistance

随着城市建设的快速发展,架空线的数量呈指数式增长,电力电缆凭借其占地面积少、维护工作量和可靠性高等优点而被广泛应用。因此,为减轻城市线路通道的压力,输电系统需向架空线—电缆混合线路转变<sup>[1-5]</sup>。

空载线路合闸是在电力系统中比较常见的操作,合闸过电压在超高压及特高压系统中,已经成为决定电网绝缘水平主要依据。架空线和电缆两者在阻抗参数上有着显著的区别,由于架空线波阻抗远大于电缆线路,架空线和电缆接口处波阻抗不连续,导致过电压波在传播过程中会产生复杂的折反射现象<sup>[6]</sup>。因此,为保证系统安全、稳定的运行,有必要对架空线—电缆混合线路的过电压特性展开研究。

国内外学者对合闸过电压展开了广泛地研究。文献[7]利用 ATP/EMTP 仿真软件对某地区 220 kV 电缆进行合闸仿真,得出合闸过电压的分布规律并研究了合闸相位对合闸过电压的影响;文献[8]等采用电磁暂态仿真软件 ATP/EMTP,对合闸空载线路时,高压单芯电缆护套的过电压进行了仿真计算,得出电缆导体上的 2% 统计过电压倍数为 1.50,金属护套上的 2% 统计过电压倍数为 0.20;文献[9]运用 ATP/EMTP 仿真软件研究了 330 kV 架空线空载合闸时,合闸电阻大小对限制空载线路合闸过电压的影响,得到系统过电压幅值与合闸电阻大小呈反比关系。但实际情况下,断路器三相之间存在一定程度的不同期性,文献[10]利用 PSCAD 仿真软件中的 Multiple Run 组件,分析了某 500 kV 超高压交流系统合闸过电压与合闸同期性之间的关系。目前国内外对合闸过电压研究多为单一类型线路,而对于架空线—电缆混合线路合闸过电压特性的研究较少。

本文利用 PSCAD 仿真软件,搭建 220 kV 超高压架空线—电缆混合线路仿真模型,分别对该混合线路架空线同期与非同期合闸操作过电压进行仿真

分析,研究合闸电阻与合闸相角对合闸过电压幅值的影响。

## 1 合闸过电压

### 1.1 合闸过电压形成

合闸过电压发生的根本原因是系统初始状态和稳态的电压幅值存在差异。断路器合闸前,一端为电源电压,另一端空载线路初始电压为零;断路器合闸后,线路电压不变,维持初始零值,此时在断路器两侧存在电压差,进而产生过电压振荡<sup>[11-12]</sup>。

但实际工程中,断路器合闸时会存在一定程度的三相不同期,当一相或两相先合闸,三相电路不对称运行,通过电容耦合使各相架空线电压发生变化。具体分析如图 1 所示。

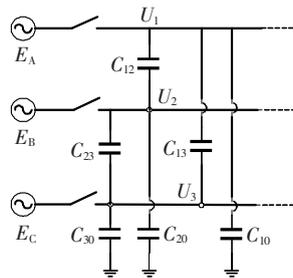


图 1 三相不同期合闸电容耦合电路

Figure 1 Three-phase non-synchronous closing capacitive coupling circuit

若 A 相先合闸,达到稳态后其电压满足  $U_1 = E_A$ 。通过相间电容耦合,使未合闸的 B 相与 C 相感应出同极性电压,此时 B 相电压  $U_2$  与 C 相电压  $U_3$  为

$$\begin{cases} U_2 = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{20}} U_1 \\ U_3 = \frac{C_{13}}{C_{13} + C_{30}} U_1 \end{cases} \quad (1)$$

若 B、C 两相分别在电压达到峰值  $E_B$ 、 $E_C$  时合闸,过电压幅值等于稳态幅值与振荡幅值之和,B 相过电压幅值和 C 相过电压幅值为

$$\begin{cases} 2E_B - U_2 = 2E_B - \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{20}} U_1 \\ 2E_C - U_3 = 2E_C - \frac{C_{13}}{C_{13} + C_{30}} U_1 \end{cases} \quad (2)$$

若B、C相在合闸时的稳态电压 $E_B$ 、 $E_C$ 的极性与感应电压 $U_2$ 、 $U_3$ 的极性相反时,过电压倍数增大。

在架空线—电缆系统中,当电压行波由架空线向电缆传播时,由于架空线与电缆的波阻抗不同,会发生折反射现象。如图2所示,AB为架空线部分, $Z_0$ 为波阻抗,BC为电缆部分,波阻抗为 $Z_c$ 。

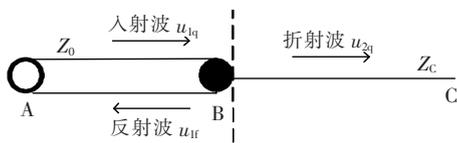


图2 架空线—电缆系统折反射

Figure 2 Overhead line-cable system refraction and reflection diagram

在电缆首端,电压波由架空线传入电缆时,得到折反射电压为

$$\begin{cases} u_{2q} = \frac{2Z_c}{Z_0 + Z_c} u_{1q} \\ u_{1r} = \frac{Z_c - Z_0}{Z_0 + Z_c} u_{1q} \end{cases} \quad (3)$$

电缆线路波阻抗小于架空线路波阻抗,因此在连接点B处,电压折射波与反射波幅值减小,均小于入射波幅值,且折射波极性与入射波相同,而反射波极性与入射波相反<sup>[13]</sup>。

在电缆末端,电缆电压行波一部分传至架空线,一部分反射回电缆线。根据上述原理,可得到电缆传至架空线时,折反射电压为

$$\begin{cases} u_{2q} = \frac{2Z_0}{Z_0 + Z_c} u_{1q} \\ u_{1r} = \frac{Z_0 - Z_c}{Z_0 + Z_c} u_{1q} \end{cases} \quad (4)$$

电缆线路波阻抗小于架空线路波阻抗,因此在连接点B处,电压折射波幅值大于入射波幅值,折射波与反射波的极性规律与电缆首端相同。

## 2 220 kV 架空线—电缆系统模型建立

### 2.1 架空线与电缆参数

该架空线—电缆系统依托浙江省洛迦—鱼东

220 kV 线路工程,具体线路拓扑结构如图3所示。其中,220 kV 架空线总长为 11.8 km,采用二分裂 LGJ-630/45 钢芯铝绞线,接地导线采用 LGJ-120/25 钢芯铝绞线。电缆长为 6.58 km,采用型号为 YJLW-127/220 1×630 的交联聚乙烯绝缘电缆。

在 PSCAD 仿真软件中,架空线和电缆选取与频率相关且能反映过电压波过程的 J. Marti 模型<sup>[13]</sup>。架空线结构如图4所示。电缆部分采用三相水平排布的单芯同轴电缆,每相电缆之间间隔为 0.35 m,电缆结构如图5所示。

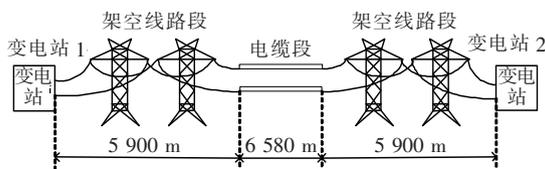


图3 线路拓扑结构

Figure 3 Line topology

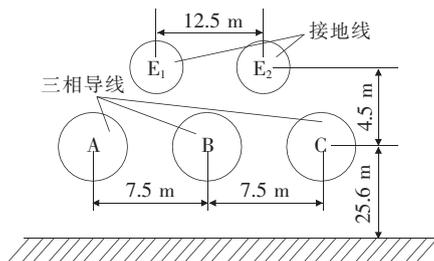


图4 架空线排布

Figure 4 Overhead line layout diagram

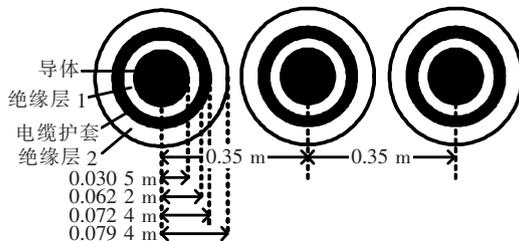


图5 单芯同轴电缆结构

Figure 5 Single-core coaxial bridge cable structure

为限制金属护套层感应电压、减少中直接头数量,电缆往往采用交叉互互联接地<sup>[14]</sup>。本工程中,与架空线相连的电缆部分,首尾段采用护套单端接地,中间部分采用护套交叉互联的连接方式,交叉互互联接地段长为 1.8 km,单端接地端长为 0.59 km,采用一端直接接地,另一端经护层保护器接地的连接方式。通常在交叉互互联接头处过电压幅值较大<sup>[15]</sup>,因此本文在电缆交叉互互联处选取 6 个测量点,分别

距离电缆首端和末端 1.19、1.79、2.39 km, 如图 6 所示。

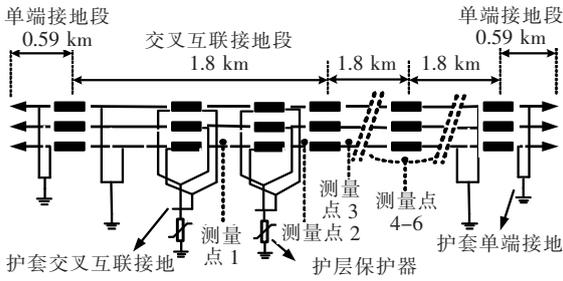


图 6 电缆连接

Figure 6 Cable connection

### 2.2 护层保护器参数

电力行业标准 DL/T 401—2002《高压电力电缆选用导则》中指出电缆经护层保护器接地, 可减小过电压对电缆护套的危害, 从而保护电缆。该工程采用起始动作电压为 4 kV 的 LHQ-220 型号的护层保护器。其伏安特性曲线如图 7 所示。

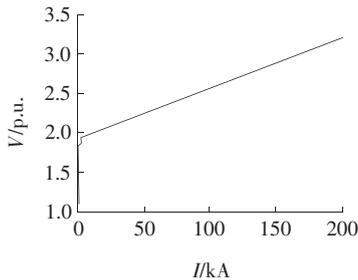


图 7 护层保护器的伏安特性

Figure 7 Sheath protector V-I characteristics

### 2.3 合闸过电压仿真模型

由于操作过电压的幅值服从概率分布, 且操作过电压的幅值具有一定的随机性, 若按照操作过电压的最大值来确定设备的绝缘, 会导致设备绝缘水平设置过高, 故可用 2% 统计过电压来确定绝缘。通常运用蒙特卡洛法对随机变量进行统计, 计算所得的 2% 统计过电压, 即置信概率水平在 98% 内的过电压值, 满足  $P(U > U_{2\%} = 0.02)$  [16]。

断路器的三相合闸的不同期性是指断路器的每一相在收到确切的合闸信号后, 并不能严格的在相应时间合闸, 具体每相合闸时间存在微小的不同。为模拟断路器三相合闸的不同期性, 在 A、B、C 三相同期合闸时间的基础上, 加上一定的时间偏移量, 该时间偏移量为三相不同期时间, 即

$$t_j = t_0 + \Delta t_j, \quad j = A, B, C \quad (5)$$

式中  $t_0$  为三相触头合闸的平均时间, 由断路器的性能参数而决定;  $\Delta t_j$  为在区间  $(-\Delta t_m, \Delta t_m)$  内服从正态分布的三相不同期时间;  $t_j$  为各相触头的实际合闸时间。

在 PSCAD 软件中使用 Multiple Run 组件来模拟多次合闸操作, 如图 8 所示。

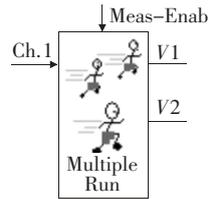


图 8 Multiple Run 组件

Figure 8 Multiple Run component

该组件工作原理如图 9 所示。T、a、b、c 均是通过 Multiple Run 组件输出, 其中, T 为服从均匀分布的时间序列, a、b、c 为在  $-0.0015 \sim 0.0015$  s 区间内服从正态分布的时间序列;  $a_1, b_1, c_1$  信号为断路器三相合闸的时间命令, 在 T 信号的基础上, 分别加上了 a、b、c 的时间偏移。

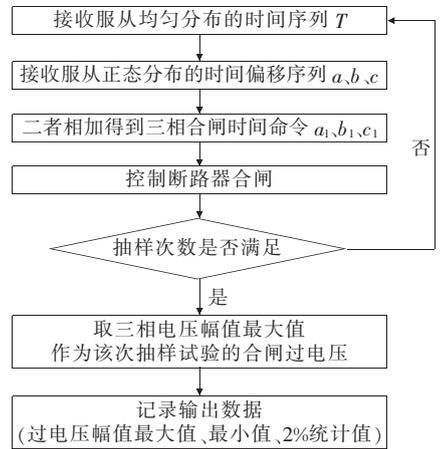


图 9 Multiple Run 模拟三相不同期合闸

Figure 9 Multiple Run simulation of three-phase non-synchronous closing

## 3 合闸过电压仿真分析

### 3.1 合闸同期性对合闸过电压的影响

在实际应用中计算合空载线路的统计过电压时, 过电压服从正态分布, 按照工程规定, 抽样次数应大于 120 次 [16]。

在合闸时间和测量位置固定的情况下, 得到 A

相架空线在不同计算次数下过电压变化情况,如表1所示。由表1可知,不同计算次数对同一仿真算例的合闸过电压  $U_{2\%}$  影响较小,合闸过电压变化波动不足 0.1%,因此可知计算次数对操作过电压的性质和变化规律上没有本质的影响。

表 1 计算次数对架空线合闸过电压的影响

Table 1 The influence of calculation times on the closing overvoltage of overhead lines

次数	$U_{A2\%}/kV$
120	215.913
220	216.127
320	216.140

在实际合闸过程中,合闸的不同期时间的大小也会对合闸过电压产生影响。因此可选取 A 相电压过零时合闸,统计次数均为 120 次,探究不同期时间对合闸过电压的影响。根据国标规定,当各相的同期性未作特殊规定时,分、合闸不同期不应大于 5 ms,因此本文选取 0.001 5、±0.003 0、±0.005 0 s 作为三相不同期时间,测量线路首端过电压情况,如表 2 所示。由表 2 可知,随着不同期时间增大,合闸过电压值略有增加。

表 2 不同期时间对架空线合闸过电压的影响

Table 2 The influence of different periods of time on the closing overvoltage of overhead lines

不同期时间/s	$U_{A2\%}/kV$
±0.001 5	215.914
±0.003 0	216.805
±0.005 0	217.172

### 3.2 合闸电阻对合闸过电压的影响

合闸可分为 2 个阶段,第 1 阶段辅助触头接通,使并联合闸电阻串入阻尼回路;合闸第 2 阶段,主触头闭合,并联合闸电阻被短接,电路如图 10 所示。

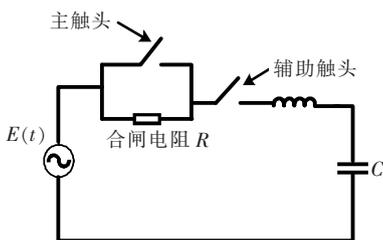


图 10 合闸电路

Figure 10 Closing circuit diagram

2 个合闸阶段对并联合闸电阻的要求不一致,为兼顾两阶段, $R$  通常取 300~600  $\Omega$ <sup>[16]</sup>。

合闸第 1 阶段,线路直接投入合闸电阻时,分别选取合闸电阻为 300、400、500  $\Omega$ ,在 A 相电压过零点 ( $t=0.1$  s) 合闸,测量点位于线路末端,得到架空线电压数据如表 3 所示。对比可知:接入合闸电阻后,合闸过电压值较无合闸电阻时有明显下降,过电压幅值约减小 3 倍,且过电压幅值与合闸电阻呈反比关系。

电缆线路在如图 6 所示的 6 个测量点时,不同合闸电阻下,电缆护套过电压的情况如图 11 所示。合闸电阻的大小并不影响电缆护套过电压变化趋势,即测量点 4 处均为护套过电压第一个明显的峰值点;过电压波在传播过程中,幅值会有所衰减,中等长度的电缆,在电缆末端过电压波发生反射,因此合闸过电压传至电缆末端时会升高。设置合闸电阻可以有效地限制合闸过电压侵入电缆,合闸电阻越大,对电缆护套过电压限制效果越明显;未设置合闸电阻时,末端过电压幅值小于第 1 个明显峰值点,即电缆末端测量点 6 为第 2 个峰值点,而随着合闸电阻的增加,末端反射作用愈发明显,此时电缆末端为护套过电压最大值。

表 3 合闸电阻限制架空线合闸过电压的作用

Table 3 The function of closing resistance to limit the closing overvoltage of overhead line

合闸电阻/ $\Omega$	$U_{A2\%}/kV$
0	109.06
300	39.86
500	27.57

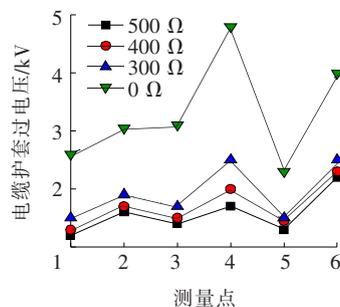


图 11 不同合闸电阻下电缆护套过电压

Figure 11 Overvoltage of cable sheath under different closing resistance

在 PSCAD 中通过对断路器进行时间上的配合操作,实现 2 个阶段合闸的配合,即多级合闸。除传统的单级并联电阻外,还可采用多级并联电阻的方法进行过电压的限制<sup>[17]</sup>。

以本工程中的 B 相为例,采用多级并联电阻,其中 BRK22 控制第 1 级 400  $\Omega$  合闸电阻接入, BRK21 控制第 2 级 100  $\Omega$  合闸电阻接入, BRK2 为主触头,多级并联合闸电阻的电路如图 12 所示。

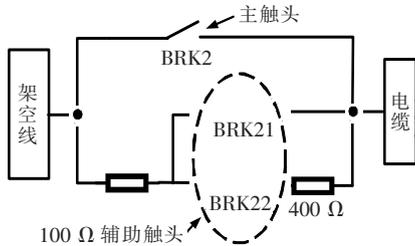


图 12 多级合闸电路

Figure 12 Multi-level closing circuit diagram

不同合闸配合下架空线过电压情况如表 4 所示。由表 4 可知,多级合闸可减小对线路冲击减小,使系统原本残留的能量得到一次释放,进而减小了冲击电压的幅值。采用多级并联合闸电阻比单级并联合闸电阻更有效地限制操作过电压倍数。

合闸过电压侵入到电缆部分,得到电缆护套过电压幅值变化,如图 13 所示。随着合闸电阻级数的

表 4 不同合闸配合下架空线过电压情况

Table 4 Overtoltage situation of overhead lines under different closing coordination

相序	不同并联方式下的分级合闸过电压倍数	
	多级	单级
B	1.04	1.00
C	1.05	1.03

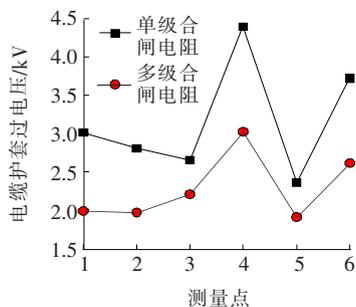


图 13 单级与多级合闸电阻时电缆护套过电压

Figure 13 Overtoltage of cable sheath in single-stage and multi-stage closing resistors

增加,过电压幅值有所减小。以电缆首端测量点 1 处的护套过电压幅值为例,采用多级合闸电阻,电缆护套过电压最大值减小至 1.95 kV,与单级合闸电阻首端护套过电压 3.02 kV 相比,减小 54%。

### 3.3 合闸相角对合闸过电压的影响

合闸时,电源电压的相位对过电压有直接影响,因此,应选取具有代表性的相位进行合闸模拟<sup>[9]</sup>。在无合闸电阻的情况下,设置不同期时间为  $\pm 0.0015$  s,选取 0.095 s(电源电压为负峰值)、0.1 s(电源电压为零)和 0.085 s(电源电压为正峰值)这 3 个不同的合闸时刻,测量 A 相架空线第一分档处合闸过电压。合闸时间影响了合闸相位,进而对架空线合闸过电压产生影响。当合闸相角为  $0^\circ$  时,合闸过电压最小,产生 1.47 倍过电压;当合闸相角为  $\pm 90^\circ$  时,合闸过电压最大,产生 1.94 倍过电压。因此,在电源电压过零时合闸,可降低合闸过电压,利于系统稳定。

当理想情况下,三相之间不存在不同期性,在上述 3 个合闸时间同时合闸,计算 A 相架空线第一分档处合闸过电压,对比三相同期与不同期合闸时架空线过电压的影响,如表 5 所示数据。通过对比三相同期与不同期合闸情况下的统计过电压可知,由于三相之间存在电感和电容的相互耦合,在未合闸相上感应出与已合闸线路相同极性的电压,叠加后使过电压幅值增大。考虑三相不同期性时,统计过电压比不考虑时幅度增加 10%~20%。

表 5 同期性与架空线过电压的关系

Table 5 Relationship between synchronization and overhead line overvoltage

合闸时间/ s	合闸相角/ ( $^\circ$ )	$U_{A2\%}/kV$	
		同期	不同期
0.095	-90	187.54	204.68
0.100	0	157.07	169.67
0.085	90	187.54	204.68

电缆护套过电压同样也受到合闸时间的影响,6 个测量点处过电压幅值变化趋势如图 14 所示。这 2 个合闸时刻,电缆首端与末端护套过电压均呈现合闸相角为  $0^\circ$  时小于合闸相角为  $\pm 90^\circ$ 。但不同合闸时刻,测量点 4 处的电压却呈现不同的变化趋势,这是由于波的传递过程,0.1 s 合闸滞后于 0.095 s

合闸  $1/4$  个周期,因此合闸过电压波经过每个测量点,在电缆护套上产生的过电压变化趋势也整体滞后。合闸相角为  $\pm 90^\circ$  时电缆首端和末端的护套过电压幅值均较合闸相角为  $0^\circ$  时有增加,这是因为系统在电源峰值时合闸,用于产生过电压的电磁能量越大,因而有架空线传输至电缆的过电压幅值有所增加。

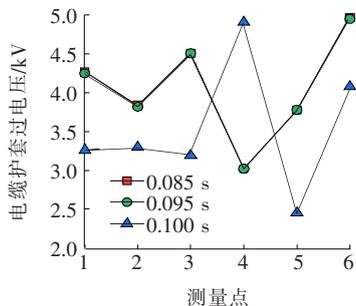


图 14 电缆护套过电压与合闸时间的关系

Figure 14 Relationship between cable sheath overvoltage and closing time

因此,为避开合闸相角  $\varphi_0 = \pm 90^\circ$  造成的过电压,选相投切技术得到广泛地应用,即断路器的 A、B、C 三相可以实现非同期合闸,根据选相合闸策略,选取最佳合闸相位,即各相电压过零点时合闸,可以达到抑制线路过电压的目的,减小过电压对设备的冲击,有利于系统的稳定。

## 4 结语

本文利用 PSCAD 仿真软件对某地区 220 kV 超高压架空线—电缆混合线路的合闸过电压进行仿真计算,分析了架空线合闸操作时产生的合闸过电压特性以及合闸过电压传输至电缆处,电缆护套过电压的变化,得到如下结论。

1) 由于架空线和电缆接口处波阻抗不连续,电压波在传播过程中会产生复杂的折反射现象,因此电缆护套处的过电压幅值呈现周期性波动,电缆中间部分的护套过电压幅值最大,且反射波的叠加作用将进一步增加电缆末端的过电压幅值。

2) 架空线合闸过电压幅值与合闸电阻大小呈反比关系,采用多级合闸电阻,能够使能量逐级释放,可更有效地限制操作过电压。过电压波传输至电缆,电缆护套过电压值呈现波动变化,但随着合闸电

阻的增加,线路末端的反射作用愈加明显,电缆末端护套过电压成为最大值。

3) 三相之间存在电感和电容的相互耦合,在未合闸相上感应出与已合闸线路相同极性的电压,叠加后使过电压幅值增大。考虑三相不同期性,合闸过电压幅值增加  $10\% \sim 20\%$ 。

4) 根据选相合闸策略,在电源电压过零时合闸,可以有效地降低架空线处的合闸过电压,进而降低侵入电缆的过电压幅值,有利于系统稳定运行。电缆护套上产生的过电压变化趋势与合闸时间密切相关,合闸相角为  $\pm 90^\circ$  时,电缆首末端的护套过电压较  $0^\circ$  时合闸增加约 1 kV。

## 参考文献:

- [1] 吴志祥,周凯,何珉. 高压电缆交叉互联系统的 3 种优化接地方案[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 135-140.  
WU Zhixiang, ZHOU Kai, HE Min. Research on three optimized grounding schemes of HV cable cross connection system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 135-140.
- [2] 逮怀东,许磊,刘宗杰,等. 电缆—架空线混合线路故障行波定位及自适应重合闸控制[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(4): 31-36.  
LU Huaidong, XU Lei, LIU Zongjie, et al. New method of traveling wave fault location and adaptive reclosing for cable-overhead mixed lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(4): 31-36.
- [3] 杨亮,周恺,倪周,等. 考虑负荷特性的 XLPE 电缆绝缘老化程度研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(10): 113-119.  
YANG Liang, ZHOU Kai, NI Zhou, et al. Analysis of XLPE cable insulation aging considering load characteristics[J]. Smart Power, 2020, 48(10): 113-119.
- [4] 边浩然,杨丽君,马志鹏,等. 基于累积损伤曲线的电寿命模型步进应力试验方法及在 XLPE 电缆中的应用[J]. 中国电力, 2020, 53(9): 125-132.  
BIAN Haoran, YANG Lijun, MA Zhipeng, et al. Step-stress test method for electrical life model based on cumulative damage curve and its application in XLPE cable[J]. Electric Power, 2020, 53(9): 125-132.
- [5] 张悦,陈孝信,钱勇,等. XLPE 电缆交叉互联系统中局放脉冲时域特征仿真研究[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 112-118.

- ZHANG Yue, CHEN Xiaoxin, QIAN Yong, et al. Simulation study on time domain feature of partial discharge pulse in XLPE cable cross-bonding system[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(7): 112-118.
- [6] 陈玉林, 陈允平, 孙金莉. 高压电缆金属护套交叉点行波折反射的规律[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 11-14.  
CHEN Yulin, CHEN Yunping, SUN Jinli. Study of traveling wave at the sheath-crossing point of high voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 11-14.
- [7] 何学锦, 邹国平, 曹俊平, 等. 220 kV 高压电缆合闸过电压研究[J]. 电工技术, 2019(1): 18-20.  
HE Xuejin, ZOU Guoping, CAO Junping, et al. Study on closing overvoltage characteristics of 220 kV high voltage cable[J]. Electric Engineering, 2019(1): 18-20.
- [8] 郭兴军, 牛海清, 王晓兵, 等. 高压单芯电缆护套操作过电压计算及冲击试验[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 147-150.  
GUO Xingjun, NIU Haiqing, WANG Xiaobing, et al. Calculation and test of sheath overvoltage of single-core cable[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 147-150.
- [9] 王国林. 基于 ATP-EMTP 的 330 kV 空载线路合闸过电压仿真分析[J]. 电工电气, 2019(11): 34-37.  
WANG Guolin. Simulated analysis of 330 kV no-load line switch-on overvoltage based on ATP-EMTP[J]. Electrotechnics Electric, 2019(11): 34-37.
- [10] 丘陵. 500 kV 超高压交流系统操作过电压仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [11] 宋苗苗, 刘健, 张志华, 等. 一种配电线路深度限流型自适应重合闸技术研究[J]. 供用电, 2020, 37(10): 51-57+64.  
SONG Miaomiao, LIU Jian, ZHANG Zhihua, et al. Research on deep current limiting adaptive reclosing technology for distribution lines[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(10): 51-57+64.
- [12] 张志华, 刘健, 吴水兰, 等. 基于暂态特征的配电线路自适应重合闸仿真研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(7): 81-88.  
ZHANG Zhihua, LIU Jian, WU Shuilan, et al. Research on simulation of distribution line adaptive auto-reclosure technique based on the transient characteristic[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(7): 81-88.
- [13] 黄振. 电缆—架空线路雷电过电压研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [14] 高俊国, 于平澜, 李紫云, 等. 基于有限元法的电缆金属护套感应电压仿真分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 714-720.  
GAO Junguo, YU Pinglan, LI Ziyun, et al. Simulation analysis of Induced voltage of metal sheath of power cable based on finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 714-720.
- [15] 惠宝军, 傅明利, 刘通, 等. 110 kV 及以上电力电缆系统故障统计分析[J]. 南方电网技术, 2017, 11(12): 44-50.  
HUI Baojun, FU Mingli, LIU Tong, et al. Statistical analysis of power cable system faults of 110 kV and above[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(12): 44-50.
- [16] 夏成军, 张尧, 邹俊雄. 合空线统计过电压的建模与仿真[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 11-15.  
XIA Chengjun, ZHANG Yao, ZOU Junxiong. Model and simulation of statistical line-energizing over-voltage[J]. High Voltage, 2007, 33(10): 11-15.
- [17] 陈思浩, 吴政球, 陈加伟, 等. 多级合闸电阻限制 1 000 kV 输电线路操作过电压的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 10-13.  
CHEN Sihao, WU Zhengqiu, CHEN Jiawei, et al. Research on limiting switching overvoltage by multistage closing resistance in 1 000 kV transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(20): 10-13.