

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.017

330 kV 架空—电缆混合线路操作过电压特征研究

王瀚锋¹, 孙浩飞², 王冲³, 苏凤飞¹, 谈震¹, 高坤¹

(1. 国网陕西省电力有限公司西安供电公司, 西安 710030; 2. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 西安 710199;
3. 国网陕西省电力有限公司, 西安 710048)

摘要: 与传统纯架空线路相比, 架空—电缆线操作过电压具有更复杂的谐波频率和传播特性, 因此深入开展架空—电缆线操作过电压特性分析对电力系统绝缘设计而言具有重要意义。文中以西北某 330 kV 电压等级的架空—电缆混合线路为例, 对该线路开关的合闸和分闸操作产生的过电压特征开展研究。首先根据混合线路结构特点建立了含有高抗站和不含高抗站两种典型的混合线路模型, 模拟该线路在同期合闸、不同期合闸、重合闸以及分闸不同工况下的仿真。仿真结果表明: ①在含有高抗的输电线路, 线路分闸时过电压波形会出现拍频效应, 拍频频率为正弦波 59.3、80.9、81.3 Hz 的组合。②三相重合闸产生的过电压幅值最大, 最极端条件下, 幅值较无残压合闸过电压升幅 33.2%。有高抗站线路分闸时拍频电压幅值高于无高抗站分闸过电压。③过电压随着架空线距离增加先增大再减小, 电缆线过电压随电缆线距离增大而增大。④对同期合闸和分闸过电压做频谱分析, 合闸过电压架空线谐波频率主要在 100 Hz 内变化, 主导频率为 2 807 Hz, 电缆线谐波频率主要在 100~500 Hz 内变化, 主导频率为 430 Hz。

关键词: 操作过电压; 特征; 混联线路; 频域; 回归分析

Research on Switching Overvoltage Characteristics of 330 kV Overhead Line-cable Hybrid Lines

WANG Hanfeng¹, SUN Haoifei², WANG Chong³, SU Fengfei¹, TAN Zhen¹, GAO Kun¹

(1. State Grid Shanxi Electric Power Co., Ltd. Xi'an Power Supply Company, Xi'an 710030, China; 2. State Grid Shanxi Electric Power Co., Ltd., Electric Power Research Institute, Xi'an 710199, China; 3. State Grid Shanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710048, China)

Abstract: Compared with the traditional pure overhead lines, switching voltages in overhead line-cable hybrid lines exhibit more complex harmonic frequency and propagation characteristics. Therefore, in-depth analysis of switching overvoltage characteristics in overhead-cable hybrid lines is of great significance for the insulation design of power systems. In this paper a 330 kV overhead-cable hybrid line in Northwest China is taken as an example to study the characteristics of overvoltage generated by the switching operation of the line. First, two typical hybrid line models with and without high resistance (reactor) stations are set up in accordance with the structure characteristics of the hybrid line, and the simulation of the line under such different conditions as synchronous closing, unsynchronous closing, reclosing and opening operation is performed. The simulation results show that ①In the transmission line with high resistance, the overvoltage waveform will appear beat frequency effect in case of opening operation, and the beat frequency is the combination of sine wave 59.3 Hz, 80.9 Hz and 81.3 Hz. ②The amplitude of overvoltage generated by three-phase reclosing is the largest. Under the most extreme conditions, the amplitude is 33.2% higher than that of no residual closing overvoltage. The beat frequency voltage amplitude during line opening on lines with high voltage reactor station is higher than that during line opening on lines without high-voltage reactor stations. ③Overvoltage firstly increases and then decreases with the increase of overhead line distance, and cable overvoltage

increases with the increase of cable line distance.④The frequency spectrum analysis of the synchronous closing and opening overvoltage shows that the harmonic frequency of the overhead line of the closing overvoltage mainly changes within 100 Hz, and the dominant frequency is 2 807 Hz. The harmonic frequency of the cable line mainly changes within 100~500 Hz, and the dominant frequency is 430 Hz.

Key words: switching overvoltage; characteristics; hybrid line; frequency domain; analysis of regression

0 引言

随着架空线—电缆线混合使用的场景越来越多^[1-8],与传统单一架空线相比,混合线路因不同波阻抗的连接,过电压波在线路上传播时会出现多次折反射,使得每次暂态过程,线路都经受数十次的冲击电压。因此这种混合线路操作过电压幅值更高^[9-14],冲击持续时间会更长,给系统的破坏性更强,故需对此混合线路操作过电压产生机理,传播过程与特征开展研究,为电力系统绝缘配合提供理论支撑。

对于传统的架空线路,多数文献集中在不同工况、影响因素和抑制措施下的操作过电压幅值研究。文[15]开展了330 kV中短架空线输电线路合闸电阻影响因素的研究,对比分析了安装合闸电阻前后操作过电压的影响。对于纯电缆线路,多数文献集中在线芯和护层中过电压幅值研究,与架空线路相比,电缆线路的电缆接头处因为工艺问题更容易发生击穿故障,因此电缆线路集中于接头处过电压幅值的研究。文[16]对于220 kV电缆C相在合闸过程中被击穿事故做了模拟仿真,仿真得出最极端情况下,导体和护层的过电压幅值对绝缘的损坏和运行寿命的影响,提出长电缆线路宜完全采用交叉互联等对应抑制措施。文[17]对50 kV输电线路电缆中间接头导体和护层上的合闸过电压进行了研究,并计算了不同工况下的过电压特性。对于架空—电缆混合线路,增加了波的折、反射的复杂过程,研究主要集中在不同工况影响因素下架空线和电缆线上的过电压幅值特性。文[18]对220 kV架空线—电缆混合线路的合闸过电压进行了研究,得出了三相不同期合闸对比同期合闸过电压幅值增幅10%~20%;多级断路器并联电阻对比单极更有效地限制

过电压倍数。文[19]提出了一种基于全频率相关参数的架空—电缆混合线路过电压的快速计算算法,建立了330 kV混合线路全频域计算参数模型,通过消除时间步长小于传输线中电压波传播时间的要求,来提高模型计算速度。上述研究均是针对操作过电压的幅值特征进行讨论,以时域特征为主,对于含有高抗站的混合线路的频域特征和波的传播特性相关研究较少,而在架空—电缆混合线路中,不同结构特征的混合线路的传播特性更加复杂,高抗站的存在使得混合线路过电压特征不同于无高抗的线路。模型考虑到母线其他出线数对输电线芯过电压的影响^[20-24],建立在其它出线退出运行,操作过电压能达到最大值的情况下,通过不同工况对不同结构特征的混合线路过电压的频率特征和幅值分布特征开展研究。

文中以西安330 kV架空—电缆混合示范线路作为研究对象,根据线路不同结构特征建立了两种典型混合线路仿真模型,计算了带有高抗站线路和无高抗站线路在不同工况下的过电压幅值分布特征,对两种典型线路过电压波开展了传播特性和频率的研究,最后采用合闸时域波形以及合分闸的频域波形得到混合线路中波的折、反射过程和频率分布,并且通过回归模型得到混合线路沿线过电压的分布特征。

1 架空线—电缆混合线路仿真模型

1.1 330 kV 架空线—电缆混合输电线路结构特征

典型的330 kV混合线路见图1,整个线路包括变电站母线电压、架空线、电缆线、避雷器、高抗站和电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)。

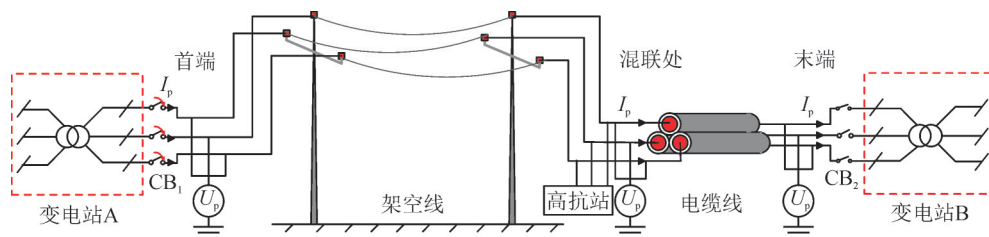


图1 输电系统结构

Fig. 1 Structure of transmission system

1.2 混合线路电路参数

混合线路设备型号见表1。

表1 设备型号表

Table 1 Equipment type list

名称	型号
架空线	4*JL/GIA-400/37、2*JL/GIA-300/40
电缆线	ZC-YJLW02
避雷器	Y10WL5-300/727W
高抗站	补偿容量45、60、75、90 Mvar
CVT	TYD330/ $\sqrt{3}$ -0.005H

根据表1中设备参数,建立如下仿真模型。

1)电源模型。采用线电压幅值为330 kV且相位差为120°的三相电压源,在计算重合闸时采用一个提供残压三相电压源。变电站内阻抗为 $5.04+j5.40\ \Omega$ 。

2)架空线路模型。架空线路采用EMTP软件中的LCC架空线路模块,选取与频率相关的J.Marti模型。

3)电缆线路模型。电缆线段采用J.Marti模型时可能会存在计算收敛性问题,因此采用固定频率的Bergeron模型^[25]。

4)并联电抗器参数。并联电抗器容量为90 Mvar,补偿度为78%,架设在架空线和电缆线的混联处,将并联电抗器用Y形连接的三相电感为1 554 mH等效,中性点连接小电感值为621 mH的接地电感,用来抑制潜供电流。

5)断路器模型参数。断路器模型利用时控开关来模拟同期合闸,组合统计开关来模拟不同期合闸。同期合闸时间为0.03 s,此时电源电压为负峰值,不同期时间不超过5 ms。

6)CVT模型参数。CVT模型用对地电容5 000 pF表示。

对其中一条混合线路进行操作过电压特征分析。该线路左侧电源为发电厂,设为A,右侧电源为变电站,设为B,从左到右经过架空线再到电缆线,由图1可知,混联处有高抗站为第一回线,无高抗站为第二回线,仿真示意图见图2、3。

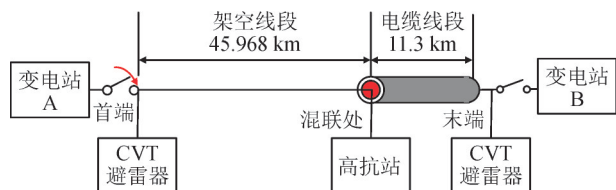


图2 第一回线过电压仿真示意图

Fig. 2 Overvoltage simulation diagram of first transmission line

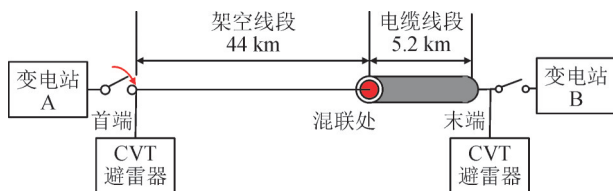


图3 第二回线过电压仿真示意图

Fig. 3 Overvoltage simulation diagram of second transmission line

该条线路是双回线路,架空线路是2条单回架空线,三相呈三角形架设,电缆线路架设在隧道内,三相呈品字形布置。设置基准电压:1 p.u.= $330\times 1.05\times \sqrt{2}/\sqrt{3}=282.9\text{ kV}$ 。

2 操作过电压仿真计算

2.1 混合线路操作方式

仿真主要考虑无残压合闸、三相重合闸以及不重燃下的分闸工况,具体见表2。

表2 混合线路典型操作方式

Table 2 Typical operation mode of hybrid line

操作方式	工况分析	
合闸	无残压合闸	同期合闸
	三相重合闸	不同期合闸
分闸	不重燃	同期分闸

2.2 无残压合闸

为模拟无残压合闸,对空载混合输电线路进行了同期合闸和不同期合闸仿真。

2.2.1 同期合闸

对该双回线路模拟同期合闸,测量3处典型位置电压来表示过电压分布趋势,分别在架空线首端、混联处、电缆线末端,若在另外一侧合闸,测量顺序为电缆线首端、混联处、架空线末端。

第一回线无残压同期合闸后,在A侧电源处合闸仿真波形见图4、5。

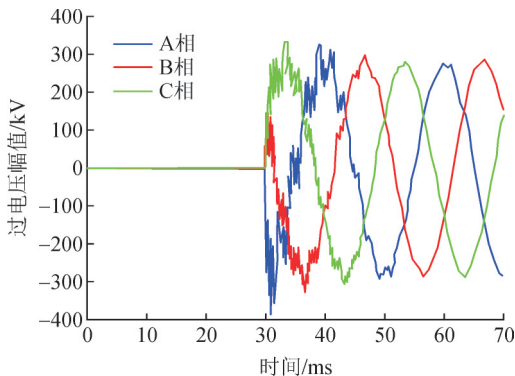


图4 架空线首端过电压波形图

Fig. 4 Overvoltage waveform diagram at the head of an overhead line

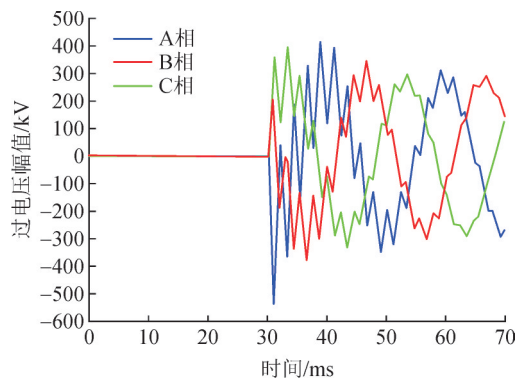


图5 混联处、末端过电压波形图

Fig. 5 Overvoltage waveform diagram at the mixing unit and end line

无残压合闸仿真结果见表3,无残压同期合闸过电压见图6。

表3 无残压同期合闸最大过电压

Table 3 Synchronised maximum closing overvoltage without residual voltage

位置		首端	混联处	末端
第一回线	A侧合闸/kV	386.50	514.60	540.20
	A侧合闸/p.u.	1.37	1.82	1.91
	B侧合闸/kV	450.70	486.50	553.90
	B侧合闸/p.u.	1.59	1.72	1.96
第二回线	A侧合闸/kV	392.30	550.40	553.40
	A侧合闸/p.u.	1.39	1.95	1.96
	B侧合闸/kV	416.10	429.70	565.30
	B侧合闸/p.u.	1.47	1.52	2.00

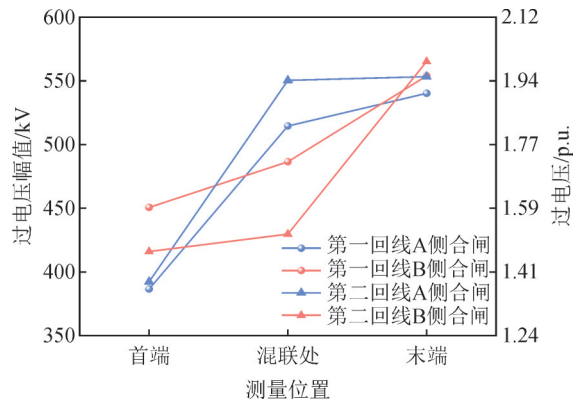


图6 无残压同期合闸过电压

Fig. 6 Synchronised closing overvoltage without residual voltage

由表3、图6电压幅值分布可知,从电缆侧合闸时,电缆线上的电压分布会比架空线侧合闸处小。最大值从540.2 kV降到486.5 kV,降幅达到9.9%。合闸侧对架空线首末端过电压压差影响较大。从架空线侧合闸,架空线起始电压由386.5 kV增大到末端的514.6 kV,压差为128.1 kV,电压升幅速度为2.8 kV/km,而从另外一侧合闸时,架空线首末端电压从486.5 kV增大到553.9 kV,压差为67.4 kV,电

压升幅速度为1.5 kV/km。而电缆压差在两种方式下均在26 kV左右,电压升幅速度为2.3 kV/km,可见,合闸侧对架空线过电压压差变化更加显著。

由于第二回路比第一回路的电缆线路短,第二回路的过电压幅值跨度比第一回路小。同A侧合闸,电缆过电压压差幅值由25.6 kV减少到3.0 kV,同B侧合闸,电缆过电压压差幅值从35.8 kV减少到13.6 kV。电缆线路越长,电缆线路的电容越大,加在电缆线路上的过电压压差也就越大。第二回路在没有并联电抗器的作用下,架空线首末两端过电压压差分别为158.1 kV和135.6 kV。类比去掉高抗站的第一回线,架空线侧合闸,过电压从首端390.3 kV增大到末端的526.9 kV,压差和最大值都比有高抗站的过电压大。很明显,并联电抗器起到抑制过电压的作用。

由以上同期合闸电压幅值特征可知:①合闸侧(A侧/B侧)的选择对线路过电压分布有明显影响。若要降低电缆输电线上的过电压幅值来抑制电缆接头的击穿,可选择在电缆侧进行空载线路先合闸。②电缆线上过电压最大值受电缆输电线长度影响,电缆线越长,末端过电压越大。③并联电抗器对过电压有抑制效果。

2.2.2 不同期合闸

不同期合闸最大特征是开关实际操作时无法做到完全同步,因此合闸操作时绝大多数为不同期合闸。合闸相在峰值时合闸,此时过电压幅值将在工频相电压峰值上叠加未衰减的谐波达到最大值。由于相间不同期形成的感应电压,使模型延迟时间分布服从高斯分布,方差为0.002,统计计算300次,计算此时线路上的不同期合闸最大过电压^[15]。不同期合闸仿真结果见表4、图7。

表4 无残压不同期合闸最大过电压

Table 4 Non-synchronised maximum closing overvoltage without residual voltage

位置		首端	混联处	末端
第一回线	A侧合闸/kV	394.20	534.40	539.50
	A侧合闸/p.u.	1.34	1.89	1.91
	B侧合闸/kV	469.20	496.80	575.20
	B侧合闸/p.u.	1.66	1.76	2.03
第二回线	A侧合闸/kV	374.20	568.40	569.30
	A侧合闸/p.u.	1.32	2.01	2.01
	B侧合闸/kV	440.20	452.50	565.70
	B侧合闸/p.u.	1.56	1.60	2.00

由表4、图7无残压不同期合闸最大过电压可知,第一回线同期合闸时,A相过电压幅值最大,而在非同期合闸时,A相先合闸相在C相上出现感应电压,当在C相在极性相反处合闸时,C相会出现比

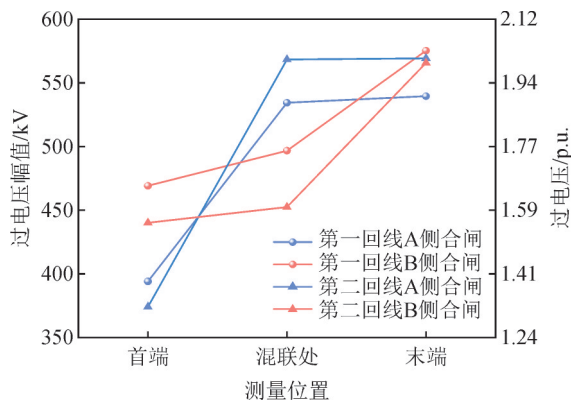


图7 无残压不同期合闸最大过电压

Fig. 7 Non-synchronised maximum closing overvoltage without residual voltage

同期合闸更大的过电压,仿真图形过电压最大幅值处由A相变为C相。由幅值数据表显示,该条线路上,不同期合闸过电压均比同期合闸过电压增大,增幅最大处有21.3 kV,上升比例达到4.5%,第二回线过电压上升趋势同第一回。

由以上不同期合闸电压幅值特征可知:①不同期合闸可能出现比同期合闸过电压更大的幅值,取决于合闸时刻的感应电压极性和幅值。②不同期合闸在极端条件下对系统绝缘配合损坏更大,在实际操作中应尽量保持三相合闸的同期性。

2.3 三相重合闸

三相重合闸考虑了线路残压的过电压计算。在合闸前,线路初始残压设为相电压峰值282.9 kV,即考虑在波峰处断开来模拟重合闸最极端初始情况。

对第二回路进行重合闸操作,在A相达到峰谷最大值时合闸,线路将出现最大合闸过电压。仿真结果见表5,三相重合闸最大过电压见图8。

表5 第二回三相重合闸最大过电压

Table 5 Maximum three-phase reclosing overvoltage of the second transmission line

位置	首端	混联处	末端
A侧合闸/kV	405.40	589.70	589.10
A侧合闸/p.u.	1.43	2.09	2.08
B侧合闸/kV	554.60	567.90	613.40
B侧合闸/p.u.	1.96	2.01	2.17

由表5、图8第二回三相重合闸最大过电压可知,相比于无残压合闸,三相重合闸过电压最大值相较增大138.2 kV,最大值从416.1 kV增大到554.6 kV,上升幅度达到33.2%,可见,线路的初始状态对操作过电压幅值有明显影响,因此在合闸前对线路接地释放能量将明显减少过电压对系统安全的影响。

由以上三相重合闸特征研究可知:三相重合闸在极端条件下比无残压合闸过电压对绝缘损坏更大,线路上通过加装泄流设备使得线路残压更小。

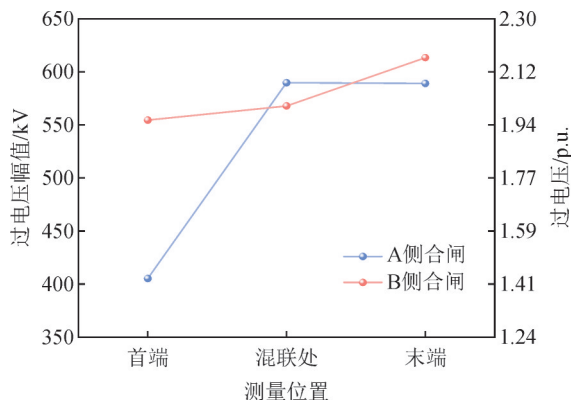


图8 第二回三相重合闸最大过电压

Fig. 8 Maximum three-phase reclosing overvoltage of second transmission line

2.4 分闸过电压

分闸过程暂不考虑电弧重燃,系统在分闸空载线路后,线路上也会产生过电压。第一回线分闸仿真结果见表6。分闸最大过电压见图9,第一回线路A侧分闸过电压幅值—时间波形见图10。

表6 第一回线分闸最大过电压

Table 6 Maximum opening overvoltage of the first transmission line

位置	首端	混联处	末端
A侧分闸/kV	434.20	432.00	432.30
A侧分闸/p.u.	1.53	1.53	1.53
B侧分闸/kV	422.10	421.90	423.50
B侧分闸/p.u.	1.49	1.49	1.50

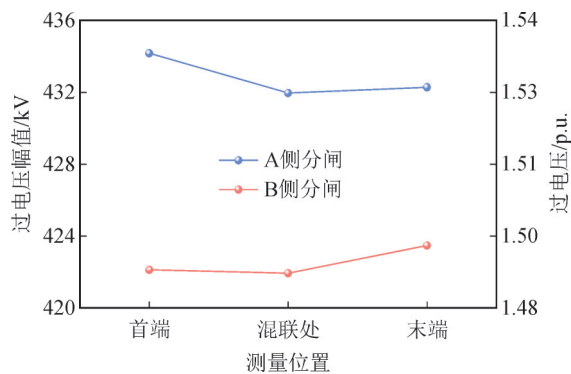


图9 分闸最大过电压

Fig. 9 Maximum opening overvoltage of transmission line

由表6、图9分闸最大过电压波形和仿真数据可知,第一回线分闸后,A相过电压在0.069 9 s左右达到幅值最大,之后电压幅值呈现衰减趋势,且分闸后,线路上各处过电压幅值相差较小,变化范围在3 kV内。对分闸过电压B相进行波形分析,见图10(b)。

由于相间的电磁和电容的耦合关系,B相能量通过相间耦合到A、C相,由于三相的不完全换位导致的相间电容的差异,使得各相回路阻抗不同,因

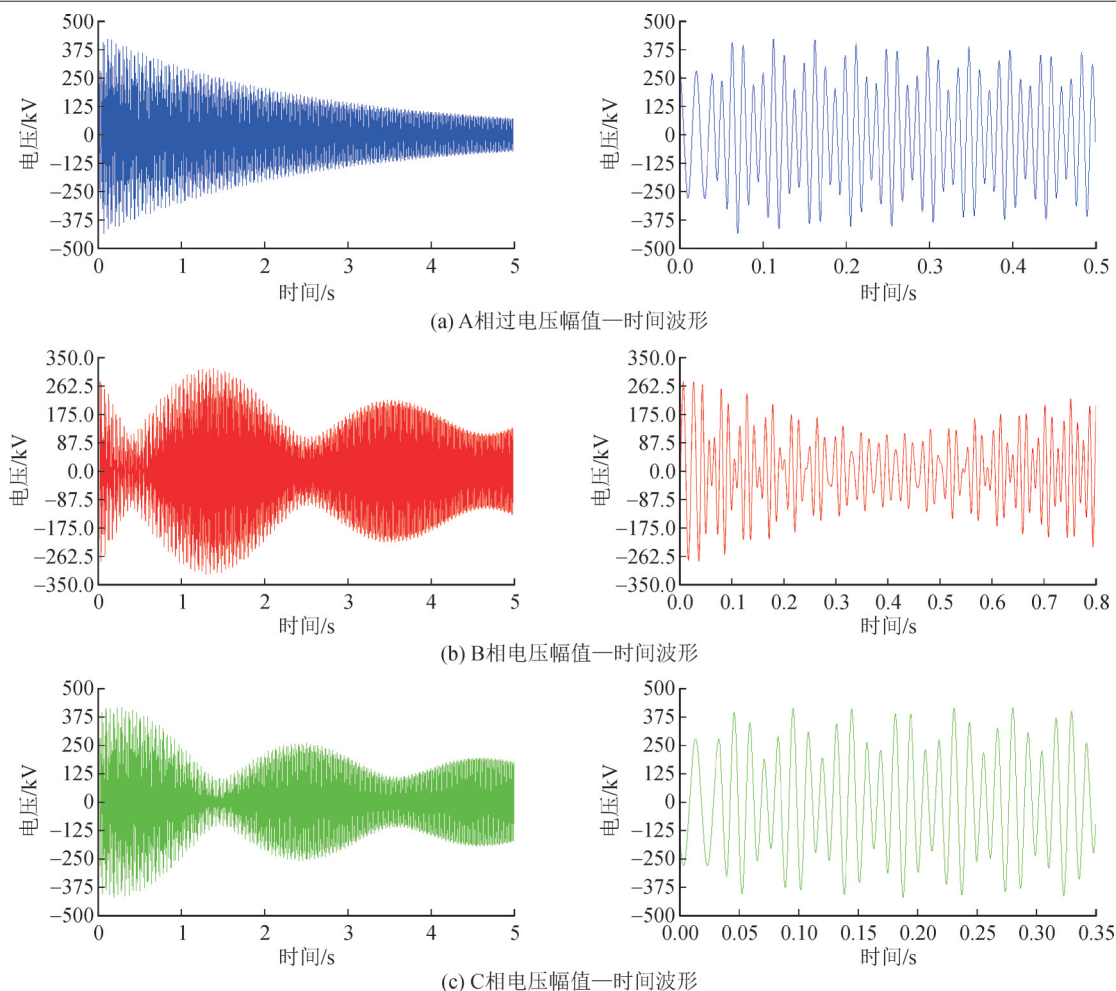


图10 分闸过电压三相波形图

Fig. 10 Three-phase waveform diagram of opening overvoltage

此产生的不同振荡频率回到B相上后,B相振荡频率与A、C相振荡频率的叠加,在频率相差不大的电压波叠加后,B相电压波形整体呈现包络线长,波动周期长特性。局部会因为正弦波的叠加,波峰波谷幅度可能会更大,也可能波峰波谷叠加使得整体更加平坦,在数学上,将两种相近频率的正弦波叠加称为拍频效应^[26],叠加后的波形幅值随时间作强弱的周期性变化,拍频电压波形见图11,图11由80.9、81.3 Hz的正弦波叠加而成。由图10三相分闸电压波形可知,分闸拍频电压总体趋势因为能量的消耗,波形幅度会逐渐衰减到0,B、C相有明显的拍频特性,A相无拍频特性,由3.2节可知,由于A相两个频率相差太大导致。拍频电压波有可能使重合闸失败,但是电压上升速度大大的下降可以抑制断路器重燃的产生,并且经研究发现,拍频效应波形特征可以用来验证重合闸前的故障是瞬时性的还是永久性的^[27-29],对于自适应重合闸提供了一种判别方式。

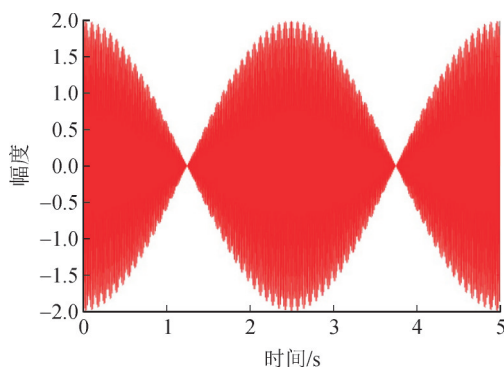


图11 拍频电压波形

Fig. 11 Beat frequency voltage waveform

对三相分闸拍频电压波形计算,定义叠加后一个强弱变化为1节,1节中有4个波,可得拍频的周期和频率见表7。B侧分闸电压波形同A侧。第二回线分闸仿真结果见表8,第二回线路A侧分闸过电压波形见图12。

由图12、表8第二回线分闸最大过电压图和仿真数据可知,第二回线由于没有高抗站的存在,在忽略输电线路电感后,线路能量随着对地电容及线路电阻慢慢释放。因此分闸后,电压波形幅值随着

表7 三相拍频电压周期和频率

Table 7 Period and frequency of three-phase beat frequency voltage

参数	A相	B相	C相
节周期/ms	49.49	49.24	49.30
节频率/Hz	20.20	20.30	20.30
波周期/ms	12.37	12.31	12.32
波频率/Hz	80.80	81.20	81.10
包络线周期/s	—	2.13	2.17
包络线频率/Hz	—	0.47	0.46

表8 第二回线分闸最大过电压

Table 8 The opening overvoltage of the second circuit

位置	A侧分闸	B侧分闸
最大过电压/kV	348.40	330.50
最大过电压/p.u.	1.23	1.17

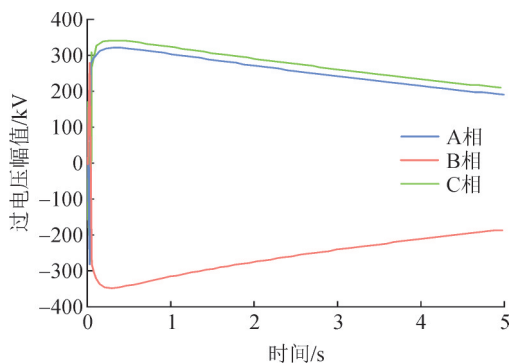


图12 分闸过电压三相波形图

Fig. 12 Three-phase waveform diagram of opening overvoltage

时间呈现衰减趋势。过电压最大幅值为 348.4 kV, 相较于第一回线最大拍频过电压幅值 434.2 kV 小, 若第一回线去掉高抗站, 分闸过电压波形同第二回, 过电压幅值也降为 319.5 kV, 降幅达到 26.4%。可见, 高抗站在调节系统无功和电压的同时, 也给系统带来一些弊端。

由以上分闸过电压研究可知: ①拍频电压出现在有高抗站的线路上, 在没有高抗站的线路上, 过电压能量随线路对地电容慢慢释放; ②三相分闸后, 线路上过电压大小几乎相等。有高抗站线路形成的过电压最大幅值大于无高抗站线路过电压, 有可能造成重合闸失败。

3 混合线路操作过电压频域特征

3.1 时域分析

为了分析过电压谐波在传播过程中传播特性, 可对过电压暂态波形谐波的主导频率^[30-33]、周期以

及传播时间进行分析。在 A 侧合闸时, 架空线和电缆线的首末端电压波形放大见图 13。

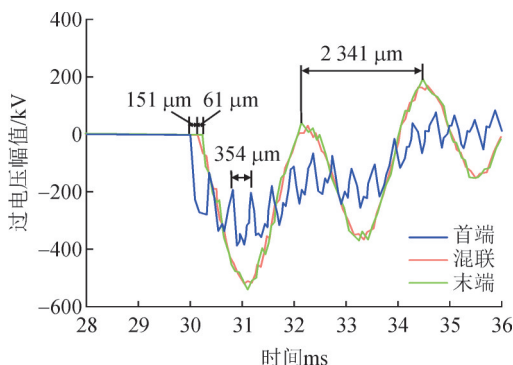


图13 架空线首端、混联处、电缆线末端电压时域波形放大图

Fig. 13 Waveform amplification in time domain of the voltage at the head of overhead line, mixing unit and cable end

由图 13 的 3 处过电压波形可知, 在架空线中过电压主导谐波周期为 354 μs , 对应的主导频率为 2 825 Hz, 在电缆线中过电压主导谐波周期为 2 341 μs , 对应的主导频率为 427 Hz。电压波从架空线处合闸传播到混联处时间为 151 μs , 可知, 每经过 302 μs 反射波电压再一次传回架空线末端; 混联处到电缆线末端传播时间为 61 μs , 同样每经过 122 μs 反射波电压再一次传回电缆线末端。因此, 在架空线工频电压到达峰值的时候, 反射波电压第 2 次回到架空线末端; 相比电缆线, 反射波电压第 38 次回到电缆线末端, 衰减更为严重, 对幅值影响较小。

经比较, 电缆过电压主导频率远小于架空线, 相反振荡周期更大, 上升陡度越小。上升幅度对时间比计算, 电缆线上升陡度为 0.5 kV/ μs , 架空线上升陡度为 1.4 kV/ μs , 在相同传播时间下, 当工频电压到达峰值时, 电缆线电压波折反射次数更多, 衰减程度更大, 在峰值时表现出更小的叠加影响。

谐波经过一段时间幅值会慢慢衰减到 0, 线路的传播系数与线路阻抗导纳特征相关, 谐波持续时间取决于衰减系数, 因此线路阻抗和导纳特征决定了谐波的持续时间。

3.2 频域分析

为了分析操作过电压的频域特征, 对该条线路同期合闸和分闸电压波形开展了频域分析, A 相电压波形频率分布结果见图 14-16。A 相合闸幅频见表 9, 分闸幅频见表 10。

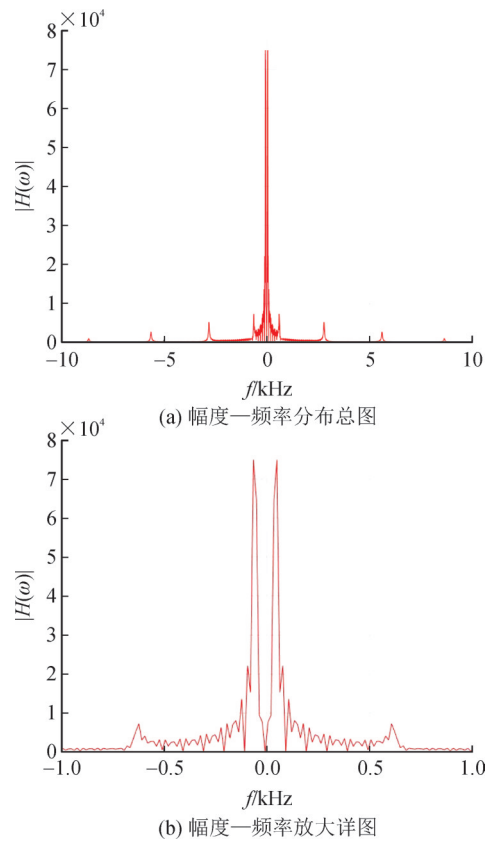


图 14 A 相合闸波形频率分布
Fig. 14 Frequency distribution of phase A closing waveform

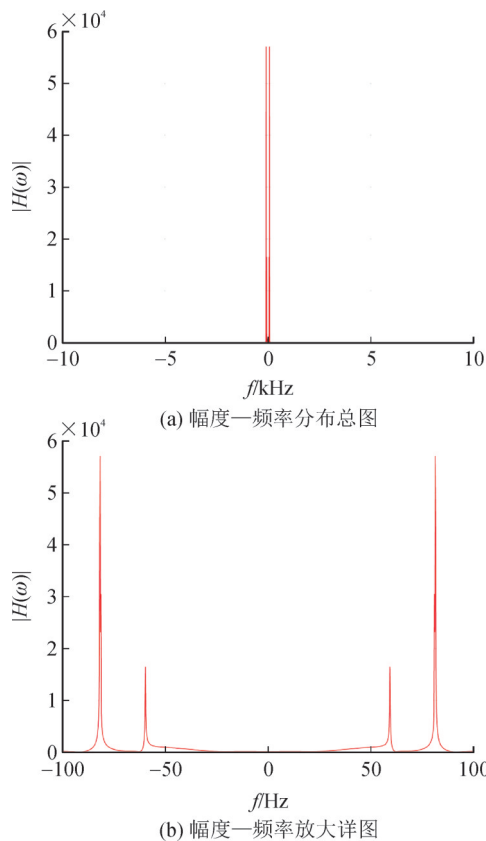


图 15 A 相分闸波形频率分布
Fig. 15 Frequency distribution of phase A opening waveform

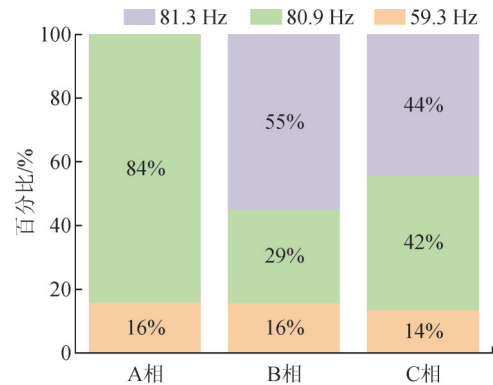


图 16 分闸幅频分布占比

Fig. 16 Opening amplitude frequency distribution ratio

表 9 A 相合闸幅频表

Table 9 Closing amplitude frequency table of phase A			
位置	频率/Hz	幅度	相对比(50 Hz)/%
架空 线段	50	74 936	—
	78	22 169	29.6
	2 807	5 208	7.0
	5 621	2 703	3.2
	8 649	1 049	1.4
电缆 线段	50	57 230	—
	110	17 278	30.2
	170	10 504	18.4
	210	8 510	14.9
	430	9 722	17.0
	2 550	6 333	11.1
	5 070	2 399	4.2

表 10 分闸幅频表

Table 10 Opening amplitude frequency table			
相位	幅度		
	59.3 Hz	80.9 Hz	81.3 Hz
A 相	15 051	79 186	—
B 相	16 544	30 496	57 085
C 相	16 455	50 910	53 137

由图 14、表 9 的 A 相合闸波形频率分布所示可知,该段架空线段合闸频率分布主要在 100 Hz 内,分布频率具体在 50、78 Hz 处,幅度对应为 74 936、22 169,100~607 Hz 波段之间分布小幅度正弦波,1 000 Hz 以上幅值相对较大的有 2 807、5 621、8 649 Hz,幅度对应为 5 208、2 703、1 049,对比 50 Hz 幅度占比 7.0%、3.6%、1.4%。可见,频率集中在百 Hz 范围内,主要还是以基频为主,结合上节计算主导频率 2 824 Hz 与分解 2 807 Hz 相近。同比电缆段,频率集中在百 Hz,结合上节计算主导频率 427 Hz,与分解 430 Hz 相近,其余低频长周期谐波与主导频率进行叠加,使得主导频率处幅度更大。

由图15、表10的A相分闸波形频率分布可知,分闸三相波形的频率主要分布在59.3、80.9、81.3 Hz 3个频率,每相频率对应的幅度各不相同,幅度占比见图16。可见,A相由两种频率组成,B、C相由3种频率组成,是因为A相处于中间相,对B、C相间电容相等导致,而B、C相由于相间电容不等形成在各相上的3种频率叠加。

分合闸主导频率不同在于求解电压时代入的不同边界条件,使得在计算线路电压谐振参数不同。该主导频率主要与电源阻抗、线路电感电容以及长度相关^[34],本仿真中主要跟线路的电感电容参数相关。

4 混合输电线的沿线过电压特征分析

由于混合输电线与单一架空线的不同结构参数,导致输电线上的过电压分布情况更加复杂。为了得到混合输电线电压沿线的分布趋势,本节对混合线路过电压与合闸距离关系建立回归模型,由此对沿线过电压分布特征进行残差分析。

以第一回混合线路A侧合闸为例,得到混合线路沿线过电压拟合曲线图。根据一元多项式拟合,针对混合输电线路整体过电压随线路距离变化规律如曲线方程 $U=2.38 \times 10^{-4}L^4 - 2.57 \times 10^{-2}L^3 + 7.41 \times 10^{-1}L^2 + 3.17 \times 10^{-2}L + 396.52$ 。其中: U 为操作过电压幅值; L 为距离始端合闸处距离。拟合曲线见图17。该曲线拟合优度 R^2 为0.98,残差平方和为761.7。

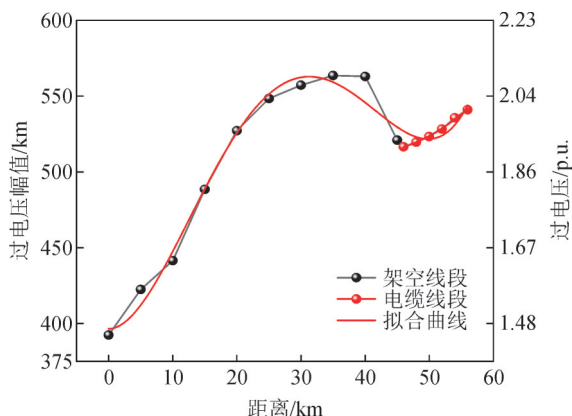


图17 混合线路沿线过电压分布图

Fig. 17 Overvoltage distribution diagram along hybrid line

根据一元多项式拟合,可得架空线段过电压幅值随混合线路距离变化规律为曲线方程 $U=-4.89 \times 10^{-3}L^3 + 1.81 \times 10^{-1}L^2 + 4.69L + 391.78$,其中: U 为操作过电压幅值, L 为架空线距离始端合闸处距离。拟合曲线见图18。架空线路沿线过电压残差分析见图

19,该计算拟合优度 R^2 为0.99,残差平方和为315.1。

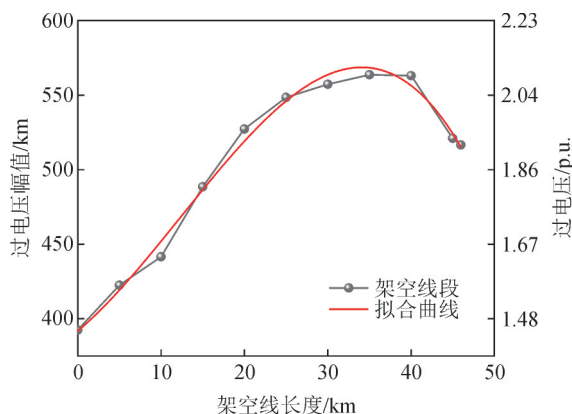


图18 架空线路沿线过电压分布图

Fig. 18 Overvoltage distribution diagram along overhead line

根据一元多项式拟合,可得电缆线段过电压幅值随混合线路距离变化规律为

$$U=0.12L^2-9.39L+701.25 \quad (1)$$

式(1)中: U 为操作过电压幅值; L 为电缆线距离始端合闸处距离。

拟合曲线见图20。电缆线路沿线过电压残差分析见图21。计算拟合优度 R^2 为0.99,残差平方和为1.77。可见,线缆段拟合模型较好,残差较小。

根据该线路特有结构参数,对该线路沿线过电压进行了统计。由混合线路拟合方程可知:架空线段最大过电压沿线一直增大到最大值后,在距离混合处越近,过电压逐渐减小,直到混联处下降停止。在电缆线段上,电缆处过电压沿线升高,末端过电压最大。

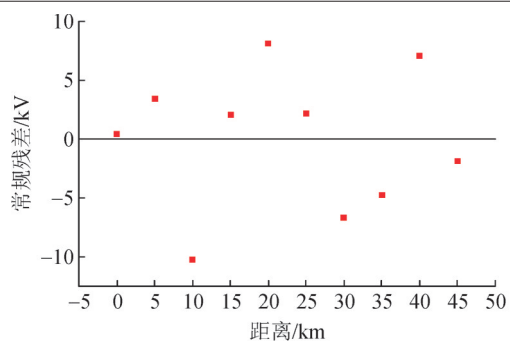
5 结论

文中通过对架空线—电缆混合线路的操作过电压的研究,对该过电压在时域和频域两个方向上进行了分析,得出如下结论:

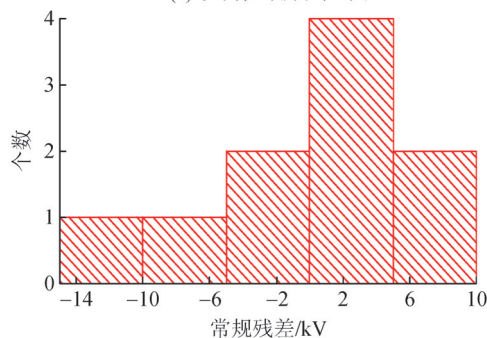
1)操作过电压合闸时最高幅值出现在三相重合闸工况下,仿真结果表明,重合闸过电压对比计划性合闸,测点最大增幅处由416.1 kV增大到554.6 kV,升幅为33.2%。分闸时,有高抗站线路的拍频电压幅值高于无高抗站线路过电压幅值。

2)在有高抗站的混合线路中,线路分闸过电压呈现拍频特性。而在没有高抗的混合线路中,分闸产生的过电压能量经过线路的对地电容慢慢释放。

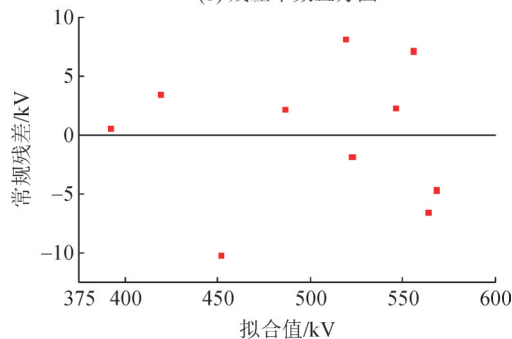
3)合闸过电压的频率主要是工频,过电压谐波频率主要在100 Hz内变化,主导频率为2 807 Hz,电



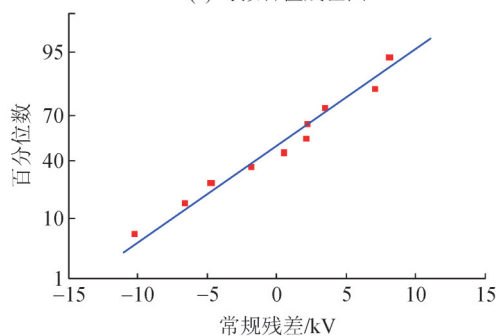
(a) 观测值顺序残差图



(b) 残差个数直方图



(c) 与拟合值残差图



(d) 残差正态概率图

图 19 架空线路沿线过电压残差分析

Fig. 19 Analysis of overvoltage residuals along overhead lines

缆线谐波频率主要在 100~500 Hz 内变化, 主导频率为 430 Hz。而在带高抗线路分闸过电压中的频率集中分布在 59.3、81 Hz 附近, 没有高抗线路分闸过电压没有交流成分。

4) 对过电压波形特征分析, 得到架空线处主导频率比电缆处主导频率大。在工频电压到达峰值

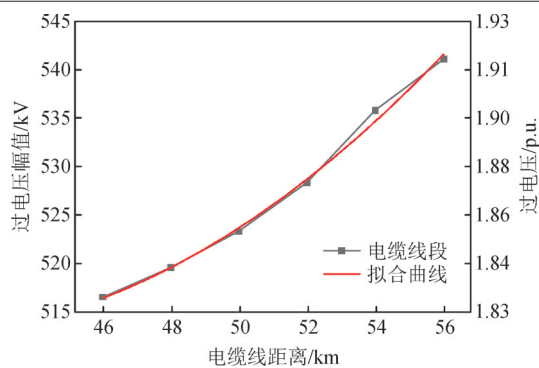
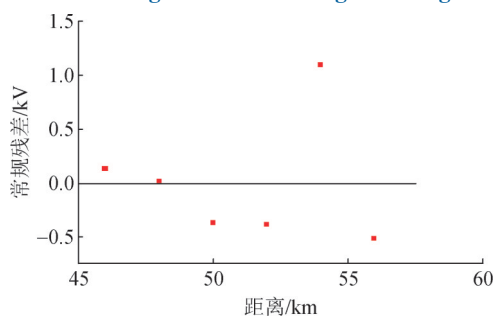
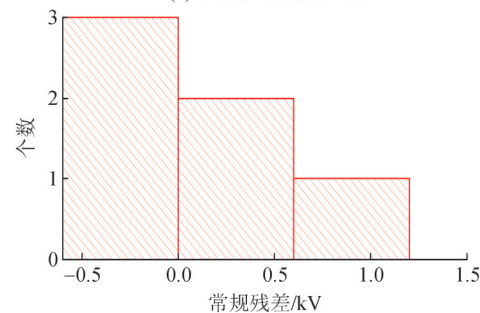


图 20 电缆线路沿线电压分布图

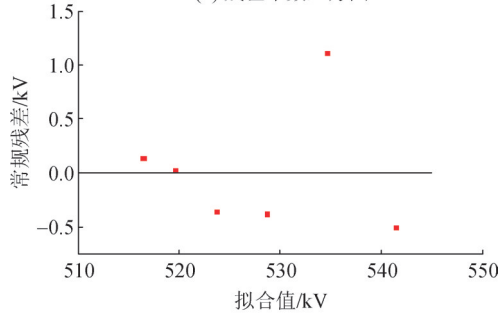
Fig. 20 Overvoltage distribution diagram along cable line



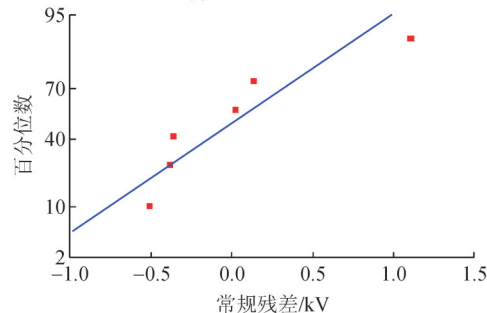
(a) 观测值顺序残差图



(b) 残差个数直方图



(c) 与拟合值残差图



(d) 残差正态概率图

图 21 电缆线路沿线过电压残差分析

Fig. 21 Analysis of overvoltage residuals along cable lines

的时候,架空线处反射波电压已经经过2次折反射,而电缆段反射波电压已经经过38次折反射,电缆反射波电压衰减程度更大,在工频电压峰值时表现出更小的叠加影响。

5)对该线路沿线过电压特征进行了回归统计分析。架空线上最大过电压沿线先增大后减小,而电缆段上过电压沿线持续增加,直到末端过电压最大。

参考文献:

- [1] 侯 喆,蒲 路,赵学风,等. 330 kV 架空线—电缆混联线路的雷电过电压研究[J]. 电网与清洁能源,2026,42(4):94-100.
Hou Zhe, Pu Lu, Zhao Xuefeng, et al. Research on lightning overvoltage of 330 kV overhead line-cable hybrid lines[J]. Power System and Clean Energy, 2026, 42(4): 94-100.
- [2] 彭诗怡,廖昊爽,刘 源,等. 基于多粒度时空序列相似度算法的高压隔离开关合闸状态识别[J]. 智慧电力,2025,53(6):101-107.
Peng Shiyi, Liao Haoshuang, Liu Yuan, et al. High-voltage disconnecting closing state recognition based on multi-granularity spatiotemporal sequence similarity algorithm[J]. Smart Power, 2025, 53(6): 101-107.
- [3] 夏小飞,刘 磊,俸 波,等. 变电站典型控制线缆高空电磁脉冲耦合特性仿真方法[J]. 南方电网技术,2026,20(4):153-162.
Xia Xiaofei, Liu Lei, Feng Bo, et al. Simulation method of coupling characteristics of shielded multi-core cable in HEMP environment [J]. Southern Power System Technology, 2026, 20(4): 153-162.
- [4] 贺冬珊,文 俊,杨 俊,等. 高电缆化率对多馈入直流受端电网稳定性的影响研究[J]. 智慧电力,2025,53(11):30-37.
He Dongshan, Wen Jun, Yang Jun, et al. Impact of high cableization ratio on stability of multi-infeed DC receiving-end grids[J]. Smart Power, 2025, 53(11): 30-37.
- [5] 吴祺嵘,徐婧涵,张国钢,等. 基于真型试验和磁流体仿真的电缆单相接地故障电弧场路耦合模型研究[J]. 电力系统保护与控制,2026,54(4):25-37.
Wu Qirong, Xu Jinghan, Zhang Guogang, et al. Arc field-circuit coupling modelling of cable single-phase-to-ground faults based on full-scale tests and magnetohydrodynamic simulations[J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(4): 25-37.
- [6] 胡顺财,李 京,陈 平,等. 基于分布式行波的混合线路故障测距算法研究[J]. 电测与仪表,2025,62(2):188-194.
Hu Shuncai, Li Jing, Chen Ping, et al. Research on fault location algorithm of hybrid line based on distributed traveling wave[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(2): 188-194.
- [7] 王 植,王 宾. 一种可反映电缆全类型故障的相模变换矩阵[J]. 电力系统保护与控制,2025,53(6):42-50.
Wang Zhi, Wang Bin. A phase-mode transformation matrix for reflecting all types of cable faults[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(6): 42-50.
- [8] Marzinotto M, Mazzetti C. Overvoltage attenuation in power cable lines - A simplified estimation method[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(5): 506-513.
- [9] 张 彪,周申培,吴细秀,等. 配电网间歇性重燃电弧模型的建立与断续弧光接地故障特征分析研究[J]. 电网技术,2024, 48(5):2207-2217.
Zhang Biao, Zhou Shenpei, Wu Xixiu, et al. Establishment of intermittent reignition arc model and analysis of intermittent arcing ground faults in distribution network[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2207-2217.
- [10] 程梦凌. 架空线—海底电缆系统过电压仿真研究[D]. 武汉:华中科技大学,2017.
Cheng Mengling. Simulation research on overvoltage of overhead line-submarine cable system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [11] 李 娟. 500 kV 变电站过电压仿真及保护方案研究[D]. 保定:华北电力大学,2017.
Li Juan. Research on overvoltage simulation and protection scheme of 500 kV substation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2017.
- [12] 裴立峰,杜振东,周文俊,等. 随桥电缆—架空混合线路的电缆护套过电压特性仿真分析[J]. 电测与仪表,2024,61(2):49-54.
Qiu Lifeng, Du Zhendong, Zhou Wenjun, et al. Simulation analysis of overvoltage characteristics of cable sheath for bridge cable-overhead hybrid line[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 49-54.
- [13] 金作林,陈小月,文习山,等. 海上风电场220 kV海底长电缆送出线工频及操作过电压研究[J]. 电瓷避雷器,2020(1):47-53.
Jin Zuolin, Chen Xiaoyue, Wen Xishan, et al. Study on power frequency and operating overvoltage of 220 kV long submarine cable in offshore wind farm[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020 (1): 47-53.
- [14] 何金良,郭锦波,孟鹏飞,等. 深度限制特高压系统操作过电压的可行性分析[J]. 高电压技术,2018,44(1):210-217.
He Jinliang, Gu Jinbo, Meng Pengfei, et al. Analysis on feasibility for deeply suppressing switching overvoltage in AC UHV systems [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 210-217.
- [15] 王翼虎,张广东,刘 康,等. 基于PSCAD的输电线路操作过电压分析[J]. 电工技术,2022(13):135-137.
Wang Yihu, Zhang Guangdong, Liu Kang, et al. Analysis of operating overvoltage of transmission line based on PSCAD[J]. Electric Engineering, 2022(13): 135-137.
- [16] 郑一鸣,刘 石,刘浩军,等. 220 kV 电力电缆线路合闸操作过电压分析[J]. 高压电器,2020,56(4):153-158.
Zheng Yiming, Liu Shi, Liu Haojun, et al. Closing switching overvoltage analysis of 220 kV power cable transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 153-158.
- [17] Ren Hongtao, Zhang Ying. Analysis on switching overvoltage and suppression method of cable joint in 500 kV cable line[J]. Energy Reports, 2021, 7(s6): 567-575.
- [18] 石逸雯,徐 星,屠幼萍,等. 超高压架空线—电缆混合线路合闸过电压特性仿真分析[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(1):178-185.
Shi Yiwen, Xu Xing, Tu Youping, et al. Simulation analysis of closing overvoltage characteristics of overhead-cable hybrid lines with extra high voltage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 178-185.
- [19] Gu Borui, Li Han, Li Shurong, et al. Algorithms for fast calculation

- of energization overvoltage of hybrid overhead line-cable transmission lines based on full frequency-dependent parameters[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023(225): 109875.
- [20] 刘宇豪, 李江涛, 冯欣, 等. 220 kV 电缆中间接头操作过电压及抑制措施研究[J]. *电瓷避雷器*, 2020(3): 146-152.
- Liu Yuhao, Li Jiangtao, Feng Xin, et al. Analysis on switching overvoltage and suppression method of cable joint in 220 kV cable line[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2020(3): 146-152.
- [21] 张耀月. ± 500 kV 直流滤波器雷电过电压特性仿真研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2025, 46(6): 9-18.
- Zhang Yaoyue. Simulation study on lightning overvoltage characteristics of ± 500 kV DC filter[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2025, 46(6): 9-18.
- [22] 程文静, 丁汝安, 卢铁兵. VSC-HVDC 并网远海风电场集电系统过电压分析及抑制[J]. *电力工程技术*, 2025, 44(5): 46-56.
- Cheng Wenjing, Ding Ru'an, Lu Tiebing. Overvoltage analysis and suppression for the power collection system in the far-offshore wind farm with VSC - HVDC grid connection[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025, 44(5): 46-56.
- [23] 淡淑恒, 乔顺利. 1 000 kV GIS 中特快速暂态过电压的仿真与分析[J]. *电力科学与技术学报*, 2025, 40(6): 233-240.
- Dan Shuheng, Qiao Shunli. Simulation and analysis of very fast transient overvoltage in 1 000 kV GIS[J]. *Journal of Electric Power Science And Technology*, 2025, 40(6): 233-240.
- [24] 龚渝涵, 李俊娜, 田君杨, 等. 典型变电站沟内线缆 HEMP 耦合仿真研究[J]. *智慧电力*, 2024, 52(4): 47-53.
- Gong Yuhao, Li Junna, Tian Junyang, et al. Simulation study on HEMP coupling of cables in the trench of typical substation[J]. *Smart Power*, 2024, 52(4): 47-53.
- [25] 李云阁. ATP-EMTP 及其在电力系统中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- Li Yunge. Application of ATP-EMTP in power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [26] 瞿万军, 田树军, 夏小飞. 500 kV 线路拍频电压的探讨[J]. *广西电力*, 2010, 33(6): 13-15.
- Qu Wanjuan, Tian Shujun, Xia Xiaofei. Discussion on beat frequency voltage of 500 kV transmission line[J]. *Guangxi Electric Power*, 2010, 33(6): 13-15.
- [27] 李厚源, 郑涛, 黄少锋, 等. 基于并联电抗器引发拍频效应的特高压交直流碰线保护改进方案研究[J]. *电网技术*, 2023, 47(8): 3416-3425.
- Li Houyuan, Zheng Tao, Huang Shaofeng, et al. Improved scheme of UHV AC-DC line-touching protection based on beat-frequency effect induced by shunt reactor[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(8): 3416-3425.
- [28] 钟高跃, 宋国兵, 王欢欢, 等. 带并联电抗器输电线路拍频电流幅值分析[J]. *电力系统自动化*, 2015(11): 139-145.
- Zhong Gaoyue, Song Guobing, Wang Huanhuan, et al. Analysis of beat frequency current amplitude of transmission lines with shunt reactors[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015(11): 139-145.
- [29] 宁家兴, 何柏娜, 孔杰, 等. 基于恢复电压拍频特性的超高压 SPAR 优化策略[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(13): 60-66.
- Ning Jiaying, He Baina, Kong Jie, et al. EHV SPAR optimization strategy based on beat frequency characteristics of recovery voltage[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(13): 60-66.
- [30] 李嘉明, 于沛鑫, 邓军波, 等. 基于 EMTP 仿真平台的超高压电缆操作过电压特性及其影响研究[J]. *智慧电力*, 2021, 49(10): 83-89.
- Li Jiaming, Yu Peixin, Deng Junbo, et al. Characteristics and influence of switching overvoltage in extra high voltage cables based on EMTP[J]. *Smart Power*, 2021, 49(10): 83-89.
- [31] 李嘉明, 徐龙, 邓军波, 等. 基于模域回路理论的配网电缆—架空线混合线路重合闸过电压特性分析[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(8): 1754-1763.
- Li Jiaming, Xu Long, Deng Junbo, et al. Analysis of reclosing overvoltage in cable-overhead line hybrid line based on return circuit theory in modal domain[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(8): 1754-1763.
- [32] 张建波, 李永赞, 黄勇, 等. 基于构网储能型 SVG 新能源直流外送系统暂态过电压抑制[J]. *智慧电力*, 2025, 53(8): 1-10.
- Zhang Jianbo, Li Yongzhan, Huang Yong, et al. Ransient overvoltage suppression in grid-forming energy-storage SVG-based renewable energy HVDC outbound systems[J]. *Smart Power*, 2025, 53(8): 1-10.
- [33] 王光耀, 刘俊, 姚宏伟, 等. 考虑新能源场站相互影响的暂态过电压幅值预测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2026, 54(4): 1-12.
- Wang Guangyao, Liu Jun, Yao Hongwei, et al. Transient overvoltage magnitude prediction method considering the mutual interactions among renewable energy stations[J]. *Power System Protection and Control*, 2026, 54(4): 1-12.
- [34] 李嘉明, 陈曦, 郝一帆, 等. 电缆线路中操作过电压主导频率的确定方法[J]. *电网技术*, 2020, 44(7): 2785-2793.
- Li Jiaming, Chen Xi, Hao Yifan, et al. Study on dominant frequency determination of switching overvoltage in cable line[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(7): 2785-2793.

王瀚锋(1992—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为高压电缆绝缘状态评估(通信作者)(E-mail: 13991112028@163.com)。