

特高压交直流线路同塔架设对交流线路 电磁暂态特性的影响

孙 棚,董 鹏,朱艺颖,蒋卫平

(中国电力科学研究院系统所,北京 100192)

摘要: 分别建立了 ± 800 kV 特高压直流输电线路与 500 kV、220 kV 交流线路同塔架设的电磁暂态仿真模型,分析了交直流线路同塔架设对 500 kV、220 kV 交流线路感应电压和感应电流的影响和对 500 kV、220 kV 交流线路潜供电流和恢复电压的影响。分析结果表明,和双回交流线路同塔架设相比,交直流线路同塔架设时,会对 500 kV、220 kV 交流线路产生如下影响:220 kV 和 500 kV 交流线路中均会产生感应电压和感应电流;500 kV 架设线路高抗时线路故障后潜供电流无过零点,否则潜供电流和恢复电压仅略有增加;由于 220 kV 交流线路通常不装设线路高抗,所以交直流线路同塔架设对其潜供电流和恢复电压影响甚微。针对 500 kV 架设线路高抗时潜供电流不过零的现象,提出了解决措施。

关键词: 特高压输电; 直流输电; 交流输电; 同塔架设; 潜供电流; 电磁感应; 模型

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.01.025

0 引言

国家电网公司正在大力推进特高压电网的建设,计划建设多条特高压直流输电线路,其中多条直流输电线路面临输电走廊紧张的局面,必须与超高压交流输电线路同塔建设。针对多回交流同塔架设的感应电压与感应电流^[1-3]、潜供电流与恢复电压问题^[4-6],已经有比较多的研究成果,但是交直流线路同塔架设,会面临较为特殊的问题,本文仅对其中的交流线路感应电压、感应电流以及潜供电流、恢复电压,进行较为全面的研究,并给出了最终的研究结果以及相应的建议。

1 特高压直流与超高压交流线路同塔架设的仿真模型

1.1 直流系统参数

整流站和逆变站均采用双极、每极双 12 脉动换流器串联接线方式,采用增容后工况。额定容量为 7600 MW;直流线路长度为 2000 km;直流额定电压为 ± 800 kV;平波电抗器为 240 mH(极线 2×60 mH,中性线 2×60 mH);送端接地极电阻为 $0.217\ \Omega$,受端接地极电阻为 $0.026\ \Omega$;换流变压器漏抗为 19%。

1.2 交流系统参数

500 kV 交流系统短路电流为 63 kA,连续运行电压范围为 500~550 kV;220 kV 交流系统短路电流为 40 kA,连续运行电压范围为 220~252 kV。双回 500 kV 交流线路输送容量为 3600 MW,双回 220 kV 交流线路输送容量为 1000 MW。

1.3 交直流线路参数及接线方式

1.3.1 直流非同塔部分的线路参数

非同塔部分直流线路长度为 1900 km,直流线路采用 $6\times \text{LGJ}-900/40$ 导线,弧垂 18 m;接地极线路采用 $4\times \text{LGJ}-500/35$ 导线,弧垂 10 m;架空地线采用 GJ-80 导线,弧垂 10 m。本文中大地电阻率均为 $100\ \Omega\cdot\text{m}$,直流线路、交流线路和接地极线路均采用频率相关模型。

1.3.2 交流非同塔部分的线路参数

500 kV 交流线路非同塔部分长度为 40 km,采用 $4\times \text{LGJ}-630/45$ 导线,弧垂 14.6 m;架空地线采用 GJ-80 导线,弧垂 10.7 m;220 kV 交流线路非同塔部分长度为 40 km,采用 $2\times \text{LGJ}-630/45$ 导线,弧垂 18 m;架空地线采用 GJ-80 导线,弧垂 15 m。

1.3.3 交直流同塔部分的线路参数

交直流线路同塔部分长度为 100 km,双回 500 kV 交流线路与单回 ± 800 kV 直流线路同塔(V 串夹角 90°)的杆塔结构见图 1;直流线路采用 $6\times \text{JL}/\text{G3A}-900/75$ 导线,弧垂 18 m;交流线路采用 $4\times \text{LGJ}-630/45$ 导线,弧垂 18 m;架空地线采用 GJ-80 导线,弧垂 15 m。双回 220 kV 交流线路与单回 ± 800 kV 直流线路同塔(V 串夹角 90°)的杆塔结构如图 2 所示:直流线路采用 $6\times \text{JL}/\text{G3A}-900/75$ 导线,弧垂 18 m;交流线路采用 $2\times \text{LGJ}-630/45$ 导线,弧垂 18 m;架空地线采用 GJ-80 导线,弧垂 15 m。

2 交直流线路同塔架设对交流线路感应电压和感应电流的影响

2.1 对 500 kV 交流线路感应电压和感应电流的影响

本文中交流双回线路采用逆相序排列;交流线

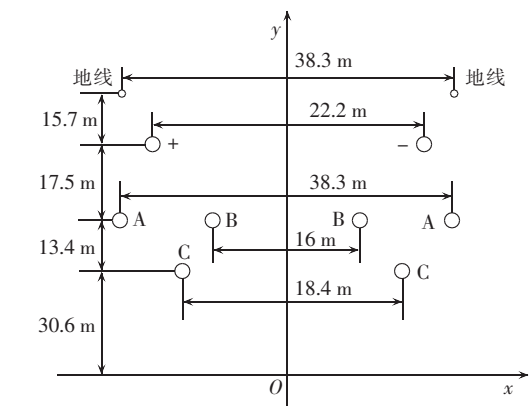


图 1 500 kV 交流与 ±800 kV 直流线路同塔架设杆塔结构

Fig.1 Structure of power transmission tower shared by 500 kV AC line and ±800 kV DC line

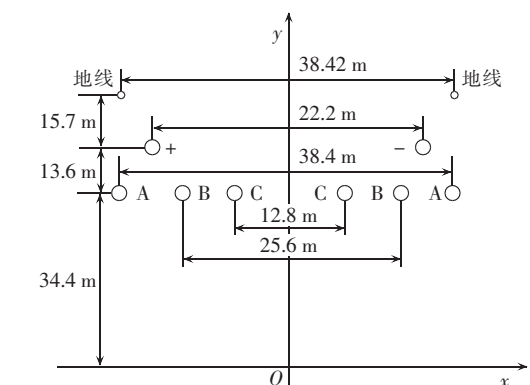


图 2 220 kV 交流与 ±800 kV 直流线路同塔架设杆塔结构

Fig.2 Structure of power transmission tower shared by 220 kV AC line and ±800 kV DC line

路与直流线路同塔架设部分采用紧凑型输电线路,交流线路不与直流线路同塔架设部分采用鼓形输电线路;交流双回线路与特高压直流系统同塔架设时,因为架线过于复杂,研究中不考虑线路换位。

目前关于交流线路潜供电流和恢复电压的计算标准,有一些研究成果和近似准则,但是最为权威的还是 DL/T615—1997 标准,本文的所有计算根据此标准进行。

为了进一步说明直流系统与交流系统之间的感应耦合情况,同时也为今后交流系统投入运行和检修提供依据,本文就交流系统与直流系统的感应电压和感应电流进行了计算。IEC 接地开关感应电流和电压标准值见表 1,其中, I_{in} 、 U_{in} 和 I_{re} 、 U_{re} 分别为额定感性电流、电压和额定容性电流、电压。

表 1 IEC 接地开关感应电流和电压标准值					
Tab.1 Induced current and standard voltage of earthing switch, stipulated by IEC					
额定电压/kV	类别	电磁耦合		静电耦合	
		I_{in}/A	U_{in}/kV	I_{re}/A	U_{re}/kV
525	A 类	80	2	1.6	8
	B 类	200	25	25	25

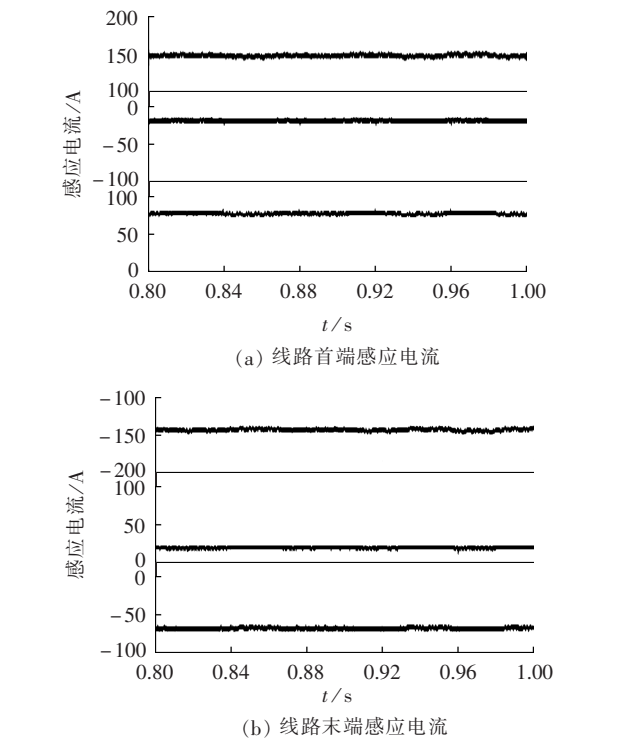
交流线路双回停运时,运行中的直流系统对双回交流系统的感应电压和感应电流(以双回线路中严重者为例)如表 2、3 所示。

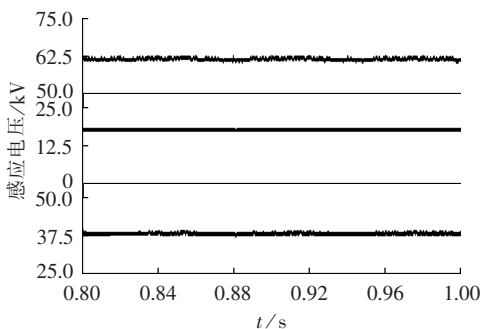
表 2 交流线路双回停运时的感应电压						
Tab.2 Induced voltage during dual-loop outage of AC transmission line						
状态	首端电压/kV			末端电压/kV		
	a 相	b 相	c 相	a 相	b 相	c 相
两端开路	60.4	16.4	37.1	59.7	16.5	36.8
首端接地	—	—	—	1.3	1.7	—
末端接地	2.1	0.2	1.4	—	—	1.1

表 3 交流线路双回停运时的感应电流						
Tab.3 Induced current during dual-loop outage of AC transmission line						
状态	首端电流/A			末端电流/A		
	a 相	b 相	c 相	a 相	b 相	c 相
首端接地	3.2	5.8	2.9	—	—	—
末端接地	—	—	—	5.8	1.3	4.0
两端接地	150.9	17.0	73.5	150.9	17.0	73.4

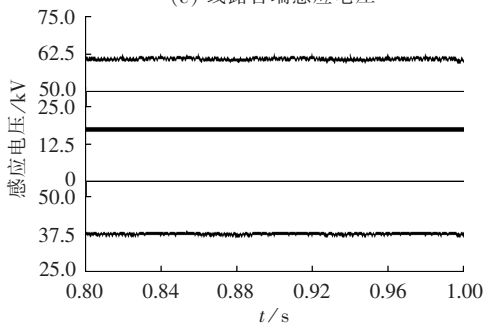
从表 2、3 中可以看出,特高压直流线路对 500 kV 交流线路有一定的感应作用,电磁感应电流最大达到 150.9 A,静电感应电压最大达到 60 kV 左右,超过了 B 类接地开关的要求。此时其线路首端和末端电磁感应电流和静电感应电压的波形如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,首端和末端电磁感应电流和静电感应电压均为直流电流或电压,即如果直流系统在运行状态时,交流线路投入运行或退出到检修状态,交流线路的接地开关将开合直流线路耦合过来的直流电流或者电流没有过零点,这和仅双回交流线路同塔架设有所不同。因此需要考虑交流





(c) 线路首端感应电压



(d) 线路末端感应电压

图 3 交流线路双回停运时,运行中的直流系统对交流线路的感应电流和感应电压波形
Fig.3 Waveforms of voltage and current induced by operating DC line during dual-loop outage of AC transmission line

线路接地刀闸开断直流或没有过零点的正弦电流的能力。

2.2 对 220 kV 交流线路感应电压和感应电流的影响

根据上面的计算结果,以最严重情况为例。交流线路单回运行时,运行中的交流线路与直流线路对另一回停运交流线路的感应电压和感应电流(以双回中严重者为)如表 4、5 所示。

表 4 交流线路单回停运时的感应电压
Tab.4 Induced voltage during mono-loop outage of AC transmission line

状态	首端电压/kV			末端电压/kV		
	a 相	b 相	c 相	a 相	b 相	c 相
两端开路	88.2	89.8	67.3	86.9	88.7	66.5
首端接地	—	—	—	3.7	4.7	6.4
末端接地	3.7	4.7	6.4	—	—	—

表 5 交流线路单回停运时的感应电流
Tab.5 Induced current during mono-loop outage of AC transmission line

状态	首端电流/A			末端电流/A		
	a 相	b 相	c 相	a 相	b 相	c 相
首端接地	3.7	4.2	5.8	—	—	—
末端接地	—	—	—	3.9	3.9	5.6
两端接地	209.4	164.6	120.2	209.4	209.4	120.2

从表 4、5 中可以看出,特高压直流线路对 220 kV 交流线路的感应作用比对 500 kV 交流线路更大,电磁感应电流最大达到 209.4 A,静电感应电压最大达到 89.8 kV。

3 交直流线路同塔架设对交流线路潜供电流和恢复电压的影响

3.1 对 500 kV 交流线路潜供电流和恢复电压的影响

3.1.1 不架设高抗时交直流线路同塔架设对潜供电流和恢复电压的影响

研究中考虑 140、150、160 km 3 种交流线路长度,针对其是否与直流线路同塔架设分别进行了计算(考虑极端情况,均按全线路同塔架设)。由于潜供电流值在交流线路两端最大,研究中考虑在同塔架设段首端和末端发生单相接地故障时的潜供电流并进行比较,结果如表 6 所示。

表 6 不同线路长度下不同位置发生单相接地故障的潜供电流值
Tab.6 Arc current during single-phase grounding fault for different line lengths and grounding locations

线路长度/km	同塔架设情况	潜供电流/A	
		首端故障	末端故障
160	是	30.6	33.0
160	否	30.8	29.7
150	是	28.7	30.8
150	否	28.5	27.6
140	是	26.6	29.7
140	否	26.3	25.5

注:“是”表示交直流线路同塔架设,“否”表示交直流线路不同塔架设。

从表 6 可以看出,如果交流线路不架设高抗,在不同的交直流同塔架设的长度下,潜供电流的大小均相差不大。

下面以交流线路长度为 140 km(其中同塔架设 100 km)为例,考虑直流是否运行(直流传输功率不同,对交流的影响不同),计算交流线路不同位置潜供电流及恢复电压。特高压直流运行时,双回交流线路首末端发生单相接地时的潜供电流及恢复电压值如表 7 所示。

表 7 交流线路首末端发生单相接地时的潜供电流及恢复电压值

Tab.7 Arc current and recovery voltage during single-phase grounding fault at both ends of AC line

故障位置	潜供电流/A	恢复电压/kV
I 回线路首端	25.5	97.7
II 回线路首端	23.2	89.3
I 回线路末端	26.7	91.2
II 回线路末端	24.4	83.6

特高压直流运行时,I 回线路末端 a 相发生单相接地短路故障时潜供电流最大,其潜供电流及恢复电压的波形如图 4 所示。

通过计算对比可以看出,和仅双回交流线路同塔架设相比,特高压直流线路与交流线路同塔架设后,由于直流线路对交流线路的感应作用,交流线路

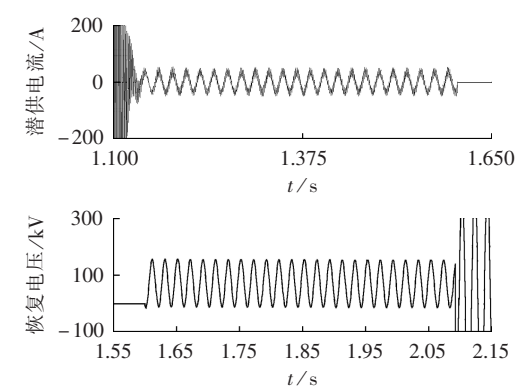


图 4 I 回交流线路末端发生 a 相接地短路故障时
潜供电流及恢复电压波形
Fig.4 Arc current and recovery voltage during
grounding fault of phase-a at end of
AC transmission line I

发生单相接地短路故障后,其潜供电流与恢复电压
仅略有增加,增加幅度分别为 1.8 A 和 1.7 kV。

3.1.2 架设高抗时交直流同塔架设对潜供电流和恢复电压的影响

双回交流线路架设高抗后,其电磁暂态过程与
不架设高抗时有很大的不同,特别是和特高压直流
线路同塔架设时,其电磁暂态过程更为复杂,需要
对其进行较为深入的研究。本节研究的计算模型与第
3.1.1 节基本相同,只在每回交流线路末端加装高压
并联电抗器(按 80% 的补偿度计算)。交流线路长度
仍然为 140 km(交直流同塔 100 km),中性点小电抗
取 800 Ω(确保潜供电流最小),接地电阻按照 10 Ω
考虑。

由于特高压交直流线路同塔架设时,双回交流
线路并没有考虑换位,如果加装高抗,其不平衡度会
更加严重,本文对线路上不同位置的潜供电流以及恢
复电压进行了校验,发现由于直流电流在交流线路
上产生的感应,潜供电流始终不存在过零点,见图 5。

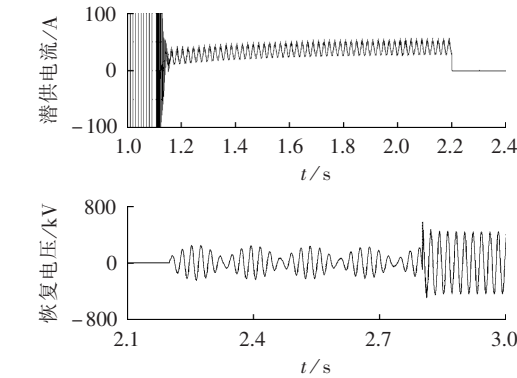


图 5 架设高抗时 I 回交流线路首端发生 a 相
接地短路故障时的潜供电流与恢复电压波形
Fig.5 Arc current and recovery voltage during
grounding fault of phase-a at end of AC
transmission line I with high-voltage
shunt-reactor

经过计算可知,将特高压直流线路停运(此时相
当于交直流输电线路没有同塔架设),相同故障下潜
供电流与恢复电压达到稳态后是不存在直流分量的
的,潜供电流为 6.2 A。

为了进一步说明这个问题,将双回交流线路完
全停运,只运行特高压直流。这时假设交流线路仍
有某一相发生单相接地故障,即使交流系统两端的
断路器已经拉开,但是通过直流系统的感应,接地点
仍存在电流,其波形如图 6 所示。

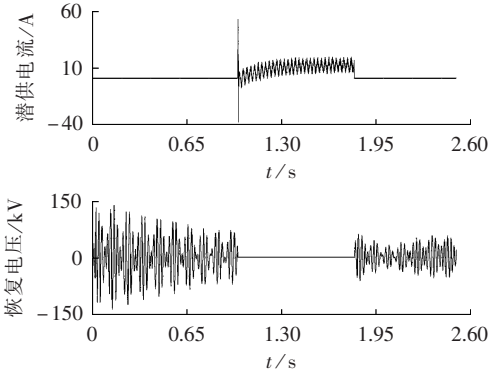


图 6 双回交流线路停运时直流线路对交流
线路的感应波形
Fig.6 Waveforms of voltage and current induced
by operating DC line during dual-loop outage
of AC transmission line

通过以上分析可以看出,潜供电流的直流分量
是由同塔架设的直流线路耦合造成的。

3.1.3 相关的解决措施

在交流线路末端架设高抗后交直流同塔架设会
造成潜供电流无过零点,从而对潜供电流的熄灭造
成影响,需要采取措施使潜供电流过零。

3.1.3.1 高抗分置

将原先同塔双回交流线路末端的高抗分置在线
路的首端和末端,那么 I 回交流线路 a 相(以线路中
点为例)的潜供电流波形如图 7 所示。

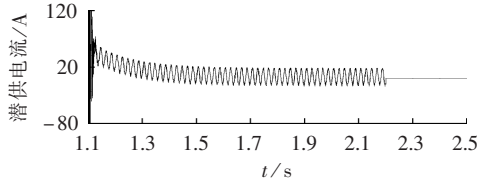


图 7 高抗首末端分置后 I 回交流线路
a 相中点的潜供电流波形
Fig.7 Waveforms of phase-a arc current at middle
of AC transmission line I with high-voltage
shunt-reactors at both ends

研究结果表明,线路首端、末端的潜供电流波形
与线路中点基本一致,b 相和 c 相也基本相同。

3.1.3.2 交流线路全换位

本文还考虑交流线路进行一次全换位的方法来
减小各点潜供电流的直流偏置。由于复杂性的原

因,交直流线路同塔架设部分不允许再换位。本节仍选取 100 km 交流线路同塔架设,换位方法采用逆相序反向换位。采用交流线路进行一次全换位的方法以后,各点潜供电流直流偏置明显减少,I 回线路 a 相首端及末端单相接地短路故障时的潜供电流及恢复电压波形如图 8 所示。

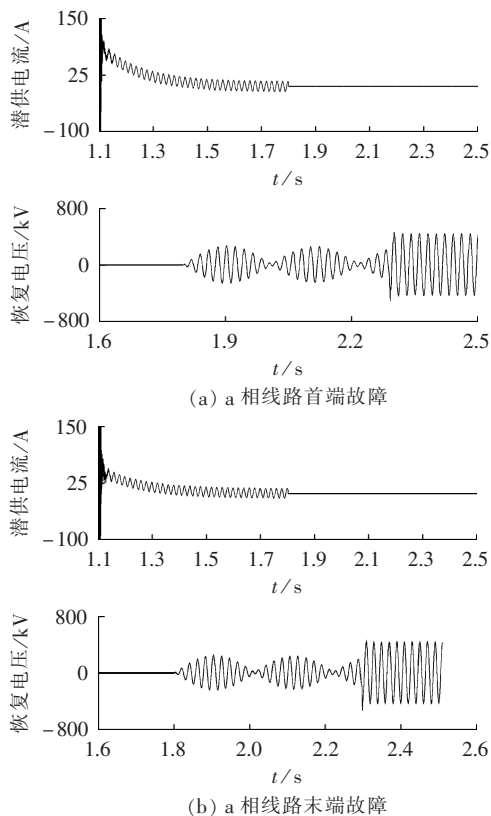


图 8 I 回交流线路 a 相潜供电流及恢复电压
Fig.8 Phase-a arc current and recovery voltage of AC transmission line I

此时,I 回线路 a 相首端潜供电流及恢复电压分别为 7.7 A 和 134.6 kV(有效值);I 回线路 a 相末端潜供电流及恢复电压分别为 7.3 A 和 125.2 kV(有效值)。将同塔架设线路长度降低为交流线路全长的 1/3 时,I 回线路 a 相首端潜供电流及恢复电压下降为 5.6 A 和 99.3 kV(有效值);I 回线路 a 相末端潜供电流及恢复电压分别为 6.9 A 和 119.0 kV(有效值),恢复电压有所下降。研究表明,将交流线路进行全换位后,潜供电流直流分量明显减小,能够有过零点,可以满足熄弧要求。

3.2 对 220 kV 交流线路潜供电流和恢复电压的影响

220 kV 交流线路通常不考虑装设线路高抗,计算结果表明,交直流线路同塔架设对 220 kV 不装设高抗的交流线路潜供电流和恢复电压均影响甚微。

4 结论

本文针对特高压直流输电线路与交流线路同塔

架设时,直流线路对交流线路感应电压和感应电流的影响,以及对交流线路潜供电流和恢复电压的影响等方面进行了较为详细全面的计算分析。计算分析结果表明,特高压直流输电系统运行时会在与其同塔架设的双回交流线路上产生感应电压和电流,造成交流线路电压和电流中存在直流分量,从而使其均超出了 IEC 接地开关感应电流和电压标准值的范围;并且当与特高压直流输电线路同塔架设的双回 500 kV 交流线路不换位且末端架设高抗时,会出现潜供电流不存在过零点的现象,从而导致潜供电流无法正常熄弧,可以采用高抗分置或者全换位的方法加以解决。这些都对今后相关工程的设计与运行具有较高的参考价值。

参考文献:

- [1] 李宝聚,周浩. 1000 kV 同塔双回线路感应电压和电流的计算分析[J]. 电网技术,2011,35(3):14-19.
LI Baoju,ZHOU Hao. Calculation and analysis on induced voltage and current of 1000 kV transmission line adopting structure of double circuit on the same tower[J]. Power System Technology, 2011,35(3):14-19.
- [2] 林莘,李学斌,徐建源. 特高压同塔双回线路感应电压、电流仿真分析[J]. 高电压技术,2010,35(9):93-98.
LIN Shen,LI Xuebin,XU Jianyuan. Simulation and analysis of induced voltage and current for UHV double circuit transmission line on the same tower[J]. High Voltage Engineering,2010,35(9):93-98.
- [3] 王晓彤,林集明,班连庚. 1000 kV 同塔双回线路不平衡度及换位方式研究[J]. 电网技术,2009,33(5):1-5.
WANG Xiaotong,LIN Jiming,BAN Liangeng. Analysis on unbalance factor and transposing modes for 1000 kV double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology,2009,33(5):1-5.
- [4] 易强,周浩,计荣荣. 同塔双回特高压线路潜供电流和恢复电压的限制[J]. 电力系统自动化,2011,35(10):83-88.
YI Qiang,ZHOU Hao,JI Rongrong. Restriction on secondary arc current on ultra-high voltage AC double circuit transmission lines on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35(10):83-88.
- [5] 王晓彤,班连庚,朱普轩. 750 kV 同塔同窗同相序双回紧凑型线路的潜供电流和感应电压[J]. 电网技术,2011,35(1):84-90.
WANG Xiaotong,BAN Liangeng,ZHU Puxuan. Research on secondary-arc currents and induced voltages for 750 kV compact double-circuit transmission lines on the same tower with the same phase sequence in the same tower window[J]. Power System Technology,2011,35(1):84-90.
- [6] 王晓彤,班连庚,林集明. 金昌—酒泉 750 kV 同塔双回紧凑型线路换位方式分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(16):102-107.
WANG Xiaotong,BAN Liangeng,LIN Jiming. Comparative analysis on transposing modes for 750 kV compact double-circuit overhead transmission lines on same tower from Jinchang to Jiuguang [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(16):102-107.
- [7] 李雨,邓春,韩仲卿. 500 kV 同塔双回紧凑型线路并联补偿特性[J]. 电网技术,2010,34(10):109-114.

- LI Yu,DENG Chun,HAN Zhongqing. Parallel compensation characteristics of 500 kV double circuit compact transmission lines on same tower[J]. Power System Technology,2010,34(10): 109-114.
- [8] 张媛媛,班连庚,林集明. 1000 kV 同塔双回输电线路潜供电流研究[J]. 电网技术,2009,33(15):87-92.
- ZHANG Yuanyuan,BAN Liangeng,LIN Jiming. Research on secondary arc current of 1000 kV double-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology,2009,33(15): 87-92.
- [9] 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.
- [10] 林莘,李学斌,徐建源. 快速接地开关对交流特高压同塔双回输电线路潜供电弧的限制[J]. 电网技术,2010,34(9):26-30.
- LIN Shen,LI Xuebin,XU Jianyuan. Suppress secondary arc in double UHVAC circuit on the same tower by high speed grounding switch[J]. Power System Technology,2010,34(9): 26-30.
- [11] 刘海军,韩民晓,文俊. 特高压双回线路并联电抗器中性点小电抗的优化设计[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):87-91.
- LIU Haijun,HAN Minxiao,WEN Jun. Optimized neutral reactor design of shunt reactor for UHV double-circuit lines[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(11):87-91.
- [12] 陈剑萍,张思,丘文千. 特高压线路潜供电流的仿真计算[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):71-75.
- CHEN Jianping,ZHANG Si,QU Wenqian. Simulative calculation of UHV line secondary arc current[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(4):71-75.
- [13] 李博通,李永丽,景雷. 同塔双回线的并联电抗器补偿方式研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(8):23-27.
- LI Botong,LI Yongli,JING Lei. Shunt reactor compensation scheme for dual parallel lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(8):23-27.
- [14] 娄颖,戴敏,何慧雯. 1000 kV 交流紧凑型输电线路潜供电流和恢复电压计算分析[J]. 高电压技术,2011,37(8):1882-1886.
- LOU Ying,DAI Min,HE Huiwen. Secondary arc current and recovery voltage of 1000 kV AC compact transmission line[J]. High Voltage Engineering,2011,37(8):1882-1886.
- [15] 林莘,谢寅志,徐建源. 特高压交流输电线路潜供电弧的抑制措施[J]. 高电压技术,2012,38(9):2150-2155.
- LIN Shen,XIE Yinzi,XU Jianyuan. Secondary arc extinction methods for UHVAC transmission lines[J]. High Voltage Engineering,2012,38(9):2150-2155.
- [16] 李振强,谷定雯,修木洪. 特高压同塔双回线路潜供电弧抑制措施的比较[J]. 高电压技术,2010,36(10):2388-2392.
- LI Zhenqiang,GU Dingxie,XIU Muhong. Comparison of two measures on restricting secondary arc in UHV double circuit lines on the same tower[J]. High Voltage Engineering,2010, 36(10):2388-2392.

作者简介:



孙 栩

孙 栩(1978-),男,天津人,高级工程师,博士,主要从事高压直流输电及电力系统仿真方面的研究(E-mail:sunxu@epri.sgcc.com.cn);

董 鹏(1985-),男,山西太原人,工程师,硕士,主要从事高压直流输电及电力系统仿真方面的研究。

Impact of tower-shared UHV DC and AC line installation on electromagnetic transient characteristics of AC line

SUN Xu,DONG Peng,ZHU Yiying,JIANG Weiping

(China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China)

Abstract: The electromagnetic simulation models are built respectively for ± 800 kV UHVDC and 500 kV/220 kV AC transmission lines installing on the same tower and the impact of the tower-shared installation mode on the induced voltage and current of 500 kV/220 kV AC line are analyzed,as well as the impact on its arc current and recovery voltage. Analytical results show that,compared with the installation mode of only AC transmission lines on the same tower,the induced voltage and current occur in both 500 kV and 220 kV AC transmission lines;the arc current of 500 kV transmission line with high-voltage shunt-reactor has no zero-crossing point,against which some countermeasures are proposed,while the arc current and recovery voltage of 500 kV transmission line without high-voltage shunt-reactor are slightly increased;because 220 kV AC transmission line usually operates without high-voltage shunt-reactor,its arc current and recovery voltage are impacted very slightly.

Key words: UHV power transmission; DC power transmission; AC power transmission; installation on same tower; arc current; electromagnetic induction; models