

500 kV 海底电缆雷电过电压研究

徐伟, 廖民传, 郑志源, 汪晶毅

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510660)

摘要: 依托南方主网与海南电网联网工程, 运用 ATP-EMTP 电磁暂态分析软件, 建立了 500 kV 架空线路与海底电缆线路的雷电侵入波仿真计算模型, 采用修正后的电气几何模型法来计算最大绕击雷电流, 采用先导发展法作为绝缘子串和空气间隙放电闪络判据, 计算架空线路遭受绕击和反击时, 无避雷器和有避雷器 2 种情况下海底电缆主绝缘上所承受的雷电过电压, 据此校核海底电缆雷电冲击绝缘水平及避雷器配置的合理性。研究结果表明, 合理配置避雷器大大降低了雷电过电压对海缆的影响, 在架空线路遭受绕击和 -250 kA 雷电流反击时, 海底电缆最大雷电过电压分别为 -916 kV 和 -923 kV, 海底电缆绝缘裕度和避雷器配置满足防雷要求。

关键词: 500 kV; 海底电缆; 绕击; 反击; 雷电过电压

中图分类号: TM863

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)02-0062-05

Research on Lightning Overvoltage of 500 kV Submarine Cable Lines

XU Wei, LIAO Minchuan, ZHENG Zhiyuan, WANG Jingyi

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510660, China)

Abstract: This paper built the simulation calculation model of lightning intruding wave for 500 kV overhead lines and submarine cable lines of Hainan interconnection project, with using ATP-EMTP software. The maximum shielding failure current of overhead lines was calculated by electrical geometry model (EGM) and the leader propagation flashover model was used as the criterion for insulators and air gap flashover. Then, the lightning overvoltage of submarine cable was calculated after overhead lines suffering from the lightning shielding failure and counterattack. Finally, the submarine cable's insulation level for lightning impulse and lightning arrester was checked. The results show that the maximum lightning overvoltage of submarine cable are -916 kV and -923 kV after overhead lines suffering from the lightning shielding failure and counterattack. And the insulation margin of submarine cable and the installation of lightning arrester meets the requirements.

Key words: 500 kV; submarine cable; shielding failure; back flash overvoltage; lightning overvoltage

南方主网与海南电网联网工程 500 kV 海底电缆线路是国内唯一的超高压、长距离海底电缆线路, 承担了连接内陆电网与海南电网的重任。海底电缆敷设于海底, 一般不会遭雷电直击。但当与海底电缆相连的架空线路遭受雷击时, 雷电波则会沿架空线路导线侵入海底电缆^[1-2]。限制雷电侵入波的主要措施是装设避雷器, 避雷器动作后, 可将侵入波幅值加以限制, 使海底电缆受到保护。一旦避雷器配置不当, 雷电侵入波则可能会导致海底电缆主绝缘损伤, 影响海缆安全稳定运行, 造成南海电

网与南方主网联系的中断。因此, 有必要对海底电缆的雷电过电压进行研究。

文章依托南方主网与海南电网联网工程, 运用 ATP-EMTP 电磁暂态分析软件^[3-4], 建立了 500 kV 架空线路与海底电缆线路的雷电侵入波仿真计算模型, 采用修正后的电气几何模型法^[5]来计算最大绕击雷电流, 采用先导发展法作为绝缘子串和空气间隙放电闪络判据^[6-7], 计算架空线路遭受绕击和反击后海底电缆主绝缘上所承受的雷电过电压, 据此校核海底电缆雷电冲击绝缘水平及避雷器配置的合理性。

1 工程概况及线路参数

南方主网与海南电网联网工程线路包括 500 kV

收稿日期: 2015-08-28

作者简介: 徐伟(1982), 男, 山东新泰人, 工程师, 硕士, 主要从事高压输电线路研究与设计(e-mail) xuwei719@qq.com。

港城至南岭海缆终端站线路、500 kV 海底电缆线路和 500 kV 林诗岛海缆终端站至福山线路, 均为单回线路, 线路全长 169.139 km, 如图 1 所示。

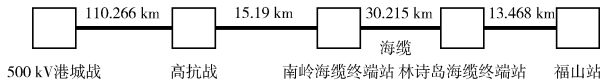


图 1 线路示意图

Fig. 1 Transmission Line Route Diagram

1.1 架空线路

架空线路每相导线采用 $4 \times \text{JL/LB20A-300/40}$ 型铝包钢芯铝绞线, 全线架设 2 根 OPGW-16B1-132 型光缆。港城侧架空线路导线悬垂绝缘子串采用 FX-BW4-500/180 型复合绝缘子, 一般线路导线耐张绝缘子串采用双联 32 片 LXHY3-210 型玻璃绝缘子, 海缆终端站进出线档采用双联 32 片 LXHY6-160 型玻璃绝缘子。福山侧架空线路导线悬垂绝缘子串采用单联 28 片 FC160P/155 型玻璃绝缘子; 一般段线路耐张绝缘子串采用双联 28 片 FC210P/170 型玻璃绝缘子; 海缆终端站进出线档采用双联 30 片 FC160P/155 型玻璃绝缘子。跳线串均采用 FXBW4-500/100 型复合绝缘子。杆塔塔头尺寸如图 2 所示。

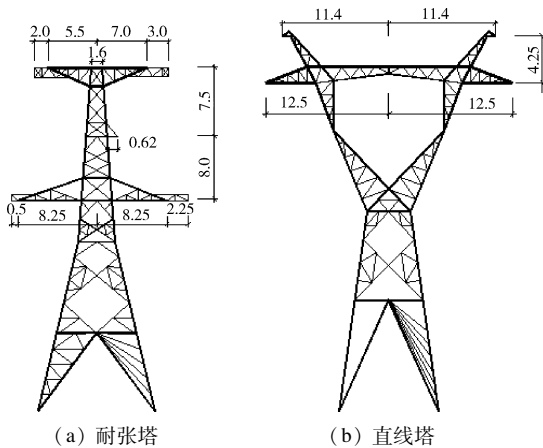


图 2 杆塔塔头尺寸(单位 m)

Fig. 2 Tower of Transmission Line (Unit m)

1.2 500 kV 海底电缆线路

500 kV 海底电缆线路长约 30.215 km, 采用自容式充油电缆, 电缆导体截面为 500 mm^2 [8]。海缆主绝缘雷电冲击耐受电压为 1 550 kV, 海缆采用两端直接接地的接地方式, 海缆铅套和铠装层分别与两侧海缆终端站的接地网相连, 中间海缆铅套和铠装层每隔约 8 km 短接 1 次。南岭海缆终端站实测接地电阻为 0.135Ω , 林诗岛海缆终端站实测接地

电阻为 0.33Ω 。海底电缆线路两端海缆终端站内安装有避雷器, 参数如表 1 所示。

表 1 避雷器参数表

Table 1 Parameter of Arrester

项 目	数值/个
额定电压(kV, 有效值)	444
最大持续运行额定电压(kV, 有效值)	355
操作冲击(30/60 (s) 2 kA 残压(kV, 峰值)	881
雷电冲击(8/20 us) 10 kA 残压(kV, 峰值)	1 069

2 仿真模型的建立

本文运用 ATP-EMTP 电磁暂态分析软件, 建立了架空线路与海底电缆线路的雷电侵入波仿真计算模型。雷电流波形采用负极性 $2.6/50 \mu\text{s}$ 双指数标准冲击波 [9-10]。反击计算时雷电通道波阻抗取 300Ω ; 绕击计算时雷电通道波阻抗取 800Ω 。架空线路和海底电缆线路采用 LCC 模块中的 JMarti 模型。杆塔采用多波阻抗模型进行建模 [11-12]。采用美国电科院及国际大电网会议 (CIGRE) 推荐的先导发展法 [6-7] 作为绝缘子串和空气间隙放电闪络判据。先导发展过程的数学描述如式 1 所示 [13]。

$$\frac{dg}{dt} = kV(t) \left[\frac{V(t)}{l-g} - E_0 \right] \quad (1)$$

式中: dg/dt 为先导发展速度, m/s; k 为常数; $V(t)$ 为间隙上的电压, kV; g 为先导长度, m; l 为空气间隙长度, m; E_0 为临界击穿场强, kV/m。

架空线路最大绕击雷电流采用改进的电气几何模型计算确定 [5], 该模型在国际通用电气几何模型基础上考虑了地形因素、工作电压对击距的影响, 同时计及了雷电入射角, 计算结果更为准确可靠。

3 绕击耐雷性能的研究

3.1 最大绕击雷电流计算

根据修正电几何法 [5] 的基本原理, 如果雷电流较大, 则大地和地线将对导线起到完全屏蔽作用, 雷击大地或地线; 若雷电流幅值较小, 大地和地线的屏蔽范围有限, 则有可能发生绕击。发生绕击的临界雷电流幅值称为最大绕击雷电流, 即当雷电流幅值大于该值时不发生绕击, 小于该值时可能会发生绕击。因此, 首先需计算最大绕击雷电流。

由于林诗岛和南岭海缆终端站进线档地形相

似、构架布置相同且第一基杆塔相似，最大绕击雷电电流基本相同。本文分别计算了雷电绕击进线档档中导线和海缆终端站侧第一基杆塔上相跳线时的最大绕击雷电电流，计算结果如图3所示。档中导线高度较低且受3根地线保护，而上相跳线高度相对较高且受地线保护效果不明显，故杆塔上相跳线遭受的最大绕击雷电电流显著大于档中边相，对海缆的危害也更大。绕击第一基杆塔上相跳线时，最大绕击雷电电流随初始相角变化而变化，在初始相角为 90° 时，绕击雷电电流达到最大 -45.3 kA 。

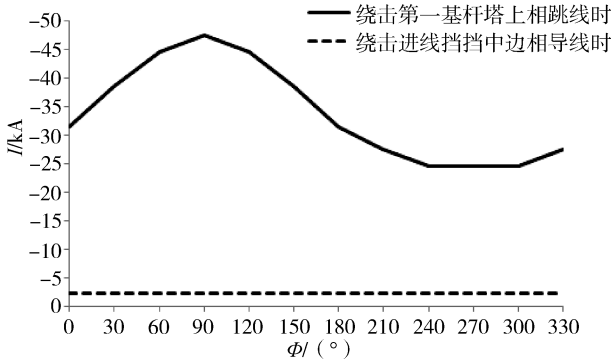


图3 不同雷击点最大绕击雷电电流随初始相角的变化情况
Fig. 3 Changes of Maximum Shielding Failure Current with Initial Phase Angle at Different Lightning Points

3.2 海缆绕击雷电过电压计算

本文计算了初始相角为 0° 时海缆雷电过电压 U 随雷电电流 I 幅值大小变化情况，如图4所示。由图可知，海缆雷电过电压 U 随雷电电流 I 的增大先增大后减小。这主要是由于：架空线路遭受绕击后，雷电过电压沿导线侵入海缆，且随着绕击雷电电流的增大，海缆所承受的雷电过电压越大；当绕击雷电电流增大到一定值时，造成跳线绝缘子串闪络，杆塔和地线将起到部分泄流作用，使导线上的雷电过电压有所下降，海缆上的雷电过电压比绝缘子串闪络前有所降低，期间海缆雷电过电压在绝缘子串闪络前海缆雷电过电压达到最大值。跳线绝缘子串雷击未闪络和雷击闪络时，海缆雷电过电压随时间变化情况分别如图5和图6所示。

综上所述，在绕击计算过程中，海缆所承受的最大雷电过电压发生在最大绕击雷电电流或绝缘子串闪络前最大雷电电流时。

本文研究了雷电绕击林诗岛侧和南岭侧架空线路时，无避雷器和有避雷器2种情况下海缆主绝缘所承受的雷电过电压，计算结果分别如表2和表3

所示。由表可知，无避雷器时，海缆雷电过电压高达 $-1\ 395\text{ kV}$ ，接近海缆主绝缘雷电冲击耐受电压；安装避雷器后，海缆上的雷电过电压得到了有效控制，最大为 -916 kV ，远低于海缆主绝缘雷电冲击耐受电压，绝缘裕度为41%。

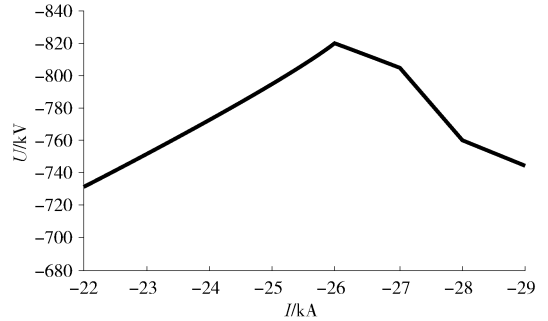


图4 海缆雷电过电压随雷电电流幅值大小变化情况 (初始相角为 0°)

Fig. 4 Changes of Lightning Overvoltage with Lightning Current Amplitude (When Initial Phase Angle is 0°)

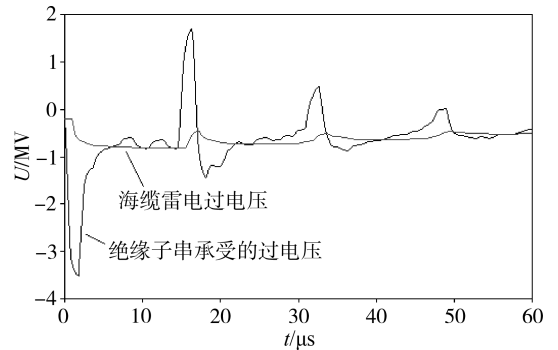


图5 跳线绝缘子串雷击未闪络时海缆雷电过电压随时间变化情况

Fig. 5 Changes of Lightning Overvoltage with Time Before the Insulator String Flashover

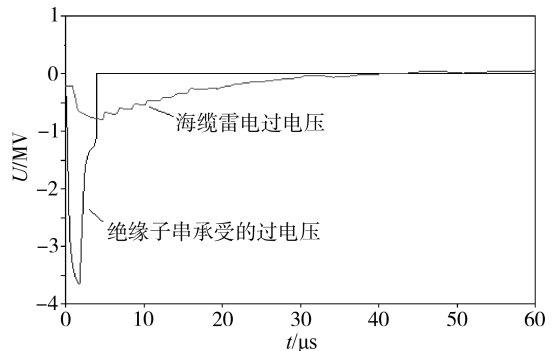


图6 跳线绝缘子串雷击闪络时海缆雷电过电压随时间变化情况

Fig. 6 Changes of Lightning Overvoltage with Time when the Insulator String Flashover

由表2和表3可以看出，在 $180^\circ \sim 330^\circ$ 初始相

表2 绕击林诗岛侧线路

Table 2 Overhead Lines of Linshidao Suffer from the Lightning Shielding Failure

初始相角/°	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
线路最大绕击雷电流/kA	-29.3	-36.3	-42.3	-45.3	-42.3	-36.3	-29.3	-25.3	-22.3	-22.3	-22.3	-25.3
跳线串闪络前最大雷电流/kA	-26	-28	-30	-31	-31	-31	\	\	\	\	\	\
无避雷器时海缆雷电过电压幅值/kV	-1 264	-1 139	-1 008	-945	-926	-951	-1 032	-1 071	-1 166	-1 302	-1 326	-1 395
有避雷器时海缆雷电过电压幅值/kV	-820	-687	-536	-404	-349	-414	-519	-618	-749	-871	-897	-910

注：“\”表示绕击雷电流达到最大时跳线串仍未闪络。

表3 绕击南岭侧线路

Table 3 Overhead Lines of Nanling Suffer from the Lightning Shielding Failure

初始相角/°	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
线路最大绕击雷电流/kA	-29.3	-36	-42.3	-45.3	-42	-36	-29.3	-25.3	-22.3	-22.3	-22.3	-25.3
跳线串闪络前最大雷电流/kA	-26	-29	-30	-31	-32	-32	\	\	\	\	\	\
无避雷器时海缆雷电过电压幅值/kV	-1 292	-1 171	-1 003	-917	-918	-992	-1 031	-1 046	-1 251	-1 414	-1 451	-1 380
有避雷器时海缆雷电过电压幅值/kV	-816	-691	-535	-387	-367	-423	-523	-628	-746	-867	-899	-916

注：“\”表示绕击雷电流达到最大时跳线串仍未闪络。

角下, 绕击雷电流达到最大时跳线串仍未闪络。该情况下海缆雷电过电压将随绕击雷电流增大而增大, 并在最大绕击雷电流时达到最大。

4 反击耐雷性能的研究

雷击架空线路塔顶或地线时, 若雷电流幅值不超过线路反击耐雷水平, 绝缘子串不闪络, 架空线路导线上的电位由工频电压、避雷线在导线上的耦合电位以及空间变化的电磁场在导线上产生的感应电压叠加而成, 过电压幅值相对较小(经计算, 感应过电压幅值约为300~400 kV), 不会对海缆构成威胁。

当雷电流幅值达到线路反击耐雷水平时, 绝缘子串将闪络, 导线上的电位将显著升高, 雷电波沿导线侵入海缆, 且雷电流幅值越大, 海缆上的雷电过电压越大, 如图7所示。

我国一般地区雷击输电线路杆塔雷电流幅值服从概率分布, 雷电流幅值越大发生的概率越低, 如式2所示。

$$\lg P = -\frac{I}{88} \quad (2)$$

式中: P 为雷电流幅值概率; I 为雷电流幅值, kA。

本文按极端情况考虑, 反击雷电流取-250 kA(发生的概率为0.144%), 计算了雷击林诗岛侧和南岭侧杆塔地线支架时, 无避雷器和有避雷器2种情况下海缆主绝缘所承受的雷电过电压, 计算结果如图8所示。可知, 无避雷器时, 海缆雷电过电压

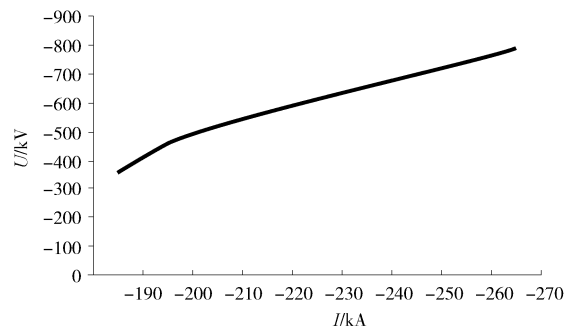


图7 海缆雷电过电压随雷电流幅值大小变化情况
Fig. 7 Changes of Lightning Overvoltage with Lightning Current Amplitude

高达-1 470 kV, 接近海缆主绝缘雷电冲击耐受电压; 安装避雷器后, 海缆上的雷电过电压得到了有效控制, 最大为-923 kV, 远低于海缆主绝缘雷电冲击耐受电压, 绝缘裕度为40%。更高幅值的雷电流能在海缆上产生更高的雷电过电压, 绝缘裕度有所降低, 但如此大幅值雷电流的概率极低。

5 结论

1) 绕击时若绝缘子串闪络, 海缆雷电过电压随雷电流幅值的增大先增大后减小, 且在绝缘子串闪络前达到最大值; 若绝缘子串不闪络, 则海缆雷电过电压将随绕击雷电流增大而持续增大, 并在最大绕击雷电流时达到最大值。避雷器的配置有效降低了绕击时的海缆雷电过电压, 最大为-916 kV, 海缆绝缘裕度为41%。

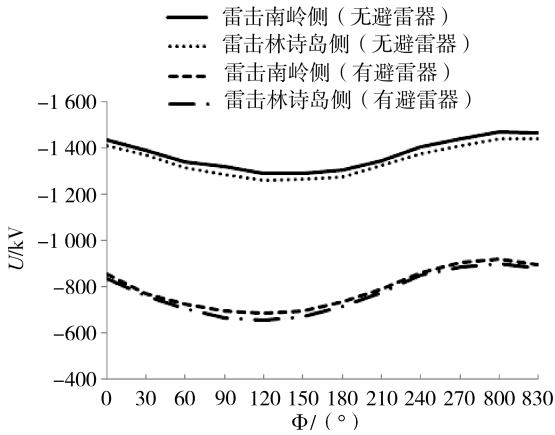


图8 海缆雷电过电压随初始相角变化情况

Fig. 8 Changes of Lightning Overvoltage with Initial Phase Angle

2) 雷击架空线路塔顶或地线绝缘子串未闪络时, 导线上的雷电过电压幅值较小, 不会对海缆构成威胁; 绝缘子串闪络后, 海缆上的雷电过电压随雷电流幅值增大而增大。避雷器的配置有效降低了反击时的海缆雷电过电压, 在线路遭受 -250 kA 雷电流反击时, 海缆上最大雷电过电压为 -923 kV , 海缆绝缘裕度为 40% 。更高幅值的雷电流能在海缆上产生更高的雷电过电压, 绝缘裕度有所降低, 但如此大幅值雷电流的概率极低。

3) 经仿真计算可见, 在海缆终端站合理配置避雷器可有效降低雷电过电压对海缆的影响, 确保海缆安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 厉天威, 刘大鹏, 雷园园, 等. 三端柔性直流输电系统雷电侵入波过电压 [J]. 电力建设, 2014, 35(3): 13-17.
LI Tianwei, LIU Dapeng, LEI Yuanyuan. Lighting Intruding Wave Overvoltage of Three-Terminal Flexible DC Transmission System [J]. Electric Power Construction, 2014, 35(3): 13-17.
- [2] 赵林杰, 赵晓斌, 厉天威, 等. 多端柔性直流输电系统中 $\pm 160 \text{ kV}$ XLPE 绝缘电缆系统设计与选型 [J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2635-2643.
ZHAO Linjie, ZHAO Xiaobin, LI Tianwei, et al. Design and Selection of $\pm 160 \text{ kV}$ XLPE Insulated Cable System for Multi-terminal VSC HVDC Power Transmission System [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2635-2643.
- [3] 曹祥麟. EMTP 在特高压研究中的应用 [J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 64-68.

CAO Xianglin. Application of EMTP in the Research of UHV AC Power Transmission [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 64-68.

- [4] MARTINEZ J A, ARANDA F C. Lightning Performance Analysis of Overhead Transmission Lines Using The EMTP [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2200-2210.
- [5] 廖民传, 汪晶毅, 李志泰, 等. 混压同塔多回输电线路绕击建模与评估 [J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2547-2552.
LIAO Minchuan, WANG Jingyi, LI Zhitai, et al. Modeling and Evaluation of Shielding Failure for Multi-Circuit Transmission Lines in Different Voltage Levels on The Same Tower [J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2547-2552.
- [6] 黄炳纲, 周东平. 对线路防雷计算中绝缘闪络判据的研讨 [J]. 中国电力, 1999, 32(11): 59-63.
HUANG Weigang, ZHOU Dongping. Study and Discussion on Insulation Flashover Criterion for Lightning Performance Calculation [J]. Electrical Power, 1999, 32(11): 59-63.
- [7] CIGRE Working Group 01 of SC 33. Guide to Procedures for Estimating The Lightning Performance of Transmission Lines [J]. CIGRE Brochure, 1991(63): 23-29.
- [8] 李健, 郑伟. 交流 500 kV 海底电力电缆结构设计 [J]. 电线电缆, 2010(1): 11-13.
LI Jian, ZHENG Wei. Design of 500 kV AC Submarine Power Cables [J]. Electric Wire & Cable, 2010(1): 11-13.
- [9] DOMMEL H W, 李永庄, 林集明, 等. 电力系统电磁暂态计算理论 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1991.
- [10] 徐伟, 刘浚, 黄伟超. 基于 ATP-EMTP 的杆塔接地体冲击接地电阻计算模型 [J]. 电力建设, 2010, 31(5): 22-25.
XU Wei, LIU Xun, HUANG Weichao. The Study of Impulse Grounding Model on Grounding Devices of Transmission-line Tower Based on Spark Discharge Equivalent Radius [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(5): 22-25.
- [11] YAMADA T, MOCHIZUKI A, SAWADA J, et al. Experimental Evaluation of a UHV Tower Model for Lightning Surge Analysis [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(1): 393-402.
- [12] HARA T, YAMAMOTO O. Modeling of a Transmission Tower for Lightning Surge Analysis [J]. Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(3): 283-289.
- [13] EPRI. EPRI AC Transmission Line Reference Book: 200 kV and Above [M]. 3rd Edition. California: EPRI, 2005: 6-47.

(责任编辑 高春萌)