

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.07.009

并行双回特高压直流输电线路地面合成场强计算与试验研究

杨小玲^{1,2}, 吕建红², 唐立军¹, 彭继文², 黄 韬²

(1. 长沙理工大学物理与电子科学学院, 长沙 410114; 2. 国网湖南省电力公司电力科学研究院, 长沙 410007)

摘要: 文中采用Deutsch假设和现场实测相结合的方法, 分析了特高压、并行双回特高压直流输电线路下地面合成场强的分布特性。结果表明: 基于Deutsch假设计算的结果与实测结果吻合, 适用于实际工程合成场强的预测。双回特高压直流线路并行时, 由于空间正负离子流的相互影响作用, 其场强分布与导线排列方式有较大关系, 两回路线路内侧极性相同时, 并行线路之间区域合成场强较单回增加, 内侧极性相反时, 并行线路之间区域场强较单回减小。同时, 随着两回线路之间距离的减小, 或线路高度的增加, 与单回路相比, 线路中间区域合成场强增加或减小幅度增大, 但两回路线路外侧合成场强与单回线路基本相同。

关键词: 并行双回; 特高压直流输电线路; 合成场强; Deutsch假设

Calculation and Test of Resultant Electric Field at the Ground Level under UHVDC Parallel Double-circuit Transmission Line

YANG Xiaoling^{1,2}, LYU Jianhong², TANG Lijun¹, PENG Jiwen², HUANG Tao²

(1. School of Physics and Electronic Science, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. Hunan Electric Power Corporation Research Institute of States Grid, Changsha 410007, China)

Abstract: We analyze the ground resultant electric field distributions under UHVDC and UHVDC parallel double-circuit transmission lines by Deutsch assumption and measurement. The analysis shows that the calculation of Deutsch assumption is consistent with measurement, so this theoretical calculation method is applicable to prediction of practical resultant electric fields. For parallel UHVDC double-circuit transmission line, the resultant electric field distribution is related with conductors arrangement because of the mutual influence of positive and negative ion flows in space. When two circuits have same polarity on their medial sides, the resultant electric field intensity inside double-circuit transmission line region is higher than that around single-circuit line, on the contrary, when two circuits have opposite polarity on their medial sides, the resultant electric field intensity inside the double-circuit line region is lower than that around single-circuit line. Moreover, with the decrease in the distance between two circuits or the increase in the height of double-circuit transmission line, the resultant electric field intensity inside the double-circuit line region increases, or decreases more larger slope, but the changed amplitude of total electric field increased as the of s decreasing or as the transmission lines higher. But the resultant electric field intensity outside the double-circuit line region is almost same with that of single-circuit transmission line.

Key words: parallel double-circuit; UHVDC transmission line; resultant electric field; Deutsch assumption

0 引言

中国的能源分布与电力负荷需求分布存在极

不平衡现象, 随着负荷中心电力需求的增加, 同时满足清洁能源外送需求, 发展远距离输送的特高压直流工程已成为必然趋势^[1]。同时, 为缓解线路走廊用地紧张矛盾, 提高单位走廊输电能力, 特高压直

收稿日期: 2015-02-03; 修回日期: 2015-03-04

基金项目: 国网湖南省电力公司重点科技项目(KZ12K16004)。

Project Supported by Key Project of State Grid Electric Power Company of Hunan Province(KZ12K16004).

流线路平行架设亦不可避免。

合成场强是评价高压直流输电工程电磁环境影响的最主要因子, 目前针对单回或双回并行高压、特高压直流输电线路地面合成场强的计算较多^[2-18], 但由于条件限制, 针对上述型式运行线路开展的现场测试鲜为报道, 同时也较少针对并行特高压直流输电线路高度的变化对地面合成场强变化情况开展详细分析。因此, 文中以 Deutsch 假设的解析法为基础, 结合在运线路实测结果, 针对单回和并行双回特高压直流输电线路地面合成场强分布开展详细研究, 同时, 探讨不同排列方式下, 并行双回特高压直流输电线路地面合成场强随两回线路之间距离和线路高度的变化趋势。

1 Deutsch 假设法

目前高压直流输电线路合成场强计算方法有基于 Deutsch 假设的解析法^[8-13]、半经验公式法^[14]和有限元法^[15-17]。有限元法精度最高, 但输电线路及周围空间属于半开放空间, 场域的精细剖分对系统配置要求很高, 导致计算效率下降; 半经验公式法程序编制较为简单, 计算速度最快, 但算法通用性差, 计算精度最低; Deutsch 解析法则在计算精度与计算速度之间取得了平衡。因此文中采用 Deutsch 假设解析方法进行建模计算。

根据 Deutsch 假设, 空间电荷只影响电场幅值而不影响其方向, 合成电场 E_s 与标称电场 E 的关系可表示为^[18]:

$$E_s = AE; \quad (1)$$

$$J = K\rho E. \quad (2)$$

式(1)、(2)中: A 为标量函数; E_s 与 E 为向量; J 为电流密度; K 为离子迁移率; ρ 为空间电荷密度。

根据电磁场理论:

$$\nabla J = 0; \quad (3)$$

$$\nabla \cdot E_s = \rho / \varepsilon_0. \quad (4)$$

联立式(1)–(4), 得:

$$A(\varphi)^2 = A_e^2 + \frac{2\rho_e A_e}{\varepsilon_0} \int_{\varphi}^V \frac{d\varphi}{E(\varphi)^2}; \quad (5)$$

$$\frac{1}{\rho(\varphi)^2} = \frac{1}{\rho_e^2} + \frac{2}{\varepsilon_0 \rho_e A_e} \int_{\varphi}^V \frac{d\varphi}{E(\varphi)^2}. \quad (6)$$

式(5)–(6)中: ρ_e 为起晕后导线表面电荷密度; $\rho(\varphi)$ 为沿电力线方向以空间电位 φ 为变量的空间电荷密度; $A_e = \frac{E_0}{E_{\max}} = \frac{V_0}{V}$, 其中 E_0 为导线表面起晕电场, $E_{\max}$ 为导线表面最大电场, V_0 为导线电晕起始电压, V 为导线上的电压。

若不考虑正负极起晕特性的差异, 则利用 Peek 公式可估算正负极导线表面起晕电场 E_0 为

$$E_0 = 30m(1 + \frac{0.301}{\sqrt{r}}). \quad (7)$$

式(7)中: m 为导线表面粗糙系数; r 为子导线半径。

对于给定的 ρ_e , 由式(6)得到的 $\rho(\varphi)$ 计算得到相应的平均电荷密度 ρ_m , 见式(8)。

$$\rho_m = \int_0^V \int_{\varphi}^V \frac{\rho(\varphi) d\eta}{E(\varphi)^2} d\varphi \bigg/ \int_0^V \int_{\varphi}^V \frac{d\varphi}{E(\varphi)^2} d\eta. \quad (8)$$

平均电荷密度 ρ_m 又可表示为

$$\rho_m = \varepsilon_0(V - V_0) \bigg/ \int_0^V \int_{\varphi}^V \frac{d\varphi}{E(\varphi)^2} d\eta. \quad (9)$$

通过弦截迭代法, 最终可得到起晕后导线表面的电荷密度 ρ_e 。进一步可通过式(5)、(6)分别求得标量函数 A 和电荷密度 ρ , 继而计算出合成电场 E_s 。

2 现场试验测试

为了验证 Deutsch 假设解析法的工程实用性, 分别选取国内在运特高压直流线路, 和在运并行架设特高压直流线路, 开展其地面合成场强现场实测。现场测试方法参照标准《直流换流站与线路合成场强、离子流密度测量方法》(DL/T 1089—2008)^[19]规定执行。

3 结果与讨论

3.1 单回特高压直流线路

选取国内某在运单回特高压直流输电线路, 依据其线路实际参数, 采取 Deutsch 假设方法进行理论计算, 并与现场实测对比分析, 结果见图 1。

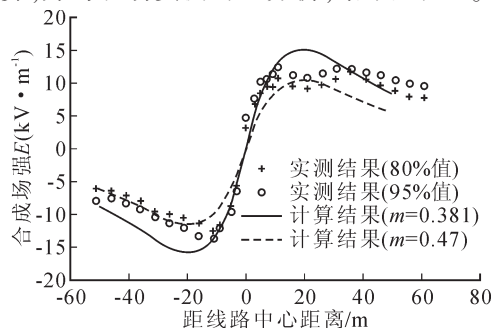


图 1 特高压直流线路下方地面合成场强的理论计算与实测分布曲线

Fig. 1 The distribution of theoretical and measured ground total electric field under UHVDC transmission line

其中, 计算时, 考虑到新建投运导线与运行较长时间导线表面粗糙程度的差异性, 粗糙系数分别取 $m=0.381$ 和 $m=0.47$ 两种情况。现场测量结果统计地面合成场强 95% 值和 80% 值 2 种情况。现场试验测

试时,该线路运行电压为 ± 800 kV,此外该线路导线高度 31 m,导线型号采用 6×ACSR720/50 导线,分裂间距 45 cm,子导线半径 1.81 cm,极间距 22 m。现场试验环境参数为:温度 16.9 °C,湿度 64%,风速 1.5 m/s,风向南。

由图 1 可知,现场实测结果与基于 Deutsch 假设解析法计算结果较吻合,外界环境虽有影响,但监测值基本落于 2 种取不同粗糙系数的计算曲线之间,即表明 Deutsch 假设解析法适用于单回特高压直流输电线路地面合成场强的预测。

3.2 双回并行特高压直流线路

与前节相同,选取国内某在运双回并行特高压直流输电线路,依据其线路实际参数,采取 Deutsch 假设方法进行理论计算,并与现场实测对比分析,结果见图 2。

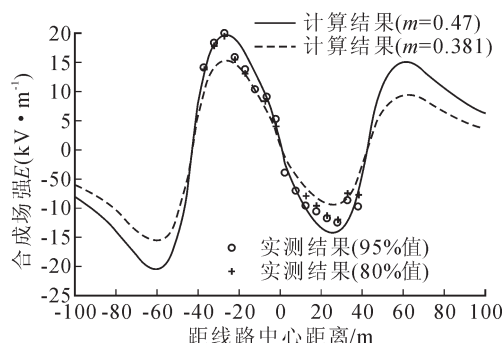


图 2 并行双回特高压直流线路下方地面合成场强的理论计算与实测分布曲线

Fig. 2 The distribution of theoretical and measured ground total electric field under parallel double-circuit UHVDC transmission line

同样,在理论计算时,考虑到新建投运导线与运行较长时间导线表面粗糙程度的差异性,粗糙系数分别取 $m=0.381$ 和 $m=0.47$ 两种情况。现场测量结果统计地面合成场强 95%值和 80%值 2 种情况,考虑到现场场地尺度限制,只测量了两回线路之间的区域范围。现场试验测试时,2 条线路的运行电压分别为 ± 800 kV 和为 ± 751 kV。其中一回线路导线对地高度 27 m,导线型号为 6×ACSR720/50,分裂间距 45 cm,子导线半径 1.81 cm,极间距 22 m;另一回线路导线对地高度 29 m,极间距 22 m,导线型号为 6×JL/G3A900/40,子导线半径为 2 cm,分裂间距 45 cm;2 线相邻极导线间距为 64 m。测试时环境参数为:温度 27 °C,风速 1.2 m/s,湿度 54%。

由图 2 可知,现场实测结果与基于 Deutsch 假设解析法计算结果较吻合,监测值均落于 2 种取不同粗糙系数的计算曲线之间,即表明 Deutsch 假设

解析法同样适用于双回并行特高压直流输电线路地面合成场强的预测。此外,考虑到线路运行长久的影响,建议在工程建设前,开展合成场强的理论预测时粗糙系数取 0.381。

3.3 并行线路与单回线路地面合成场强对比分析

在结合现场实测结果论证了 Deutsch 假设解析法的工程实用性后,下面将针对并行双回特高压直流输电线路间的相互影响作用,即其合成场强分布规律开展深入分析。

并行双回特高压直流输电线路的排列主要有“+ - + -”、“+ - - +”、“- + - +”、“- + + -”4 种方式,其中“+ - + -”与“- + - +”、“+ - - +”与“- + + -”相应区域地面合成场强的方向相反,但分布规律一致,因此本文仅讨论“- + - +”、“- + + -”2 种排列组合情况下的地面合成场强分布。

该节首先分析并行双回特高压直流输电线路下方地面合成场强分布相比单回线路的变化情况,对比计算结果见图 3。在理论计算中,每回线路参数取值一致,具体为:电压为 ± 800 kV,对地高度 29 m,导线型号 6×JL/G3A900/40,分裂间距 45 cm,子导线半径 2 cm,极间距 22 m,两回线路相邻极导线间距为 64 m。此外,图 3(a)中的双回线路为“- + - +”排列方式,图 3(b)中的双回线路为“- + + -”排列方式。

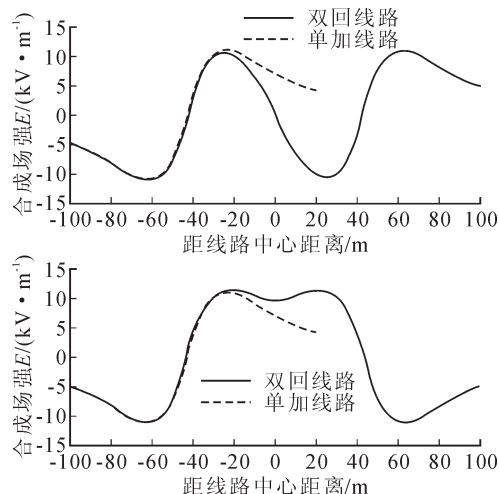


图 3 单回线路与并行双回线路下方地面合成场强分布规律的对比曲线

Fig. 3 The compared distribution of ground total electric field under UHVDC transmission line and parallel double-circuit UHVDC transmission line

根据图 3(a)可知,对于“- + - +”排列模式的并行双回特高压直流输电线路,由于两回线路之间区域正负离子流的相互抵消作用,导致两回线路之间区域的合成场强相比单回而言均有减小,如并行双回线路内侧导线下方地面最大合成场强由 11.07 kV/m

下降为 10.61 kV/m, 外侧导线以外区域, 受另一回路影响较小, 线路下方地面合成场强基本和单回路相同。

根据图 3(b)可知, 对于“+ + - -”排列模式的并行双回特高压直流输电线路, 由于两回路之间区域正离子流的相互加强作用, 导致两回路之间区域的合成场强相比单回而言均有增加, 如并行双回路内侧导线下方地面最大合成场强由 11.07 kV/m 增加至 11.41 kV/m, 与“-+ -+”排列模式相同, 外侧导线以外区域, 受另一回路影响较小, 线路下方地面合成场强基本和单回路相同。

3.4 线路间距对并行线路地面合成场强分布的影响

在线路实际建设过程中, 由于整条输电线路较长, 且所经各地环境敏感点情况不同, 因此, 线路建成后, 并行双回路各线路段之间的距离差异很大。鉴于此问题, 该节详细开展线路间距对并行双回路地面合成场强分布的影响分析。

与 3.3 节一致, 同样选取“-+ -+”、“-+ + -”2 种排列方式进行计算, 两回路间距选取 60、90、120 m 3 种情况。此外, 理论计算中, 并行双回特高压输电线路电压均取 ± 800 kV, 对地高度 45 m, 导线型号 6×JL/G3A900/40, 分裂间距 45 cm, 子导线半径 2 cm, 极间距 22 m。计算结果见图 4。

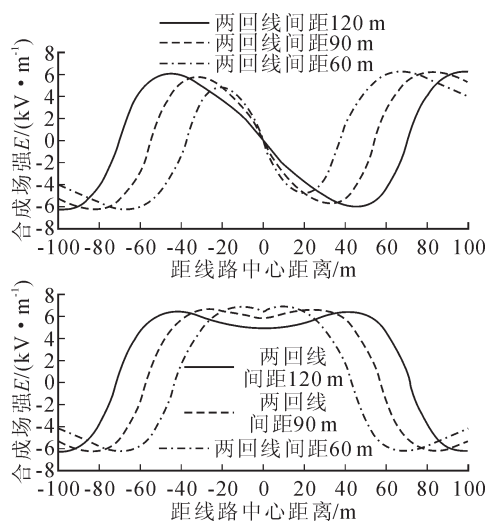


图 4 不同间距下并行双回线路下地面合成场强的分布曲线
Fig. 4 The distribution of ground total electric field under parallel double-circuit UHVDC transmission line with difference distance

由图 4(a)可知, 随着并行双回路之间间距的减小, 两回路之间区域正负离子流的相互作用加强, 导致内侧极导线下方地面合成场强随着线路间距的减小而减小, 即内侧区域最大地面合成场强由 120 m 的 6.06 kV/m, 降低至 90 m 时的 5.76 kV/m,

再降低至 60 m 的 4.82 kV/m。因此, 随着两回路之间距离的减小, 线路间区域电磁环境将有所减缓, 但考虑到线路安全因素, 两线间距离不可太小。

对于“-+ + -”排列方式, 由图 4(b)可知, 随着并行双回路之间间距的减小, 两回路之间区域正离子流的相互作用将加强, 继而导致内侧极导线下方地面合成场强随着线路间距的减小而增大, 即内侧区域最大地面合成场强由 120 m 的 6.42 kV/m, 增加至 90 m 时的 6.61 kV/m, 增加至 60 m 的 6.89 kV/m。

3.5 线路高度对并行线路地面合成场强分布的影响

同样地, 对于实际运行并行高压直流线路, 所跨越区域不同, 架设高度亦不相同。为了解线路架设高度对并行双回路地面合成场强分布的影响, 选取 25、35、45 m 3 种线路高度, 针对“-+ -+”、“-+ + -”2 种排列方式进行计算。理论计算中, 并行双回线路的架设高度一致, 电压均取 ± 800 kV, 导线型号 6×JL/G3A900/40, 分裂间距 45 cm, 子导线半径 2 cm, 极间距 22 m, 理论计算结果见图 5。另外, 不同排列方式下, 并行双回特高压直流线路外侧极导线下方、及内侧极导线下方地面合成场强最大值的绝对值见表 1。

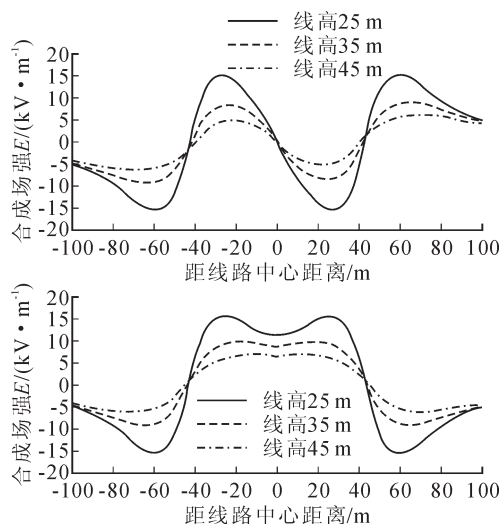


图 5 不同高度下并行双回线路下地面合成场强的分布曲线

Fig. 5 The distribution of ground total electric field under parallel double-circuit UHVDC transmission line with difference height

由图 5 和表 1 可知: 随着导线架设高度的增加, 并行双回特高压直流线路下方合成场强迅速衰减。采用“-+ -+”排列方式架设, 线路高度为 25 m 时, 地面合成场强最大值为 15.37 kV/m, 高度增加至 35 m 高度时, 地面合成场强最大值衰减至 9.13 kV/m, 线路高度再行增加至 45 m 时, 场强

表1 不同排列方式下,其中一回路内、外侧极导线下方地面合成场强最大值

Table 1 The maximum ground total electric field under the outer polarity of one circuit incase of difference arrangement

排列模式	导线高度/m	最大地面合成场强/(kV·m ⁻¹)		内、外侧极导线下方地面合成场强变化幅值/%
		外侧极导线下方	内侧极导线下方	
-+ -+	25	15.37	15.29	-0.5
	35	9.13	8.48	-7.1
	45	6.25	5.02	-19.7
-+ +-	25	15.52	15.57	0.3
	35	9.21	9.65	4.8
	45	6.24	6.89	10.4

最大值衰减至 6.25 kV/m。同样地,采取“-+ +-”排列方式时,线路高度从 25 m 分别增加至 35、45 m 时,地面合成场强最大值由 15.57 kV/m 分别衰减至 9.65 kV/m、及 6.89 kV/m。

此外,由表 1 可知,随着线路高度的增加,并行线路对外侧极导线下方合成场强影响变弱。当线路架设高度为 45 m 时,“-+ -+”、“-+ +-”2 种排列方式,外侧极导线下方地面最大合成场强的绝对值基本相同,分别为 6.25、6.24 kV/m。

而随着线路高度的增加,并行线路内侧极导线之间的相互作用加强,导致内侧极导线下方合成场强最大值减小或变大的幅值增大。“-+ -+”排列方式,线高为 25 m 时,内侧极导线下方地面合成场强最大值的绝对值相比外侧极导线只衰减了 0.5%,而线路高度增加至 35、45 m 时,衰减幅值分别增大为 7.1%和 19.7%;对于“-+ +-”排列方式,线路高度从 25 m 增加至 35、45 m 时,内侧极导线下方地面合成场强最大值的绝对值相比外侧极导线而言,变大的幅值从 0.3%,分别增加至 4.8%和 10.4%,见表 1。

4 结论

1)依据在运线路实测,进一步验证了 Deutsch 假设解析法在工程合成场强预测中的实用性,为线路设计、环境影响评价提供了依据。

2)通过并行双回特高压直流输电线路与单回线路下方地面合成场强的对比计算,分析了并行线路对地面合成场强的影响。由于并行两回线路间正负离子流的相互影响,“-+ -+”排列模式的并行双回特高压直流输电线路,两回线路之间区域的合成场强相比单回而言均有减小;“-+ +-”排列模式下,两回线路之间区域的合成场强相比单回而言均有增

加;外侧导线以外区域,受另一回线路影响较小,线路下方地面合成场强基本和单回线路相同。

3)随着并行双回线路间距离的增加,由于两回线路间相互作用的加强,不同排列方式下两回线路间地面合成场强增加或减小幅值变大。

4)随着并行双回线路对地高度的增加,并行线路对外侧极导线下方合成场强影响变弱,当线路架设高度为 45 m 时,无论哪种排列方式,并行线路对外侧极导线下方合成场强的影响基本为零;而随着线路高度的增加,并行线路内侧极导线之间的相互作用加强,导致内侧极导线下方地面合成场强的最大值减小或变大的幅值增大。“-+ -+”排列式时,内侧极导线下方地面合成场强最大值的绝对值相比外侧极导线的衰减幅值从 25 m 线高的 0.5%增加 45 m 时的 19.7%;“-+ +-”排列时,内侧极导线下方地面合成场强最大值的绝对值相比外侧极导线而言,变大的幅值从 25 m 线高的 0.3%,增加至 45 m 时的 10.4%。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压直流输电线路[M]. 北京:中国电力出版社,2009:143-168.
LIU Zhenya. Ultra high voltage DC transmission line[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009:143-168.
- [2] 林秀丽,徐新华,汪大釐. 高压直流输电线路电场强度计算方法[J]. 浙江大学学报:工学版,2007,41(8):1421-1426.
LIN Xiuli, XU Xinhua, WANG Dahui. Calculation of electric field intensity of high voltage direct current transmission lines[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(8):1421-1426.
- [3] 袁海燕,庄燕飞,姚金霞,等. 导线表面最大场强对直流输电线路电磁环境的影响分析[J]. 高压电器,2013,49(10):7-12.
YUAN Haiyan, ZHUANG Yanfei, YAO Jinxia, et al. Influence analysis of conductor surface maximum electric field strength on DC transmission line electromagnetic environment[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10):7-12.
- [4] 黎小林,张波,王琦,等. 特高压直流线路的场分布影响因素分析[J]. 高压电器,2006,42(6):407-409.
LI Xiaolin, ZHANG Bo, WANG Qi, et al. Influence factor analysis of the field distribution around the ultra-HVDC line[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6):407-409.
- [5] 王小凤,周浩. ±800 kV 特高压直流输电线路的电磁环境研究[J]. 高压电器,2007,43(2):109-112.
WANG Xiaofeng, ZHOU Hao. Electromagnetic environmental effect of ±800 kV UHVDC transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2):109-112.
- [6] 龙晓慧,罗栋梁. HVDC 输电线路合成场强解析计算方

- 法研究[J]. 浙江电力, 2008, 27(3):9-12.
- LONG Xiaohui, LUO Dongliang. Research on analytic calculation of total electric field around HVDC transmission lines[J]. Zhejiang Electric Power, 2008, 27(3):9-12.
- [7] The Ohio State University. Model study of HVDC electric field effects[R]. USA: EPRI EL-1817, 1981.
- [8] 傅宾兰. 高压直流输电线路地面合成场强与离子流密度的计算[J]. 中国电机工程学报, 1987, 7(5):58-66.
- FU Binlan. Calculation of the ground total electric field strength and ion current density under HVDC overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 1987, 7(5):58-66.
- [9] 杨 勇, 陆家榆, 雷银照. 极导线垂直排列直流线路地面合成电场的一种计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21):13-18.
- YANG Yong, LU Jiayu, LEI Yinzhaohao. A calculation method for the total electric field strength at the ground level under vertical bipolar HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(21):13-18.
- [10] SARMA M P, JANISHEWSKYJ W. Analysis of corona losses on DC transmission lines, Part I-Unipolar lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(5):718-731.
- [11] ABDEL-SATTAR S. Corona current and field profile underneath vertical bipolar HVDC lines with bundle conductors[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1986, EI-21(2):197-204.
- [12] SANNA M P, JANISHEWSKYJ W. Analysis of corona losses on DC transmission lines, part ii-bipolar lines [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(10):1476-1489.
- [13] YONG Yang, LU Jiayu, LEI Yinzhaohao. A calculation method for the electric field under Double-Circuit HVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4):1736-1742.
- [14] JOHNSON G B. Degree of corona saturation for HVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2):695-707.
- [15] AL-HAMOUZ Z M, ABDEL-SALAM M. Finite-element solution of monopolar corona on bundle conductors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(2):380-386.
- [16] 万保权, 邬 雄, 路 遥, 等. ± 800 kV 云广 UHVDC 输电线路合成场强计算[J]. 高电压技术, 2006, 32(9):143-145.
- WAN Baoquan, WU Xiong, LU Yao, et al. Calculation on the total electric field under ± 800 kV Yun-Guang UHVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9):143-145.
- [17] 杨 扬, 陆家榆, 杨 勇. 基于上流有限元法的同走廊两回 ± 800 kV 直流线路地面合成电场计算[J]. 电网技术, 2012, 36(4):22-27.
- YANG Yang, LU Jiayu, YANG Yong. Calculation of total electric field at the ground level under double-circuit ± 800 kV DC transmission lines arranged on same corridor with upstream FEM method[J]. Power System Technology, 2012, 36(4):22-27.
- [18] 方 芳, 黄 韬, 吕建红, 等. ± 500 kV 直流架空线路地面合成场实测与计算[J]. 湖南电力, 2014, 34(1):1-4.
- FANG Fang, HUANG Tao, LYU Jianhong, et al. Test and calculation research of total electrical field at ground level for 500 kV HVDC overhead transmission line[J]. Hunan Electric Power, 2014, 34(1): 1-4.
- [19] DL/T 1089—2008 直流换流站与线路合成场强、离子流密度测量方法[S]. 2008.
- DL/T 1089—2008 Measurement method for total electric field strength and ion current density of the converter station and DC transmission lines[S]. 2008.

杨小玲(1986—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为电网电磁环境。

吕建红(1981—), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要研究方向为电网电磁环境、输变电设施噪声及大气环境与外绝缘。

唐立军(1963—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为信号检测与处理、集成电路设计。

(上接第 45 页)

- WANG Zhengming, LU Jianqiu. Six inch thyristor optimised for UHVDC[J]. Power Electronics, 2008, 42(12):20-22.
- [17] 刘国友, 黄建伟, 舒丽辉, 等. 6 英寸晶闸管的研究开发与特性控制[J]. 变流技术与电力牵引, 2007(6):32-35.
- LIU Guoyou, HUANG Jianwei, SHU Lihui, et al. R&D and characteristic control of 6-inch thyristors[J]. Converter Technology & Electric Traction, 2007(6):32-35.
- [18] BOTAN V, WALDMEYER J, KUNOW M, et al. 6 英寸超

高压直流输电用晶闸管[J]. 电力电子, 2010(5):48-50.

BOTAN V, WALDMEYER J, KUNOW M, et al. Thyristor for 6 inch high voltage DC transmission[J]. Power Electronics, 2010(5):48-50.

任小静(1982—), 女, 硕士, 工程师, 从事高压直流输电换流阀研制。