

同塔多回线路绝缘子机械性能试验 及试验过程的电气性能评估

邓鹤鸣^{1,2} 李勇杰³ 王 建³ 刘春翔^{1,2} 赵建平³ 庄文兵³ 姚文俊^{4,*}

(1 南瑞集团公司(国网电力科学研究院) 南京 211000; 2 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司 武汉 430074;
3 国网新疆电力公司电力科学研究院 乌鲁木齐 830000; 4 中南民族大学 电子信息工程学院 武汉 430074)

摘 要 为了弄清同塔多回线路架设方式下绝缘子的机械特性,试验研究了不同垂直荷载 F 和水平荷载 G 下不同绝缘子串夹角的 V 型瓷绝缘子串应力变化情况,探讨了在不同荷载下长棒型瓷绝缘子和三伞型瓷绝缘子组成的 V 型瓷绝缘子串夹角的变化及对绝缘子串机械性能的影响,分析了该试验过程对输电线路电气性能的影响。结果表明:在相同串夹角下,卸载后 α 角的变化与 F/G 的值成正相关关系;串夹角越小时,同等 F/G 条件下 α 角越大,绝缘子串越容易移动;在某些试验情况下相地空气间隙低于 3.3m 的要求,但线路相间空气间隙最小距离均大于相间间隙的最低要求。这些结果可为同塔多回线路架设方式下 V 型绝缘子串的设计提供基础数据。

关键词 同塔多回线路;绝缘子;绝缘子串夹角;应变变化;垂直荷载;水平荷载;电气性能评估

中图分类号 TM85 文献标识码 A 文章编号 1672-4321(2017)03-0074-06

Mechanical Experiment of Insulators in Multiple-Circuit Transmission Lines and the Evaluation of Electrical Performance in the Experiment Process

Deng Heming^{1,2} Li Yongjie³ Wang Jian³ Liu Chunxiang^{1,2} Zhao Jianping³ Zhuang Wenbing³ Yao Wenjun⁴
(1 NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute) , Nanjing 211000 , China; 2 State Grid Electric Power Research Institute Wuhan Nari limited liability company , Wuhan 430074 , China; 3 State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute , Urumqi 830000 , China; 4 College of Electronic and Information Engineering , South-Central University for Nationalities , Wuhan 430074 , China)

Abstract To understand the mechanical characteristics of insulators in multiple-circuit transmission lines , the stress variation of "V" string porcelain insulators is analyzed by mechanical experiments under different vertical loads (F) and horizontal loads (G) , and the stress variation of string insulators at the leeward side is studied by monitoring the angle (α) between the vertical loads and string insulators at the windward side. The paper analyzes the different angles of "V" string porcelain insulators which consist of the porcelain long rod insulators and three umbrella type porcelain insulators under different loads , and the different angles affect the mechanical characteristics of "V" string porcelain insulators; it analyzes the effect of experiment process on the electrical performance of the transmission lines. The results show that the change of the angle (α) has the positive relationship with the value of F/G after unloading under the same angle of "V" string porcelain insulators; the smaller of the angle of "V" string insulator , the larger of the angle (α) , the easier move of string insulators; the phase-ground gaps are less than the requirement of 3.3m , but the minimum phase-phase gaps are less than the minimal gap requirements. The results provide the references for the design of insulators in multiple-circuit transmission lines.

Keywords multiple-circuit transmission lines; insulators; angle of insulator strings; stress variation; vertical load; horizontal load; evaluation of electrical performance

收稿日期 2016-11-17 * 通讯作者 姚文俊 研究方向: 高电压与绝缘技术 E-mail: yaowj@ mail. scuec. edu. cn

作者简介 邓鹤鸣(1979-) ,男 ,博士 ,高级工程师 ,研究方向: 高电压与绝缘技术 ,E-mail: dengheming@ sgepri. sgcc. com. cn

基金项目 国家高技术研究发展计划(863 计划) 项目(2013AA030701) ; 国网新疆电力公司科技项目(5230DK15009L)

近年来,能源匮乏和环境污染问题引起全球的关注,可再生清洁能源已成为世界重点发展方向,但能源丰富地区远离经济发达地区,通常使用超特高压线路来输送新能源电力^[1-3].我国的大多数能源基地集中在西部地区,而用电负荷主要分布在华北、华东和南方沿海地带,国家已计划使用多条特高压线路来提高电力输送容量^[4],但沿海发达地区城市化迅猛发展引起土地资源的匮乏直接加剧了这些地区输电线路走廊的紧张程度,采用特高压线路^[1-6]、同走廊内多回线路^[7-8]、同塔多回线路^[9]和紧凑型线路^[10]等架设方式已成为缓和输电线路走廊的重要手段.

我国电网的同塔多回线路数量不断增加,该类线路的设计、建设和运行维护等相关工作已成为线路专业技术人员的研究焦点.该种架设方式的线路一般采用V型绝缘子串来缩小线路走廊宽度、减少线间距离并减少线路风偏灾害的发生概率.国内研究者详细研究了各电压等级、各种类型(复合、瓷和玻璃)和不同海拔交直流绝缘子的污秽覆冰闪络特性^[11-17],研究了瓷绝缘子的电场分布^[18-20],以及现场绝缘子的运行特性^[21-22],少量研究者开始了长绝缘子串的放电特性研究工作,这包括绝缘子串冲击电压放电特性^[23]、绝缘子串泄露电流特性^[6]和污秽耐受电压特性试验方面的研究^[24],并开始了超特高压输电线路绝缘子串片数的选择工作^[25],这些为同塔多回架设方式的输电线路提供了设计依据.但是很少有研究者关注同塔多回线路架设方式下V型绝缘子串的机械性能.为了弄清同塔多回线路架设方式下绝缘子的机械特性,本文试验研究了不同垂直和水平荷载下不同绝缘子串夹角的V型瓷绝缘子串应力变化情况,通过监测迎风侧绝缘子与垂直方向夹角 α 的变化来研究背风侧绝缘子的应力情况.集中分析了长棒型瓷绝缘子和三伞型瓷绝缘子组成的V型瓷绝缘子串在不同荷载下绝缘子串夹角的变化及对绝缘子串的影响,并根据GB 50545-2010《110kV~750kV架空输电线路设计规范》^[26],分析了该试验过程对输电线路电气性能的影响.这些可为同塔多回线路架设方式下V型绝缘子串的设计建议提供基础数据.

1 实验设置与方法

用在500kV同塔多回输电线路V型绝缘子串上的荷载主要有线路的重量、线路覆冰重量和垂直

于线路方向的水平风压.因此,在考虑V型绝缘子串所受荷载时,一般分垂直荷载和水平荷载,垂直荷载 G 为线路的重量、线路覆冰重量之和,水平荷载 F 为垂直于线路方向的水平风压(可根据风速、风速不均匀系数、风荷的体型系数以及风向与架空线之间的夹角计算).本次试验中,垂直荷载 G 采用悬挂于V形绝缘子串上的重物进行模拟,水平荷载 F 采用水平拉力模拟,如图1所示.背风侧绝缘子受压程度与迎风侧绝缘子受水平拉力 F 发生偏移的程度相关,但背风侧绝缘子受压角不易测量,因此试验中通过监测迎风侧绝缘子与垂直方向的夹角 α 的变化来反映背风侧绝缘子受压情况,夹角 α 为偏移角.

按照500kV同塔多回输电线路的模拟横担、模拟导线以及V型模拟绝缘子串布置,设定杆塔构架的实际范围,对如图1所示.所用绝缘子串由无锡华能塞拉姆公司提供,由2支LP/75/18+17/1435和1支LP/75/21+20/1640组成.长棒型绝缘子的联接结构为槽型,且安装时槽型开口与联板的方向一致.为了方便测量相地空气间隙,将杆塔边缘定在重物 F 的中心位置上,利用激光测距仪测量联板边缘相对杆塔边缘的距离.

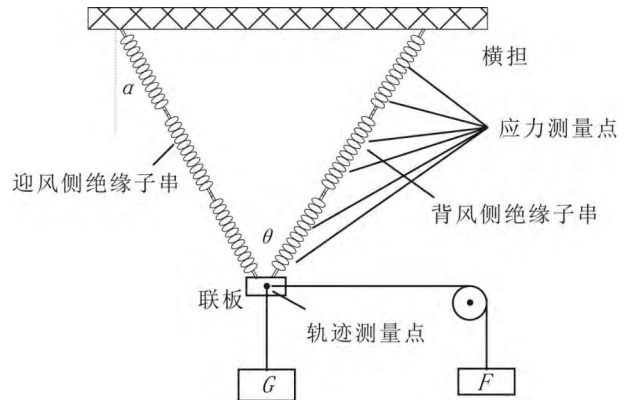


图1 试样布置图

Fig. 1 The sketch of the experiment layout

在背风侧绝缘子中3支长棒型绝缘子的上、下端瓷棒上安置2片应变片以监测应力情况,以V形串迎风侧串与联板的联接点作为绝缘子串位移观察点,使用经纬仪测量水平位移和垂直位移.瓷绝缘子材料为脆性材料,破坏前的应变非常小.对瓷棒进行拉伸、压缩试验时破坏前均为直线,拉伸和压缩的应力应变斜率也相同服从虎克定律,由式(1)表示:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1)$$

式中 σ 为应力, E 为弹性模量, ε 为应变.瓷棒的弹性模量一般为 $(4.2 \sim 7.2) \times 10^4$ MPa.本次试验选用

高铝配方的高棒型绝缘子(杆径为130mm)弹性模量为 10^5 MPa,根据试验测得的应变,可计算出长棒型绝缘子的受力情况,并在试验后观察绝缘子的损伤程度,评估对电气性能的影响。

根据 GB 50545-2010《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》^[26]中规定的500 kV带电设备与杆塔构件的最小间隙分别为工频电压1.2 m、操作电压2.5 m、雷电3.3 m,线路相间工频电压2.2 m、操作电压为4.6 m。根据这些参数,以及试验过程中线路相地和相间的空气间隙变化情况,评估是否低于电气安全距离。实验过程中测量重物 G 和重物 F 的中心点位置,即为相地空气间隙大小。

2 实验结果与讨论

2.1 长棒型绝缘子V串的机械试验

本文中长棒型绝缘子V串的夹角 θ 分别为 60.3° 、 70.2° 、 80.0° 、 94.0° 、 106.0° ,施加的应力有两种情况:1)水平荷载为28.93 kN,垂直荷载从28.31 kN增加至45.98 kN,2)水平荷载为28.08 kN,垂直荷载从22.75 kN增加至27.20 kN。绝缘子串 α 角的变化趋势图分别如图2和图3所示。

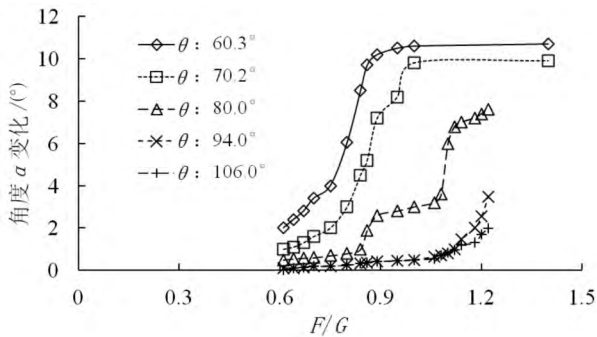


图2 水平荷载28.08 kN时绝缘子串 α 角的变化趋势图

Fig.2 The trend chart of the angle α in the experiment on "V" type string insulators under the horizontal load of 28.08 kN

结合图2和图3,绝缘子串 α 角的大小总体随着 F/G 增大而增大,增幅为先平缓后急剧再平缓;在同样 F/G 下,绝缘子串 α 角的大小随着串夹角 θ 增大而减小,即串夹角越小时绝缘子串越容易移动;在同样串夹角 θ 以及同样 F/G 下,水平荷载28.08 kN的绝缘子串 α 角小于水平荷载28.93 kN的值。

水平荷载分别为28.08 kN、28.93 kN时,相地空气间隙与绝缘子串 α 角变化的关系如图4和图5所示。根据这两张图,在相同的串夹角 θ 下,相地空气间隙与绝缘子串 α 角的变化成线性负相关关系;在相同绝缘子串 α 角的变化下,相地空气间隙与绝

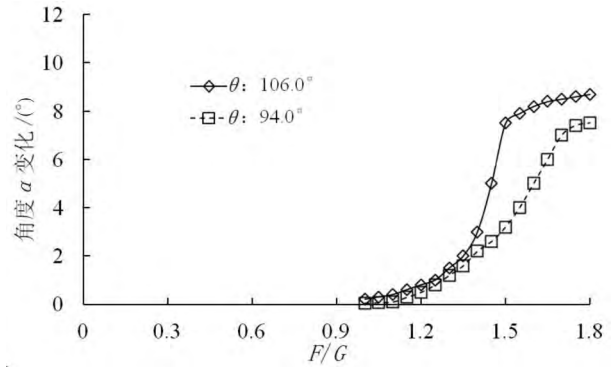


图3 水平荷载28.93 kN时绝缘子串 α 角的变化趋势图

Fig.3 The trend chart of the angle α in the experiment on "V" type string insulators under the horizontal load of 28.93 kN

缘子串串夹角 θ 成线性负相关关系。

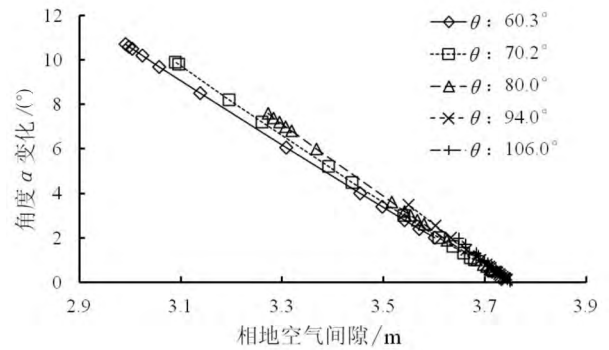


图4 水平荷载28.08 kN时,相地空气间隙与绝缘子串 α 角变化的关系图

Fig.4 The relationship between the phase-ground gap and the change of the angle α under the horizontal load of 28.08 kN

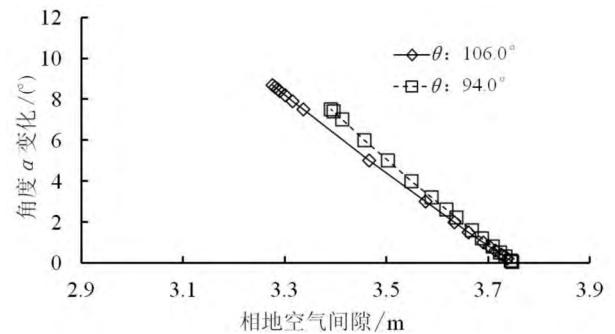


图5 水平荷载28.93 kN时,相地空气间隙与绝缘子串 α 角的关系图

Fig.5 The relationship between the phase-ground gap and the change of the angle α under the horizontal load of 28.93 kN

水平荷载28.08 kN时,当串夹角为 60.3° 时,绝缘子串 α 角增加 6.05° 时,相地空气间隙低于3.3 m;当串夹角为 70.2° 时,绝缘子串 α 角增加 6.42° 时,相地空气间隙低于3.3 m;当串夹角为 80.0° 时,绝缘子串 α 角增加 7.0° 时,相地空气间隙低于3.3 m;当串夹角分别为 94.0° 、 106.0° 时,直到背风侧绝缘子

串发生卸载为止,相地空气间隙仍高于3.3m。水平荷载28.93 kN时,当串夹角为 94.0° ,绝缘子串 α 角增加 8.20° 时,相地空气间隙低于3.3m;当串夹角为 106.0° 时,直到背风侧绝缘子串发生卸载为止,相地空气间隙仍高于3.3m。根据GB 50545-2010所提及,线路相间空气间隙不低于4.6m,按最苛刻的条件计算,即两相导线相向摆动,此时最小距离为5.98 m(水平荷载28.08 kN、串夹角为 60.3° 、绝缘子串 α 角增加 10.70°),远大于线路相间空气间隙最低要求。

根据现场的照片、应力监测数据和绝缘子串位移监测数据,可以得出以下结论:串夹角 θ 为 106.0° 时,绝缘子串受水平风力后,首先是导线联板发生偏转。当水平荷载、垂直荷载与迎风侧绝缘子达到平衡时,迎风侧绝缘子串移动。当导线联板达到最大偏转量后,导线联板会顶住绝缘子联板,绝缘子联板将发生轻微偏转,如图6所示。在 $F = 28.08$ kN、 $G = 26.08$ kN时,根据应力监测数据,背风侧绝缘子串发生卸载,卸载后(F 增大或 G 减小时)基本不受力。水平荷载为28.93 kN下背风侧绝缘子串均为卸载状态,根据绝缘子应变监测的结果,应力最大值仅为3.6 kN,仅为绝缘子串的自身重力反映。试验后观察绝缘子串,该过程中未见损伤的绝缘子产生。



图6 金具偏转照片

Fig. 6 The deflection photograph of fittings

串夹角 θ 为 94.0° 时,在 $F = 28.08$ kN、 $G = 23.81$ kN时,根据应力监测数据,背风侧绝缘子串发生卸载。水平荷载为28.93 kN,背风侧绝缘子串均为卸载状态,根据绝缘子应变监测的结果,应力最大值仅为2.3 kN,迎风侧串绝缘子偏移很大,施加垂直荷载36.3 kN时即可发生很大偏移。试验后观察绝缘子串,该过程中亦未见损伤的绝缘子产生。

串夹角 θ 为 80.0° 时,在 $F = 28.08$ kN、 $G = 22.93$ kN时背风侧绝缘子串发生卸载。水平荷载为28.93 kN,试验均为非迎风侧串卸载状态,卸载时所有监测状态下各点应力的最大值也仅为2.3 kN。试

验后观察绝缘子串,该过程中也未见损伤的绝缘子产生。

串夹角 θ 为 70.2° 和 60.3° 时,在 $F = 28.08$ kN、 $G = 22.73$ kN时(即试验设定的初始状态)背风侧绝缘子串发生卸载,绝缘子串就已经卸载。水平荷载为28.93 kN时,垂直荷载较小的情况背风侧绝缘子串已经与垂直的塔脚发生碰撞,试验已无法继续。试验后观察绝缘子串,串夹角 θ 为 70.2° 的试验过程中也未见损伤的绝缘子产生;但串夹角 θ 为 60.3° 时背风侧的绝缘子串中部位置上有3~4个绝缘子遭到破坏性损伤,这些绝缘子不能承担相应的绝缘功能。

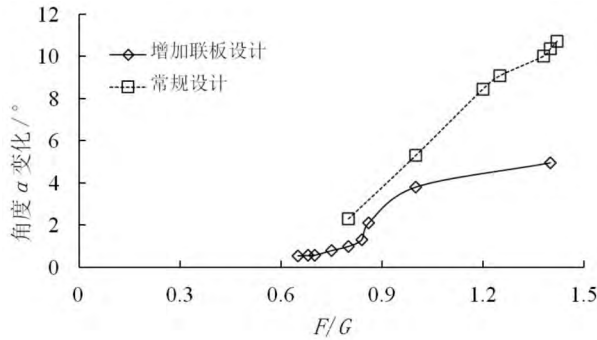
2.2 三伞型瓷绝缘子V串的机械试验

对CA-872EZ型三伞瓷绝缘子V串进行了卸载试验,以观察卸载串绝缘子受压时单片绝缘子之间发生偏移后,绝缘子受损的程度情况。试验布置见图1,绝缘子串安装时所有绝缘子销口均朝向上方。在背风侧绝缘子串中,在第1、2、3、11、12、13、14、15、16、24、25、26片绝缘子各贴了2片应变片以监测应变情况。与常规V串绝缘子不同,此次在串绝缘子和导线间增加了联板进行连接。

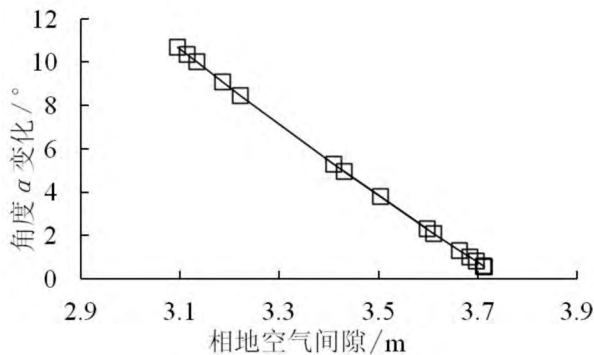
在横向荷载28.08 kN,纵向荷载28.31 kN,串夹角为 80° 的条件下对CA-872EZ型三伞瓷绝缘子V串进行了卸载试验。此时非迎风侧串已卸载,受压后未发生片与片的碰撞,试验后检查各片绝缘子、铁帽、钢脚及锁紧销均无明显损坏。根据绝缘子应变监测的结果,应力的最大值出现在导线侧第2片绝缘子上,此时的横向应力为152.1 MPa,剪切应力为155.4 MPa,其他单片绝缘子所受的应力最大不超过75 MPa。钢脚应变监测的结果显示所有监测绝缘子应力最大不超过160 MPa(钢脚材料为45#钢,其屈服点应力为335 MPa)。

根据图7可以看出,增加联板设计后绝缘子串的偏移相对较小,背风侧绝缘子串受压程度相对较小,这对绝缘子串的安全更有利。与长棒型绝缘子串在相同串夹角情况下进行了比较,在 F/G 大于0.8后显然三伞型绝缘子串更容易发生偏移。这与两种串型单片绝缘子的型式有一定关联。

相地空气间隙与三伞型绝缘子串 α 角变化的关系如图8所示。根据该图,相地空气间隙与三伞型绝缘子串 α 角的变化成线性负相关关系;绝缘子串 α 角增加 7.05° 时,相地空气间隙低于3.3m。同理,根据GB 50545-2010所提及,线路相间空气间隙不低于4.6m,按最苛刻的条件计算,即两相导线相向

图7 三伞型绝缘子串 α 角的变化趋势图Fig.7 The trend chart of the angle α in the experiment on "V" type three umbrella porcelain insulators

摆动,此时最小距离为 6.18 m,远大于线路相间空气间隙最低要求。

图8 相地空气间隙与三伞型绝缘子串 α 角变化的关系图Fig.8 The relationship between the phase-ground gap and the change of the angle α in the experiment on "V" type three umbrella porcelain insulators

3 结论

(1) 绝缘子串 α 角的大小总体随着 F/G 增大而增大,增幅为先平缓后急剧再平缓;在同样 F/G 下,绝缘子串 α 角的大小随着串夹角 θ 增大而减小;在同样串夹角 θ 以及同样 F/G 下,水平荷载 28.08 kN 的绝缘子串 α 角小于水平荷载 28.93 kN 的值。

(2) 在 $F = 28.08$ kN 背风侧绝缘子串卸载状态:串夹角 θ 为 106.0° 时, $G = 26.08$ kN;串夹角 θ 为 94.0° 时, $G = 23.81$ kN;串夹角 θ 为 80.0° 时, $G = 22.93$ kN;串夹角 θ 为 70.2° 和 60.3° 时, $G = 22.73$ kN;水平荷载为 28.93 kN 下背风侧绝缘子串均为卸载状态。

(3) 水平荷载 28.08 kN 时,当串夹角为 60.3° 时,绝缘子串 α 角增加最小,当增加仅 6.05° 时,相地空气间隙低于 3.3m;水平荷载 28.93 kN 时,当串夹角为 94.0° 绝缘子串 α 角增加最小,当增加仅 8.20°

时,相地空气间隙低于 3.3m;线路相间空气最小距离为 5.98 m(水平荷载 28.08 kN、串夹角为 60.3° 、绝缘子串 α 角增加 10.70°) 远大于线路相间空气间隙最低要求。

(4) 在横向荷载 28.08 kN 纵向荷载 28.31 kN,串夹角为 80° 的条件下对三伞型瓷绝缘子 V 串进行了卸载试验,应力的最大值出现在导线侧第 2 片绝缘子上,且绝缘子应力最大不超过 160 MPa 增加联板设计后绝缘子串的偏移相对较小,绝缘子串 α 角增加 7.05° 时,相地空气间隙低于 3.3 m,并且相间空气间隙最小距离为 6.18 m,远大于线路相间空气间隙最低要求。

参考文献

- [1] Smith J C, Osborn D, Zavadil R, et al. Transmission planning for wind energy in the United States and Europe: status and prospects [J]. WIREs Energy and Environment, 2013, 2(1): 1-13.
- [2] Scherer Jr H N, Vassell G S. Transmission of electric power at ultra-high voltages: Current status and future prospects [J]. Proceedings of the IEEE, 1985, 73(8): 1252-1278.
- [3] Annestrand S A, Parks G A. Bonneville power administration's prototype 1100/1200 kV transmission line project [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(2): 357-366.
- [4] 杜至刚. 中国特高压电网发展战略规划研究 [D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [5] Gu D, Zhou P, Dai M, Xiu M, et al. Overvoltages and insulation coordination of 1000-kV AC transmission systems in China [J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(1): 83-93.
- [6] 张亚萍, 戴敏. 1000 kV 交流绝缘子串泄露电流特性研究 [J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 242-246.
- [7] Hu Y, Novosel D, Saha M M, et al. An adaptive scheme for parallel-line distance protection [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2002, 17(1): 105-110.
- [8] Ismail H M. Effect of tower displacement of parallel transmission lines on the magnetic field distribution [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2008, 23(4): 1705-1721.
- [9] 周浩, 张晓, 赵斌财, 等. 导线水平排列同塔四回路跨越或邻近建筑物的安全距离 [J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 1884-1892.
- [10] 胡毅, 万保权, 何慧雯. 1000kV 交流紧凑型输电关键技术研究 [J]. 高电压技术, 2011, 37(8):

- 1825-1831.
- [11] 向泽,蒋兴良,张志劲,等. 标准悬式普通玻璃绝缘子的高海拔现场交流污闪特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2582-2588.
- [12] 张志劲,蒋兴良,孙才新,等. 低气压下特高压直流污秽复合绝缘子覆冰闪络特性[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 7-12.
- [13] 王新,关志成,张福增,等. 高海拔地区玻璃绝缘子的直流污闪特性[J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 17-23.
- [14] 胡建林,蒋兴良,张志劲,等. 布置方式对直流绝缘子串人工污秽闪络特性的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 11-15.
- [15] 蒋兴良,董冰冰,张志劲,等. 试验方式对瓷和玻璃绝缘子串直流污闪特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 122-127.
- [16] 姚文俊,何正浩,邓鹤鸣. 气固两相体放电对电力系统外绝缘的影响[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2012, 31(2): 79-84.
- [17] 姚文俊,何正浩,邓鹤鸣,等. 模拟雾霾对输电线外绝缘影响的试验研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2015, 34(2): 95-99.
- [18] 蒋兴良,黄斌,苑吉河,等. 电网络法计算交流特高压绝缘子串电压分布[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 7-10.
- [19] 司马文霞,邓稼卓,卢明,等. 符合绝缘子导线端串联玻璃绝缘子对其电场分布的改善[J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1630-1637.
- [20] 杨帆,何为,杨浩,等. 高压瓷质绝缘子电场逆问题的研究及其应用[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 36-40.
- [21] 李恒真,刘刚,李立涅. 广州地区线路盘式防污型玻璃绝缘子的自然积污规律[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 118-124.
- [22] 李翔,顾洪连. 玻璃绝缘子在大跨越线路上的运行概况[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 120-122.
- [23] 陈勇,万启发,张祥贵. 特高压绝缘子串冲击电压放电特性研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(3): 29-30.
- [24] 徐涛,吴光亚,周文俊. 交流特高压输电线路绝缘子串污秽耐受电压特性试验[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 9-13.
- [25] 吴光亚,蔡炜,卢燕龙,等. 交流输电线路绝缘子串片数的选择[J]. 高电压技术, 2002, 28(2): 21-23.
- [26] GB 50545-2010. 110~750kV 架空输电线路设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.