

# 特高压线路瓷绝缘子污秽分布特性研究

李世平<sup>1</sup>, 范超<sup>2</sup>, 郭裕钧<sup>2</sup>, 张血琴<sup>2</sup>, 肖章<sup>2</sup>, 王耀振<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 西南交通大学, 四川 成都 611756)

**摘要:** 绝缘问题是特高压输电建设中需要解决的首要问题, 研究不同气候不同电压类型条件下输电线路绝缘子积污分布对指导输电线路外绝缘设计具有重要意义。以特高压输电线路广泛使用的陶瓷绝缘子为研究对象, 建立电场等效模型, 通过调整3片绝缘子伞裙两端电压模拟实际特高压输电线路绝缘子串周围电场情况, 并基于实验室搭建的人工雾室模拟南北方典型气候, 在不同电压类型下开展了陶瓷绝缘子积污试验。研究表明: 在南方沿海气候下, 由于空气湿度较大, 两种电压类型下的陶瓷绝缘子表面积污量均高于北方地区; 绝缘子串的积污量随电压等级的升高而增大; 在两种气候下, 陶瓷绝缘子串在直流电压作用下积污量呈现两端高、中间低的现象, 而交流电压下积污量变化不大, 且直流电压较同等级交流电压作用下绝缘子片上下伞面的积污量更大; 南方和北方气候下陶瓷绝缘子直流和交流电压下积污比分别约为1.37和1.51。

**关键词:** 特高压输电线路; 南北方气候; 积污规律; 直交比

中图分类号: TM852 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)01-0041-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.01.009

## Research on Pollution Distribution Characteristics of Ceramic Insulators in UHV Transmission Lines

Li Shiping<sup>1</sup>, Fan Chao<sup>2</sup>, Guo Yujun<sup>2</sup>, Zhang Xueqin<sup>2</sup>, Xiao Zhang<sup>2</sup>, Wang Yaozhen<sup>2</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

**Abstract:** Insulation is the most important problem to be solved in the construction of UHV transmission lines. It is of great significance to study the pollution distribution of transmission line insulators under different climates and voltage types. Taking ceramic insulator which is widely used in UHV transmission lines as the research object, the electric field equivalent model is established, and the electric field around the actual insulator string of UHV transmission lines is simulated by adjusting the voltage at the ends of 3 insulator sheds. Typical climates in the north and south are simulated, and pollution accumulation tests of the ceramic insulator are carried out under different voltage types based on the artificial fog chamber built in the laboratory, and the effectiveness of the model is verified. The research results show that in the southern coastal climate, the pollution accumulation on ceramic insulator surfaces are higher than that in the northern climate under two voltage types because of the high humidity of the air. Under DC and AC voltage, the pollution accumulation quality of insulator string increases with the increase of the voltage level. In both climates, the pollution accumulation quality on insulator string under the action of DC voltage on two ends sheds is higher than the middle shed, while the pollution accumulation quality on the upper surfaces of 3 sheds is about the same under AC voltage. And the pollution accumulation quality on the upper and the lower surfaces of 3 insulator sheds under DC voltage is higher than that under the same AC voltage level. The contamination ratio of the ceramic insulator string under DC and AC voltages in southern climate is about 1.37, while that of northern climate is about 1.51.

**Key words:** UHV transmission line; north and south climate; pollution accumulation rule; contamination ratio

## 0 引言

特高压直流输电工程相对交流输电具有线路输

电距离远、损耗小、容量大、功率调节控制灵活等优势, 已成为中国“西电东送、全国联网”的重要手段<sup>[1-3]</sup>。外绝缘问题是特高压输电需要解决的首要问题。特高压输电线路设备易受到工业粉尘、扬尘、

鸟粪等污秽污染,在雾、露、毛毛雨、融冰等不利气候条件下,即在空气相对湿度较高时容易发生污闪事故<sup>[4-5]</sup>给设备外绝缘带来了极大的危害。绝缘子积污机理较复杂,其表面污秽程度和分布与地域气候环境、带电情况等因素相关。在直流电场作用下,污秽颗粒会受到单一方向的电场力作用,相对于交流电场而言,污秽颗粒更容易粘附在绝缘子表面,在恶劣天气下易发生闪络<sup>[6-8]</sup>,对电力系统的安全运行、工农业生产及人们的日常生活造成危害。

目前,已有很多学者对输电线路绝缘子积污特性进行了研究分析。文献[9-10]在美国±400 kV和±500 kV线路、新西兰±275 kV线路等地区的试验站进行了直流电压下合成绝缘子的积污情况研究。文献[11]对±500 kV换流站支柱绝缘子积污特性及绝缘子直流电压下积污比进行了研究,得出了直流等值盐密比。文献[12]研究了±800 kV宾金线绝缘子自然积污特性,发现电压极性对绝缘子积污无显著影响。文献[13]对哈郑线负极性线路瓷绝缘子的积污特性进行了研究,得到了绝缘子表面的灰盐比。文献[14-15]通过复合和瓷绝缘子自然积污试验研究发现:复合绝缘子下伞面直交比大于5,瓷绝缘子下伞面直交比大于10。文献[16]开展了高海拔地区特高压线路绝缘子带电积污试验,并对瓷三伞绝缘子的积污特性进行数值模拟,研究发现:材质对积污影响较大,瓷三伞绝缘子积污直交比随风速增大而减小,随粒径增大而增大。文献[17]对±800 kV楚穗特高压线路复合绝缘子自然积污特性展开了研究:复合绝缘子表面污秽呈两端重、中间轻的分布规律。文献[18]对广州地区500 kV以下线路玻璃绝缘子积污特性及灰盐比进行了研究。

中国特高压线路“五纵五横”贯穿东西南北,不同地区的气候相差较大,对线路设计中的设备选型以及线路建成后的运行维护都带来很多不便。目前,针对南北方地区特高压输电线路陶瓷绝缘子的积污特性和直交比的异同还少有研究。有针对性的结合南北方地区典型气候环境,研究和分析特高压输电线路绝缘子的积污规律,可以指导特高压输电线路外绝缘的防污工作,对输电线路外绝缘配置和电力系统的安全运行具有重要的理论和工程实际意义。为此,建立了输电线路陶瓷绝缘子仿真模型,并搭建了实验室人工雾室,针对南北方地区典型气候

下的陶瓷绝缘子积污特性以及污秽直交比展开了人工积污试验研究。

## 1 污秽受力分析及电场等效模型

下面对输电线路周围污秽颗粒的受力状态进行了理论分析,通过仿真软件分析了特高压输电线路绝缘子周围电场分布并提出等效模型;通过对污秽颗粒的受力分析讨论影响绝缘子积污的因素。

### 1.1 颗粒受力分析

图1、图2分别为空气中及绝缘子表面粘附的污秽颗粒受力示意图。

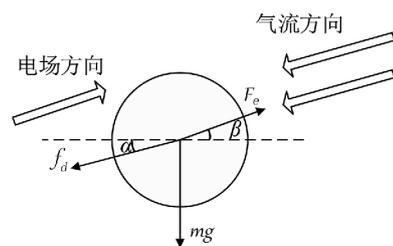


图1 空气中污秽颗粒受力示意

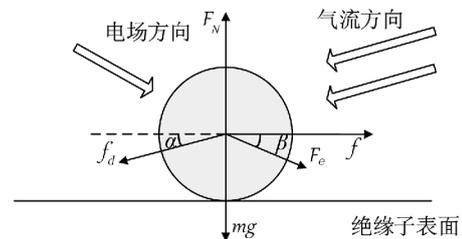


图2 绝缘子表面粘附污秽颗粒受力示意

由图中可以看出,绝缘子周围污秽颗粒在空中主要受气流曳力、电场力以及自身重力作用,其中:影响曳力的主要因素为气流与污秽颗粒的相对速度以及空气湿度;影响电场力的主要因素是绝缘子串周围电场强度以及污秽颗粒自身荷电量;重力则为污秽颗粒自身的性质,同一地区的污秽平均质量一般不会有太大变化。

因此,设计试验时主要考虑风速、湿度以及电场强度3个因素,并以此研究特高压输电线路陶瓷绝缘子污秽分布特性。

### 1.2 等效电场仿真

由于特高压输电线路电压等级高、拉伸应力大的原因,绝缘子串较长,在实验室中难以有效开展特高压线路绝缘子串人工积污试验。而在输电线路旁架设试验线的方式成本较高,且无法探究不同因素对积污的影响。因此,提出了一种能够模拟特高压

电场环境下输电线路绝缘子积污的方法。

仿真和试验绝缘子采用型号为 XWP-70 的陶瓷绝缘子模型,模型盘径为 255 mm,结构高度 160 mm,如图 3 所示。

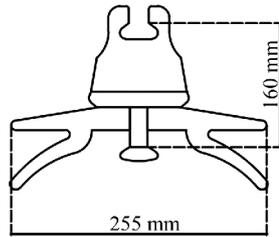


图3 XWP-70型陶瓷绝缘子结构

特高压输电线路 I 型耐张绝缘子串由 54 片 XWP-300 陶瓷绝缘子片构成。绝缘子串从高压端至低压端,其表面及周围空气中的电势与电场强度分布不均匀呈马鞍形分布。因此,仿真和试验均采用 3 片陶瓷绝缘子分别模拟绝缘子串高压端、中间段以及低压端。仿真计算 800 kV 电压下 54 片陶瓷绝缘子周围电场大小,使 3 片绝缘子周围电场大小分别与 54 片绝缘子串的高压端、中间段和低压端相似,以此方法模拟特高压绝缘子串周围电场情况。

对特高压输电线路 I 型耐张绝缘子串进行电场仿真,其最上部金具接地,最下部金具接高压端,周围电场仿真结果如图 4 所示。

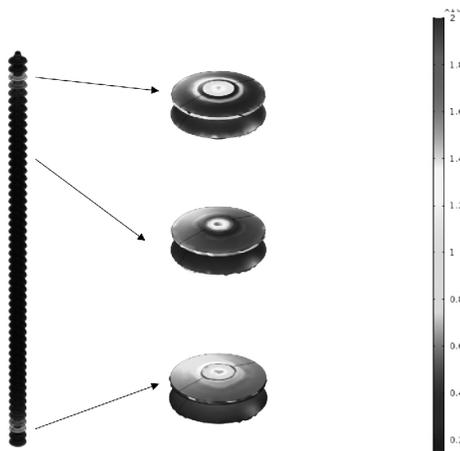


图4 特高压输电线路绝缘子串电场仿真

由仿真图可以看出,在 800 kV 电压等级下,绝缘子串高压端和低压端伞裙周围电场达到  $8 \times 10^5$  V/m;绝缘子串的中间伞裙周围电场强度约为  $3.3 \times 10^4$  V/m,与两端伞裙场强相比,低了 1~2 个数量级。

改变两端所加电压,对 3 片陶瓷绝缘子进行电场仿真得到其周围场强。当两端所加电压为 45 kV

时,中间绝缘子片与绝缘子串的中间部分的伞片电场强度基本等效。高压端和低压端绝缘子片周围场强与绝缘子串两端约第 10 片的伞裙场强大小等效。因此,在 3 片绝缘子两端施加 45 kV 电压时,其 3 片伞裙可分别等效 800 kV 电压等级下 54 片绝缘子串的高压侧、中间和低压侧伞裙周围电场强度。同时进行 1100 kV 电压等级下绝缘子串的电场仿真,发现 3 片绝缘子两端加 55 kV 时两者电场分布相似。

## 2 绝缘子直流积污试验方法

### 2.1 试验样品及平台

通过电场等效仿真模型,可以确定试验所需电压等级并在人工雾室内进行陶瓷绝缘子积污试验。试验采用的陶瓷绝缘子样品结构、大小以及形状都与仿真模型相同。人工雾室主体为 1.2 m × 1.2 m × 1.5 m,其结构示意图如图 5 所示。雾室前后壁面设有开口,以便绝缘子通过套管连接高压电源。侧壁设有进风与出风口,出风口处放置负压风机,负压风机抽取气流,使绝缘子受到恒定气流作用。负压风机可提供的风速范围为 0~5 m/s,可模拟自然风。雾室内部设置有水雾发生器,通过调控水雾产生的速率以调节雾室内湿度,可模拟南方湿润气候条件。

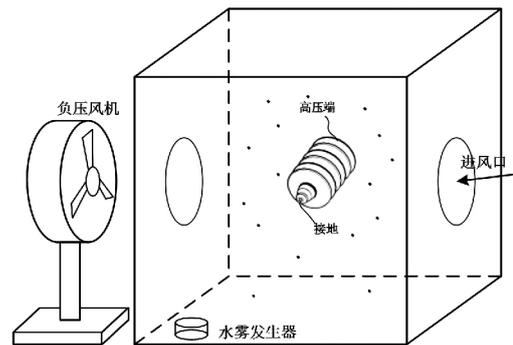


图5 人工气雾室结构

### 2.2 试验积污方法

将 3 片陶瓷绝缘子通过支撑杆悬挂,第 3 片伞片下金具接交、直流高压,第 1 片伞片上金具接地,如图 6 所示。绝缘子加压后,使用鼓风机将 3 g 高岭土颗粒吹入雾室,使绝缘子完全处于污秽颗粒包围的状态,污秽颗粒受到重力作用下降,并在气流曳力、重力以及电场力的共同作用下在绝缘子表面沉积。积污时间持续 10 min,当雾室内空气中无悬浮的污秽颗粒时,再次鼓入 3 g 高岭土,重复进行 3

次。试验结束后,使用洁净棉签分别清扫3片绝缘子上下表面沉积的污秽颗粒,并使用精度为0.1 mg的称量仪称量污秽质量。每个电压类型、等级或每个湿度重复进行3次试验,并取结果的平均值作为最终测量结果。



图6 人工气雾室

### 3 南北方气候条件下绝缘子直、交流积污特性

#### 3.1 不同湿度下绝缘子直流积污试验对比

云南—广东特高压直流输电线路受端换流站位于广州市,地处南亚热带,属于典型的季风海洋气候,年平均相对湿度约为79%,年平均风速约为2.3 m/s。调整负压风机的频率,采用FA-300A风速测定仪测得风速约为2.3 m/s,调整水雾发生器产雾速率,控制雾室内的湿度为80%,与广州地区基本一致。按照第2.2节积污方法完成积污试验。

而北方地区气候相较南方地区,其湿度较小,风速稍高。如哈密南—郑州特高压直流输电线路,其受端换流站位于郑州市,属于温带季风气候,年平均相对湿度约为55%,年平均风速约为2.8 m/s,与广州地区比差别不大。调整风机频率,使风速达到2.8 m/s;调整水雾发生器,使雾室内湿度为55%,以模拟郑州市的气候条件。在陶瓷绝缘子两端分别施加45 kV和55 kV直流电压,模拟特高压输电线路绝缘子串周围电场强度,并完成积污试验。

南北方气候环境中45 kV和55 kV直流电压下3片陶瓷绝缘子表面的积污量如图7所示。

对比两种气候下的试验结果,可以看出,广州地区与郑州地区绝缘子积污情况不同,但3片绝缘子污秽颗粒质量变化趋势一致,由于两端伞裙周围电场强度较高,对颗粒吸附作用较中间伞裙更强,因此

两种气候下均呈现两端伞裙污秽颗粒质量较大,中间伞裙污秽颗粒质量较小的现象。湿度对绝缘子积污有很大的影响,湿度较高的情况下,3片绝缘子伞裙上下表面的积污量均有明显增多。绝缘子表面被水雾湿润,当污秽颗粒碰撞于绝缘子表面更容易粘附,且难以受气流曳力的影响离开绝缘子表面,因此,在湿度更高时的陶瓷绝缘子伞片积污更加严重。

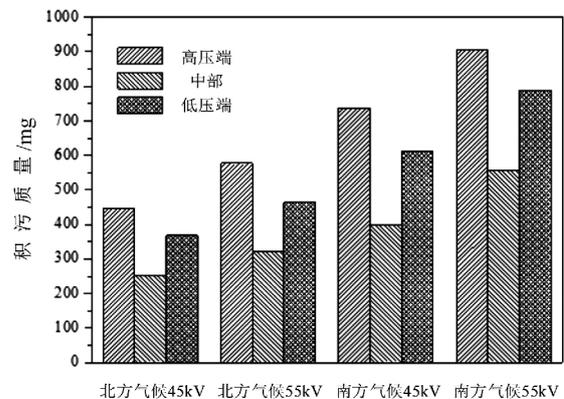


图7 南北方气候直流电压下3片伞裙积污分布

#### 3.2 直、交流积污试验对比

在雾室内模拟南北方两种典型气候,并在绝缘子两端分别施加45 kV和55 kV的直、交流电压,观察不同电压类型和电压等级下绝缘子积污分布情况。

两种气候环境中45 kV和55 kV直、交流电压作用下绝缘子串总污秽质量如图8所示。

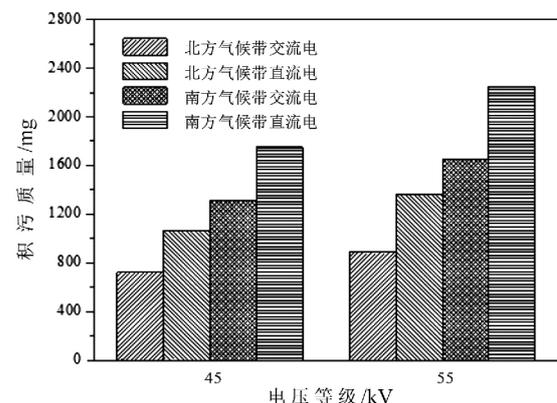


图8 南北方气候直、交流电压下绝缘子串总积污量

从图8中可以看出,在相同的电压类型和电压等级下,南方气候较北方气候绝缘子串表面积污更严重,这是由于湿度较高,污秽颗粒更容易发生团聚使质量增大,受到重力影响较大沉降并粘附于绝缘子表面,在气流曳力作用下沿绝缘子表面滑移或脱离绝缘子表面的概率较低。在相同气候类型和电压类型下,随着电压等级升高,绝缘子串周围电场增

大,对污秽颗粒吸附作用增强,空气中沉降的污秽颗粒更容易吸附于绝缘子表面。在相同气候类型和电压等级下,直流电压较交流电压下绝缘子串积污量更大,直流电场力对污秽颗粒的作用比交流电场力更稳定,颗粒在绝缘子表面粘附后更牢固,而交流电场力在一个周期内对污秽颗粒作用力为0。

### 3.3 交流电压对绝缘子积污分布影响

南北方气候环境中45 kV和55 kV交流电压下3片陶瓷绝缘子表面的积污量如图9所示。

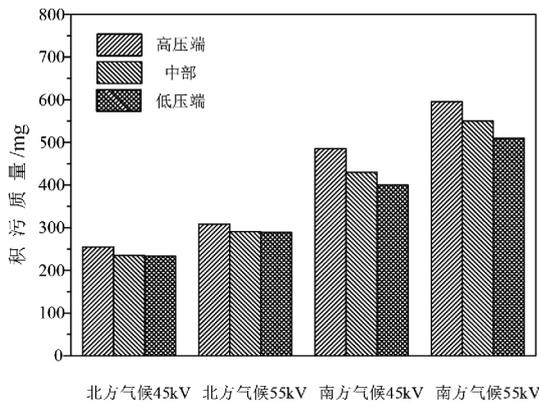


图9 南北方气候交流电压下3片伞裙积污分布

与第3.1节中直流电压下绝缘子表面积污量不同,在相同气候类型和电压等级下,交流电压作用下3片绝缘子伞裙积污量之间没有太大的变化,与绝缘子不带电情况下积污规律类似。造成这种现象的主要原因是由于交流电作用下,绝缘子周围会产生周期性的交变电场,由于污秽颗粒所带电荷极性固定,电场方向的变化会造成作用在污秽颗粒表面的电场力方向的改变,使得电场力对污秽颗粒的作用效果变弱,因此此种情况下积污规律与绝缘子不带电情况类似。

将两种电压类型下绝缘子串表面总污秽颗粒质量的比值作为直交比,可以得出:北方气候下,直流和交流电压下陶瓷绝缘子串表面积污直交比约为1.51;在南方气候下,直流和交流电压下陶瓷绝缘子串表面积污直交比约为1.37。

## 4 结 论

通过人工气雾室开展交直流电压下绝缘子积污试验,研究了南北方不同典型气候下陶瓷绝缘子的积污规律,计算南北方典型气候不同电压等级下绝缘子积污直交比,得到如下结论:

1) 在南方沿海典型环境下,由于空气湿度较高,与绝缘子表面碰撞的污秽颗粒更容易发生粘附,故相较北方气候条件下的绝缘子表面积污量更大,且积污量随电压等级升高而增大。

2) 在两种不同典型环境气候下,陶瓷绝缘子串在直流电压作用下积污量呈现两端高、中间低的现象,而交流电压下积污量大致相同,3片间变化不大,且直流电压较同等级交流电压作用下绝缘子片上下伞面的积污量更大;

3) 南方和北方典型气候环境下陶瓷绝缘子直流和交流电压下积污比分别约为1.37和1.51。

### 参考文献

- [1] 刘振亚,张启平,董存,等.通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2513-2522.
- [2] 张文亮,于永清,李光范,等.特高压直流技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(22):1-7.
- [3] 谢辉春,崔翔,路遥,等.特高压同塔双回交流输电线路绝缘子串长优化后的线路可听噪声试验[J].高电压技术,2016,42(5):1659-1666.
- [4] 徐式蕴,吴萍,赵兵,等.提升风火打捆哈邦特高压直流风电消纳能力的安全稳定控制措施研究[J].电工技术学报,2015,30(13):92-99.
- [5] 吴敬儒,王建生,何百磊.建设特高压直流输电工程输送风电的技术经济可行性分析及建议[J].风能,2013,44(10):54-58.
- [6] 孙保强,王黎明,关志成,等.电压种类及极性对绝缘子积污的影响[J].高电压技术,2013,39(12):3101-3108.
- [7] 宿志一.葛南直流输电线路华东段和南桥换流站绝缘子自然积污状况调查[J].电网技术,1993,17(3):9-15.
- [8] 汤存燕,梁曦东.国外直流合成绝缘子运行及自然污秽试验[J].电网技术,1999,23(9):50-53,59.
- [9] GUBANSKI S M. Wettability of Naturally Aged Silicone and EPDM Composite Insulators [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(3): 1527-1535.
- [10] 宿志一.换流站直流绝缘子的自然积污特性与直交流积污比[C]//中国电机工程学会高压专委会2007年学术年会2007年学术年会论文集,深圳:中国电机工程学会,2007:281-290.
- [11] 李特,王少华,柳青山,等.±800 kV特高压宾金直流悬式及支柱绝缘子自然积污特性[J].电网技术,2017,41(11):3553-3558.

[12] 卢明,李瑶琴,李黎,等.哈郑特高压直流负极线路上U70BL型绝缘子自然积污规律[J].高电压技术,2016,42(2):557-563.

[13] 王彬,梁曦东,张轶博,等.交、直流电压下复合绝缘子和瓷绝缘子的自然积污试验[J].高电压技术,2009,35(9):2322-2328.

[14] 李震宇,梁曦东,王彬,等.直流电压下复合绝缘子的自然积污试验[J].电网技术,2007,31(14):10-14.

[15] 律方成,秦春旭,郭文义,等.高海拔地区±800 kV特高压直流输电系统绝缘子带电自然积污特性[J].高电压技术,2013,39(3):513-519.

[16] 吕玉坤,李金岗,刘云鹏,等.低风速下瓷三伞绝缘子

积污特性数值模拟研究[J].华北电力大学学报,2016,43(5):55-61.

[17] 杨帅,周文俊,李涵,等.±800 kV 楚穗特高压直流线路复合绝缘子自然积污特性[J].高电压技术,2018,44(3):952-958.

[18] 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.

作者简介:

李世平(1963),高级工程师,主要研究方向为电气设备的高压绝缘技术及状态评估技术。

(收稿日期:2018-12-06)

(上接第5页)

[2] 祝洪博,徐刚刚,海冉冉,等.基于云自适应梯度粒子群算法的无功优化[J].电网技术,2012,36(3):162-167.

[3] 陈前宇,陈维荣,戴朝华,等.基于改进PSO算法的电力系统无功优化[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(2):8-13.

[4] 邓佑满,张伯明,相年德.配电网电容器实时优化投切的逐次线性整数规划法[J].中国电机工程学报,1995,15(6):375-383.

[5] Edimar J. Oliveira, Leonardo W. Oliveira, J. L. R. Pereira, et al. An Optimal Power Flow Based on Safety Barrier Interior Point Method[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015, 64: 977-985.

[6] 刘明波,程莹,林声宏.求解无功优化的内点线性和内点非线性规划方法比较[J].电力系统自动化,2002,26(1):22-26.

[7] 蒋平,梁乐.基于内点法和遗传算法相结合的交流系统无功优化[J].高电压技术,2015,41(3):724-729.

[8] 董海龙,奚慧兴,付立思,等.基于混合PSO-ACO算法的含DG配电网无功优化[J].电网与清洁能源,2017,33(1):50-56.

[9] 肖军,刘天琪,苏鹏.基于双种群粒子群算法的分时段电力系统无功优化[J].电网技术,2009,33(8):72-77.

[10] 李珂,郇能灵,张沈习.基于改进粒子群算法的配电网综合运行优化[J].上海交通大学学报,2017,51(8):897-902.

[11] 张涛,徐雪琴,史苏怡,等.基于改进多种群量子粒子群算法的STATCOM选址及容量优化[J].中国电机工程学报,2015,35(S1):75-81.

[12] Leilei Cao, Lihong Xu, Erik D. Goodman. A Neighbor-based Learning Particle Swarm Optimizer with Short-term

and Long-term Memory for Dynamic Optimization Problems[J]. Information Sciences, 2018, 453: 463-485.

[13] Kalfallah Naima, Benzergua Fadela, Cherki Imene, et al. USE of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization Methods for the Optimal Control of the Reactive Power in Western Algerian Power System[J]. Energy Procedia, 2015, 74: 265-272.

[14] 刘佳,李丹,高立群,等.多目标无功优化的向量评价自适应粒子群算法[J].中国电机工程学报,2008,28(31):22-28.

[15] MehdiMehdinejad, Behnam Mohammadi - Ivatloo, Reza Dadashzadeh - Bonab, et al. Solution of Optimal Reactive Power Dispatch of Power Systems Using Hybrid Particle Swarm Optimization and Imperialist Competitive Algorithms[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016, 83: 104-116.

[16] 任小康,吴尚智,苟平章.基于动态状态树的回溯算法[J].计算机工程与设计,2007,28(4):755-756.

[17] Debao Chen, Feng Zou, Renquan Lu, et al. Learning Backtracking Search Optimisation Algorithm and Its Application[J]. Information Sciences, 2017, 376.

[18] A. E. Chaib, H. R. E. H. Bouchekara, R. Mehasni, et al. Optimal Power Flow with Emission and Non-smooth Cost Functions Using Backtracking Search Optimization Algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016, 81: 64-77.

作者简介:

杨春生(1979),高级工程师,从事海上油田电力系统设计及电网智能控制研究管理工作。

(收稿日期:2018-09-16)