

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.02.003

气—固绝缘分界面电荷积聚模型及数值计算

杜乾栋¹, 吴治诚¹, 刘浩宇¹, 李志兵², 何 洁², 赵军平¹, 张乔根¹

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 气体绝缘金属封闭输电线路(gas-insulated transmission line, GIL)绝缘子在直流电压长期作用下, 会积聚表面电荷, 引起绝缘子沿面闪络电压降低, 导致闪络事故。因此研究绝缘子在长期直流耐受下的表面电荷积聚现象, 对气—固界面在直流电压下的电荷积聚机理进行分析, 建立更为完善的表面电荷积聚模型, 具有重要的理论意义和工程价值。笔者基于3种已有的表面电荷积聚模型、分界面电荷弛豫方程和更为普适的稳态电荷密度方程, 利用微元法对盆式绝缘子表面电荷分布进行了数值计算。结果表明: 分界面电荷弛豫方程能够近似描述电荷积聚的动态过程; 稳态电荷密度方程揭示了电荷积聚的必然性, 且能够在不同条件下退化为已有的3种积聚模型; 介质分界面的电荷分布与外加电场、气体与固体的介电常数和电导率密切相关。

关键词: 气—固分界面; 电荷积聚模型; 电荷弛豫方程; 稳态电荷密度方程; 数值计算

Modeling and Numerical Calculation of Charge Accumulation on Gas-solid Insulation Interface

DU Qiantong¹, WU Zhicheng¹, LIU Haoyu¹, LI Zhibing², HE Jie²,
ZHAO Junping¹, ZHANG Qiaogen¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Charges accumulated on the surface of HVDC GIL(gas-insulated transmission line)insulator can lead to the decrease of its flashover voltage and even flashover accident. Therefore, it is of important theoretical significance and engineering value to study the phenomenon of surface charge accumulation under long-term DC voltage and analyze its mechanism in order to propose a more comprehensive model. In this paper, the charge relaxation equation and steady-state charge density equation are introduced based on 3 present accumulation models. The surface charge distribution of a disc insulator is numerically calculated by using the method of micro-element. The results show that charge relaxation equation can describe the relaxation process of surface charge, and that steady-state charge density equation reveals the inevitability of charge accumulation. The latter can be degraded into the present models under different conditions. The distribution of surface charge is closely related to the applied electric field, dielectric constant and conductivity of both gas and solid dielectrics.

Key words: gas-solid insulation interface; charge accumulation models; charge relaxation equation; steady-state charge density equation; numerical calculation

0 引言

气体绝缘金属封闭输电线路(gas-insulated transmission line, GIL)具有传输容量大、损耗小、可靠性

高等优点, 被大量应用于特高压直流输电工程^[1-3]。在 GIL 设备中, 盆式绝缘子是关键部件, 起到电气绝缘、固定中心导体和隔离气室等作用, 然而其闪络电压通常较相同放电距离下纯气隙的击穿电压低, 是 GIL 的绝缘薄弱环节。导致绝缘子发生沿面

收稿日期: 2016-09-27; 修回日期: 2016-11-04

基金项目: 国家电网公司科技项目(GY71-15-066)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid of China(GY71-15-066).

闪络的原因较多,有相当一部分绝缘子沿面闪络原因不明。相关研究表明,在外施直流电压作用下,GIL 绝缘子表面会积聚电荷^[4-5]。表面电荷积聚是引起绝缘子沿面闪络电压下降的重要因素^[6-9],不仅畸变局部电场,也为沿面放电提供了电荷来源。因此,研究绝缘子沿面的电荷积聚特性,深入认识电荷积聚机理,完善表面电荷积聚模型,对优化绝缘子设计、提高其闪络电压有重要意义。

GIL 盆式绝缘子沿面是典型的气—固绝缘分界面,绝缘子表面积聚电荷的来源主要有以下几个方面:自然环境下的气体电离、电极表面的场致发射、电极和绝缘子之间以及绝缘子表面上的微放电^[10]。国内外学者针对绝缘界面上电荷积聚的途径提出了 3 种模型,即体积电导模型、表面电导模型和气体侧传导模型,能够分别描述特定情况下的电荷积聚途径,然而并未形成统一的积聚模型。另外,有学者根据 Maxwell 基本方程推导出了气—固绝缘界面上电荷弛豫方程以及空间电荷稳态分布的密度方程,这些方程可以近似反映电荷积聚的动态过程或稳恒状态,但方程自身的物理意义及其与电荷积聚模型的关系仍较为模糊,而且缺乏具体的数值计算和应用。

文中基于已有的 3 种电荷积聚模型,分析各模型下的电荷来源、理论依据和实验验证,简述电荷弛豫方程和稳态电荷密度方程,指出空间和表面电荷积聚的必然性,并阐述稳态电荷密度方程在不同条件下向已有 3 种模型的退化。最后根据表面电荷稳态密度方程,采用微元法对简化的盆式绝缘子表面电荷密度进行数值计算,讨论影响绝缘子表面电荷分布的因素。

1 分界面电荷积聚模型与方程

1.1 分界面电荷积聚模型

表 1 总结了已有的 3 种绝缘子表面电荷积聚模型。实验验证表明,体积电导模型预测表面电荷极性与实际相反,不能作为表面电荷积聚的主要途径;表面电导模型和气体侧传导模型均可反映在特定电极结构下绝缘子表面电荷的大致分布,但不能描述一般情况下的电荷积聚。

绝缘子表面电荷积聚不仅和外施电压及绝缘介质的介电特性有关,气体侧微放电也会极大地影响电荷积聚,因此许多实验结果重复性差,各学者对于电荷积聚机理的认识仍存在较大分歧。

表 1 已有的 3 种表面电荷积聚模型

Table 1 3 present charge accumulation models on dielectric interface

项目	体积电导模型	表面电导模型	气体侧传导模型
电荷来源	电极处或绝缘子表面由于微放电等原因产生的电荷	电极与绝缘子接触处产生的电荷	场致发射、电极上的微放电
电荷传输途径	固体传导	绝缘子表面电导	电荷在气体中沿电场线由产生地移动至绝缘子表面 表面电荷产生电场抵消掉原电场法向分量,达到积聚饱和态:
理论依据	固体内部电阻率分布不均匀,空间电荷密度 $\rho = -\frac{\varepsilon_d}{\gamma_d} E_d \nabla \gamma_d$, 其中 ε_d, γ_d 及 E_d 分别为固体介质内部介电常数、体积电阻率及局部电场强度 ^[11] 。	表面电荷密度 $\sigma_{st} \propto -T_0 E_t \frac{\partial E_t }{\partial z}$, 其中 T_0 为时间周期常数, E_t 为绝缘子表面电场切向分量 ^[12-13] 。	$\begin{cases} E_{n1}=0 \\ E_{n2}=-\sigma/\varepsilon_2 \end{cases}$ 其中 E_{n1}, E_{n2} 分别为分界面气、固两侧的法向电场, ε_2 为绝缘子的介电常数 ^[14-19] 。
实验验证	预测表面电荷极性与实际相反	可描述特定情况下绝缘子表面电荷分布	可描述特定情况下绝缘子表面电荷分布

1.2 分界面电荷弛豫方程

针对 1.1 节简述的 3 种模型,文[20]给出了描述施加直流电压时介质分界面上电荷弛豫过程的方程,见式(1)

$$\sigma(t) = \frac{\varepsilon_s \gamma_s - \varepsilon_g \gamma_g}{b \gamma_s + a \gamma_g} U (1 - e^{-t/\tau_e}). \quad (1)$$

式(1)以电场强度由气体侧指向固体侧为正。式(1)中: ε_g, γ_g 为气体介质的介电常数和电导率; ε_s, γ_s 为固体介质的介电常数和电导率; a, b 为与电极结构相关的具有长度量纲的常数; U 为施加直流电

压; τ_e 为电荷弛豫时间常数。文[21-22]通过实验施加不同时间的直流电压测量绝缘子的表面电荷分布,证实了式(1)的合理性,并给出了平板电极和同轴电极结构下 a, b 的计算公式,但对于一般形状的绝缘子及气体介质并未进行分析。

此外,式(1)没有考虑与积聚同时发生的电荷消散^[23-26]。文[21, 27]在式(1)基础上增加了电荷消散时间常数 τ_1 ,同时反映表面电荷的积聚和消散过程,见式(2)

$$\sigma(t) = \frac{\varepsilon_s \gamma_s - \varepsilon_g \gamma_g}{b \gamma_s + a \gamma_g} U (1 - e^{-(1/\tau_e - 1/\tau_1)t}). \quad (2)$$

式(1)、(2)表明,极板间施加直流电压后,介质分界面上的自由电荷来不及突变,仍保持为零,此时介质中的位移电流远大于传导电流,电场按介电常数分布;随着分界面上电荷的积聚,这些场趋向于稳定传导,最终仅有传导电流而无位移电流,电场按照电导率分布。

1.3 稳态电荷密度方程

文[10]讨论了绝缘子内部及表面电荷积聚机理,认为综合考虑固体和气体介质特性后,空间电荷积聚达到稳态时的微分方程见式(3)

$$\rho = \gamma E \left(\nabla \frac{\varepsilon}{\gamma} \right). \quad (3)$$

式(3)中: ρ 为介质空间中的自由电荷密度; ε 与 γ 分别为介质介电常数和体积电导率。在介质分界面处,由式(3)可推导得式(4),用以描述表面电荷的稳态密度值

$$\sigma = \varepsilon_g E_{ns} \left(\frac{\gamma_s - \varepsilon_s}{\gamma_g - \varepsilon_g} \right). \quad (4)$$

式(4)中, E_{ns} 为固体侧场强法向分量。式(4)可解释直流下气—固绝缘分界面积聚电荷的极性,在考虑气体侧微放电等因素影响时,由于气体介质电导率 γ_g 大于绝缘子体电导率 γ_s ,即有 $\gamma/\gamma_g - \varepsilon/\varepsilon_g < 0$,因此在 $E_{ns} \neq 0$ 处存在电荷积聚,且积聚电荷极性与 E_{ns} 相反。另外,由式(4)可知介电常数较高的固体介质通常更易积聚电荷。

2 分界面电荷积聚模型的讨论

2.1 空间及表面电荷积聚的必然性

由第1章可知,稳态电荷密度方程(3)揭示了介质内部空间电荷积聚的必然性,即任何非各向同性的电介质($\nabla(\varepsilon/\gamma) \neq 0$)在泄漏电流方向上都存在空间电荷积聚;而在介质分界面处由于 ε/γ 不连续,电荷积聚现象更为严重。

式(1)、(2)揭示了施加直流电压后介质分界面上电荷积聚的必然性。事实上,当式(1)或式(2)中电荷积聚达到稳态后,也可以由式(3)在一定条件下推导出,因此表面电荷积聚是空间电荷积聚在介质分界面处的一种特殊情况。对于各向同性电介质,空间电荷积聚量极小,电荷主要在介质表面发生积聚。

2.2 稳态电荷密度方程向3种模型的退化

稳态电荷密度方程(3)、(4)在不同条件下可以退化为已有的3种电荷积聚模型。例如,当固体介质的介电常数 ε 恒定时,式(3)可化简为 $\rho = -(\varepsilon/\gamma)E\nabla\gamma$,即体积电导模型;当存在较强的表面泄漏电流,例

如户外绝缘子表面暴露在盐、雾等环境中时,式(4)可化简为 $\sigma = -(\varepsilon_s E_{ns}/\gamma) \cdot (\partial\gamma/\partial z)$,此时若表面电导率与绝缘子表面切向场强的关系为 $\gamma = \gamma_0 e^{b|E_{ts}|}$,则式(4)可进一步化简为 $\sigma = -\varepsilon_s E_{ns} \frac{\partial |E_{ts}|}{\partial z}$,即表面电导模型;当外施电压较高,气体侧产生较多自由电荷,使得气体电导率 γ_1 远大于固体电导率 γ_2 ,式(4)变为 $\sigma = -\varepsilon_s E_{ns}$,而气体侧法向场强 $E_{m1} = 0$,即气体侧传导模型。

综上所述, $\nabla(\varepsilon/\gamma) \neq 0$ 是导致电荷积聚的本质原因,稳态电荷密度方程(3)可以较好地涵盖3种电荷积聚模型,而式(1)或式(2)描述的模型可近似反映介质分界面电荷积聚的动态过程。

3 绝缘子表面电荷积聚稳态的数值计算

3.1 计算模型与方法

直流电压作用下,气—固分界面电荷积聚达到稳态时,表面电荷密度可由式(1)或式(2)得到

$$\sigma = \frac{\varepsilon_s \gamma_g - \varepsilon_g \gamma_s}{b \gamma_s + a \gamma_g} U. \quad (5)$$

计算给定气—固界面上的电荷分布首先需计算该电极结构下的常数 a 、 b [20,22]。该章采用微元法对简化的GIL盆式绝缘子表面电荷积聚稳态进行了数值计算。简化的绝缘子及电极结构见图1,图1中 x 轴为GIL轴向, r 轴为径向, $r=0$ 为GIL轴线,母线半径为 r_0 , $r=H+r_0$ 处为GIL接地外壳。盆式绝缘子与轴向夹角取定值 θ , D 为沿面长度在 x 轴上的投影, d 为绝缘子厚度在 x 轴上的投影。对绝缘子表面电荷稳态分布的计算分成3部分进行,即 $x \in [0, d]$, $[d, D+d]$, $[D+d, D+2d]$ 。

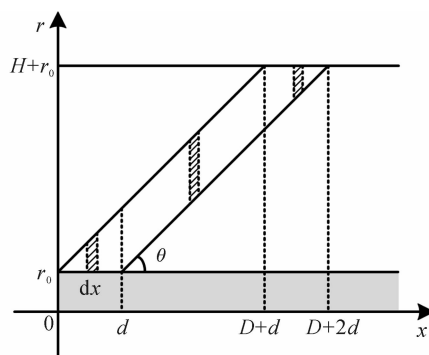


图1 盆式绝缘子表面电荷稳态分布计算模型

Fig. 1 Calculation model of surface charge state distribution of a disc-type insulator

在每个区间内取微元 dx ,利用高斯定律可计算得到该微元处对应的电极结构常数 a 与 b 。不同区间内 a 与 b 表达式有所不同,且均为 x 的函数。再由积分法计算得到区间 $[x_1, x_2]$ 内的稳态电荷密度平均

值, 见式(6)

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\varepsilon_s \gamma_g - \varepsilon_g \gamma_s}{b(x) \gamma_s + a(x) \gamma_g} U dx. \quad (6)$$

进行计算时各参数取为: $d=0.05$ m, $\theta=45^\circ$, $H=0.20$ m, $r_0=0.05$ m; 绝缘子材料设定为环氧树脂, 其相对介电常数为 4.8, 电阻率为 $5.2 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$; SF_6 气体相对介电常数取 1.0, 气体电导率取 $1.0 \times 10^{-18} \text{ S/m}$ 。当施加 $U=+100$ kV 直流电压时, 将各区间内 $a(x)$ 与 $b(x)$ 的表达式代入式(6)进行数值积分, 即可求得各个区间上电荷密度平均值。

3.2 计算结果与讨论

对自变量 x 的 3 个不同区间, 计算得到 $a(x)$ 与 $b(x)$ 表达式分别为:

1) 当 $x \in [0, d]$ 时

$$\begin{cases} a(x) = (r_0 + x \tan \theta) \ln \frac{r_0 + x \tan \theta}{r_0} \\ b(x) = (r_0 + x \tan \theta) \ln \frac{r_0 + H}{r_0 + x \tan \theta} \end{cases}; \quad (7)$$

2) 当 $x \in [d, D+d]$ 时

$$\begin{cases} a_{\text{内}}(x) = [r_0 + (x-d) \tan \theta] \ln \frac{r_0 + (x-d) \tan \theta}{r_0} \\ b_{\text{内}}(x) = [r_0 + (x-d) \tan \theta] \ln \frac{r_0 + x \tan \theta}{r_0 + (x-d) \tan \theta} \\ a_{\text{外}}(x) = (r_0 + x \tan \theta) \ln \frac{r_0 + x \tan \theta}{r_0 + (x-d) \tan \theta} \\ b_{\text{外}}(x) = (r_0 + x \tan \theta) \ln \frac{r_0 + H}{r_0 + x \tan \theta} \end{cases}; \quad (8)$$

3) 当 $x \in [D+d, D+2d]$ 时

$$\begin{cases} a(x) = [r_0 + (x-d) \tan \theta] \ln \frac{r_0 + (x-d) \tan \theta}{r_0} \\ b(x) = [r_0 + (x-d) \tan \theta] \ln \frac{r_0 + H}{r_0 + (x-d) \tan \theta} \end{cases}. \quad (9)$$

绝缘子表面电荷稳态分布计算结果见图 2, 从图 2 可以看出, 绝缘子内表面主要积聚负电荷, 负电荷密度平均值约为 $-0.177 \mu\text{C}/\text{m}^2$; 外表面主要积聚正电荷, 正电荷密度平均值约为 $0.135 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 。另外, 盆式绝缘子表面电荷分布与电场分布密切相关, 正极性直流电压下, 若不考虑气体侧微放电导致的气体电导率变化, 电场线由气体介质通过内表面穿入绝缘子内部, 式(6)中 $\varepsilon_s \gamma_g - \varepsilon_g \gamma_s < 0$, 内表面主要积聚负电荷; 电场线通过外表面穿出绝缘子, 外表面主要积聚正极性电荷。

综合计算结果可知, 影响分界面电荷积聚的因素有: 气体和固体介质的介电常数及电导率、电极结构和外施电场分布等。使用该微元法可以对绝缘分界面上稳态积聚电荷的极性和分布进行计算和预测。

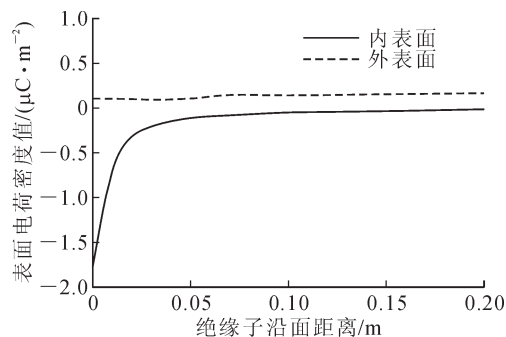


图 2 盆式绝缘子表面电荷稳态分布计算结果

Fig. 2 Calculation result of surface charge state distribution of a disc-type insulator

4 结论

文中分析了已有的 3 种绝缘子表面电荷积聚模型, 对绝缘分界面上的电荷弛豫方程及固体介质中的稳态电荷密度方程进行了讨论, 并提出一种采用微元法计算绝缘子表面电荷稳态分布的方法, 得到的结论如下:

1) 电介质在电场方向上分布不均匀 ($\nabla(\varepsilon/\gamma) \neq 0$) 导致了分界面上必然发生电荷积聚。稳态电荷密度方程可在不同的条件下退化为已有的 3 种积聚模型。

2) 分界面上电荷弛豫方程可近似描述电荷积聚的动态过程, 使用时应考虑电荷消散过程的影响。

3) 直流下盆式绝缘子表面电荷分布与外施电场、气体和固体介质的介电常数和电导率密切相关。若不考虑气体电导率变化, 施加足够长时间正极性电压时, 当电场线由气体穿入固体介质, 分界面主要积聚负电荷, 反之积聚正电荷。

参考文献:

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 10-17.
ZHAO Wanjuan. Transmission technology of HVDC[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 10-17.
- [2] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 331-337.
LIU Zhenya. Ultra-high voltage AC & DC grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013: 331-337.
- [3] 范建斌, 李 鹏, 李金忠, 等. ± 800 kV 特高压直流 GIL 关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 1-7.
FAN Jianbin, LI Peng, LI Jinzhong, et al. Study on key technology of ± 800 kV UHVDC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 1-7.
- [4] 贾志杰, 张 斌, 范建斌, 等. 直流气体金属封闭输电线路中绝缘子的表面电荷积聚研究[J]. 中国电机工程学报,

- 2010,30(4):112-116.
- JIA Zhijie,ZHANG Bin,FAN Jianbin,et al. Study of charge accumulation along the insulator surface in the DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(4):112-116.
- [5] 张贵新,张博雅,王 强,等. 高压直流 GIL 中盆式绝缘子表面电荷积聚与消散的实验研究[J]. 高电压技术,2015,41(5):1430-1436.
- ZHANG Guixin,ZHANG Boya,WANG Qiang,et al. Experiment study of surface charge accumulation and decay on a cone-type insulator in HVDC GIL[J]. High Voltage Engineering,2015,41(5):1430-1436.
- [6] 邢照亮. GIS 盆式绝缘子表面电荷分布对沿面闪络的影响[D]. 北京:华北电力大学,2013:1-8.
- XING Zhaoliang. Influence of surface charge distribution on flashover of GIS insulator[D]. Beijing:North China Electric Power University,2013:1-8.
- [7] 张贵新,王 蓓,王 强,等. 直流电压下盆式绝缘子表面电荷积聚效应的仿真[J]. 高电压技术,2010,36(2):335-339.
- ZHANG Guixin,WANG Bei,WANG Qiang,et al. Simulation of accumulated surface charge effect on DC cone-type spacers[J]. High Voltage Engineering,2010,36(2):335-339.
- [8] 李 鹏. 直流电压下 SF₆ 气体中绝缘子闪络特性及其在特高压直流 GIL 中的应用[D]. 西安:西安交通大学,2015:38-43.
- LI Peng. Flashover characteristics along the insulator in SF₆ gas under DC voltage and its application in UHV DC GIL[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2015:38-43.
- [9] BEKTAS S I,FARISH O,HIZAL M. Computation of the electric field at a solid/gas interface in the presence of surface and volume charges[J]. IEE Proceedings a Science, Measurement and Technology,1986(12): 577-586.
- [10] TAN J. Surface charge accumulation in SF₆[D]. Netherlands:Delft University of Technology,1993:115-142.
- [11] MANGELSDORT C W. Bulk charging of epoxy insulation under DC stress[C]//IEEE Int. Symposium on Electrical Insulation.[S.l.]:IEEE,1980:146-149.
- [12] NAKANISHI K,YOSHIOKA A. Surface charge on epoxy spacer at DC stress in compressed SF₆ gas[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1983,PAS-102(12):3919-3927.
- [13] 贾志杰. 直流下 SF₆ 气体中绝缘子的闪络特性[D]. 西安:西安交通大学,2010:14-24.
- JIA Zhijie. Flashover characteristics along the insulator in SF₆ gas under DC voltage[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2010:14-24.
- [14] FUJINAMI H,TAKUMA T. Mechanism and effect of DC charge accumulation on SF₆ gas insulated spacers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1989,4(12):1765-1772.
- [15] SATO S,ZAENGL W S. A numerical analysis of accumulated surface charge on DC epoxy resin spacer[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1987,EI-22(3):333-340.
- [16] ZHANG Q,TAO F,YANG L,et al. Influence of waveform on the accumulation of charges along a particle contaminated spacer surface in SF₆ stressed by impulse voltage[J]. J. Phys. D-Appl. Phys., 2005(38): 1221-1224.
- [17] WANG Feng,QIU Yuchang,PFEIFFER W,et al. Insulator surface charge accumulation under impulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2004,11(5):847-854.
- [18] JING T,MOTSHUIS P H F,KREUGER F H. Mechanisms of surface charge accumulation in SF₆[J]. Archiv Für Elektrotechnik,1994,77(2):151-155.
- [19] 王邸博,唐 炬,刘 凯. 直流高压下 GIS 支柱绝缘子表面电荷积聚特性[J]. 高电压技术,2015,41(9):3073-3081.
- WANG Dibo,TANG Ju,LIU Kai. Charge accumulation on post insulator surface under HVDC in GIS[J]. High Voltage Engineering,2015,41(9):3073-3081.
- [20] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京:高等教育出版社,2000:193-197.
- FENG Cizhang,MA Xikui. Introduction to engineering electromagnetic fields[M]. Beijing:Higher Education Press,2000:193-197.
- [21] 汪 汎. 绝缘子表面电荷积聚及其对沿面闪络的影响[D]. 西安:西安交通大学,2003:28-37.
- WANG Feng. Research on surface charge accumulation and its effect on flashover characteristics of the insulator[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2003:28-37.
- [22] 汪 汎,肖登明,陈庆国,等. 介质分界面电荷积聚过程分析[J]. 西安交通大学学报,2001,35(4):347-380.
- WANG Feng,XIAO Dengming,CHEN Qingguo,et al. Analysis of charge accumulation at dielectric interface[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2001,35(4):347-380.
- [23] KINDERSBERGER J,LEDERLE C. Surface charge decay on insulators in air and sulfurhexafluoride-Part I:Simulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(4):941-948.
- [24] GAERTNER T J M. Decay of surface charges on insulators in SF₆[C]//IEEE Int. Symp. on Electric Insulation. [S.l.]:IEEE,1984:208.
- [25] 林海丹,马云飞,梁义明,等. 聚合物绝缘材料表面电荷衰减特性研究进展[J]. 高压电器,2015,51(8):35-42.
- LIN Haidan,MA Yunfei,LIANG Yiming,et al. Research progress in dynamic behaviors of surface charge on polymer materials[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(8):35-42.
- [26] GREMAUD R,BJELOGRLIC M,SCHNEIDER M,et al. Surface charge decay on HVDC insulators: Temperature and

- ZHAO Yuanyuan, AI Qian, YU Zhiwen, et al. Consider a variety of factors assessment of the micro grid optimizations cheduling[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23):23-30.
- [12] 彭春华, 谢 鹏, 詹骥文, 等. 基于改进细菌觅食算法的微网鲁棒经济调度[J]. 电网技术, 2014, 38(9):2392-2398. PENG Chunhua, XIE Peng, ZHAN Jiwen, et al. Robust economic dispatch of microgrid using improved bacterial foraging algorithm[J]. Power System Technology, 2014, 38(9):2392-2398.
- [13] MENG Xianbing, LIU Yu, GAO Xiaozhi, et al. A new bio-inspired algorithm: Chicken swarm optimization[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2014(8794):86-94.
- [14] SMITH C L, ZIELINSKI S L. The startling intelligence of the common chicken[J]. Scientific American, 2014, 310(2):89-90.
- [15] 丁 明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 3(4):7-14. DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Contains sodium sulfur battery energy storage micro network system economic operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 3(4):7-14.
- [16] 张颖媛. 微网系统的运行优化与能量管理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011. ZHANG Yingyuan. Operation optimization and energy management of micro grid system[D]. Hefei: HeFei University of Technology, 2011.
- [17] MORGANTOWN W. Emission rates for new DG technologies. the regulatory assistance project, May 2001[EB/OL]. <http://www.raponline.org/ProjDocs/DREmsRul/Collfile/DG>, 2016-11-02.
- [18] PIPATTANASOMPORN M, WILLINGHAM M, RAHMAN S. Implications of on-site distributed generation for commercial/industrial facilities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1):206-212.
- [19] 魏学好, 周 浩. 中国火力发电行业减排污染物的环境价值标准估算[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1):53-56. WEI Xuehao, ZHOU Hao. Evaluating the environmental value schedule of pollutants mitigated in China thermal power industry[J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(1):53-56.
- [20] 郭 力, 许 东, 王成山, 等. 冷电联供分布式供能系统能量优化管理[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19):96-100. GUO Li, XU Dong, WANG Chengshan, et al. Energy optimization and management of combined cooling and power distributed energy supply system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19):96-100.

胡汉梅(1965—), 女, 教授, 硕士生导师, 从事电力系统及其自动化专业的科研与教学工作。

李静雅(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向是微电网的优化运行(通信作者)。

黄景光(1968—), 男, 博士, 副教授, 从事信号分析和电力系统继电保护方面的研究。

(上接第 18 页)

- field effects[J]. IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2013(4):1056-1059.
- [27] 汪 汛, 方 志, 邱毓昌. 高压直流 GIS 中绝缘子的表面电荷积聚的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3):105-109. WANG Feng, FANG Zhi, QIU Yuchang. Study of charge accumulation on insulator surface in HVDC gas-insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3):105-109.
- 杜乾栋(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事 GIS 绝缘试验方面的研究。
- 张乔根(1965—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事气体绝缘与放电等离子技术、大功率脉冲技术及应用的研究。