

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.05.014

不同电压等级GIS局部放电UHF信号传播特性仿真研究

任志刚¹, 李伟¹, 徐兴全¹, 王飞², 段大鹏¹, 唐志国³

(1. 北京电力科学研究院, 北京 100075; 2. 国网北京城区供电公司, 北京 100035;

3. 华北电力大学高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206)

摘要: 特高频局部放电检测是进行气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)状态评估的一项重要技术手段。通过信号注入方式对特高频传感器在GIS上配置的合理性和局放特高频监测系统灵敏度进行校核是确保状态监测有效实施的重要手段。不同电压等级的GIS结构尺寸不同,对UHF信号的传播和衰减的影响也不相同,因此所需注入校核信号的幅值也不尽相同。文中根据真实GIS建立110、220、500、1 000 kV 4种电压等级下的直腔体、L型、T型仿真模型,通过CST仿真软件对比研究并分析了同一结构下不同电压等级的GIS中UHF信号以及同一电压等级不同结构中UHF信号的传播衰减情况;据此得出了不同电压等级GIS各种典型结构下UHF信号的衰减量,为UHF传感器的配置合理性评价及现场校核信号注入值的确定奠定了基础。

关键词: 气体绝缘组合电器; 局部放电; 特高频; 衰减; CST

Simulation on Propagation Characteristics of UHF Signals of Partial Discharge in Different Voltage Levels GIS

REN Zhigang¹, LI Wei¹, XU Xingquan¹, WANG Fei², DUAN Dapeng¹, TANG Zhiguo³

(1. Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China; 2. State Grid Beijing Urban District Power Supply Company,

Beijing 100035, China; 3. Beijing Key Laboratory of HV & EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: UHF(ultra-high frequency)partial discharge detection is an important technical means for the condition monitoring of GIS, verifying the reasonableness of sensors arrangement and the performance of the monitoring system by the signal injection is an important means to ensure the effective implementation of condition monitoring. The propagation and attenuation of UHF signals vary with different voltage levels GIS structures, so the injection amplitudes of verification pulse are different. In this paper, the simulation models of straight cavity, L type and T type of 110, 220, 500, 1 000 kV GIS are established based on real GIS, comparative study and analysis the attenuation differences and propagation rules of UHF signals of the same structure of different voltage levels GIS and the same voltage level of different structures through CST simulation software. Based on above, the attenuations of various typical structures of GIS with different voltage levels are obtained. Through this research laid a foundation for the reasonable evaluation of UHF sensors arrangement and the amplitude determination of site verification pulse injection.

Key words: gas insulated switchgear(GIS); partial discharge; ultra-high frequency(UHF); attenuation; CST

0 引言

气体绝缘组合电器(GIS)内部发生局部放电时,会在GIS腔体中激发特高频(UHF)电磁波^[1-2],其频率可达300~3 000 MHz。由于局部放电特高频检测技术具有灵敏度高、抗干扰能力强、可定位等优点,已

在GIS局部放电检测中得到广泛应用,其现场使用效果也得到了运行检修人员的广泛认可^[3-5]。

目前,UHF在线监测传感器的布置均是根据经验进行,不同厂家、不同电压等级GIS的传感器布置方案差异很大,其布局的经济合理性缺乏科学的检验;在长期运行中UHF传感器和检测仪的灵敏度可

能会下降,并导致无法对局放信号进行有效检测,从而产生漏报的情况。为了检验 UHF 传感器在 GIS 上配置的合理性,以及确保 UHF 监测系统在长期运行中的灵敏度和有效性,须有针对性地开展检测系统灵敏度的现场校核工作。等效脉冲注入法是 UHF 检测系统灵敏度现场校核的重要手段^[6-9],不同电压等级 GIS 尺寸结构不同,UHF 信号传播衰减特性也不尽相同,因而如何确定合理的注入信号幅值成为现场校核的关键所在^[10-11]。近年来,北京电科院针对国网公司管辖的重要超高压和特高压 GIS 进行了多次现场校核试验,通过从相邻传感器注入一定电平的脉冲信号,观察待校系统响应,发现了很多传感器配置不足的问题,但是对于注入信号幅度并未考虑 GIS 结构差异,缺乏统一的标准和量化评价。解决 UHF 电磁波在不同电压等级 GIS 典型结构中的传播特性成为解决上述问题的关键。

目前,国内外针对 UHF 电磁波的传播特性研究主要针对电磁波传播过程中的频谱变化或针对某个电压等级的某些典型结构的衰减进行,并未系统的研究不同电压等级的不同 GIS 结构中 UHF 信号的衰减差异性^[11-15]。文中通过 CST 仿真软件对 UHF 电磁波在 110、220、500、1 000 kV 电压等级的不同 GIS 典型结构中的传播衰减特性进行了仿真研究。明确了不同电压等级 GIS 中 UHF 时域信号的衰减传播规律和衰减量,对局部放电强度的判断、传感器布点以及现场校核技术提供了相关依据。

1 GIS 内电磁波传播特性

GIS 腔体可以看成圆筒和圆柱组成的同轴波导系统,发生局部放电时所产生的 UHF 电磁波不仅以横电磁波(TEM)传播,还会激发高次模波,即横电波(TE)和横磁波(TM),且以高次模波为主^[16-17]。其中 TEM 波在波导中以光速传播,而 TE 波和 TM 波传播速度低于光速与频率有关,见式(1)

$$v_g = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} \quad (1)$$

式(1)中: v_g 为高次模波波速; c 为光速; μ_r 为相对磁导率; ϵ_r 为相对介电常数; λ 为同介质同频率电磁波的波长; λ_c 为高次模波截止频率对应的波长。

TEM 波波速与频率无关,可以以任意频率传播,为非色散波,而 TE 和 TM 波速度与波长、频率有关,为色散波,有各自的截止频率,见式(2)、(3),只有当频率大于截止频率时才能在同轴波导中

传播。

TE_m波截止频率为

$$f_c = \frac{2cm}{\pi(D+d)} \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

TM_n波截止频率为

$$f_c = \frac{cn}{2(D+d)} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (3)$$

式(2)、(3)中: D 为外导体内径; d 为内导体外径。

由于不同频率正弦波的振幅和相位不同,在色散介质中,UHF 电磁波在 GIS 腔体中不同位置合成的时域信号也会发生变化,且不同电压等级 GIS 所对应的高次模波截止频率不同,对 UHF 信号也会产生不同的影响。

2 仿真模型建立

利用 CST 仿真软件进行研究,依据 110、220、500、1 000 kV 电压等级 GIS 标准尺寸分别建立直腔体、L 型、T 型同轴腔体仿真模型,见图 1,不同电压等级所对应的模型尺寸见表 1,腔体总长度均为 6 m,CST 仿真往往在边界框的内部进行,边界设置为开阔场,材料均设置为理想导体。

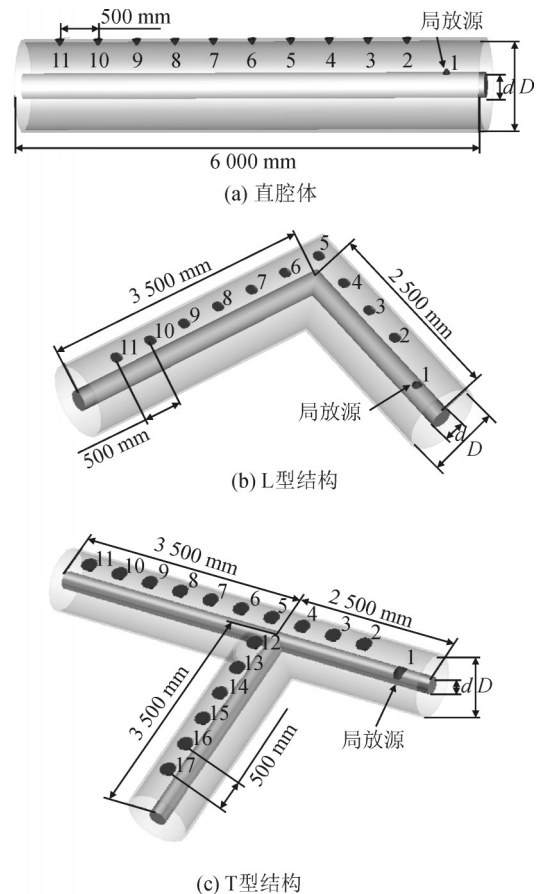


图 1 不同 GIS 典型结构

Fig. 1 Typical structures of different GIS

表1 不同电压等级GIS结构尺寸
Table 1 GIS size of different voltage levels

电压等级/kV	外壳内径/mm	母线外径/mm
110	240	60
220	360	90
500	520	120
1 000	890	260

局放源采用双指数脉冲电流源,波形同UHF检测仪标定用脉冲发生器输出电压波形,见图2,其中脉冲上升时间 $t_r=0.3$ ns,幅值为1 A。通过长度为5 mm的放置在距首端500 mm处的高压导体上单极探针进行辐射,放电方向沿GIS径向。通过内阻为50 Ω 的单极探针对UHF电磁波进行检测,单极探针与局放源的夹角为0°,每隔500 mm设置一个50 Ω 匹配的单极探针负载进行电场取样。

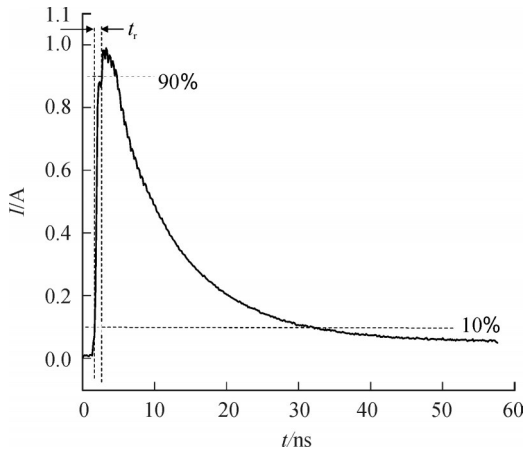


图2 激励电流源脉冲波形

Fig. 2 The pulse waveform of excitation current source

3 仿真结果分析

以探针2所测电场值峰值为基准,根据式(4)计算各探针处场强的衰减量(dB)

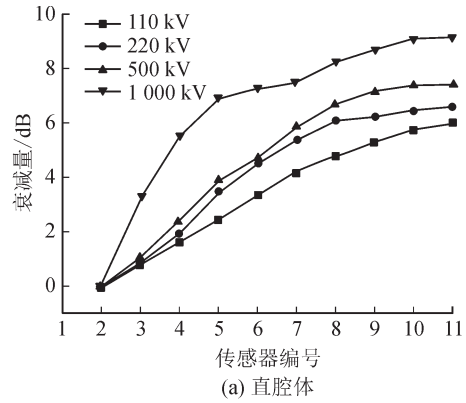
$$D = \left| 20 \lg \frac{U_i}{U_2} \right| \quad i = 2, 3, 4 \dots \quad (4)$$

式(4)中: D 为衰减量; U_i 为第 i 个探针场强峰值; U_2 为第2个探针场强峰值。

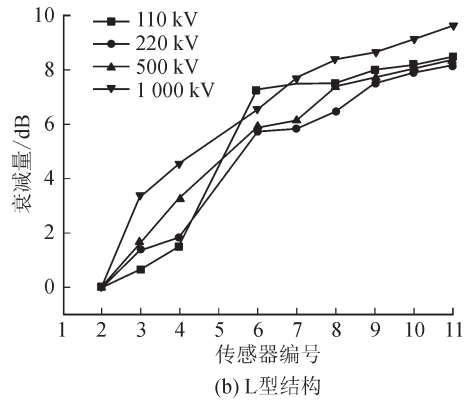
各电压等级不同结构情况下的衰减曲线见图3。各电压等级5 m处衰减量见表2。图3表明,电压等级越高,GIS罐体尺寸越大,此时UHF电磁波能量变得越分散,因而能量密度下降,这一因素成为信号衰减的主导,因此随着电压等级从110~1 000 kV,电磁波信号经过单位距离的衰减呈现一致增大的趋势。

3.1 直腔体仿真结果分析

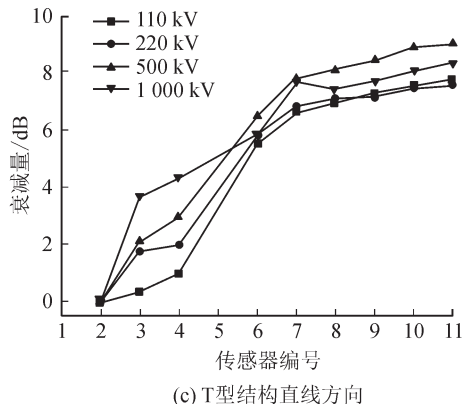
UHF信号在直腔体中传播时,随着电压等级增



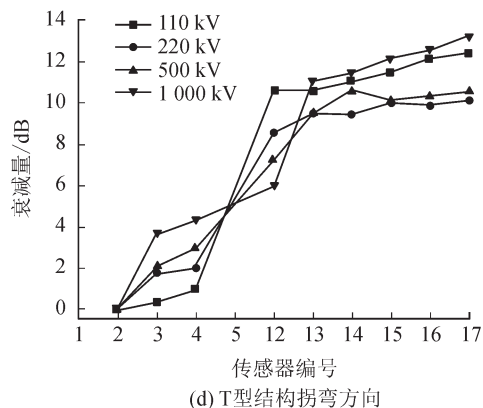
(a) 直腔体



(b) L型结构



(c) T型结构直线方向



(d) T型结构拐弯方向

图3 不同电压等级不同GIS结构UHF信号衰减量
Fig. 3 The UHF attenuation of different structure of different voltage levels GIS

高,其对应的高次模波截止频率越低,低频成分含量在信号频谱中的比重增加,见图4。

表 2 各电压等级不同 GIS 结构衰减量
Table 2 The attenuation of different structure of different voltage levels GIS

电压等级/kV	直腔体距放电源 5 m(检测点11)处 衰减量/dB	L结构 衰减量/dB	T型直线 方向衰减 量/dB	T型拐弯 方向衰减 量/dB
110	9.0	5.7	4.6	9.4
220	7.4	4.0	3.0	7.3
500	6.5	2.7	2.0	4.2
1 000	6.0	2.0	1.5	2.0

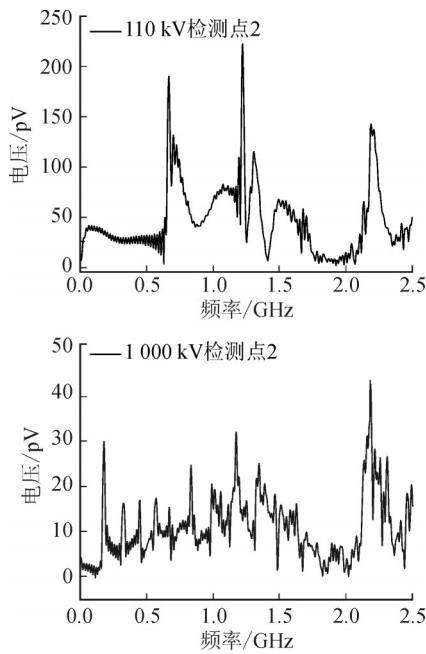


图 4 110 kV 及 1 000 kV 直腔体波形频谱

Fig. 4 Spectrums of 110 kV and 1 000 kV straight cavity

1 000 kV 直腔体检测点 2、4、7 处 UHF 信号的频谱见图 5。从图 5 可以看出,电磁波在直腔体中传播低频成分衰减较高频成分快,因此腔体越大,低频成分越多,衰减量越大。随着距离的增加,低频成分逐渐减少,则信号的衰减主要由高频成分决定,高频成分在直腔体中衰减速率较低频成分慢,因此信号的衰减速率又逐渐降低,UHF 信号在直腔体中传播时距放电源越近衰减越快。

3.2 L型结构仿真结果分析

从图 3(b)及表 2 可知,在 L 型结构中,电压等级越高,L 型拐弯对 UHF 信号的衰减量越小,表明随着 GIS 管径增大,电磁波低频分量的增大在不连续点引起的衰减下降。

500 kV L 型结构检测点 4 和检测点 6 的波形频谱见图 6。从图 6 可以看出,从检测点 4 到检测点 6 UHF 信号的高频成分衰减较大,文[18]也给出了相同的结论,L 型结构主要对高频成分有衰减。通过 L 型

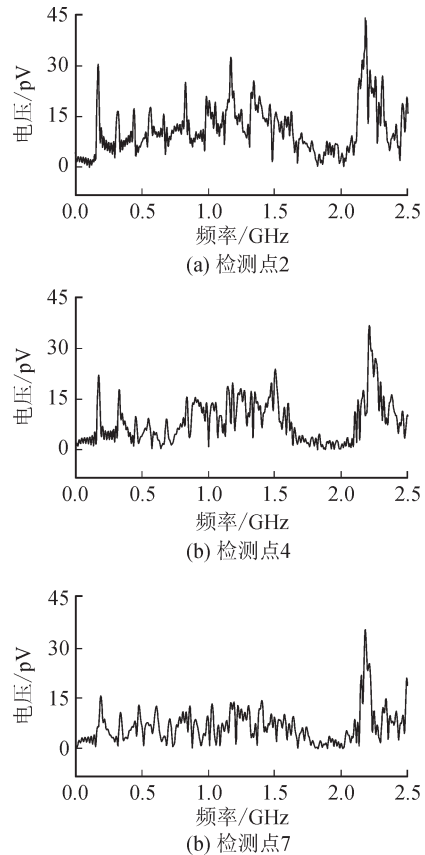


图 5 1 000 kV 直腔体中不同检测点波形频谱
Fig. 5 Spectrums of different detected points of 1 000 kV straight cavity

结构之后,UHF 电磁波的传播衰减仍主要由管径对于能量分散作用决定。

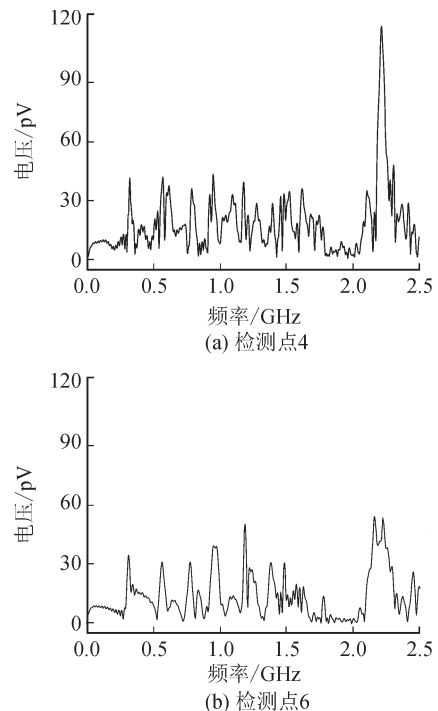


图 6 500 kV L 型信号检测点 4 和 6 信号频谱
Fig. 6 Spectrums of points 4 and 6 of L type of 500 kV GIS

3.3 T型结构仿真结果分析

UHF电磁波经过T型结构会沿着直线和拐弯方向传播,电磁波经过T型拐弯方向会产生模态转换,引起信号衰减,直线方向虽不会引起模态转换,但也会引起一定的衰减^[9]。从图3(c)、(d)可知,直线方向衰减比拐弯方向衰减少,随着电压等级的升高,两者差异逐渐减小,衰减量见表2。

电压等级越高受T型结构影响越小,T型拐弯方向和L型中波的传播特性一致,电压等级越高,低频成分越大,而T型拐弯处主要是高频成分衰减,因此衰减量越小。同样,经过T型拐弯结构后,电压等级越高,衰减越大。

3.4 同一电压等级不同结构衰减特性

以110 kV为列来说明同一电压等级不同结构衰减量差异,110 kV各GIS结构衰减量见图7,从图7可以看出,衰减量从大到小为:T型拐弯方向>L型>T型直线方向>直腔体,T型结构的拐弯要比L型结构衰减大3 dB,T型结构直线方向要比直腔体衰减大2 dB,比较以上3种结构,T型结构对UHF信号影响最大。

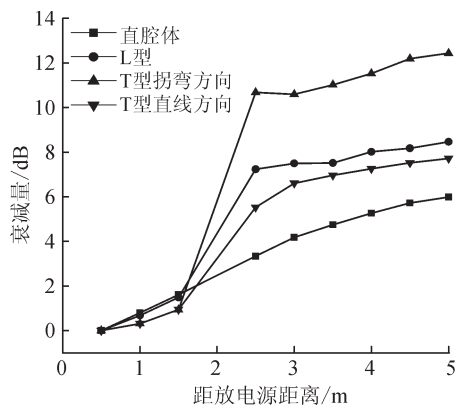


图7 110 kV 各GIS结构衰减量

Fig. 7 Attenuation of 110 kV GIS structures

4 结论

文中通过CST仿真软件对110、220、500、1 000 kV电压等级的GIS直腔体、L型、T型结构中UHF时域信号传播衰减特性进行仿真研究,可知:

1)电压等级越高,UHF信号在直腔体中衰减越大,且越靠近放电源衰减速率越快,而受T型和L型结构影响越小,但经过T型拐弯和L型结构后,电压等级越高衰减越大。T型拐弯和L型结构主要对高频成分有影响。

2)同一电压等级中衰减量由大到小:T型拐弯方向>L型>T型直线方向>直腔体。

3)确定了UHF信号经过不同电压等级不同结构的衰减量,为UHF传感器的配置布点合理性评价

及现场校核信号注入值的确定奠定了基础。

参考文献:

- [1] 杜树壮. SF₆全封闭组合电器(GIS)局部放电故障检测方法比较与综合应用[J]. 中国电业(技术版),2014(11):50-52. DU Shuzhuang. Partial discharge detection method comparison and comprehensive application, power system technology[J]. China Electric Power(Technology Edition),2014(11):50-52.
- [2] BOLIN P, KOCH H. Introduction and applications of gas insulated substation(GIS)[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Francisco, California, United States: IEEE, 2005:920-926.
- [3] ITO T, KAMEI M, UETA G, et al. Improving the sensitivity verification method of the UHF PD detection technique for GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(6): 1847-1853.
- [4] 李 信. GIS局部放电特高频检测技术的研究[D]. 北京:华北电力大学,2005. LI Xin. GIS partial discharge UHF detection technology research[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [5] 王 雷, 秦立军. 基于UHF的GIS局部放电在线监测研究[J]. 中国电业(技术版),2011(8):16-20. WANG Lei, QIN Lijun. Research of UHF on-line detection for partial discharge in GIS[J]. Power System Technology, 2011(8):16-20.
- [6] CIGRE Task Force 15/33. 03. 05. Partial discharge detection system for GIS: Sensitivity verification for the UHF method and the acoustic method[J]. ELECTRA, 1999(183): 74-87.
- [7] Study Committee Working Group. UHF partial discharge detection system for GIS: Application guide for sensitivity verification[R]. Paris, France: CIGRE, 2016.
- [8] 黎 量. GIS局部放电UHF检测系统性能现场校核方法[D]. 北京:华北电力大学,2015. LI Liang. The site verification method of the partial-discharge detection using the UHF method in GIS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [9] 舒胜文, 陈金祥, 陈 彬, 等. 应用正向传输系数的GIS局部放电UHF传感器布置方式现场校核方法[J]. 电网技术, 2016, 40(9):2910-2916. SHU Shengwen, CHEN Jinxiang, CHEN Bin, et al. A field calibration method for UHF partial discharge detection sensor arrangement in GIS based on forward propagation coefficient[J]. Power System Technology, 2016, 40(9):2910-2916.
- [10] 程 序, 颜廷利, 詹花茂, 等. GIS中局部放电UHF信号传播特性研究[J]. 高压电, 2014, 50(5):30-35. CHENG Xu, YAN Tingli, ZHAN Huamao, et al. Propagation characteristics of UHF partial discharge signals in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5):30-35.

- [11] 任明, 董明, 肖智刚, 等. GIS 中局部放电电磁波同轴传播特性仿真研究[J]. 高压电器, 2014, 50(3): 88-94.
REN Ming, DONG Ming, XIAO Zhigang, et al. Simulation on propagation characteristics of partial discharge electromagnetic signals in GIS with coaxial structure[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3): 88-94.
- [12] JUDD M D, HAMPTON B F, FARISH O. Modelling partial discharge excitation of UHF signals in waveguide structures using green's functions[J]. IEE Proceeding of Science Measurement Technology, 1996, 143(1): 63-70.
- [13] 张磊, 林群, 丁登伟, 等. GIS 中局部放电特高频信号传播特性的仿真分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 726-731.
ZHANG Lei, LIN Qun, DING Dengwei, et al. Simulation analysis on the attenuation characteristics of partial discharge ultra-high frequency signals in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 726-731.
- [14] 路俊勇, 王岗, 司刚全, 等. 基于 FDTD 的 GIS 中电磁波传播特性仿真研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 178-182.
LU Junyong, WANG Gang, SI Gangquan, et al. Simulation analysis of propagation characteristics of electromagnetic wave in GIS based on FDTD[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 178-182.
- [15] 丁登伟, 高文胜, 刘卫东. GIS 结构尺寸对局部放电特高频信号的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2850-2854.
DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Influence of structure dimension of GIS on UHF signal of partial discharge[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2850-2854.
- [16] HIKITA M, OHTSUKA S, UETA G, et al. Influence of insulating spacer type on propagation properties of PD-induced electromagnetic wave in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(5): 1642-1648.
- [17] HIKITA M, OHTSUKA S, WADA J, et al. Propagation properties of PD-induced electromagnetic wave in 66 kV GIS model tank with 1 branch structure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5): 1678-1685.
- [18] HIKITA M, OHTSUKA S, WADA J, et al. Study of partial discharge radiated electromagnetic wave propagation characteristics in an actual 154 kV model GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 8-17.
- [19] 丁登伟, 高文胜, 刘卫东. GIS 中特高频电磁波模式转换及传播效率的仿真研究[J]. 高压电器, 2014, 50(6): 13-20.
DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Simulation on mode transformation and propagation attenuation of UHF signal of partial discharge in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(6): 13-20.

任志刚(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事带电检测技术与带电检测仪器校验技术研究工作。

(上接第 87 页)

- quantum computing, cognitive informatics and life sciences [M]. United States: IGI Global, 2011.
- [18] 韩莹, 陈胜. 类序关系下剩余型双极值 FMP 问题的 3I 推理方法及其鲁棒性[J]. 模糊系统与数学, 2016, 30(2): 15-21.
HAN Ying, CHEN Sheng. 3I reasoning method to residual bipolar-valued FMP problems and its robustness based on the category order relation[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2016, 30(2): 15-21.
- [19] HAN Y, LUO Q, CHEN S. Hesitant bipolar fuzzy set and its application in decision making[C]/Frontiers in Artificial Intelligence and Applications. [S.l.]: [s.n.], 2016: 115-121.
- [20] HAN Ying, SHI Peng, CHEN Sheng. Bipolar-valued rough fuzzy set and its applications to the decision information system[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 23(6): 2358-2370.
- [21] MUDDINENI V P, BONALA A K, SANDEPUDI S R. Enhanced weighting factor selection for predictive torque control of induction motor drive based on VIKOR method[J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(9): 877-888.
- [22] OPRICOVIC S. Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(10): 12983-12990.
- [23] LIAO Huchang, XU Zeshui, ZENG Xiaojun. Hesitant fuzzy linguistic VIKOR method and its application in qualitative multiple criteria decision making[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 23(5): 1343-1355.
- [24] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information & Control, 1965, 8(3): 338-353.
- [25] ZADEH L A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning[J]. Information Sciences, 1975, 8(3): 199-249.
- [26] ATANASSOV K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96.
- [27] 韩莹, 陈胜. 双极值模糊集研究综述[J]. 南京信息工程大学学报, 2015, 7(6): 512-518.
HAN Ying, CHEN Sheng. Research summary of bipolar-valued fuzzy sets[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2015, 7(6): 512-518.
- 罗琦(1958—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为随机动力分析。
- 杨林(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为模糊故障诊断(通信作者)。
- 韩莹(1978—), 女, 博士, 副教授, 硕导, 主要研究方向为不确定数据处理与分析。
- 史凯(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金融数据分析处理。