

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.09.003

一种适用于配电开关辐射场仿真分析方法

范闻博¹, 吴 燕¹, 赵轶民², 关石磊¹, 余勇祥², 耿英三²

(1. 配电变压器节能技术北京市重点实验室, 北京 100192;

2. 西安交通大学电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 在一、二次融合配电开关设备中, 操作过程中暂态电磁辐射会对安装在开关内部的二次元件产生影响。目前对配电开关设备的电磁兼容问题研究集中在试验检测, 而缺乏对电磁辐射场的仿真工作。文中研究目标是建立一种适合于配电开关电磁辐射场仿真方法, 并通过实验验证仿真方法的适用性。通过分析配电开关设备近场辐射的特点, 认为时域有限积分法是计算该电磁模型的适用方法, 接下来使用 CST 微波工作室时域有限积分软件对一台 10 kV 的真空断路器进行了建模, 仿真分析了合闸涌流操作引起的电磁辐射场, 并进行了相同条件的辐射磁场测量实验。仿真得到的辐射磁场波形与实验采集结果对比显示, 二者波形变化趋势一致, 数值误差小于 15%, 证明了该仿真方法对计算配电开关设备的电磁辐射场的适用性。

关键词: 配电开关; 电磁兼容; 辐射场; 时域有限积分法

Simulation Method for Calculating Radiation Field of Distribution Circuit Breakers

FAN Wenbo¹, WU Yan¹, ZHAO Yimin², GUAN Shilei¹, YU Yongxiang², GENG Yingsan²

(1. Beijing Key Laboratory of Energy-saving Technology for Distribution Transformer, Beijing 100192, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In primary-secondary integrated distribution circuit breakers, the transient radiation caused by switching operations may affect the inner secondary devices. However, the existing researches on EMC problems of distribution switching equipment are mostly focused on experimental tests, which are lack of simulation parts. The objective of this paper is to establish one simulation method which is suitable for researching electromagnetic radiation problems of distribution circuit breakers, and to verify the method by experiments. By analyzing features of near-field radiation of distribution circuit breakers, finite integration time domain (FITD) is considered as a suitable calculating methodology for this electromagnetism model. Next, one simulation model of a 10 kV vacuum circuit breaker is established by the simulation software CST microwave studio, and then an electromagnetic radiation field caused by the inrush current is calculated with FITD. The experimental measurement in the same condition is also carried out. The comparison between the simulation and experiment results shows that waveforms of them are similar in tendency and the error range is within 15%, which proves the availability of this simulation method in electromagnetic radiation calculation of distribution circuit breakers.

Key words: distribution circuit breakers; EMC; radiation field; finite integration time domain(FITD)

0 引言

随着智能电网的发展, 对电力开关设备的智能

化要求也在日益提高^[1]。2016 年国家电网发布了国网配电设备的一二次融合技术相关初步方案与技术标准^[2], 旨在全面推进电力开关设备的智能化性能。相比于传统开关设备, 一二次融合技术开关设备更

收稿日期: 2017-04-16; 修回日期: 2017-06-26

基金项目: 国家电网公司科技资助项目(PDB17201400189)。

Project Supported by Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(PDB17201400189).

加注重二次测控设备与一次开关设备的密切配合与集成化设计^[3-4],通过下放二次设备到现场一次设备附近或通过在产品设计中直接将二次设备安装在一次设备上,形成一、二次设备的一体化,使传统的开关设备真正成为拥有智能化单元的智能电器。

在一、二次电力设备一体化设计的实现过程中,产品的电磁兼容性能问题较为突出^[5-7]。由于开关设备的强弱电部分的距离进一步减小,加剧了二次智能设备对电磁干扰的敏感性与脆弱性。对样机的测试也表明,在设备进行合分操作时,二次设备容易被干扰进而产生故障。相比于高压及变电站环境下的强暂态电磁兼容问题^[8-10],配电系统中由开关操作引发的暂态干扰幅值和辐射水平较低,一般不会引起电力设备及弱电单元的硬件损伤,且对远场区域的设备影响较小。因此在电力系统的发展进程中,对近场电磁干扰一直未引起足够的重视^[11]。但在二次融合技术中,由于二次设备与一次设备的高度集成化,开关暂态引发的电磁兼容问题成为了一个不可忽视的因素,对这一问题的研究如果不够完善,将严重阻碍配电开关一二次融合技术的发展和实际应用。

目前对低电压等级的开关设备电磁兼容的研究较少,且多为针对特定开关设备的试验结论^[12-13]。文[14]中将低压断路器及其部分回路与一部独立供电单片机系统置于同一个箱体,试验中在开断过程中记录到了单片机系统发生了“死机”、显示屏乱码及非正常复位等干扰现象;文[15-17]通过实测对智能电器弱电单元的电磁兼容问题进行分析,并讨论了运行于分断近场条件下的二次部分设计原则;文[18]的研究结论表明,借助于线路电流测量结果进行理论计算出的空间工频磁场分布与实际的磁场测量结果非常一致。在一二次融合开关设备的研发过程中,为了彻底研究电磁兼容问题对开关设备的影响,有必要运用电磁仿真的方法模拟产品在实际使用过程中的运行状态,并以此评价设备所处的电磁环境,进而对产品的电磁兼容设计提出合理的建议。

文中的研究目标是建立一种适合于配电开关电磁场仿真方法并通过实验进行对比,验证仿真方法的适用性。在分析研究对象的电磁特性之后,采用 CST(computer simulation technology)微波工作室作的时域有限积分法仿真软件,对一台 10 kV 的真空断路器进行了建模仿真,并通过选定的开关操作实验,测量特定位置的磁场波形,并进行仿真与实验结果的对比。

1 配电开关近场仿真的分析与算法

在电磁场辐射计算时,按照观测点与辐射源之间的距离 r ,将射源激发的场域将被划分为 3 个区域,见图 1。分别为近场区、费雷斯内尔(Fresnel)区以及远场区^[19]。

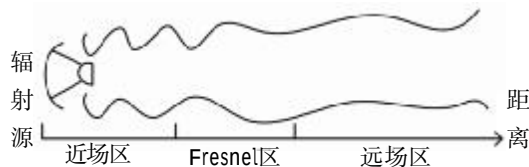


图 1 辐射场域的划分示意图

Fig. 1 Partition diagram of radiation field

当观测点距辐射源远小于辐射波长时,认为该观测点处在近场区。配电开关设备的电压等级较低,因此由开关操作引发的暂态电磁辐射的水平也较低。文[11]中提到,对于配电开关的实测电磁辐射的上限频率一般不超过 10 MHz。因此,文中工作中的电磁辐射问题属于近场的研究范畴。

结合配电开关本身的较小电尺寸特征,可总结出配电开关电磁模型以下几个特点:①在近场区域内电场强度与磁场强度不存在相互关系,磁场与电流相关,电场与电压相关,可以分开计算;②由于配电开关内部结构复杂,对电磁场的影响因素较多,因此过于简化模型可能会导致计算结果不准确;③配电开关合分操作引起的暂态干扰持续时间较短,频段较窄,但暂态幅值较高。以 10 kV 断路器关合背靠背电容器组时的涌流波形为例,电流波形幅值达到 20 kA,但频率为 4 250 Hz,持续时间在毫秒级别。

综上所述,在仿真计算配电开关的辐射场时,由于激励源的持续时间短,频带较窄,因此在时域和频域两种计算方法中使用时域计算方法效果更好;同时配电开关的体积小,结构精密,对仿真计算的精确度和计算量也提出了一定的要求。在目前流行的电磁场计算方法中,使用时域有限积分法能满足上述的要求。

时域算法能够较为精确地处理暂态模型,同时使用迭代的方式进行计算使得其计算量相对有限元法等其它常用计算方法低得多。时域有限积分法的计算原理示意图^[20]见图 2。仿真过程中,计算域会被正六面体的网格剖分,网格剖分包括主网格和亚网格两套系统,它们被设置为相互正交关系,有限积分法使用积分形式麦克斯韦方程组的空间离散化正是在这两组相互正交的网格上进行的,网格内的电场强度 E 和磁感应强度 B 在主网格上进行分配,而电位移 D 和磁场强度 H 则被定义在亚网格上。在仿真

计算时,由式(1)的麦克斯韦方程积分形式对各个网格进行迭代

$$\left\{ \begin{array}{l} \oint_{\partial A} \mathbf{E} d\mathbf{s} = - \int_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A} \\ \oint_{\partial A} \mathbf{H} d\mathbf{s} = - \int_A \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \right) \cdot d\mathbf{A} \\ \oint_{\partial V} \mathbf{D} d\mathbf{A} = \int_V \rho dV \\ \oint_{\partial V} \mathbf{B} d\mathbf{A} = 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

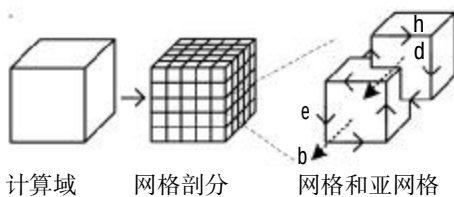


图2 时域有限积分法的计算原理示意图

Fig. 2 Calculation principle of FITD

每个网格的面都被独立地规制于麦克斯韦方程组。在每个网格的平面上重复图中的运算步骤并将所有的计算过程以矩阵的形式表示,同时引入拓扑矩阵 $\mathbf{C}$ 作为主网格上的空间离散化的旋量算子。

再对亚网格运用安培定律并定义该网格上的旋量算子为 $\tilde{\mathbf{C}}$ 。类似地,对麦克斯韦方程组中剩下的两个等式也进行离散化并定义相应的散度算子 $\mathbf{S}$ 与 $\tilde{\mathbf{S}}$,分别对应与主网格与亚网格。因为这些算子只表示网格之间的拓扑关系,因此在算子中的矩阵元素只会存在 1, 0 和 -1 3 种系数。最终,得到完全离散化的麦克斯韦方程组的网格表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{C}\mathbf{e} = - \frac{1}{dt} \mathbf{b} \\ \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{h} = \frac{d}{dt} \mathbf{d} + \mathbf{j} \\ \tilde{\mathbf{S}}\mathbf{d} = \mathbf{q} \\ \mathbf{S}\mathbf{b} = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

将式(2)与麦克斯韦方程组的连续化公式进行对比,可以看出它们之间的相似度与关联性。值得一提的是在按照式(2)得到电磁模型的拓扑矩阵时不会出现任何离散化带来的误差,这也正是 FIT 算法的优点之一:优良的梯度连续性。即使是在离散的空间网格上,旋度与散度算子的运算关系也说明了梯度连续性依旧保持。另一方面,由于离散的麦克斯韦方程式依旧遵循电荷与能量守恒定律,在数值计算中出现迭代发散的可能性很小。

在列出了各网格之间的麦克斯韦方程组关系矩阵之后,再根据网格的材料属性由式(3)进行对矩阵的相关元素进行替换,得到了计算矩阵后便可以由计算机开始解决空间电磁场问题。

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_s \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{d} = \mathbf{M}_\epsilon \mathbf{e} \\ \mathbf{b} = \mathbf{M}_\mu \mathbf{h} \\ \mathbf{j} = \mathbf{M}_\sigma \mathbf{e} + \mathbf{j}_s \end{array} \right. \quad (3)$$

2 仿真模型的建立及实验测量对比

2.1 配电开关辐射近场模型的建立

为验证时域有限积分法在配电设备电磁兼容问题研究中的适用性,选择 10 kV 的真空断路器为研究对象,使用 CST 微波工作室作为仿真软件进行了建模和电磁仿真。图 3 左侧为该 10 kV 真空断路器的实物图,右侧为在 CST 微波工作室中建立的电磁场模型。由图 3 可以看出,该 10 kV 单相真空断路器主要由真空灭弧室、操动机构(操动杆、绝缘子、铁心线圈)以及机体支架 3 个部分组成。建立的仿真模型最大限度地还原了实物的结构特征,并对所有的模型材料属性进行了准确的设置。

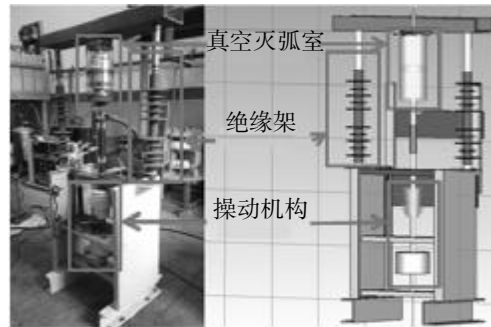


图3 10 kV 真空断路器实物图及与其仿真模型对比图

Fig. 3 Comparison of a 10 kV vacuum circuit breaker and its electromagnetic model

仿真不仅完成对断路器本体的建模,还根据断路器所处的位置对其周围的环境进行了相应的设置,见图 4。将断路器放置在一层水泥材料的地面上并以空气介质进行包覆。引入激励源时,将真空灭弧室的上下两端引出的接线处作为进出端口,仿真中设置激励源为 20 kA, 4 250 Hz 的涌流波形。

模型的仿真条件设置有:频率范围 1~100 kHz;边界设定为开放边界;无对称条件;边界材料为空气。网格剖分状况包括:网格形状为正六面体,最大网格为 44.5 mm;最小网格为 4.3 mm;x 方向网格数为 49;y 方向网格数为 26;z 方向网格数为 31;总网格数为 36 000。由于激励源的频率为 4 250 Hz,考虑到计算速度和实际干扰的带宽情况,因此将计算频率上限设置为 100 kHz。在使用时域有限积分法时,网格的

剖分形式为正六面体。

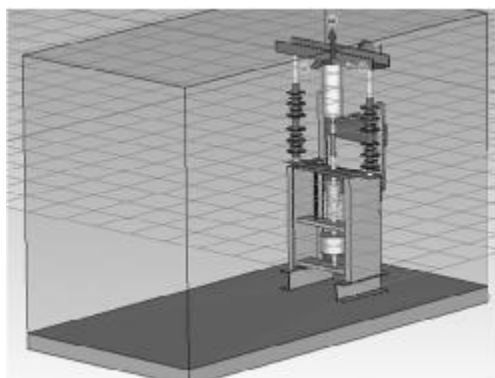


图 4 10 kV 真空断路器的建模示意图

Fig. 4 The model of a 10 kV vacuum circuit breaker

在距离断路器为 1 m, 高度与真空灭弧室中央等高位置设置磁场探针作为观测点, 并开始仿真计算。在仿真计算结束后, 可以在结果中查看探针处的磁场强度波形见图 5。

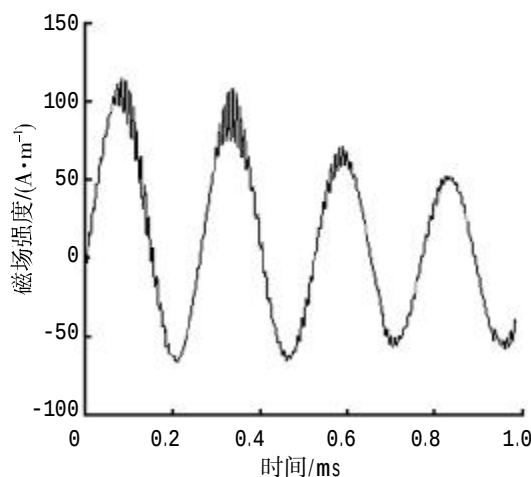


图 5 观测点处 y 轴方向上的磁场波形

Fig. 5 Magnetic waveform for spectrum point in the direction of y axis

2.2 辐射磁场测量实验

为了测量 10 kV 单相真空断路器在开断过程中产生的辐射磁场值, 文中使用了涌流合成回路对该断路器进行了实验。电路原理图见图 6。通过交流电源 AC 与可调式变压器 T 预先给电容 C 充电, 涌流回路中 SH 两端接入真空断路器, 通过预充电的 LC 振荡回路产生高频涌流。使用罗氏线圈测得回路中产生的涌流波形见图 7, 与仿真中使用的同为 20 kA, 4 250 Hz 的标准波形。

磁场的测量位置与仿真中选取的观测点位置相同, 使用近场磁场探头将辐射磁场转换为电压信号传输到后端仪器上显示, 并根据相应的换算系数得到探头测得的磁场强度波形。测量实验中使用了 PSB2 的近场磁场探头以及相应配备的电磁兼容测试分析

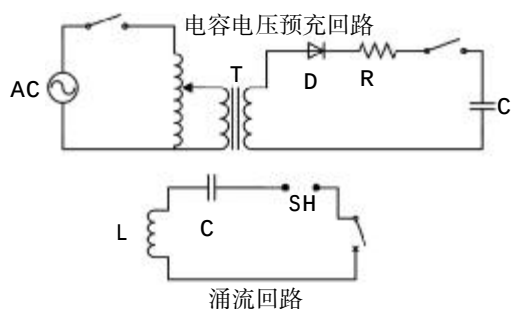


图 6 涌流合成回路原理图

Fig. 6 The electrical circuit of inrush current

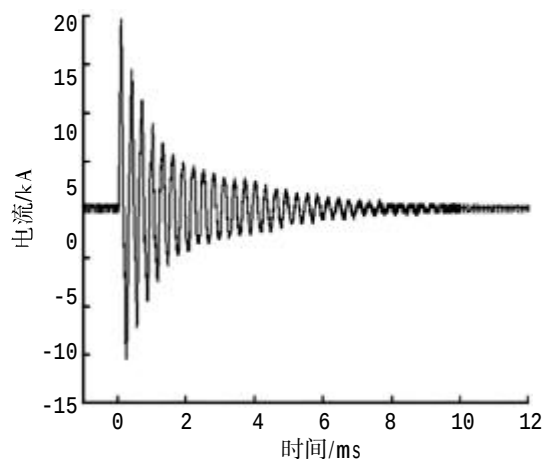


图 7 实验中测量到的涌流波形

Fig. 7 Inrush current measured in experiment

仪 NF5035, 磁场探头的测量频率范围为 0~500 MHz, 阻抗 50 Ω , 测量磁场强度范围为 1 pT~2 mT。

测量得到的 y 轴方向上的磁场波形见图 8, 与图 5 的仿真结果相对应。对比仿真和实际测量的波形可知, 二者的波形变化趋势相近, 最大值均为 100 A/m 左右。经统计, 以实际测量波形为基准, 仿真得到辐射磁场强度数值的误差小于 15%。

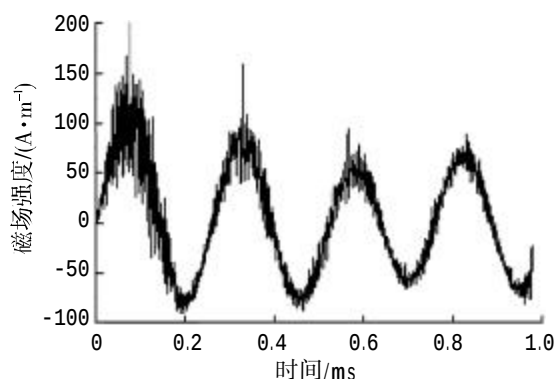


图 8 实验得到的观测点处 y 轴方向上的磁场波形

Fig. 8 Experiment measured magnetic waveform for spectrum point in the direction of y axis

但相较于仿真结果来说, 实测的磁场波形存在较多的高频分量, 这一方面是因为在仿真计算时为了加快仿真速度, 上限频率仅设置为 100 kHz, 而实

际测量中的探头频带上限为 500 MHz; 另一方面是因为在实际测量时的背景是合成回路, 电磁环境较为复杂, 且在合成涌流的瞬间回路导体和各元器件也会产生一定的磁场辐射。仿真与实测的 y 轴方向上的磁场波形的频域分析对比见图 9。由图 9 可以看出二者的主频频率和幅值近乎相等, 但在高频段上实测波形的高频分量衰减较慢, 且带宽远高于仿真结果波形。

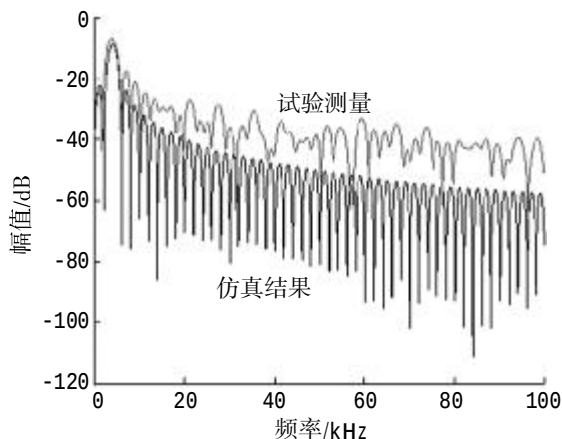


图 9 仿真和实验得到的磁场波形频谱图对比

Fig. 9 Frequency spectrums of simulation and experiment

3 结语

文中使用 CST 微波工作室时域有限积分软件对一台 10 kV 的真空断路器进行了建模, 仿真分析了合闸涌流操作引起的电磁辐射场, 进行了相同条件下辐射磁场测量实验, 并对相同位置观测点处仿真得到的辐射磁场波形与实验的采集波形进行了对比。对比结果显示, 二者的波形变化趋势一致, 数值误差小于 15%, 从而证明了该仿真方法对计算配电开关设备的电磁辐射场的适用性。使用该仿真方法可以对一二次融合技术配电开关的电磁环境和设备受扰状况等进行更加深入的研究, 有利于解决一二次融合开关设备中由于一二次设备紧密结合而产生的电磁兼容问题。

参考文献:

- [1] 王建华, 张国钢, 耿英三, 等. 智能电器最新技术研究及应用发展前景[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 1-11.
WANG Jianhua, ZHANG Guogang, GENG Yingsan, et al. The latest technology research and application prospects of the intelligent electrical apparatus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 1-11.
- [2] 国家电网公司运维检修部. 10 kV 一体化柱上变台和配电一二次成套设备典型设计及检测规范[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 10-23.
Department on Operation Maintenance and Overhaul of National Grid. Typical design, inspection and test standard for 10 kV attached distribution switching devices[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 10-23.
- [3] 陈振生, 王兵. 成套 HV/MV 开关设备的发展趋势——智能化、紧凑型及采用新型传感器[J]. 电气开关, 2005, 42(5): 5-11.
CHEN Zhensheng, WANG Bing. The development trends of HV/MV switchgear equipment assemblies-intellectualization, compact type and with adaption of new type sensors[J]. Switching Devices, 2005, 42(5): 5-11.
- [4] 陈德桂. 低压电器智能化的新动向[J]. 电气制造, 2007, (10): 36-40.
CHEN Degui. New developing trend of low-voltage intelligent apparatus[J]. Electrical Manufacturing, 2007(10): 36-40.
- [5] LIU Y, REN W, FENG J, et al. Research on electromagnetic compatibility test port model of smart high voltage equipment[C]//6th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics(CEEM), [S.l.]: IEEE, 2012: 381-383.
- [6] 崔翔. 2002 年国际大电网会议系列报道——电力系统电磁兼容研究进展[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 1-5.
CUI Xiang. A review of CIGRE' 2002 on power system electromagnetic compatibility[J]. Power System Automation, 2003, 27(4): 1-5.
- [7] 陈绍魁. 智能化电器对电器开发的新要求[J]. 电气制造, 2007, 22(1): 33-36.
CHEN Shaokui. New demands on intelligent apparatus developing[J]. Electrical Manufacturing, 2007, 22(1): 33-36.
- [8] JAKEL B W, MULLER A B. Switching transient levels relevant to medium voltage switchgear and associated instrumentation electromagnetic compatibility[C]//International Conference and Exhibition on EMC. New York: IEEE, 1999: 35-40.
- [9] WIGGINS C M, WRIGHT S E. Switching transient fields in substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(2): 591-600.
- [10] WIGGINS C M, THOMAS D E, NICKEL F S, et al. Transients electromagnetic interference in substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(4): 1869-1884.
- [11] 翟小社. 低压断路器暂态电磁过程及其控制单元 EMC 设计[D]. 西安: 西安交通大学, 2008.
ZHAI Xiaoshe. Research of low-voltage circuit breaker's transient electromagnetic process and the emc design of its intelligent controller[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2008.
- [12] 黎鹏, 黄道春, 阮江军, 等. 10 kV 开关柜开断对二次智能设备的电磁干扰[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 110-117.
LI Peng, HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, et al. Electromagnetic interference on secondary smart devices caused by breaking 10 kV switch cabinet[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 110-117.

- [13] TESCHEF M, IANOZ M, KARLSSONT. EMC analysis methods and computational models[M]. US: John Wiley & Sons, 1997.
- [14] 王 昊, 李 昕, 张 军. 低压电器干扰单片机的机理与对策[J]. 辽宁工学院学报, 2007, 27(4): 221-226.
WANG Hao, LI Xin, ZHANG Jun. Mechanism and prescription of low-field electrical appliance jamming singlechip[J]. Journal of Liaoning Institute of Technology, 2007, 27(4): 221-226.
- [15] 王成多, 杨利峰, 程雪婷. 智能电器中的电磁兼容及对策[J]. 低压电器, 2008(3): 45-52.
WANG Chengduo, YANG Lifeng, CHENG Xueting. Electromagnetic compatibility and its countermeasure in intelligent electrical apparatus[J]. Low Voltage Apparatus, 2008(3): 45-52.
- [16] UCHIMURA K. Electromagnetic interference from discharge phenomena of electric contacts[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1990, 32(2): 81-86.
- [17] MINEGISHI S, ECHIGO H, SATO R. Frequency spectra of the arc current due to opening electric contacts in air[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1989, 31(4): 342-345.
- [18] SHIMIZU M, KATO K, YOSHIDA A, et al. Quantitative evaluation of elf electromagnetic environment at substations[C]//CIGRE. France, Paris: CIGRE, 2002: 36-105.
- [19] 吴 昕, 钱照明. 开关电源近场干扰的研究[J]. 电力电子技术, 1999, 33(4): 59-61.
WU Xin, QIAN Zhaoming. Research on near-field interference of switching sources[J]. Power Electronics, 1999, 33(4): 59-61.
- [20] HIRTENFELDER F. Effective antenna simulations using CST microwave[C]//International Itg Conference on Antennas. New York: IEEE, 2007: 238-239.
- 范闻博(1979—), 女, 工程师, 研究方向为智能配用电装备、配电网经济运行及电能质量等。
- 吴 燕(1982—), 女, 工程师, 研究方向为高电压技术与配电系统设备检测技术。

(上接第 10 页)

- [16] 王 威, 杨小凤, 庄春龙. 通风强度对温湿度分布和壁面结露的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2014, 30(6): 55-59.
WANG Wei, YANG Xiaofeng, ZHUANG Chunlong. Effects of ventilation on distribution of temperature, humidity and surface condensation on walls[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2014, 30(6): 55-59.
- [17] 刘 晖, 张洪涛, 肖 红. 水饱和蒸汽压的 Antoine 方程常数的比较[J]. 内蒙古石油化工, 2019(13): 32-34.
LIU Hui, ZHANG Hongtao, XIAO Hong. Comparison for Antoine equation constants of water-saturated vapor pressure[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2019(13): 32-34.
- [18] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
YANG Shiming. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.
- [19] 王治华. 受限空间内气体扩散的数值模拟及分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
WANG Zhihua. The numerical study on diffusion of gases in limited space[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [20] 柯斯乐. 扩散流体系统中的传质[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
Cussler. Diffusion mass transfer in fluid system[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [21] 戴荟邴. 周期性温湿度作用下混凝土内部温湿度场的模拟计算[D]. 安徽: 安徽工业大学, 2014.
DAI Huili. Simulation of temperature and humidity field in concrete under cyclical temperature and humidity[D]. Anhui: Anhui University of Technology, 2014.
- 刘云鹏(1976—), 男, 博士生导师, 教授, 研究方向为特高压输电技术、电气设备状态监测与故障诊断和高电压绝缘技术等。
- 郭 沁(1992—), 男, 硕士, 研究方向为变电站运行与维护、高电压与绝缘技术。