

开关电弧放电电磁暂态干扰研究综述

闫 格¹, 吴细秀¹, 田 芸², 张 欢³

(1. 武汉理工大学自动化学院, 武汉 430070; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 武汉 430074;

3. 湖南省电力公司超高压管理局, 长沙 410005)

摘要:电力系统中的电磁暂态现象主要是由各种开关装置在操作过程中的电弧放电现象所引起,随着输电电压等级的提高,开关电弧放电所引起的电磁暂态问题更加突出。文中总结了开关电弧放电的电磁暂态特征和暂态干扰机理,并重点分析了国内外电磁暂态干扰数学模型研究和现场测量技术的发展现状。分析结果表明建立准确有效的单次电弧放电模型和多次电弧重燃模型对电磁暂态干扰仿真研究至关重要。其中,单次电弧放电模型正朝着基于物理模型和黑盒模型的混合电弧模型方向发展;多次电弧重燃模型的研究重点在于电弧重燃判据的建立,在特高压条件下,由热击穿引起的电弧重燃应引起高度重视。根据电磁暂态干扰的现场测试要求(低噪声、宽频带、高动态响应、高精度),研究可用于特高压变电站瞬态电场和磁场测量的传感系统是现场测量技术发展的重中之重。

关键词:开关电弧; 电磁暂态; 数学模型; 现场测量

中图分类号: TM56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)02-0119-12

Review on the Research of Electromagnetic Transient Interference Caused by Arc Discharge Due to Switchgear Operation

YAN Ge¹, WU Xixiu¹, TIAN Yun², ZHANG Huan³

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. College of Electrical & Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

3. EHV Administration of Hunan Electric Power Corporation, Changsha 410005, China)

Abstract: Almost of the electromagnetic transient phenomena in the power system are caused by arc discharge when operating switchgears. With the development of the transmission voltage level, the transient electromagnetic problems become more serious. This paper summarizes the characteristics and the interference mechanism of the electromagnetic transient phenomena, emphatically analyzes the recent research trends in terms of the mathematical models and field measurement technology. The analysis shows that to establish precise and effective single-discharge arc model and multi-reignition arc model is of great importance to the study of the transient electromagnetic interference by simulation method. Among them, the single-discharge arc model is developing with trends of hybrid arc model based on the physical model and black-box model. To obtain the criterion of arc-reignition is the research emphasis of multi-reignition arc model. For ultra-high voltage (UHV) applications, we should attach great importance to the thermal breakdown which is one of the reasons leading to the arc-reignition. According to the field testing requirements (low-noise, ultra-broad-band, high-dynamic response, high-precision), to develop the sensor measurement system for the transient electric field and magnetic field in UHV substation is the most important to the field testing technology's research.

Key words: switching arc; electromagnetic transient; mathematical model; field measurement

收稿日期: 2013-05-22; 修回日期: 2013-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51107093); 高校基本科研业务费专项资金资助(2011-IV-066, 113211001)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51107093), the Fundamental Research Funds for the Central(2011-IV-066, 113211001).

0 引言

电力系统在运行过程中常常会受到各种扰动使系统参量发生变化,当电力系统从一种状态变换到另一种状态时,就会出现电磁暂态过程。暂态过渡过程会产生一定频率的电磁信号,当承载该电磁信号的导电结构尺寸与电磁波波长可以相互比拟,即该导体结构是电大尺寸时,导行波在导体结构中会反射、叠加,导致电磁波幅值升高,产生过电压、过电流以及脉冲电场和磁场。过电压和过电流会直接破坏一次设备绝缘,引起接地故障,影响电网的安全运行;而脉冲电场和磁场会通过各种形式耦合到二次回路,影响二次回路的正常运行,严重时造成继电保护误动作,发生意外停电事故^[1]。

文[2]指出电力系统中绝大多数电磁暂态现象是由开关操作引起的。在开关操作过程中会产生电弧,而电磁暂态特征(暂态频率、干扰幅值、持续时间等)取决于电弧的预击穿、重燃和熄灭等物理放电过程。因此,对开关触头间隙电弧现象的研究,是揭示电磁暂态现象的产生及干扰机理的重要方面。文中总结了 AIS 和 GIS 电站中开关电弧放电的电磁暂态特征,讨论了其产生机理,在此基础上分析了电磁暂态干扰的研究现状,为深入研究开关电弧放电引起的电磁暂态现象理清了思路。

1 开关电弧放电引起的电磁暂态特征

1.1 AIS 开关电弧放电电磁暂态特征

在敞开式空气绝缘变电站(AIS)中由开关电弧引起的电磁暂态特点如下^[2-12]:

- 1) 开关操作过程中,触头间隙会产生几十次至几百次重复燃弧与熄弧的过程,电弧的持续时间约从几 μs 到几 ms ,上升时间为 $50\sim 200\ \mu\text{s}$;
- 2) 暂态过程产生的典型过电压幅值约为相电压幅值的 2 倍,在特殊情况下(含有共振电路),可达到相电压幅值的 6.5 倍;
- 3) 开关操作产生的电磁暂态主频变化范围大,在几百 kHz 到上百 MHz 之间;
- 4) 最大暂态干扰幅值出现在分闸最后时刻和合闸开始时刻,隔离开关切合空载母线时在屏蔽电缆上产生的电磁干扰最为强烈;
- 5) 电压等级越大,开关操作产生最大瞬变电场和磁场的幅值越大,暂态干扰频率越小;
- 6) 与隔离开关相比,断路器操作时产生暂态电场及磁场幅值小,主频率高,暂态持续时间短。

1.2 GIS 开关电弧放电电磁暂态特征

气体绝缘变电站(GIS)因其具有占地少、运行可靠、维护周期长等优点在电力系统中的应用日益广泛,成为高压输电的核心设备^[9]。

GIS 中由开关操作引起的电磁暂态现象主要表现为:GIS 母线套管上的快速暂态过电压(VFTO)、GIS 壳体上的暂态地电位升高(TEV)以及在 GIS 周围空间产生暂态电磁场(TEM)和电磁干扰(EMI),见图 1。

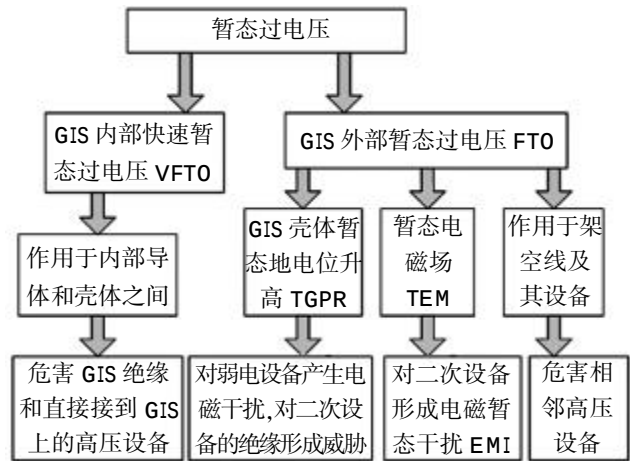


图 1 GIS 中的电磁暂态现象

Fig. 1 The electromagnetic transient phenomena in GIS

其中,快速暂态过电压 VFTO 是 GIS 中最典型、危害最严重的一种电磁暂态现象。隔离开关在操作过程中,由于其切换速度慢,触头间隙会发生多次重燃,产生极陡的行波并在 GIS 管线内迅速发生折射、反射和叠加,产生高频振荡的快速暂态过电压即 VFTO。典型的 VFTO 波形见图 2^[13]。

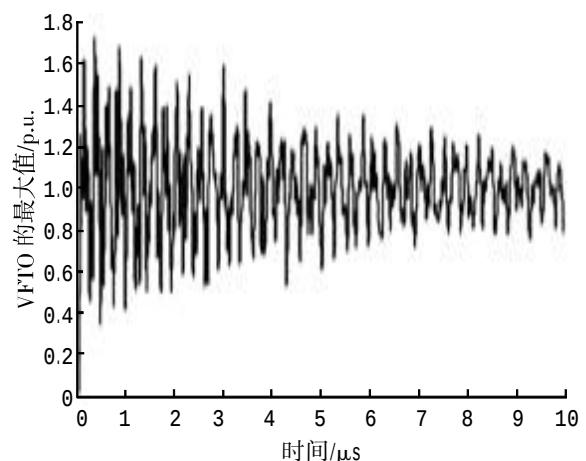


图 2 GIS 内部 VFTO 典型波形

Fig. 2 Typical waveform of VFTO in GIS

已有的研究表明,VFTO 具有如下特性^[2,13-18]:

- 1) 波前很陡,上升时间短($3\sim 20\ \text{ns}$),电压上升率高,可达 $40\ \text{MV/s}$;
- 2) 频率高,主要集中在 $0.5\sim 150\ \text{MHz}$ 范围内,最高可达 $300\ \text{MHz}$;
- 3) 幅值不高,典型值为 $1.5\sim 2.0\ \text{p.u.}$,最高可达 $2.5\ \text{p.u.}$ 。

VFTO 主要作用于 GIS 内部导体与壳体之间, 危及 GIS 内部设备, 尤其是对盆式绝缘子的绝缘危害非常大^[17]。

当 GIS 内的 VFTO 以行波方式沿母线传播时, 高频电流的集肤效应使电流仅沿母线的外表层及外壳的内表层流动, 到达套管后, 一部分沿着架空线传播, 对与之相连的电气设备(如变压器、架空线路)造成直接的绝缘损坏; 另一部分则耦合到壳体与地之间, 使 GIS 壳体上形成暂态地电位升高^[17], 即 TGPR, 幅值范围一般在 0.1~0.25 p.u. 之间^[18]。数十到上百千伏的 TGPR 具有持续时间短、频率高和陡度大的特点, 对二次设备构成过电压威胁。

2 开关电弧电磁暂态干扰产生机理

2.1 开关电弧电磁暂态干扰形成过程分析

由上文分析可知, 开关操作所产生的电磁暂态现象是引发系统电磁干扰问题的主要原因。该暂态现象通常以电快速瞬变脉冲群(图 2 所示)的形式体现^[19]。

电快速瞬变脉冲群是一种由上升时间和持续时间短的单个脉冲组成的周期性脉冲波, 具有幅值和重复频率高的特点, 其典型波形见图 3^[20]。

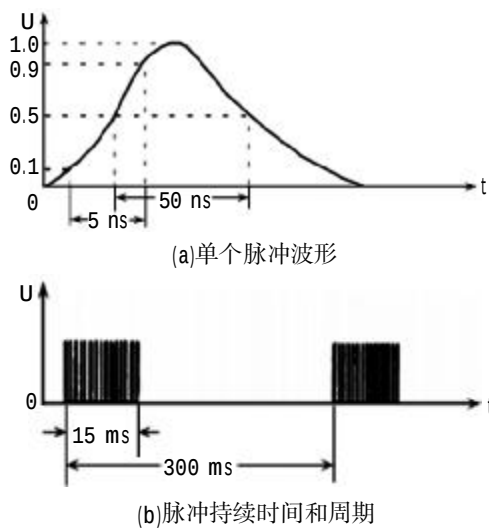


图 3 电快速瞬变脉冲波形

Fig. 3 Waveforms of electrical fast transient/burst(EFT/B)

文中以开关分合感性负载操作为例来分析电快速瞬变脉冲群的产生机理, 其等效电路模型见图 4^[20]。图 4 中, L_0 、 R_0 、 C_0 分别为回路的杂散电感、导线电阻和杂散电容。

当开关闭合时, 间隙逐渐缩小, 当间隙电压达到其介质击穿电压时, 产生第 1 次电弧, 此时电路接通, 负载侧线路电位从初始状态零值经过快速振荡过程后变为当时电压的瞬时值, 线路电流相应发生快速振荡, 形成快速瞬变振荡脉冲。随着时间的推

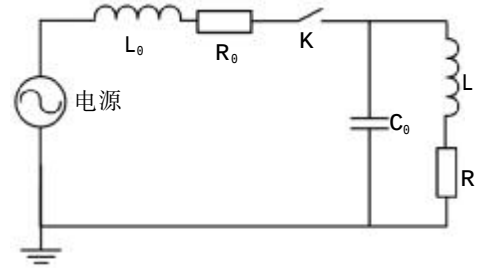


图 4 形成电快速瞬变脉冲群的等效电路模型

Fig. 4 Equivalent circuit model of EFT/B's generation

移, 当电弧电流过零时电弧熄灭, 电容电压保持为电弧熄灭时的瞬时值, 并与负载侧电感和电阻组成衰减振荡回路, 产生振荡过电压。当负载侧与电源侧的电位差再次增大到与击穿电压相等时, 电弧重燃, 产生与第 1 次电弧放电类似的快速瞬变脉冲群, 直至动、静触头完全闭合为止^[19], 此处暂不讨论由触头弹跳引起的电快速瞬变脉冲群。

当开关分断时, 由于电感中的电流不能突变, 此电流流向杂散电容 C_0 , 对其反向充电, 电感负载两端出现暂态过电压, 此过电压与电源电压叠加后加在开关触头两端, 当触头间隙电压高于介质击穿电压时, 触头间产生电弧, 使电路重新导通, C_0 放电, 形成高频电流, 当电流过零时电弧熄灭, 两端又出现过电压。上述过程重复发生, 直至电容上的电压不能使开关的动、静触头间隙击穿为止^[20]。

由此可见, 开关在分合感性负载时会形成一系列快速瞬变电压和电流脉冲, 而开关电弧的产生、熄灭和重燃引发的暂态过程是形成这种电快速瞬变脉冲群的根本原因^[19]。

2.2 电磁暂态干扰的耦合方式分析

电磁暂态干扰的耦合方式分为具有电气连接特性的传导性耦合和通过空间传播的辐射性耦合^[21]。

2.2.1 传导性耦合

传导性耦合是指干扰源的电磁能量以电压或电流的形式耦合至二次系统。传导性耦合有 3 种方式: 感性、容性和阻性, 其耦合原理分别见图 5(a)、(b)、(c)^[21-22]。图 5 中: U_1 为干扰源电压; I_1 为干扰源电流; M 、 C_{12} 、 Z_{12} 分别为两电路间的互感、杂散电容和公共阻抗; U_2 为电路 2 的耦合电压。

1) 感性耦合(磁耦合)。感性耦合由磁场作用引起, 主要取决于干扰源的电流。电感耦合电压 U_2 串联在被干扰回路中, U_2 可由式(1)确定:

$$U_2 = M di_1/dt. \quad (1)$$

开关电弧引起的高频电流会产生交变磁通并通过互感 M 与二次回路交链, 在二次回路中产生电磁感应电势。

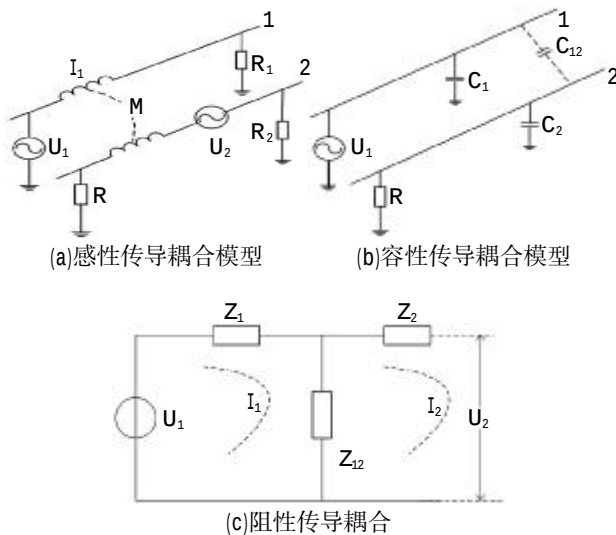


图 5 传导性耦合模型

Fig. 5 Conductive coupling models of EM

2)容性耦合(电耦合)。容性耦合由静电感应作用引起,主要取决于干扰源的电压。电容耦合电流 I 并联在导体与地之间, I 可由式(2)确定:

$$I = C_{12} du_1 / dt. \quad (2)$$

在变电站中,电压互感器 PT 和电流互感器 CT 一、二绕组之间的电容,电磁式电压互感器 CVT 和电容式电压互感器 CCVT 的中间变压器两绕组之间的电容以及高压母线与二次回路之间的寄生电容等相当于模型中的杂散电容 C_{12} ,当开关操作时,高压导线上的暂态电压就会通过这些杂散电容直接耦合到二次系统中,形成干扰。

3)阻性耦合(电导耦合)。当多个电路共用同一接地线或接地联接体时,干扰源直接通过传导作用加在二次设备上产生阻性耦合。阻性耦合电压 U_2 可由式(3)确定:

$$U_2 = U_1 Z_{12} / (Z_1 + Z_{12}). \quad (3)$$

开关电弧引起的高频电流经接在母线上的一次设备的接地引下线流入地中时,在引下线的电感和接地电阻上产生高频压降,使接地点乃至整个地网的电位升高,二次回路(如二次电缆、互感器二次绕组的中性点)与接地网的连接点的电位也会随之升高,形成共模干扰电压,接地电阻越大,阻性耦合的干扰问题就越严重^[23]。

2.2.2 辐射性耦合

辐射性耦合是指干扰源的电磁能量以电磁场的形式向周围空间散布。一方面,由开关电弧引起的电磁暂态在传播过程中通过高压母线及 GIS 壳体向外辐射电磁场;另一方面,由于开关电弧本身是一种热等离子体,是一种导电的连续电介质,在其运动过程中,带电粒子也会产生暂态电磁场,对周围二次设备

形成暂态干扰^[24]。对于电力系统中使用较多的电缆,未屏蔽时,高频辐射电磁场可直接耦合到电缆内部导线并在它的负载处产生暂态电流和电压;对于屏蔽的电缆,辐射场先作用于二次屏蔽电缆的屏蔽层,产生感应电流,再通过电缆和屏蔽层之间的转移阻抗在二次电缆的芯线上感应出干扰电压^[4]。

由上述分析可知,电磁暂态干扰的耦合方式不同,其干扰表现形式也不同。传导干扰主要表现为耦合到二次回路中的电压和电流;辐射干扰主要以空间辐射电场和磁场的形式存在,当该暂态电场、磁场被二次回路接收时,同样也会产生干扰电压和电流。

3 电磁暂态干扰研究现状

目前,国内外对开关操作电磁暂态干扰的研究主要有数学模型研究、现场测量研究以及测量与数学建模相结合等方法。其中以现场测量为主,数学模型的研究相对偏少^[25],并主要集中于传导干扰模型的研究。

3.1 电磁暂态干扰的数学模型研究

电磁暂态干扰的数学模型是指在对一次系统元件进行等效的基础上,建立系统的电路模型,运用多导体传输线理论和天线理论,获得描述系统的积分方程和微分方程,求解一次系统的瞬态电压和瞬态电流,进而得到空间的瞬态电场和瞬态磁场分布。根据干扰耦合的方式,电磁暂态干扰的数学模型可分为传导干扰数学模型和辐射干扰数学模型。

3.1.1 传导干扰的模型研究

传导干扰的数学模型主要用于计算变电站二次设备入口处由传导耦合引起的干扰电压和干扰电流^[25-26]。传导干扰模型的建立步骤主要有:①干扰源的确定及其特征分析,即分析干扰源电流、电压信号的动态变化规律;②耦合路径的电路特性分析,即确定是感性、容性还是阻性传导干扰。其中第②点是传导干扰建模的关键与难点。感性传导干扰侧重于分析电流传导信号,根据带绕组电气设备的结构特征,将其等效为相应的感性元件,建立带绕组电气设备的电路模型。如文[27]建立了一种变压器 T 形等效电路,将绕组分布式参数等效为以电感元件表示的集总参数来描述变压器的相间耦合效应。暂态电流、电压在绕组中的波过程是研究此类干扰模型的热点和核心问题;容性干扰模型则侧重于分析电压传导信号。与感性传导干扰模型一样,分析容性电气设备的电路特性,并将其等效为相应的电容元件是此类干扰模型建模的关键,如文[28]重点分析了电流互感器和电容式电压互感器的耦合路径,将其等效为

电容,建立起干扰路径的等值电路图。在工程实际中,往往是多种耦合路径并存,因此如何分析多耦合路径的电路特性,将其简化为基本耦合路径(见图5)的叠加是建立传导干扰数学模型亟需解决的问题。

实际上,由于高电压等级系统过电压和过电流幅值及暂态频率高,对测量设备提出很高要求或者系统的某些等效参数测量存在技术难题,使得现场测量存在难度,导致建模时需要进行很多简化和假设,计算结果与电磁暂态干扰测量值不能很好吻合。文[29-30]利用多导体传输线模型计算了开关操作时母线上的电流、电压波形,但是该模型的研究对象是相互平行的导体结构,不适合设备间连线等复杂导体结构,且模型参数是由估算得到的,计算精度方面存在误差。在现场测量的基础上建立的数学模型更能反应实际情况和问题,因此应注重现场测量技术的发展。目前,传导干扰数学模型对现场测量数据的使用体现在两方面:①模型参数提取;②利用现场测量数据修正数学模型,使模型更准确。以开关电弧黑盒模型(详见3.1.3节)为例,文[31-33]针对不同的电流区域提出不同的电弧黑盒模型,并详细介绍了从实测电弧电压、电流波形得到电弧时间常数、耗散功率 P_0 及新增参数的非线性最小二乘法和实数码遗传算法等数值拟合方法,最后将计算结果与实测波形进行对比分析,以获得模型的适用范围,并对其进行改进。

3.1.2 辐射干扰的模型研究

与传导干扰建模过程一样,辐射干扰建模步骤也分为两部分:①干扰源的确定和特性分析;②辐射天线的等效和求解。目前,在开关电弧引起的辐射干扰模型中重点考虑的辐射干扰源有:

1)电快速瞬变脉冲群沿高压母线及架空线传播,向外辐射电磁场;

2)电快速瞬变脉冲群沿GIS外壳传播,导致壳体暂态地电位升高,使GIS壳体成为一种辐射干扰源。

辐射天线的等效是指根据辐射干扰源的特性将开关电弧引起的辐射干扰源等效为相应的天线,利用天线理论求解空间辐射电磁场。天线辐射问题是宏观电磁场问题,求解满足边界条件的麦克斯韦方程解析解是一种精确分析天线辐射电磁场的方法。但该方法的求解过程十分复杂,一般难以实现^[24]。因此在实际问题中都是采用近似解法,即将天线辐射问题分为两个独立的问题:①确定线天线上的电流分布或面天线中包围场源的体积表面上的电磁场分布即内场问题;②根据①中确定的电流分布或电磁场分布求得天线向外辐射的空间电场和磁场即外场

问题^[34]。获得流过等效天线的电流是求解空间辐射场的关键。

在已有研究中^[35-36],开关电弧引起的电磁辐射干扰模型主要是针对上述两种辐射干扰源展开,先获得各自的暂态电流分布,再根据其辐射源的形状特点采用相关的天线模型求解,或者直接采用电偶极子、磁偶极子或惠更斯元产生的暂态电磁场进行积分计算。

目前国内外有关开关电磁暂态辐射干扰的研究均未考虑电弧自身的电磁场辐射问题。美国电力研究院(EPRI)的研究报告显示开关电弧产生的暂态电磁场频率一般小于100 MHz,不是主要的电磁干扰源,可以不考虑电弧的电磁辐射干扰问题^[37]。由于国外变电站与国内变电站存在诸多不同,上述结论适用范围有限。一方面,随着中国电力系统电压等级的提高,开关操作产生的电弧暂态能量也越高,电磁干扰的强度在不断增强;另一方面,随着建设中国坚强智能电网的提出,更多抗干扰能力弱的二次设备下放至变电站中,在其恶劣的电磁环境下极易受到电磁干扰。文[38]中最新研究结果显示,气体放电的空间辐射场频率可达GHz。文[39]中对132 kV AIS变电站中开关操作暂态电磁场测量结果显示,SF₆断路器操作时,其电弧电磁辐射频率范围是200~1 000 MHz,并且辐射峰值出现在840 MHz^[39]。因此,为研究开关电弧电磁暂态干扰中出现的新情况,提高特高压电网电磁兼容水平,需要对开关电弧电磁辐射干扰问题进行重新评估,进一步深入其理论模型研究工作。

开关电弧强烈的非线性和随机性导致对电弧电磁辐射研究十分复杂,鲜有相关研究报道。文[40]将直流继电器分断电弧辐射等效为最简单的直导线天线辐射。该模型针对低电压等级直流开关电弧而建立,并不适用于高压交流开关电弧电磁辐射模型的建立。文[41]将开关电弧等效为电偶极子模型,采用双指数解析函数描述电弧电流,计算出近场区和远场区的暂态电磁场强度,该方法未考虑等离子体的非线性效应,因此不能体现电弧电流真实变化规律。

考虑到开关电弧本质上是一种热等离子体,因此可以采用等离子体天线建立开关电弧辐射干扰模型。

等离子体的辐射特性与等离子体参数(密度和碰撞频率)密切相关。文[42-45]采用不同的方法均对圆柱形等离子体通道天线模型进行了辐射场、辐射方向图、输入阻抗和辐射效率的计算。在开关电弧辐射建模过程中可借鉴上述模型。将开关电弧等效为充满均匀介质的圆柱体,首先获得柱形等离子体表

面电流的近似分布,在此基础得到等离子体电磁辐射场强。在实际的电弧通道中,粒子密度不均匀,电弧的半径和长度并非定值,电弧的辐射特性也会受到周围空间电磁场的影响,因此要精确计算辐射电磁场需对上述模型进行修改。

综上所述,根据电磁辐射干扰源的形状及电磁辐射特点,可采用不同的天线描述辐射干扰源的特性,见表 1。

表 1 开关操作引起的辐射干扰源及其相应等效天线

Tab. 1 Radiation sources and its equivalent antenna caused by switchgear operation

辐射干扰源	相应等效天线
母线、架空线	电偶极子、线天线
GIS 壳体(TGPR)	惠更斯元、面天线(口径天线)
开关电弧	电偶极子、等离子体天线模型

3.1.3 电弧模型的研究

电弧放电的物理过程决定了开关操作电磁暂态的特性。因此,研究电弧放电现象,建立开关操作电弧放电模型是研究电磁暂态现象的重要内容。目前,模拟电弧放电的数学模型主要有参数模型、黑盒模型及物理模型,其中以参数模型和黑盒模型使用居多。

1)物理模型。物理模型中应用最广泛的是磁流体(MHD)模型,它是根据流体动力学方程,结合遵守麦克斯韦方程的热力学定律建立起来的一组微分方程^[2],描述了电弧发展的微观过程,但仿真求解极其复杂,且无法直接计算电弧电压和电流,这种模型主要应用于断路器的设计。如文[46]建立了开关电弧的 MHD 模型,重点计算电场和磁场对开关灭弧性能的影响,并未涉及开关电弧产生的电磁暂态干扰。

2)参数模型。参数模型是利用电弧的伏安特性将电弧等效为某一电路元件。如文[47]根据电弧电阻在燃弧期间的变化特性将其等效为一时变电阻,认为燃弧时电弧电阻呈指数下降,其表达式为

$$R_{\text{arc}}(t)=R_s+R_0e^{-t/T} \quad (4)$$

式(4)中: R_s 是静态电弧电阻; $R_0=10^{12} \Omega$; $t=1\sim 10 \text{ ns}$; $T=10 \text{ ns}$ 。此时变电阻模型描述了开关从断开状态到被击穿这一过程的电阻变化情况,反映了电弧电阻变化的快速性,但是并未考虑电弧熄灭过程,因此该模型不能完整的描述电弧从产生、发展到熄灭整个燃弧过程的电阻变化情况。

由于时变电阻模型不能描述电弧的熄弧阶段,故有人提出分段电弧模型^[48],将电弧发展过程分为 3 个阶段:①在预击穿阶段,即 $t < t_1$ 时,用式(4)计算电弧电阻;②在稳定燃弧阶段,即 $t_1 < t < t_2$ 时,电弧处于稳态,令 $R_a(t)=0.5 \Omega$;③在熄弧阶段,即 $t > t_2$ 时,在

不考虑外加恢复电压的情况下,电弧电阻的表达式为

$$R_a(t)=r_0+R_{a0}e^{t/\tau} \quad (5)$$

式(5)中: $r_0=0.5 \Omega$; R_{a0} 为电弧电流过零时的电弧电阻。

分段电弧模型电弧电阻变化曲线见图 6。

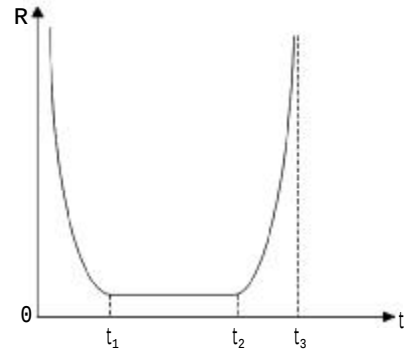


图 6 分段电弧模型电弧电阻变化曲线

Fig. 6 Arc resistance curve of subsection arc model

3)黑盒模型。黑盒电弧模型不考虑电弧内部复杂的物理过程,它利用电弧电导与电弧电流、电压相互关系的微分方程来描述电弧发展过程中的电路特性,能很好地反映电弧与电路的相互关系,通过建立黑盒电弧模型可直接得到开关操作暂态过程的电流、电压动态变化规律,因此黑盒模型电弧模型在电磁暂态研究中得到广泛应用。

常见的黑盒模型有 Mayr 模型、Cassie 模型,其他的黑盒模型几乎都是在这 2 种模型的基础上进行修改后提出的,比如 Mayr-Cassie 联合模型、KEMA 模型、Schwarz/Adovin 模型等。由于黑盒模型的基本参数需从试验数据中提取^[2],故该类模型对试验的依赖性很强。

国外对黑盒电弧模型的研究已开展多年,荷兰 Delf 技术大学以 MATLAB 为平台,开发出 7 种黑盒电弧模型的模型库^[49]。ABB 公司的 Ludvika 高压实验室用 ATP-EMTP 软件实现了 Cassie-Mayr、KEMA 等黑盒电弧模型的模拟仿真^[50],国内在此方面的研究则相对较少。

在高压工程应用领域,由开关操作引起的系统过电压和过电流是重点考察对象,因其暂态特性与电弧放电通道内的微观物理过程密切相关,故所建立的电弧模型不但要考虑电压等级、开关结构、气体介质成分和压强等对暂态电流、电压幅值的影响,还应使其能反应电弧预击穿、重燃、熄灭等微观物理放电过程,即需建立既能体现电弧放电的宏观电路特性,又能描述电弧放电微观物理过程的统一电弧模型。由于电流密度不仅能体现电弧内部电子运动规律,还能反映电弧电流、电压等外部特性,因此可通

过电流密度这一参量将电弧微观运动与宏观特性联系起来,即解决电弧内场问题和外场辐射问题。根据对不同类型电弧适用条件的分析可知,建立基于黑盒模型和 MHD 模型的混合电弧模型不但完全满足上述要求,还能有效降低黑盒模型对试验的依赖性。因此建立混合电弧模型是进一步深入研究电磁暂态现象的重点。

上述电弧模型均只反映了一次燃弧过程,根据电弧放电的物理过程,在 VFTO 等计算场合有必要考虑电弧多次重燃的累积效应和统计规律。多次电弧重燃模型建模的难点在于重燃模型判据的确立十分复杂,影响因素众多,有触头分断速度、气体介质成分及压强及触头间隙的暂态恢复电压等。目前主要采用弧隙介质强度恢复理论,即从电击穿角度建立电弧重燃模型,尚未发现有文献采用弧隙能量平衡理论作为模型中的电弧重燃判据。由于电弧既是电导体又是热导体,根据击穿理论,热击穿也是电弧放电产生的机理之一。特高压条件下,断路器操作时电流大、电弧热量高,符合热击穿发生条件,热击穿引起的电弧重燃应予以考虑;隔离开关操作时电流小,电弧能量也较小,是否应将热击穿效应同样考虑在内有待验证。

总体说来,围绕着开关操作电磁暂态,国内外学者主要是从单次电弧放电模型、多次电弧重燃模型两方面开展电弧放电模型的研究工作。单次电弧放电模型主要考虑如何在电弧模型中体现电压等级、开关结构、气体介质组成和压强等对燃弧过程、电弧电压、电流等参数的影响,提高单次电弧放电仿真的准确性和精确性。多次电弧重燃模型是在单次电弧放电模型基础上发展起来的,建立多次电弧重燃模型的关键是弄清电弧重燃机理,在此基础上提出电弧重燃判据,使建立的电弧模型能反映电弧多次重燃的累积效应。在特高压条件下,由热击穿引起的电弧重燃应引起高度重视。该类模型多应用于 VFTO 的计算中,如何提高模型的实用性使之能服务于工程应用需要是多次电弧重燃模型发展的目标。

3.2 电磁暂态干扰的现场测量

由于变电站内接线复杂,电磁暂态干扰的模型研究还不够完善^[7],需用现场测试技术对开关操作产生的电磁暂态干扰进行现场测量。作为研究电磁暂态干扰的重要手段,现场测量技术能够直接获取电磁暂态干扰的实际情况和特性,同时还能变电站电磁暂态干扰模型提供验证依据。

电磁暂态干扰的测量可分为传导干扰和辐射干扰的测量,其各自的测量量和频率范围见表 2。图 7

给出了由 CISPR16-1-1 建议的电磁暂态干扰测试设备示意图^[51]。

表 2 传导干扰和辐射干扰的现场测量

Tab. 2 Field measurements of conducted interference and radiated interference

干扰类型	测试量	频率范围
传导干扰	二次设备的干扰电压和干扰电流	9 kHz~30 MHz
辐射干扰	空间辐射电场、磁场及干扰功率	30 MHz~数 GHz

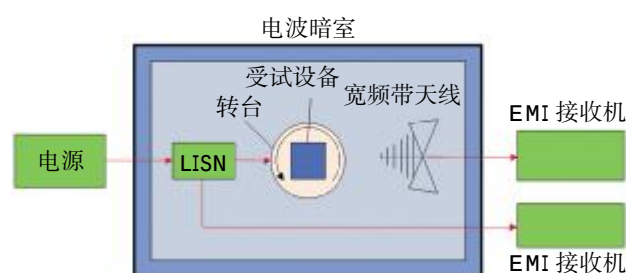


图 7 电磁暂态干扰测试设备示意图

Fig. 7 Testing equipments scheme of the transient electromagnetic interference

3.2.1 传导干扰的测量

传导干扰的测量方法主要有工电源网络法 (LISN)、电流探头法及吸收钳测量法等,其测量主要在屏蔽室中进行^[52]。工电源网络法主要用于测量沿电源线传导的干扰电压,图 7 为测试设备的示意图,它可将来自电网和被测设备上的其他干扰信号隔离开,以保证测量的准确性,同时还可向被测设备提供近似恒定的高频阻抗,使测量的干扰电压有统一的基准^[52]。工电源网络法的测量频率范围为 10 kHz~30 MHz,这是由于在更高频段无法保证线路阻抗为固定值。电流探头法主要用于测量电源线上的干扰电流,其测量频率为 25 Hz~10 kHz,它可以在不与干扰源导线直接接触,即不改变导线系统、电子线路正常布置和处于工作状态的情况下测量出传导干扰电流。实验证明,当干扰电流频率高于 30 MHz 时,干扰信号将通过电源线和其他连接导线向外界辐射,使用吸收钳可以评价其干扰能力,其测量频段为 30 MHz~1 GHz。使用吸收钳测量电磁干扰的测试电路见图 8^[53]。

3.2.2 辐射干扰的测量

从辐射干扰源到周围空间的电磁波可以分为近区感应场和远区辐射场。远区辐射场通常采用宽频带天线进行测量,便于自动化扫频测量^[54]。在远场区,电磁波为平面波,电场分量和磁场分量可通过波阻抗 Z_0 (见式(6))进行换算,因此在现场测量中,可通

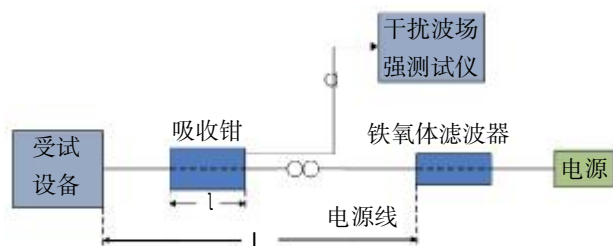


图 8 吸收钳法测试电路

Fig. 8 A test circuit of absorbing clamp method

过测量的电场信号计算磁场信号或由测量的磁场信号计算电场信号。

$$Z_0 = \frac{E}{H} = 120\pi \Omega. \quad (6)$$

对应不同频率的信号，需采用不同的天线进行测量，通常以 30 MHz 进行划分。在 30 MHz 以下主要有杆状天线和环形(有源)天线，分别测量干扰场的电场和磁场分量，在 30 MHz 以上，则主要使用电场天线。在不同的频率范围内，采用的天线见表 3^[54]。

表 3 在不同频率范围内所适用的天线类型

Tab. 3 The applicative antenna types in different frequency ranges

测量频率	天线类型
9 kHz~30 MHz	杆状天线(电场)、环形有源天线(磁场)
30 MHz~1 GHz	偶极子天线、双锥天线、对数周期天线、双锥对数复合天线、圆锥天线
1 GHz 以上	喇叭天线

其中，复合天线是近几年才发展起来的将双锥天线和对数周期天线合二为一的天线，其测量频宽为 30 MHz~2 GHz，在 30~200 MHz 内表现为双锥天线的特性，在 200 MHz~2 GHz 内则表现为对数周期天线的特性^[55]，大大扩展了可测量的频率范围。测量天线的性能指标主要由天线系数、天线增益、天线方向图、天线驻波比等指标来体现，其中天线系数是天线最主要的参数，文[55]介绍了在 EMC 研究中常用于电磁辐射干扰测量的双锥天线、对数周期天线、复合天线以及双脊喇叭天线的天线系数的测量方法。

采用宽频带天线测量辐射电磁场时对其测量环境的要求较高。CISPR 指出，辐射干扰的测量系统需放置在开阔试验场或电波暗室中进行，其中在电波暗室中的测量系统见图 7。理论上，辐射干扰的测量也可在横电波传输(GTEM)小室进行，但是其测试结果需建立数学模型及结合计算软件进行数据处理后才能和开阔场或电波暗室测试结果进行对比，另外被试设备在 GTEM 小室中摆放的位置不同，其测试结果也不同，因此测试人员必须给以充分注意^[56]。

就空间暂态电场和磁场的测量而言，在干扰的

主要频段里，当测量点与干扰源的距离 L 与干扰波长 λ 不满足 $L > \lambda/(2\pi)$ 的关系时，即测量点位于近场内，电场和磁场由于受驻波的影响，不满足互相垂直的关系，此时就需要分别测量电场和磁场^[7]。对近区电磁场进行测量的关键是开发能满足测量要求的瞬态电场和瞬态磁场传感器系统。美国在 20 世纪 60 年代就开始了暂态电场和磁场传感器系统的开发，并研制出用于瞬态电场测量的空心球形偶极子探头和用于暂态测量的多间隙环磁场探头，但是该测量系统主要用于测量核电磁脉冲(NEMP)的电场和磁场，整套测量系统结构复杂，价格昂贵，并没有得到广泛运用。此外，法国 Thomson-csf 公司也研制了用于测量 NEMP 的光纤瞬态电场和磁场传感器。德国斯图加特大学在 20 世纪 80 年代中期开发出一套二维电场传感器，经过改进，于 20 世纪 90 年代中期又研制了三维电场传感器^[7]，文[57]指出该研究组已开发出一套瞬态磁场传感器。国内华北电力大学于 20 世纪 90 年代初研制了一套光纤瞬态电场传感器，随后在实验室实现了对二维瞬态电场的测量，文[7]指出该研究组已开发出一套光纤瞬态电场和磁场传感系统，并利用该系统对三座 500 kV 的变电站进行了测量。

由于暂态电磁场现场测量的复杂性，电场和磁场传感器的开发成本昂贵。目前，国内尚无用于特高压变电站瞬态电场和磁场测量的国产传感系统，并且光纤瞬态磁场传感器的研究尚处于起步阶段。同国外相比，国内传感器开发总体投入不够，传感器类型单一，通用性差^[2]。

除上述传导干扰测量装置、天线和传感器等设备外，EMI 接收机是电磁干扰测量系统中又一重要的基本测量仪器，它以点频法为基础，应用本振调谐的原理测试相应频点的电平值。现代接收机主要采用扫频调节超外差式接收方式，并逐渐向低噪声、宽频带、高动态响应发展。随着扫描频率技术的发展，频谱分析仪开始取代点对点的测量方法，成为当前频谱分析的主要工具，提高了 EMI 的测量效率和精度，其测量频率已达到 18 GHz^[54]。

4 结语

文中主要从数学模型研究和现场测量技术两方面对开关电弧引起的电磁暂态干扰研究现状进行了梳理和总结，并得到如下结论：

1)国内外对开关电弧放电引起的电磁暂态干扰的研究主要以现场测量为主，数学模型的研究相对偏少，且主要集中于传导干扰模型的研究。

2)建立准确有效的单次电弧放电模型和多次电

弧重燃模型对电磁暂态干扰仿真研究至关重要。其中, 单次电弧放电模型的发展趋势是建立基于物理模型和黑盒模型的混合电弧模型; 多次电弧重燃模型的研究重点在于电弧重燃判据的建立, 在特高压条件下, 由热击穿引起的电弧重燃应引起高度重视。

3) 在开关电磁暂态辐射干扰研究中, 应考虑电弧自身的辐射电磁场问题, 可采用等离子体天线模型进行相关的研究和计算。

4) 在现场测量技术方面, 各种电磁暂态干扰测量仪器正向低噪声、宽频带、高动态响应、高精度、高效率方向发展, 但是在基于传感器的近场测量系统方面, 国内发展稍显落后, 国家应在此方面加大投入, 以开发用于特高压变电站瞬态电场和磁场测量的传感系统。

数学模型能揭示电磁暂态干扰产生机理、预测电磁环境, 现场测量技术能直接获取电磁暂态干扰的实际情况及特性, 是建立数学模型的基础, 并为数学模型研究提供验证依据。在今后的研究工作中, 应注重数学模型和现场测量的结合和统一, 以加快开关电弧电磁暂态干扰的研究步伐。

参考文献:

- [1] 董振亚. 电力系统过电压保护[M]. 第二版. 北京: 中国电力出版社, 1997.
DONG Zhenya. Overvoltage protection in power system [M]. Second Edition. Beijing: China Electric Power Press, 1997.
- [2] 吴细秀, 王晓琪, 吴士普, 等. 开关操作电磁暂态研究概述[C]//中国电机工程学会高电压专业委员会 2009 年学术年会.[S.l.]:IEEE, 2009:732-740.
WU Xixiu, WANG Xiaoqi, WU Shipu, et al. Review on the research of electromagnetic transient caused by switch operation [C]//The Annual Conference of China Electrical Engineering Society High Voltage Professional Committee in 2009. [S.l.]:IEEE, 2009:732-740.
- [3] 巩学海, 何金良, 李雨. 变电所的瞬态电磁环境分析[J]. 高压电器, 2009, 45(5):39-43.
GONG Xuehai, HE Jinliang, LI Yu. Analysis on transient electromagnetic environment of substations [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5):39-43.
- [4] 梁小冰. 变电站开关操作造成的暂态电磁干扰[J]. 广西电力技术, 1999, 22(1):7-10.
LIANG Xiaobing. The transient electromagnetic interference caused by switch operations at substation[J]. Guangxi Electric Power Technology, 1999, 22(1):7-10.
- [5] 郝淑荣, 唐燕. 浅谈变电站电磁干扰及抗干扰措施[J]. 电气开关, 1999(2):35-37.
HAO Shurong, TANG Yan. The electromagnetic interference and anti-interference measures in substation [J]. Electric Switchgear, 1999(2):35-37.
- [6] 齐磊, 崔翔. 变电站开关操作对屏蔽电缆电磁干扰的预测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9):46-51.
QI Lei, CUI Xiang. Prediction of electromagnetic interference on the shielded cable due to the switching operation in substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9):46-51.
- [7] 张卫东. 变电站开关操作瞬态电磁干扰问题的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2003.
ZHANG Weidong. Research on switching transient electromagnetic interference in substations[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2003.
- [8] 卢斌先. 变电站开关瞬态场干扰耦合机理研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2007.
LU Binxian. Research on coupling mechanism of switching field transient in substation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2007.
- [9] 张桂红, 郭洁, 徐燕飞. GIS 中的电磁暂态现象[J]. 高压电器, 2006, 42(5):349-351.
ZHANG Guihong, GUO Jie, XU Yanfei. Transient electromagnetic phenomena in GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(5):349-351.
- [10] WIGGINS C M, WRIGHT S E. Switching transient field in substations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(3):591-599.
- [11] WIGGINS C M, THOMAS D E, NICKEL F S, et al. Transient electromagnetic interference in substations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(4):1869-1881.
- [12] 李清泉, 李彦明, 牛亚民. 变电站开关操作引起的瞬变电磁场及其防护[J]. 高电压技术, 2001, 27(4):35-37.
LI Qingquan, LI Yanmin, NIU Yamin. The transient electromagnetic fields caused by the operation of disconnector [J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4):35-37.
- [13] 孟涛. 分段电弧模型下快速暂态过电压特性仿真及其影响因素的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010.
MENG Tao. Characteristics of VFTO and study on its influencing factors under the condition of novel arc model [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2010.
- [14] 陈水明, 许菁, 何金良, 等. 特快速暂态过电压及其对主变的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(4):573-576.
CHEN Shuiming, XU Jing, HE Jinliang, et al. Very fast transient over-voltages and their effects on power transformers [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2005, 45(4):573-576.
- [15] 田驰. 超、特高压 GIS 中快速暂态过电压(VFTO)及其影响的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
TIAN Chi. Study on very fast transient over-voltage and its impacts in EHV and UHV GIS [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009.

- [16] 何善庆. GIS 中的快速暂态现象 [J]. 高压电器, 1995, 31(2):41-46.
HE Shanqing. The fast transient phenomena in GIS [J]. High Voltage Apparatus, 1995, 31(2):41-46.
- [17] 童彤. 750 kV 特高压 GIS 隔离开关特快速暂态过电压 (VFTO) 的危害及预防 [J]. 新疆电力, 2006(4):17-22.
TONG Tong. Very fast transient over-voltage (VFTO)' hazards and its prevention caused by disconnecter in 750 kV UHV GIS [J]. Xinjiang Electric Power, 2006(4):17-22.
- [18] 陈建. GIS 中陡波前过电压特性及其影响因素的研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2007.
CHEN Jian. Characteristic of very fast transient over voltages in GIS and analysis of influencing factors [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2007.
- [19] 柯春俊, 张国钢, 汪雨辰. 开关操作暂态电磁干扰及其与电弧物理过程的相关性研究 [C]//中国电工技术学会电器智能化系统及应用专业委员会 2009 年学术交流会. [S.l.]:IEEE, 2009:154-158.
KE Chunjun, ZHANG Guogang, WANG Yuchen. Study on EMI of switching operation and its correlation with electric arc [C]//The academic exchanges of China Electro technical Society Electrical Intelligent Systems and Application Professional Committee in 2009. [S.l.]:IEEE, 2009:154-158.
- [20] 王玉峰, 邹积沿, 廖敏夫. 一次回路形成电快速瞬变脉冲群骚扰的研究及防护 [J]. 电力自动化设备, 2007(9):22-26.
WANG Yufeng, ZOU Jiyan, LIAO Minfu. Study of EFT/B generated in primary circuit and its countermeasures [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007(9):22-26.
- [21] 路宏敏, 余志勇, 李万玉. 工程电磁兼容 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010.
LU Hongmin, YU Zhiyong, LI Wanyu. Engineering electromagnetic compatibility [M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press, 2010.
- [22] 李景禄. 电力系统电磁兼容技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
LI Jinglu. The technique of electromagnetic compatibility in power system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [23] 屠幼萍, 何金良, 曾嵘. 发变电站电磁干扰对二次系统的传播途径 [J]. 电力建设, 2000(10):16-18.
TU Youping, HE Jinliang, ZENG Rong. Propagating channels of electromagnetic disturbance sources of power plants and substations on the secondary system [J]. Electric Power Construction, 2000(10):16-18.
- [24] 赵青, 刘述章, 童洪辉. 等离子体技术及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
ZHAO Qing, LIU Shuzhang, TONG Honghui. Plasma technology and application [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2009.
- [25] 张重远, 梁贵书, 崔翔. 等. GIS 隔离开关操作对二次设备的影响 [J]. 高电压技术, 2002, 28(2):5-7.
ZHANG Zhongyuan, LIANG Guishu, CUI Xiang, et al. The effects of operation the disconnecter switch on the secondary circuits in gas insulated substations [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(2):5-7.
- [26] UGLESIĆ I, HUTTER S, MILARDIĆ V. Electromagnetic disturbances of the secondary circuits in GIS due to disconnecter switching [C]//International Conference on Power Systems Transients. [S.l.]:IEEE, 2003:1-6.
- [27] 王晓彤, 牛晓民, 施围. 电磁暂态计算中新的变压器模型 [J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(4):9-12.
WANG Xiaotong, NIU Xiaomin, SHI Wei. A transformer model for electromagnetic transients [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(4):9-12.
- [28] 周雪霞, 张良栋, 黄承清. 暂态电磁干扰的电路模型与计算 [J]. 河南化工, 2003(8):33-35.
ZHOU Xuexia, ZHANG Liangdong, HUANG Chenqing. Transient electromagnetic interference circuit model and the calculation [J]. Henan Chemical Industry, 2003(8):33-35.
- [29] LU Tiebing, CUI Xiang, YIN Haoliu, et al. Time-domain analysis of transient electromagnetic field generated by aerial busbars above lossy soil [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2):773-776.
- [30] 卢铁兵, 崔翔. 变电站空载母线波过程的数值分析 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6):39-42.
LU Tiebing, CUI Xiang. Numerical analysis of wave process for buses without load in substations using FDTD [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6):39-42.
- [31] EXCLUSALRO, MEDINABR. Numerical arc model parameter extraction for SF₆ circuit breaker simulations [C]//International Conference on Power Systems Transients in New Orleans. [S.l.]:IPST, 2003:1-5.
- [32] GLINKOWSKI M T, TAKNASHI K. Parameter optimization of Cassie-Mayr equation for SF₆ arc modeling [J]. Proceedings of North America Power Symposium, 1996(11):1-7.
- [33] RASHTCHI V, LOTFI A, MOUSAVI A. Identification of KEMA arc model parameters in high voltage circuit breaker by using of genetic algorithm [C]//The Second International Conference on Power and Energy. [S.l.]:IEEE, 2008:1515-1517.
- [34] 刘学观, 郭辉萍. 微波技术与天线 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.

- LIU Xueguan, GUO Huiping. Foundation of microwave and antenna[M]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University Press, 2001.
- [35] 张重远, 梁贵书, 崔翔, 等. 气体绝缘变电站内辐射干扰的建模与计算[J]. 华北电力大学学报, 2002, 29(4): 22-25.
- ZHANG Zhongyuan, LIANG Guishu, CUI Xiang, et al. Modeling and calculation of radiant interference in gas insulated substation[J]. Journal of North China Electric Power University, 2002, 29(4): 22-25.
- [36] PEREIRA E T, THOMAS D W P, HOWE A F, et al. Computation of electromagnetic switching transients in a substation[C]//International Conference on Power and Energy. London: IEEE, 1991: 331-334.
- [37] 邹军, 袁建生, 何金良, 等. 开关操作暂态对二次电缆的电磁干扰途径分析[C]//中国电机工程学会电磁干扰专业委员会第八届学术会议. 武汉: IEEE, 2002: 65-68.
- ZOU Jun, YUAN Jiansheng, HE Jinliang, et al. Coupling analysis of transient electromagnetic interference to secondary cables caused by the switch operation in substation [C]//Eighth Conference of China Electrical Engineering Society Electromagnetic Interference Professional Committee. Wuhan: IEEE, 2002: 65-68.
- [38] KIM C J. Electromagnetic radiation behavior of low-voltage arcing fault[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2009, 24(1): 416-423.
- [39] MOORE P J, CHONG S H. Analysis of the radiation electromagnetic field generated by a 132 kV, SF₆ circuit breaker[C]//The 2002 Annual report on Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]: IEEE, 2002: 134-137.
- [40] 吴细秀, 肖畅, 袁佑新. 直流继电器电弧电磁辐射模型[J]. 低压电器, 2010(14): 10-14.
- WU Xixiu, XIAO Yang, YUAN Youxin. A preliminary study on mathematic model of electromagnetic radiation caused by DC relay arc[J]. Low Voltage Apparatus, 2010 (14): 10-14.
- [41] ARI N, BLUMER W. Transient electromagnetic fields due to switching operations in electric power systems[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1987, 29(3): 233-237.
- [42] 尹昌刚. 等离子体天线的理论与应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- YIN Changgang. Research on the theory and applications of plasma antenna[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [43] 赵卫国, 徐跃民, 陈诚. 柱形等离子体辐射场和阻抗的数值计算[J]. 物理学报, 2006, 55(7): 3459-3463.
- ZHAO Weiguo, XU Yuejin, CHEN Cheng. Numerical calculation of radiation pattern and impedance of column plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(7): 3459-3463.
- [44] 夏新仁, 尹成友. 等离子体通道天线的辐射场计算[J]. 核聚变与等离子体物理, 2010, 30(1): 30-36.
- XIA Xinren, YIN Chengyou. Numerical calculation of radiation pattern of plasma channel antenna[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2010, 30(1): 30-36.
- [45] 钱志华. 等离子体天线的辐射与散射特性分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- QIAN Zhihua. Analysis of radiation and scattering characteristics of plasma antenna[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [46] 李兴文, 陈德桂. 空气开关电弧的磁流体动力学建模及特性仿真[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 31-37.
- LI Xinwen, CHEN Degui. Magnetohydrodynamics modeling and characteristics simulation of air switching arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 31-37.
- [47] MARTINEZ J A, CHOWDHURI P. Modeling guidelines for very fast transients in GIS [J]. Power Engineering Review, 1996, 17(13): 71-95.
- [48] 孟涛, 林莘, 徐建源. 分段电弧模型下 VFTO 的计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 69-73.
- MENG Tao, LIN Xin, XU Jianyuan. Calculation of VFTO on the condition of segmental arcing model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 69-73.
- [49] SCHAVEMAKER P H, DERSLUIS L. The arc model blockset [C]//Proceeding of Second LASTED International Conference Power and Energy Systems. Crete, Greece: IEEE, 2002: 644-648.
- [50] GUSTAVSSON N. Evaluation and simulation of black-box arc models for high voltage circuit-breakers[EB/OL]. <http://www.ep.liu.se/exjobb/isy/2004/3492>, 2012-08-16.
- [51] RUSSE P. EMC measurements in the time-domain[EB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6050792>, 2012-08-16.
- [52] 陈淑凤, 马蔚宇, 马晓庆. 电磁兼容试验技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.
- CHEN Shufeng, MA Weiyu, MA Xiaoqing. EMC test technology[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2001.
- [53] 郭亚红. 辐射电磁干扰测试方法[J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(11): 252-253.
- GUO Yahong. Testing methods of radiant electromagnetic disturbance [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2009, 28(11): 252-253.

- [54] 吴 钊. EMC 测量天线特性简介 [J]. 安全与电磁兼容, 2007(3):1.
WU Fan. Brief introduction of EMC measuring antenna[J]. Safety & EMC, 2007(3):1.
- [55] FISCHER B E, LAHAIE I J. Measurement and computational analysis of the radiation patterns of EMC antennas used in radiated-emissions measurements[J]. Antennas and Propagation Magazine, 2011, 53(4):103-112.
- [56] 何 宏. 电磁兼容设计与测试技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
HE Hong. EMC design and testing technology[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2008.
- [57] KRAUSS T, KOHLER W, FESER K. Improved high bandwidth potential-free magnetic field probe[C]//Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering. [S.l.]:IEEE, 1999:83-86.
- 闫 格(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高压开关设备、电力系统电磁暂态与电磁兼容。
- 吴细秀(1976—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电器电弧理论、开关电器暂态过程及其电磁兼容。
- 田 芸(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为开关电器、过电压与绝缘技术。

(上接第 118 页)

- [13] 陈振生, 陈俊丽. 智能化中压开关柜的监测和传感技术(二)[J]. 江苏电器, 2003(2):7-12.
CHEN Zhensheng, CHEN Junli. The monitoring & transducing and sensing technology of intelligent medium-voltage switchgear cabinet(II)[J]. Jiangsu Electrical Apparatus, 2003(2):7-12.
- [14] 李永坚, 周有庆. 智能型开关柜及其关键技术[J]. 湖南工程学院学报, 2003, 13(3):22-24.
LI Yongjian, ZHOU Youqing. Intelligent switchgear cabinet and its key technology[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering, 2003, 13(3):22-24.
- [15] 朱敏华, 陈振生. 中压开关柜的智能化技术[J]. 华通技术, 2005(4):20-25.
ZHU Minhua, CHEN Zhensheng. Intelligent orientation technology towards medium voltage switchgear [J]. Hua Tong Technology, 2005(4):20-25.
- 吕 鸿(1983—), 男, 工程师, 研究生, 主要研究领域为高压开关试验及绝缘诊断技术。