

宽频电压感知方法及其数据应用

杨 庆, 董富宁, 罗曼丹, 孙 健, 崔浩楠, 揭青松
(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 宽频电压的传感与量测能够为电力系统电能计量、智能控制以及继电保护提供重要信息, 在电网过电压在线监测、故障预警、故障定位与防护以及设备智能化等领域具有重要地位。面向未来规模不断扩大的智能电网, 电压测量从传统的电磁式电压互感器向电子式电压互感器和光学电压传感器转型, 测量装置不断向低成本、低功耗、小型化及易安装的方向发展。为此基于目前对宽频电压感知方法的研究现状, 首先从电压感知耦合机制方面, 分别介绍了基于分压器和光学电压传感器的接触式测量方法, 以及基于杂散电容分压原理、GIS 内置电极和电容设备泄漏电流测量的非接触测量方法。其次, 重点阐述了宽频电压感知数据在电磁暂态防护中的应用, 包括典型故障波形的统计与研究、电力设备暂态故障分析以及暂态故障防护; 同时, 总结了宽频电压感知数据在设备智能化中的应用, 主要包括其在线路故障定位和设备绝缘诊断的应用。在此基础上, 指出宽频电压传感在传感方式、频率和幅值特性、温湿度补偿、装置小型化以及与设备共形融合等方面面临的挑战。最后, 针对在电磁暂态防护和设备智能化中的应用情况, 对宽频电压感知技术发展前景做出进一步的展望。

关键词: 智能电网; 宽频电压传感; 数据应用; 电磁暂态防护; 设备智能化

Wideband Voltage Sensing Methods and Sensing Data Applications

YANG Qing, DONG Funing, LUO Mandan, SUN Jian, CUI Haonan, JIE Qingsong
(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Wideband voltage sensing and measurement can provide important information for energy metering, intelligent control and relay protection of power system, which has an essential position in the fields of overvoltage online monitoring, fault warning, fault location and protection, and real-time monitoring of equipment status in grid. In the face of the ever-expanding smart grid in the future, voltage measurement has been transformed from traditional electromagnetic voltage transformers to electronic voltage transformers and optical voltage sensors, and measurement devices continue to be low-cost, low-power, miniaturized, and easy to install. Based on the current research status of broadband voltage sensing methods, this paper first introduces the contact measurement methods based on voltage dividers and optical voltage sensors and the non-contact measurement methods based on the stray capacitance-voltage division principle, GIS built-in electrode, and capacitance leakage current. Secondly, the applications of the broadband voltage sensing data in system protection, including statistics and research on typical fault waveforms, transient fault analysis of power equipment and protection means of power grid are emphatically expounded. At the same time, its applications in equipment intelligence, which is mainly divided into two parts such as line fault location and equipment insulation diagnosis, are summarized. On this basis, the challenges faced by broadband voltage sensing in terms of sensing methods, frequency and amplitude characteristics, temperature and humidity compensation, device miniaturization, and conformal integration with equipment are pointed out. Finally, further development prospects for broadband voltage sensing technology in the application in power system protection and equipment intelligence are made.

Key words: smart grid; broadband voltage sensing; data application; electromagnetic transient protection; equipment intelligence

0 引言

智慧、高效、清洁的智能电网是我国未来电网

发展的必然趋势^[1-2], 与现有电网相比, 其先进性和优势主要表现在: 可获取电网的全景信息, 及时发现、预见可能发生的故障并且在故障发生时可快速隔离故障, 实现自我恢复, 避免大面积停电事故发生^[3-4]。面向未来规模不断扩大的智能电网, 故障数

基金资助项目: 国家自然科学基金(52077019)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52077019).

据的缺失和高性能传感设备的匮乏是实现智能电网的一大难题^[5-6]。宽频电压作为表征暂态故障信息的重要状态量,对其感知技术的研究和感知数据的应用分析成为构建智能电网的关键性工作^[7],如果能直接精确感知并获取海量电压实测数据,并对其进行数据挖掘和分析,则可以更好地加强电网安全防护并推动设备智能化进程。

目前,电压互感器是电网输电线路和变电站中电压测量最常规的装置,技术相对成熟,但其容量有限、动态范围小,常用于测量工频电压信号,同时其体积较大,难以安装到空间有限的输电电路上^[8]。实际上,电网的电压信号量程变化巨大,频率可从0赫兹(DC)到数百兆赫兹。随着我国对特高压电网建设的不断推进,电网物理结构、运行方式以及动态特性等正发生深刻变化^[4],常规电压监测装置很难在该复杂工况下对电压状态量进行实时精确传感,不利于后期对电压感知数据的分析和应用。同时,在电网智能化发展过程中,分布式能源和电力电子器件的大量推广应用可能会改变设备结构并且引起电网故障特征变化^[9],增加了对关键节点电压状态量的监测难度。并且,智能电网中需电压测量的关键节点多而密集,对电压传感设备的体积、成本以及安装难易程度提出了新的要求。因此,亟需低成本、高性能、稳定性强、小型化并且易实现分布式安装的宽频电压传感设备为智能电网及时发现、快速诊断故障并进行故障处理提供数据支撑,实现其在复杂网络和条件下的安全可靠高效运行。同时,电力设备作为电网的核心部分,其缺陷故障往往出现在内部,由于常规监测装置无法深入设备内部,设备状态监测有效性、准确性均受到极大制约。基于对宽频电压感知的一次设备共形植入融合技术的深入研究,将电压传感装置与一次设备如气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)、套管、开关柜等共形植入融合,获取设备内部电压的全景信息,将其作为设备状态监测参量对设备状态进行实时全面直接的监测,可为设备绝缘故障的预判和防护工作提供有效数据支撑。除此之外,设备内部所遭受的暂态电压普遍具有宽频宽幅值的特点,同一阻抗条件下,其波形衰减不明显,与工频注入信号波形相比具有显著优势,完全有可能通过对设备内部宽频电压信号及其响应信号的数据监测获取电缆、套管等设备和输电线路内部相关参量的有效分布信息,实现设备绝缘故障和线路故障的非

侵入、无干扰、高精度的在线诊断和定位,以此加快设备智能化的相关研究并促进智能电网的发展。

现阶段,宽频电压感知方法趋于多样化,同时传感装置趋于小型化和智能化^[10-12]。宽频电压感知还需同时兼顾宽温湿区环境工作稳定性、安全兼容性问题。国内清华大学、中国电科院、重庆大学、西安交通大学、华北电力大学等,国外美国海军实验室、东京大学等研究机构相继对此进行了大量的研究,并致力于推动其实用化进程。本文基于现阶段对宽频电压感知方法的研究进展和实用情况,从接触式和非接触式电压耦合方式两方面对已挂网运行传感器的原理、优缺点以及存在问题进行总结,并就目前宽频电压感知数据在电磁暂态防护和设备智能化中的应用情况进行分类阐述。最后对未来宽频电压感知的发展趋势以及应用前景进行了展望,希望对构建具有信息化、数字化、自动化、互动化特征的统一的坚强智能电网有所帮助。

1 宽频电压感知方法

1.1 接触式感知方法—分压法

1.1.1 基于电阻、电容及阻容的分压法

此种宽频电压感知装置结构简单,利用电阻、电容或阻容串联方式构成分压器,最后通过分压比反推被测电压^[13]。其中电阻分压器在高频电压下工作时测量误差较大,电容分压器可用于暂态电压的测量,但因自身寄生参数而存在高频振荡,无法测量高幅值的雷电冲击电压。阻容分压器利用阻容串联或并联2种形式可减弱对地杂散电容的影响,并且分压器等效电阻可抑制大部分高频振荡,使测量结果较准确。并联式阻容分压结构是目前宽频电压测量最有效、最可靠的结构。此类分压器的最大问题是长期与高电压等级的输电线路或母线并联运行将会对系统安全带来潜在风险,一般广泛应用在10、35 kV等级电网中^[14-17],对于220 kV及以上等级电网宽频电压的测量,使用阻容分压器作为专用分压器的案例较少。

此类分压器可靠运行必须是以分压比恒定不变为前提的^[18-19]。有学者针对电容器杂散电容和相间干扰对分压比的影响做了理论分析,两者均会使得分压器主电容各点电压分布不均,从而使得测量产生误差,可以通过改进电容分压器的本体结构(加屏蔽罩)、缩小电容分压器的尺寸或选择大一点额定电容的电容分压器来减小此类误差^[18,20]。除此之外,

环境温度、工作电压和工作频率等都会对分压比的稳定性造成影响, 一般通过选择精密的电容器、温度频率特性相近的高压和低压电容器或者选择频率相适应的仪器进行分压比较准来消除这种影响^[21-22]。

1.1.2 套管末屏串接电容分压法

套管末屏串接电容分压法, 即借助于一次设备, 比如电流互感器、变压器、穿墙设备等套管末屏串接电容形成高性能电容型分压器进行宽频电压传感的方法。此种监测方式在不增加电网一次设备的前提下, 解决了电容分压器长期并联电网运行给系统带来的安全问题, 其在 110~750 kV 等电压等级的变电站以及特高压工程测量中均有研究和应用^[23-26]。整个监测系统将电容式套管的等效电容作为高压臂, 串联标准定值电容作为低压臂, 从而形成电容分压器以实现电网宽频电压的实时感知。图 1 是基于变压器电容式套管分压的电压传感系统的安装示意图, 在套管末屏上串入的特制分压传感器需保证输出电压在合理范围内, 并且能得到良好的频率响应特性。为了能可靠实现末屏开路的监测和保护, 一般会在传感器中加入采用压敏电阻和末屏开路检测电路组成的保护单元。

此种在套管末屏抽头处安装电压传感器测量宽频电压的方法响应快、频带宽、抗干扰能力强, 并且接入的传感器体积小、绝缘水平高、拥有完善的保护措施, 能满足较高电压等级宽频电压在线感知的要求。但是外加传感器接入时不可避免会引入杂散电感, 文献^[27]通过方波试验证明杂散电感的增加会使传感器输出波形出现严重振荡。为了减小杂散电容对输出特性的影响, 一方面使用多个阻容元件并联连接, 按圆周对中心均匀对称排列构成电压传感器; 另一方面尽量缩短传感器与套管末屏抽头的引线长度。

1.2 接触式感知方法-光学电压传感法

当前, 电压传感技术的研究热点包括基于电光效应、逆压电效应和电致发光效应的传感技术, 但后者主要处于研究和试验状态, 基于电光效应, 尤其是一次电光效应的电压传感器目前已实际应用于系统宽频电压的感知中。图 2 为基于一次电光效应的横向调制的电压传感器原理图, 在外施电压下, 线性偏振光通过电光晶体时 o 光和 e 光会产生一定的相位差, 在光路末端用检偏器将被调制的激光相位变化转化为可直接探测的光强变化, 如式(1)所述, 设入射光强为 I_0 , 当所施电压 U 或场强 E 远小

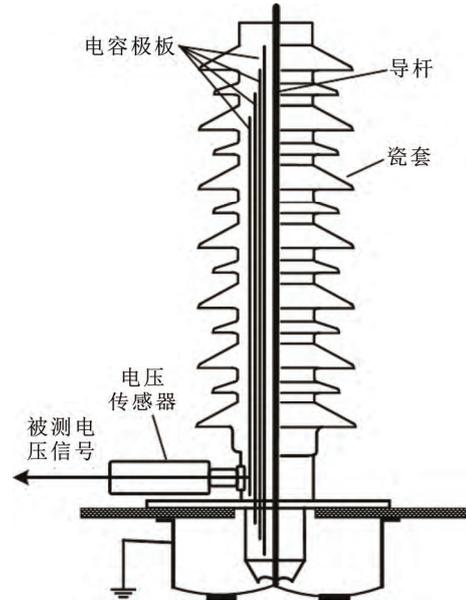


图 1 变压器套管末屏分压系统安装示意图

Fig.1 Installation schematic diagram of transformer bushing tap divider system

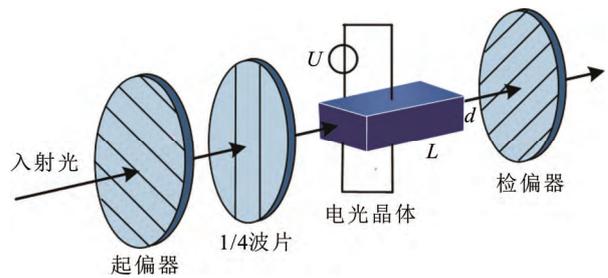


图 2 电光传感单元原理图

Fig.2 Principle diagram of electro-optic sensing unit

于半波电压 U_π 或半波场强 E_π 时, 输出光强 I 与输入电信号之间存在简单的线性关系^[28-29]。

$$I = I_0 \sin^2 \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi U}{U_\pi} \right) \right) = \frac{I_0}{2} \left(1 + \sin \frac{\pi U}{U_\pi} \right) = \frac{I_0}{2} \left(1 + \sin \frac{\pi E}{E_\pi} \right) \quad (1)$$

根据实际应用情况, 目前基于一次电光效应的宽频电压传感器主要拓扑结构包括全电压型光学电压传感器和电容分压型光学电压传感器两种。

1.2.1 全电压型光学电压传感法

全电压型光学电压传感器即指光学电压传感器直接承受被测高电压的传感方法。为提高电光晶体直接承受待测电压时的稳定性, 一般利用调整电极间距离的方法来降低作用在电光晶体上的电压。ABB 公司于 2009 年成功研制出了适用于

75~550 kV 电压等级的纵向调制方式全电压型光学电压互感器, Nxtphase 公司研制的基于横向电光效应的光学电压互感器在 123~500 kV 等级的电网中实现了挂网运行^[30-33]。东京大学 Hidaka Kunikiko 等学者研究出的多节 BGO 晶体的纵向调制方式可实现幅值达几百千伏, 频带可覆盖到兆赫兹级别的宽频暂态电压的直接测量^[34]。从目前挂网运行情况来看, 全电压型光学电压传感器可满足宽频电压的测量, 但一般电光晶体的半波电压通常只有几十千伏, 制作能够直接耐受被测高电压的性能优良的长条晶体是非常困难的, 并且成本较高。因此, 此种方法并未广泛应用于电网宽频电压的感知中。

1.2.2 电容分压型光学电压传感法

受电光晶体半波电压的限制, 为满足高电压测量的需求, 利用电容分压器与光学传感器组合使用, 从高压母线获得一个较低的电压信号加于光学电压传感器的方法称为电容分压型光学电压传感法, 原理如图 3 所示。该方式利用光学电压传感器响应快、频带宽的特点避免了传统电容式电压互感器容量小暂态特性较差的缺点, 提升了变电站和输电线路对宽频电压的感知能力。日本日立公司采用电容分压器和横向调制的光学电压传感器的组合结构研制出了适用于 70 kV 电压等级的光学电压互感器, 东电公司采用类似的结构研制出了适用于 300 kV 电压等级的光学电压互感器^[35-36]。近几年, 文献^[37]提出了一种适用于 220 kV 电压等级的自愈式光学电压互感器, 在电容分压器和横向调制的光学电压传感器组合结构的基础上, 采用基准源自动校准的设计方案, 解决了互感器的测量精度随温度漂移的问题, 并于 2012 年在国内某 220 kV 等级的智能变电站的现场运行^[38]。

以上基于电光效应的光学电压传感器具有无源无损传输、全电介质材料封装、测量频带宽、动态响应快等特性。但挂网运行时存在施加在电光晶体上的电压比较高的问题, 即使从电容分压器分出的电压一般也在几千伏(3~5 kV 较普遍), 这对光学电压传感器的温度稳定性和测量精度非常不利, 并且电光晶体材料本身具有自然双折射和热释电性, 所以必须采取有效措施解决此类传感器的温漂问题, 以提高对宽频电压的感知精度。目前, 关于电光晶体的温度补偿方法主要有温控法、硬件补偿和软件补偿法等, 国内外学者也相继提出了双光路法、互易反射式结构、具有参考光路的自愈式结构和传

感头的分布式结构来抵消温度的影响^[37,39-41]。图 4 为重庆大学杨庆等提出双铌酸锂晶体补偿原理图, 在 2 块尺寸相同但光轴相反的晶体中插入 1 块 1/2 波片, 合理设置波片光轴与晶体光轴间的夹角, 可使自然双折射引起的相位差被抵消^[42]。

1.3 非接触式感知方法

在高压电网中, 非接触式传感耦合方式与一次设备无任何电气连接, 不改变电网本身结构, 可实现长期的稳定运行, 是目前研究的热点。在已投运的非接触式宽频电压感知设备中, 基于杂散电容分压原理、GIS 内置电极以及容性设备泄漏电流的感知方法应用较为广泛。第 1 种方法一般用在输电导线上, 后 2 种方法多用在变电站中。

1.3.1 基于杂散电容和光学电压传感器的感知方法

基于杂散电容分压原理的感知方法, 一般利用感应金属板与被测输电线路之间的耦合杂散电容 C_1 和传感器电容 C_2 组成的分压单元来实现宽频电压的非接触式测量, 原理如图 5 所示。其中杂散电容 C_1 的估算是确定传感器分压比 $k=(C_1+C_2)/C_1$ 的关键。如图 6 所示, L 、 $2r$ 分别为输电导线的等效长度和宽度, a 、 b 分别为感应金属板沿导线方向和垂直于导线方向的长度, h 为导线与金属板之间的距离, ϵ 是空气介电常数, 变量 z 的积分区间为 $[0, h]$, 可利用串联法计算出 C_1 , 表达式为

$$C_1 = \frac{1}{\int_0^h \frac{dz}{\epsilon \left(2r + \frac{(h-z)(b-2r)}{h} \right) \left(a + \frac{z(L-a)}{h} \right)}} \quad (2)$$

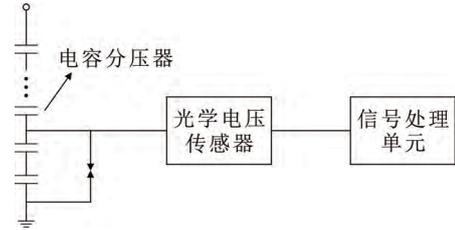


图 3 电容分压性光学电压传感器
Fig.3 Optical voltage sensor based on capacitor divider

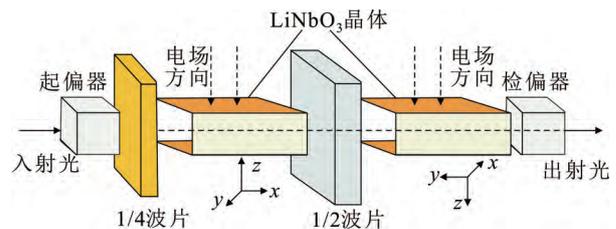


图 4 双铌酸锂晶体补偿原理图^[42]
Fig.4 Compensatory principle diagram of double Lithium Niobate crystal^[42]

此种传感方式结构简单、安装方便、经济性能, 但其中杂散电容的大小与输电导线的形状、尺寸、以及自身安装位置有关, 并且易受外界环境和电磁干扰影响, 会降低宽频电压的测量精度。因此整个传感器一般安装在金属屏蔽壳内, 减小其他杂散电容和环境因素对测量的干扰^[43-46]。

早期运行时该传感器低压端得到的宽频电压信号需要通过同轴电缆进行长距离传输至外部的数据采集系统, 这是一种有源的传感方扰。目前, 很多研究将先进的光纤传感技术和此种非接触感应电压技术结合, 实现了高压电网中宽频电压的安全无源非接触测量, 有效解决了长距离传输过程中复杂电磁干扰的问题。如图 7 所示, 整个传感系统由电场耦合单元和的基于电光效应的光学传感单元组成, 电场耦合单元感应出宽频电压, 通过电光传感单元调制成光信号, 利用光纤进行无源传输和测量, 易满足小型化、智能化、多功能的要求^[47-50]。

1.3.2 基于 GIS 内置电极的感知方法

基于 GIS 内置电极的感知方法主要用于对超高压、特高压 GIS 内部快速暂态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)的监测, 其利用电极和中心导体间的耦合电容作为高压臂电容, 是一种非接触测量方式, 主要包括预埋电极法及窗口式传感器法两种。预埋电极法^[51]利用绝缘子中预先埋置的金属环与高压导杆之间构成耦合电容, 再外接大电容构成电容分压器, 最终实现 VFTO 测量, 原理如图 8(a)所示。此种方法低压端电路安装相对简单, 且对一次设备基本无影响, 但只适用于带有预埋环的绝缘子, 并且高频截止频率受分压系统参数配置和结构设计影响较大, 一般达几兆赫兹^[52]。可以通过降低电路连接产生的杂散电感和电容元件引入的杂散电感提高此类传感器高频截止频率^[53]。窗口式传感器法^[54-55]是在 GIS 手窗位置预先安装感应电极与 GIS 高压导杆之间构成 1 个杂散电容, 也与 GIS 接地外壳构成 1 个电容, 实现电容分压, 原理如图 8(b)所示。其测量频带很宽, 但现有的窗口传感器法采用绝缘膜制作低压臂电容, 导致其低压臂电容值会随温湿度改变, 且较易损坏, 国内清华大学和华北电力大学对此做了大量研究和改进分析^[56-58]。文献^[56]采用手孔式电容传感器与阻抗变换器相结合的方法研制出测量频带为 0.003 Hz~100 MHz 的测量系统, 其能够满足 VFTO 全波段的测量要求。随后, 文献^[57]将低压臂电容内置的方法改进为

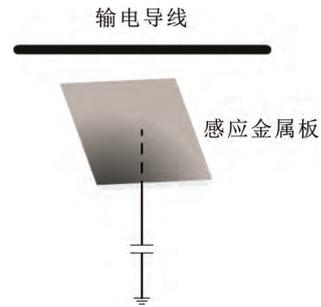


图 5 杂散电容分压原理图

Fig.5 Principle diagram of stray capacitor voltage divider

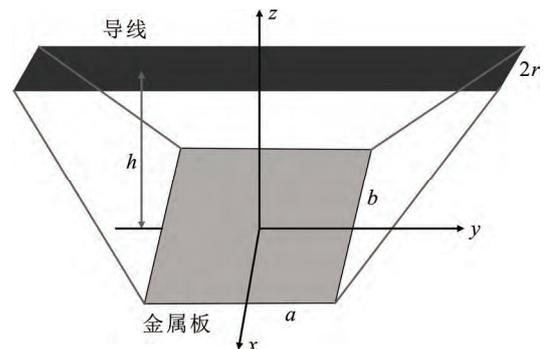


图 6 耦合电容计算模型

Fig.6 Calculation model of coupling capacitance

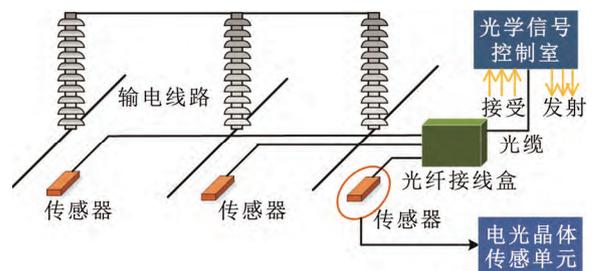


图 7 非接触光学电压传感器布局图

Fig.7 Layout diagram of non-contact optical voltage sensor

外置集成电容, 通过采用陶瓷贴片电容并联设计及降低引线电感的方法, 实现了传感器 200 MHz 的高截止频率, 并且基本消除了温、湿度变化对分压比的影响问题, 最后将测量系统在 1 100 kV GIS 上进行了数千次现场试验, 证明了其长期运行可靠性。针对窗口传感器安装于 GIS 腔体内、安装与维护较麻烦的问题, 有研究在此基础上提出一种介质窗口式传感器, 优选了聚四氟乙烯作为介质窗材料, 结构如图 9 所示。最后通过气密、水压试验和数百次 252 kV GIS 过电压测量试验证明, 该传感器带宽为 6.75 Hz~179.7 MHz, 满足 VFTO 测量要求, 具有良好的可靠性和稳定性^[58]。

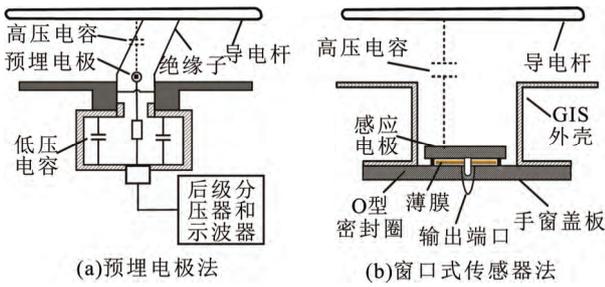


图 8 基于 GIS 内置电极的感知方法原理图

Fig.8 Principle diagram of sensing method based on GIS built-in electrode

1.3.3 基于容性设备泄漏电流的感知方法

电网容性设备如套管末屏和母线电容式电压互感器(capacitor voltage transformers, CVT)的泄漏电流随时间的积分与设备所受暂态电压之间呈线性关系。以泄漏电流作为反演对象,也可实现宽频暂态电压的感知,具有较高的可靠性。测量原理图如图 10 所示, C_0 为容性设备等效电容, TA 为基于罗氏线圈结构的电流传感器; R 为电流传感器的积分电阻。文献[59]利用罗氏线圈式电流传感器设计出了变压器套管末屏宽频电压测量系统, 现已在河南某 500 kV 变电站挂网运行。除此之外, 利用母线 CVT 响应电流也可以实现侵入电压波的宽频感知。此监测方法不足之处在于不同的电压波形导致电容型设备对地泄漏电流的幅值及频率差异非常大, 无法同时测量包括工频、操作及雷电在内的全频带暂态电压信号。并且现场安装的时候需要打开接地线或对接地装置进行改造以此便于安装传感器, 存在一定的安全风险^[60]。

以上为目前已运用于电网宽频电压的在线感知方法, 图 11 总结了其能量耦合方式, 表 1 总结了各种方法基本性能及其在电网中的可能应用场景。

2 宽频电压感知数据在暂态防护中的应用

当前电网不断向远距离、大容量、超特高压方向发展, 一旦发生故障, 势必会造成电力设备绝缘的巨大损伤, 致使供电发生波动或中断。目前, 构建以宽频电压传感器为基础的电压波形数据感知-特征参量获取-暂态故障分析-暂态故障防护系统, 是增强电网自愈能力、实现电网在复杂网络和条件下的安全可靠高效运行的基础。下面将从导致电力系统发生故障的典型波形(包括雷击过电压和 GIS 中暂态过电压)的特征参量获取、电力设备暂态故障

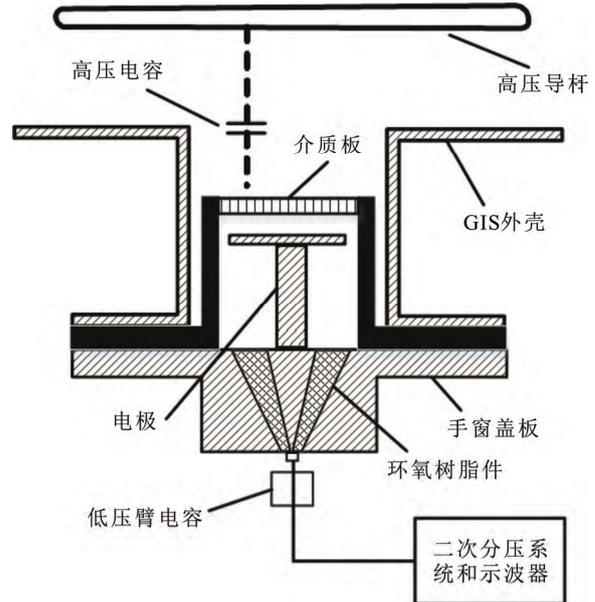


图 9 介质窗口式传感器原理图^[58]

Fig.9 Principle diagram of dielectric window sensor^[58]

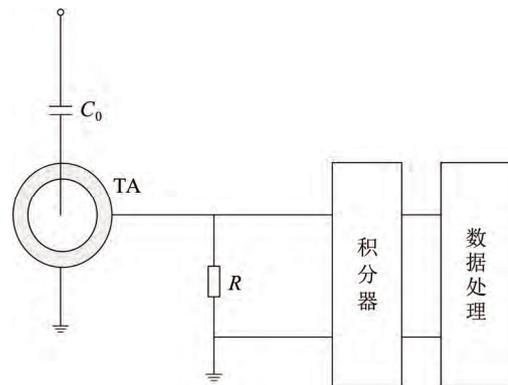


图 10 基于容性设备泄漏电流的测量原理图

Fig.10 Measurement principle diagram based on leakage current of capacitive equipment

分析和目前暂态故障防护措施三方面进行总结和分析。

2.1 典型故障波形统计分析

2.1.1 雷击过电压

对于雷击较频繁的地区, 基于宽频电压感知数据对其进行长期统计学分析是十分必要的, 这可为电力系统仿真计算和雷电防护提供广泛数据支撑。美国是早期开始研究雷击过电压统计规律的国家, 在 1926—1930 年间, 美国通用电气公司分别对数个不同电压等级的输电线路雷击事故进行分析, 但受监测设备性能的限制, 未能对具体的波形特征和故障机理给出定性的结论^[61]。东京大学的 Kunihiro Hidaka 等人在 1996—2007 年期间利用非接触式感应电压技术和电光传感技术组合而成的在线监测装

表 1 宽频电压传感器的性能比较

Table 1 Performance comparison of broadband voltage sensors

传感方式	传感类型	关键传感单元	测量范围	优点	缺点	电网应用场景
接触式	电阻/电容/阻容分压器	电阻/电容/阻容串/并联	220 kV	结构简单、测量精度较高、暂态响应好	长期与高电压线路并联运行给系统安全带来潜在风险	变电站
	套管末屏串接电容分压器	电力设备套管末屏+电容传感器	750 kV	响应快、频带宽、绝缘水平高、拥有完善的保护措施	输出波形受杂散电容电感影响	变电站
	全电压型光学电压传感器	电光晶体	550 kV	无源、动态测量范围大、可测直流至吉赫兹信号	接触式测量、成本昂贵、体积大	变电站
	电容分压型光学电压传感器	电容器+电光晶体	765 kV	无源、暂态特性好、可靠性高	接触式测量、测量精度高度依赖于结构和材料的稳定性	变电站、输电线路
非接触式	杂散电容分压型光学电压传感器	耦合电容+电光晶体	800 kV	无源非接触、动态测量范围大、频带宽、光学工作点可控	不能测量直流信号、光路补偿结构复杂	变电站、输电线路
	基于 GIS 内置电极的分压器	耦合电容+电容器/耦合电容	1 100 kV	非接触式测量、频带极宽, 最高可达 200 MHz, 最低小于 1 Hz	分压比受系统参数配置、结构设计及环境因素影响较大	特高压 GIS
	电容泄漏电流互感器	容性末端+电流互感器	500 kV	不改变一次接线、安全性高	频带窄、不易安装和维护、测量精度依赖于电流传感器	变电站

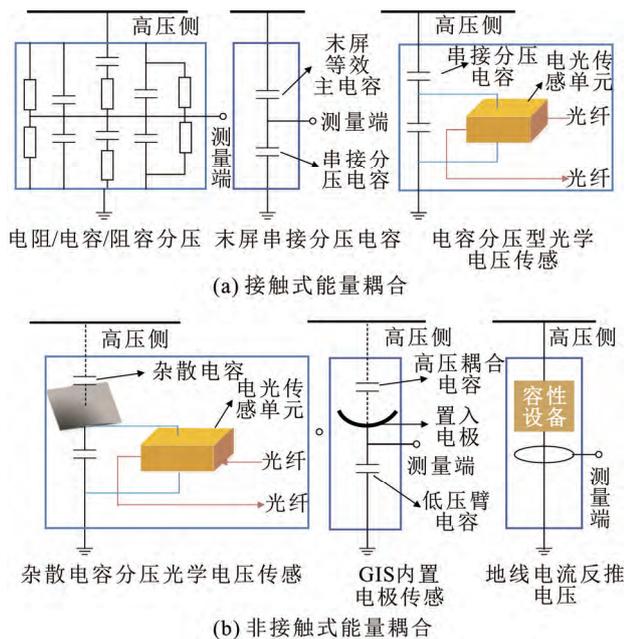


图 11 宽频电压能量耦合方式

Fig.11 Broadband voltage energy coupling modes

置对 10 个 500 kV 变电站的雷电侵入波进行了研究, 得到了累积概率为 50% 的波前、半波时间和峰值电压分别为 5.9 μs 、36 μs 和 240 kV, 监测结果表明波形特征受测量位置和测量条件的影响, 虽然各种实测波分布相似, 但作者并未对此做进一步讨论^[62]。

国内孙才新、司马文霞、周凯等学者相继对雷

击暂态电压波形进行长期在线监测与统计分析, 极大促进了对电力系统暂态防护的研究。文献[63-64]通过对分压器和数据采集系统的特殊设计, 对 10 kV 电网雷击暂态电压波形的幅值、陡度和持续时间等进行长期监测, 为 10 kV 电网的过电压防范、绝缘配合、事故诊断和设备绝缘性能的预测等提供了可靠的依据。文献[65]基于某变电站 10 kV 系统过电压在线监测装置捕获的 280 条雷击暂态电压波形, 分析了其最大幅值、波前时间、振荡主频以及衰减常数等特征量, 揭示了实际站内雷电侵入波过电压的幅值和波形参数分布规律, 为绝缘特性、绝缘配合和电力物联网数据层建设提供基础数据支撑。随后文献[66]分别利用电容分压器和套管末屏电容分压器法对重庆 110 kV 先锋变电站中 10、35 和 110 kV 3 个电压等级, 5 条母线进行雷击过电压监测。经过近 3 年雷电过电压波形的在线监测, 系统捕获大量的感应雷侵入波形, 结果表明其在传输过程中受到冲击电晕、电阻损耗和折反射等因素影响, 波前时间和陡度分散性较大, 分别为 5~80 μs 和 120~20 000 V/ μs , 波形衰减振荡时间为 2~5 ms。

2.1.2 GIS 中暂态过电压

近年来在 GIS 中产生的 VFTO 一直被认为是导致 GIS 盆式绝缘子闪络和设备故障的重要诱因, 对此类电压波形数据的长期感知与统计分析对保护设

备绝缘和维护系统稳定运行意义重大,国内陈维江、李成榕、马国明等学者引领了此方面的研究工作。文献[67-68]基于武汉特高压实验基地 1 100 kV GIS 试验回路,开展了数千次隔离开关带电操作试验,试验结果表明,VFTO 最大幅值标幺值为 2.27,频率分量范围从准直流到近百兆赫兹,单次击穿波形具有最大陡度平均值为 78.6~138.9 kV/ns,持续时间平均值为 5.6~9.7 μ s 的特点,同时,试验通过隔离开关加装阻尼电阻的方式将 VFTO 最大幅值标幺值由 2.27 降至 1.33,整个研究成果为超高压 GIS 的防护工作提供有力数据支撑;文献[69]利用一种超宽频电容传感的 VFTO 在线监测系统,对某水电站 500 kV GIS 设备操作隔离开关和断路器引起的 VFTO 波形进行了准确记录与分析,结果表明,操作隔离开关引起的 VFTO 波形持续时间和上升沿时间分别低于 5 μ s 和 60 ns,小于操作断路器引起的 VFTO 波形持续时间和上升沿时间(分别约为 30 μ s 和 100 ns),并且 2 类操作引起的 VFTO 主要频谱分别分布在 1~10 MHz 和 0.1~2 MHz 之间,上升沿处最高瞬时频率均可达 100 MHz,统计结果为优化 GIS 设备 VFTO 仿真模型以及提升设备 VFTO 防护水平奠定了坚实基础。除了对 GIS 中 VFTO 波形的大量统计分析,文献[70]研究了 1 100 kV GIS 隔离开关切换速度和与电源连接方式对 VFTO 幅度的影响,结果表明,降低隔离开关切换速度会减小 VFTO 的幅度,但该改变隔离开关与电源连接方式对 VFTO 的幅度影响很小,所得结果对 GIS 中 VFTO 的抑制工作具有重大意义。

2.2 设备暂态故障分析

电力系统中发电机、变压器、电抗器、断路器等设备的绝缘击穿是造成停电事故的主要原因。基于宽频电压感知数据,研究和分析施加于电力设备上暂态过电压的产生机理和传播特性,可为确定设备绝缘水平和提出有效的过电压抑制措施提供参考。文献[71]采用套管末屏电压传感器对某 110 kV 变电站内雷电侵入波进行在线监测,并对比研究了变压器油纸绝缘在该站实测雷电侵入波和标准雷电波作用下的击穿特性。试验结果表明:油纸绝缘在实测雷电波和标准雷电波作用下的 50% 击穿电压和 50% 伏秒特性曲线均存在明显差异,表明减少变压器绝缘击穿等暂态故障的发生需要综合考虑大量的实测暂态数据,合理进行绝缘设计和绝缘考核。断路器作为变电所主要的电力控制设备,其投切操作

过电压可能导致电抗器损坏、断路器炸裂等事故发生。国内杨庆、庄池杰等人采用基于杂散电容分压原理和电光效应原理的非接触无源测量方法分别对 220 kV、500 kV 变电站和 \pm 800 kV 换流站中可能引发的暂态故障的开关操作过电压进行现场实测并分析了投切对象切换过程中的暂态特性变化,有助于制定相应措施预防事故发生^[72-74]。文献[75-76]研究了真空断路器投切 10 kV 并联电容器和电抗器的暂态过程,图 12(a)、12(b)分别为文献[75]中真空断路器合闸预击穿和分闸电弧重燃过程与并联电抗器同一母线侧的一站用变高压端处的暂态过电压波形图,表明分闸重燃形成的最大过电压值明显高于预击穿时的情况,是威胁站用变绝缘的主要原因。清华大学关永刚等学者在某变电站对 40.5 kV 真空断路器开断并联电抗器的暂态过程进行长期现场监测,经统计,整个暂态过程具有三相极易发生重燃、重燃次数极多、重燃过程持续时间很长、瞬态恢复电压上升率很高、过电压倍数大的特点,其中三相多次重燃和相间过电压是此类事故的主要原因,统计结果可为断路器的应用和过电压的抑制提供参考^[77-78]。

2.3 暂态故障防护

随着电网大量分布式能源和电力电子器件的引入,利用 ATP-EMTP 等电磁暂态仿真软件已难以模拟真实的暂态发生过程,因此,单依赖仿真模拟

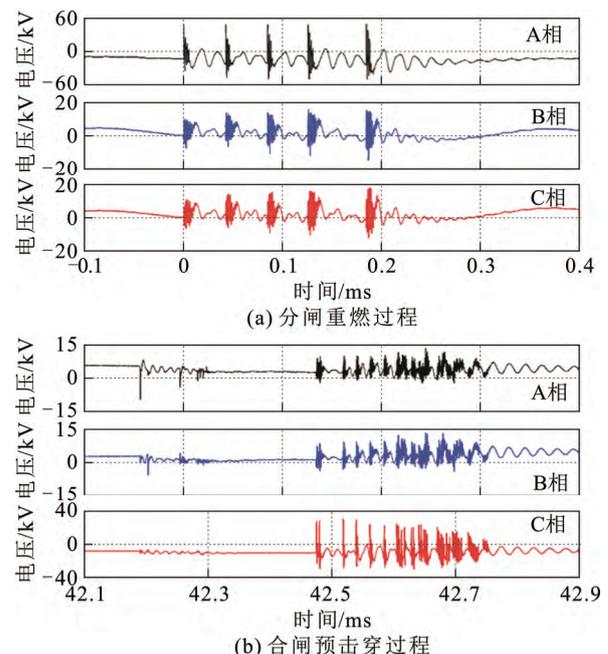


图 12 2 种暂态过程站用变高压端处电压波形^[75]

Fig. 12 Voltage waveform of transformer high voltage end during two transient processes^[75]

的被动暂态故障防护工作无法在实际网络中产生有效的抑制效果。利用宽频电压传感器对电力系统各类过电压进行全覆盖测量,可真实呈现暂态发生过程,为采取暂态故障防护措施提供有效数据支撑,同时所获取的大量数据可帮助改进和完善现有的仿真模型,提高电磁暂态模拟的可靠性。目前,超高压、特高压电网中操作断路器等开关设备产生的暂态电压幅值远远超过了最高运行电压,是导致系统故障的主要原因之一。对此,研究者相继提出了多种暂态电压抑制措施并通过现场试验对其可行性进行分析。中国电力科学研究院林集明等对2种特高压典型网络结构不同条件下合闸操作空载线路所引起的操作过电压进行差异化分析,提出断路器选相合闸技术深度抑制措施,并分析了不同线路长度时该项技术的适用性^[79]。文献[80]研究了我国1000 kV特高压试验示范工程中可能出现幅值较高的合空载变压器谐振过电压现象,在计算分析合闸电阻、投入低压电抗器等措施限制合空变谐振过电压效果的基础上,提出了抑制合特高压空载变压器谐振过电压的相应对策,以保证特高压试验示范工程的安全运行。随后,文献[81]针对国内40.5 kV真空断路器开断并联电抗器进行了一系列现场试验,并对装设阻容吸收保护装置和各种组合型式的氧化锌避雷器等抑制措施的抑制效果进行了分析和比较,比较结果对于实际应用具有一定的指导意义。同时,文献[82]提出在站用变和电抗器电缆末端均安装伏安特性曲线较低的避雷器的方法抑制真空断路器开断10 kV并联电抗器时的暂态过程,现场测试结果表明,此方法可以将两处最大分闸过电压标幺值分别限制在3.44和3.67,抑制效果显著。

3 宽频电压感知数据在设备智能化中的应用

下面从输电线路故障定位、变压器故障诊断以及电缆绝缘诊断三个方面分析宽频电压感知数据在设备智能化中的应用。

3.1 线路故障定位

目前输电线故障定位中应用较多的是行波法,其主要利用线路发生故障所产生的高频暂态行波向两端传播的波速和时间来确定故障位置。相较于电流行波,电压行波突变幅值大、不易受噪声干扰,在故障定位中具有广阔应用前景^[83]。早期应用中,由于变电站内常规电压互感器的容量和频带范围受限,准确提取故障电压行波信号一直是线路故障定

位的一个难题^[84-85]。现阶段,随着宽频电压传感器性能的不断改进、传感装置小型化以及和设备共形技术的发展,基于高频暂态电压行波提取的故障定位法测量精度有了很大改善。文献[86]利用电压行波法实现了1100 kV特高压气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated metal-enclosed transmission line, GIL)故障的精确定位,现场试验结果表明其定位误差低于5 m,可有效减少特高压GIL故障排除时间,提高特高压输电系统的运行可靠性。目前,线路故障定位的研究热点聚焦于利用可直接安装于线路的暂态电压监测装置,建立整个输电网的分布式故障行波定位系统,实现对线路故障信息的全面监测与高精度定位^[87-88]。重庆大学杨庆等人设计出了一种自供电、无线传输的智能绝缘子型宽频电压监测装置,其可在输电线路杆塔或输电导线上进行多点安装布局,同步实现线路宽频电压的分布式监测^[89],将其应用于电压行波故障定位中,可充分利用信息冗余降低行波信号长距离传输容易发生衰减和畸变以及时钟不同步等问题的影响,进一步提高定位准确度和灵敏度。近年来,基于故障暂态电压信息电磁时间反演(electromagnetic time reversal, EMTR)的故障定位方法成功应用到了输电线路故障定位中。图13为基于分布式宽频电压监测和EMTR的故障定位原理图, Z_c 为线路特征阻抗, Z_0 、 Z_1 分别为线路首末两端负载电阻, L 为线路总长,此定位方法主要包含以下3个步骤:1)正向时间阶段,通过宽频电压行波监测装置对故障行波信号 U_0 进行分布式测量,并对信号进行时间反转处理;2)在数值仿真平台搭建与配电线路一致的模型,将第1步中经过时间反转处理的信号 U_0^* 注入仿真模型中;3)设置不同的猜测故障距离 X_f ,通过不同的故障特征值(猜测故障点对地电压 U_f 或电流 I_f)对实际故障距离进行判断,此种方法可消除行波法中全球定位系统(global positioning system, GPS)时间不同步、高阻故障难以定位、信号处理复杂等问题,显示出了较高的定位准确性^[90-91]。

3.2 变压器故障诊断

大量运行经验表明,变压器绕组发生故障时仍然可能正常或近似正常工作一段时间,通过监测电流变化的方法无法有效发现变压器绕组小规模短路或变形等轻微故障。目前,冲击电压法和扫频响应法是变压器故障诊断(transformer fault diagnosis, TFD)常用的2种方法,但分别存在对电压传感设备

要求高和监测周期长、现场不便使用的弊端^[92-93]。基于高性能的电压传感器，利用系统操作断路器产生的暂态信号或遭受的雷击过电压信号代替额外注入信号的方式对变压器故障进行诊断，可解决上述问题。随着传感设备与变压器共形植入融合技术的发展，此种故障诊断方法还可以避免引入电压传感设备会改变套管结构导致变压器绝缘受损的问题，具有显著优势。文献^[94-95]分别采用幅值为 0.4 和 4 kV、上升沿为 400 ns、半脉宽为 20 μs 的暂态信号模拟变压器运行时遭受的电压波形，通过对比分析频率响应曲线的变化验证本方法具备检测不同绕组故障的潜力，图 14 为其诊断原理图。文献^[96-97]获取了标准雷电冲击电压和振荡冲击电压下变压器绕组不同故障时的传递函数，研究表明，可根据变压器绕组电压传递函数的变化规律实现变压器不同故障的诊断。

3.3 电缆绝缘诊断

电力电缆在现代工业传输电能方面起着重要作用，对电缆绝缘状态的在线监测是保障电力电缆安全、可靠、稳定运行的关键环节。常用的电缆绝缘状态监测方法多在运行电压下对电缆绝缘的品质进行诊断，绝缘缺陷不容易暴露，分辨较困难，并且多次试验有可能会对电缆绝缘造成破坏，从而加速绝缘的老化^[98-99]。现阶段，随着对高性能、小型化、与设备共形的电压传感装置的研究，基于电缆内部宽频电压信号传递特性的电缆绝缘状态方法被提出。文献^[100]指出电缆绝缘特性的变化会导致沿其传播的暂态信号的不同，这为利用暂态电压响应表征电缆绝缘状况提供依据；之后，文献^[101]利用电力系统中电容投切、空载线路充电等操作产生的宽频暂态电压信号获取了交叉互联电缆绝缘导纳频谱曲线，从而实现绝缘整体老化的在线监测，ATP-EMTP 的仿真结果表明了该方法的正确性和有效性。加拿大 Wilsun Xu 等学者提出了一种新的电缆状态在线监测方法，将系统电容器开关投切和故障等自然干扰产生的暂态电压信号作为测试信号，电缆绝缘层的相对介电常数作为绝缘状态的表征参量，准确跟踪其随时间的变化趋势，以此来实现电缆绝缘状态的实时监测和评估^[102]。

4 总结与展望

1) 本文针对电网中宽频电压这一重要感知量和监测对象，首先对其目前的在线监测方法的原理

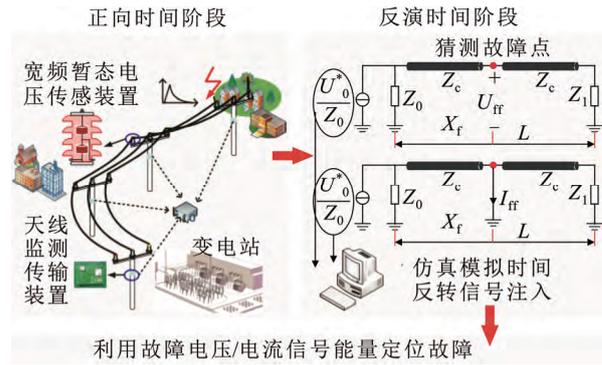


图 13 基于分布式宽频电压监测的 EMTR 故障定位原理图
Fig.13 Schematic diagram of EMTR fault location based on distributed broadband voltage monitoring

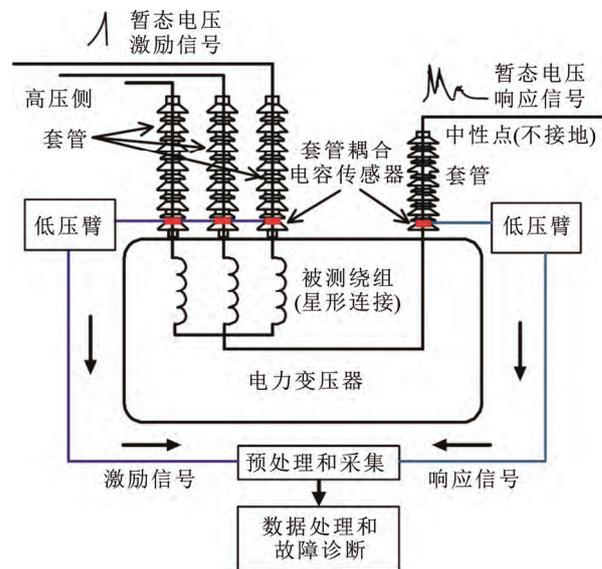


图 14 变压器故障诊断示意图^[95]

Fig.14 Schematic diagram of transformer fault diagnosis^[95]

和优缺点进行了阐述。接触式测量方法主要基于电容分压原理，技术相对成熟，测量精度与可靠度较高，在变电站中应用较为广泛。但此方法中装置是与待测点直接连接的，安装和维修较为麻烦，并且长期运行可能存在潜在危险。其中基于电容、电阻分压和阻容分压的方法，由于技术相对成熟，已在变电站中运用较多。但杂散电容和温度对分压比造成影响以及暂态性差等问题仍需要进一步解决。基于一次电光效应的光学传感器具有宽频带、无源、体积小等优点，但存在静态工作点稳定性弱、光学偏置点难以控制、补偿结构复杂、成本较高等问题。非接触测量方法与一次设备无任何电气连接，不改变电网本身结构，因此安全系数较高，安装更换都比较方便。其中基于杂散电容分压原理的监测方法

由于相间耦合电容和杂散电容的影响, 测量准确度不足, 一般用在输电导线的过电压监测当中。将先进的光学测量技术和非接触感应电压技术相结合的方法实现了暂态过电压的安全无源非接触测量, 并且幅值和频率的测量范围较宽。基于 GIS 内置电极的感知方法中, 预埋电极法低压端电路安装相对简单, 且对一次设备基本无影响, 但只适用于带有预埋环的绝缘子, 并且频带受分压系统自身结构影响较大; 窗口式传感器法测量频带极宽, 满足 VFTO 全波段的测量要求, 其中低压臂电容外置以及加介质窗的结构稳定性高, 安装维护方便, 具有良好发展前景。基于泄漏电流测量电压的方法频带宽, 但由于其泄漏电流很小, 对电流传感器的精度要求较高, 同时易受信号处理电路噪声的影响, 难以保证精确度。

2) 其次, 本文基于不同宽频电压传感方法, 对其感知数据在电磁暂态防护中的应用现状进行了总结。基于监测获取的大量电压感知数据, 一方面可对导致电力系统发生故障的典型波形(包括雷击暂态电压和 GIS 中暂态电压)的特征参量进行长期统计学规律研究, 研究结果对电力设备暂态防护工作意义重大; 另一方面, 可获取变压器、电抗器、断路器等电力设备故障前遭受的宽频电压, 分析其产生机理和传播特性, 为提出合理的绝缘配合方案提供有效数据支撑; 最后, 基于上述暂态波形特征参量的提取和对设备暂态故障的分析, 分析比较了目前电力系统不同场景下的暂态故障防护研究成果, 对避免系统故障发生以及保证电网安全运行具有一定的指导意义。

3) 基于宽频电压传感器与一次设备共形植入融合技术, 总结了设备内部幅值高、携带频谱分量丰富的暂态信号在设备智能化中的应用, 主要利用自然暂态信号取代额外脉冲注入信号对电力设备状态进行监测, 包括线路故障定位、变压器和电缆绝缘诊断两部分, 此种做法保留了系统原始接线方式, 并且利用设备内部电气量对设备状态进行直接监测与评估, 实现了设备非侵入、无干扰、高精度的状态在线监测, 促进了设备智能化进程, 对构建智能电网具有深远的意义。

目前存在的问题及展望如下。

随着我国智能电网的加速建设, 对宽频电压感知方法的要求也不断提升, 要求其在传感耦合方式、无损传输、抗干扰能力、拓扑结构、宽幅值和宽频

带测量等方面具有鲜明的优势。综合上述对已投入使用的宽频暂态电压感知技术的分析和应用来看, 存在的问题主要集中在以下 6 个方面: 1) 输电线路暂态电压测量过程中, 接触式传感直接接触一次高压设备, 影响装置的运行安全和可靠性, 非接触式传感中杂散电容和相间干扰会增大耦合误差, 降低解耦精度; 2) 依赖于极化、振动和位移等新型耦合方式的电压传感器, 其频率响应特性存在一定的局限性, 难以实现对 VFTO、雷电等电压信号的全波段监测; 3) 温湿度、振动和电磁环境等因素会对光学电压传感器传感单元的工作特性产生影响, 带来较大测量误差, 目前缺乏成本低、结构简单并且有效的补偿单元; 4) 对基于光纤光栅等敏感元件的电压传感器来说, 其传感性能优异, 但调制和解调单元整体的固定封装问题是实现其现场安装和在线长期测量的一大难点; 5) 传感装置难以实现低成本、高性能与小型化微型化之间的平衡, 目前微纳、微机电系统(micro electromechanical system, MEMS)等技术的实用产品较少; 6) 宽频暂态电压感知的一次设备共形植入融合技术研究较少, 难以对设备状态进行全面、直接、有效的监测。

对上述问题的进一步研究和解决, 有助于提高宽频电压感知方法的可靠性, 加快处于研究和试验阶段的传感方法的实用化进程。为此, 亟需研发新型电压传感材料, 探索新的传感耦合机制和高精度解耦方法, 最终设计出新颖有效的传感拓扑结构, 使传感装置可以安全稳定地进行宽频暂态电压的在线测量, 并且能够保证结果的准确度和波形保真度。

最后, 针对宽频电压感知数据在电力系统电磁暂态防护和设备智能化中的应用情况, 本文有以下几点展望, 希望有助于推动智能电网的建设工作: 1) 为实现智能电网对暂态故障的预见、分析、隔离和自我恢复的功能, 需要建立广域、分布式电网深度全景信息实时采集的感知网络。其中对电压传感的要求最重要的两点就是体积和频率特性, 以便实现关键节点的分布式传感和各类电压的全覆盖传感。2) 面向未来电网对传感器低功耗、低成本和微型化的要求, 对电压传感器进行芯片级的集成、模块级的集成以及产品级的集成至关重要, 这需要新材料和新技术的研究作为支撑。目前微纳、MEMS 传感器具有体积小、重量轻、反应快、灵敏度高以及成本低等优点, 是传感器微型化的一大研究方向, 在未来必然会占据主要地位。3) 电力能源装备是电网

的核心部件, 设备故障往往会带来巨大的经济和社会损失, 建立设备内部分布式信息感知网络, 研究设计集量测、感知、信息融合为一体的智慧装备意义重大。4) 智能电网涉及电气、材料、微电子、光学、大数据与人工智能、信息通信等多个学科领域的交叉, 为实现系统自寻优、自校正、自愈的能力, 电网先进传感理论与技术、电力能源装备智能感知技术和基于感知信息的电网智能分析运行控制等方面是今后大力发展的方向和研究工作的重点。

参考文献 References

- [1] STRASSER T, ANDREN F, KATHAN J, et al. A review of architectures and concepts for intelligence in future electric energy systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(4): 2424-2438.
- [2] 张 瑶, 王傲寒, 张 宏. 中国智能电网发展综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(5): 180-187.
ZHANG Yao, WANG Aohan, ZHANG Hong. Overview of smart grid development in China[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(5): 180-187.
- [3] KHALID H, SHOBOLE A. Existing developments in adaptive smart grid protection: a review[J]. *Electric Power Systems Research*, 2021, 191: 1-15.
- [4] 范润生. 具备自愈能力的高压智能电网研究[J]. *通讯世界*, 2017(23): 161-162.
FAN Runsheng. Research on high-voltage smart grid with self-healing ability[J]. *Telecom World*, 2017(23): 161-162.
- [5] RABIE A H, SALEH A I, ALI H A. Smart electrical grids based on cloud, IOT, and big data technologies: state of the art[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2020, 12: 1-32.
- [6] FAHEEM M, FIZZA G, ASHRAF M W, et al. Data acquired by internet of things-enabled industrial multichannel wireless sensors networks for active monitoring and control in the smart grid industry 4.0[J]. *Data in Brief*, 2021(4): 1-12.
- [7] 杨 庆, 孙尚鹏, 司马文霞, 等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J]. *高电压技术*, 2019, 45(2): 349-367.
YANG Qing, SUN Shangpeng, SIMA Wenxia, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(2): 349-367.
- [8] 洪新春, 余银钢, 吴喜生. 配电网电磁式电压互感器运行故障分析及试验研究[J]. *电工技术*, 2020(20): 118-119.
HONG Xinchun, YU Yingang, WU Xisheng. Analysis and test research on operation fault of electromagnetic voltage transformer in distribution network[J]. *Electric Engineering*, 2020(20): 118-119.
- [9] BUDKA K C, DESHPANDE J G, THOTTAN M. Introduction to smart grids[M]. London, UK: Springer, 2014.
- [10] 罗易桥, 毛宇翔, 甘 黎. 变电站雷电侵入波过电压测量技术综述[J]. *电工文摘*, 2017, 302(6): 11-14.
LUO Yiqiao, MAO Yuxiang, GAN Can. Summary of lightning intrusion wave overvoltage measurement technology in substation[J]. *Electrician Abstracts*, 2017, 302(6): 11-14.
- [11] 司文荣, 傅晨钊, 赵丹丹, 等. 电网暂态过电压传感耦合技术述评[J]. *高电压技术*, 2016, 42(4): 1124-1141.
SI Wenrong, FU Chenzhao, ZHAO Dandan, et al. Review on sensors and measurement technologies used for transient over-voltage of power grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(4): 1124-1141.
- [12] 李振华, 赵 爽, 胡蔚中, 等. 高电压测量技术研究综述[J]. *高电压技术*, 2018, 44(12): 3910-3919.
LI Zhenhua, ZHAO Shuang, HU Weizhong, et al. Review of the study of high voltage measurement technology[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(12): 3910-3919.
- [13] 施 围, 邱毓昌, 张乔根. 高电压工程基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 92-118.
SHI Wei, QIU Yuchang, ZHANG Qiaogeng. High voltage engineering foundation[M]. Beijing, China: Mechanical Industry Press, 2006: 92-118.
- [14] 朱金龙, 张大伟, 李 政. 串联阻容分压器频率特性仿真[J]. *机电信息*, 2015(27): 53-55.
ZHU Jinlun, ZHANG Dawei, LI Zheng. Frequency characteristic simulation of series resistor capacitor voltage divider[J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2015(27): 53-55.
- [15] 李登云, 李 前, 李 鹤, 等. DCTV 阻容分压器热平衡条件下温度及传热特性分析与计算[J]. *高电压技术*, 2010, 36(4): 994-999.
LI Dengyun, LI Qian, LI He, et al. Calculating method for thermal equilibrium temperature of traditional DCTV[J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(4): 994-999.
- [16] 周 凯, 张 涛, 董秀成, 等. 基于电容分压的配电网过电压在线监测[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(21): 86-89.
ZHOU Kai, ZHANG Tao, DONG Xiucheng, et al. On-line monitoring of overvoltage in power distribution network based on the capacitance divider[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(21): 86-89.
- [17] 康 兵, 季龙三, 侯铁信, 等. 电容分压器在高压系统谐波测量中的应用[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(4): 164-167.
KANG Bing, JI Longsan, HOU Tiexin, et al. Application of capacitive voltage divider in measuring harmonics of high voltage system[J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2012, 30(4): 164-167.
- [18] 赵海翔, 杨海芳, 张源斌. 集中式电容分压器分压比稳定性的研究[J]. *高电压技术*, 1998, 24(2): 66-69.
ZHAO Haixiang, YANG Haifang, ZHANG Yuanbin. Study of stability of ratio of lumped capacitive divider[J]. *High Voltage Engineering*, 1998, 24(2): 66-69.
- [19] JAYARAM S, XU X Y. High-divider-ratio fast-response capacitive dividers for high-voltage pulse measurements[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000, 36(3): 920-922.
- [20] WANG H, ZHANG G, CAI X, et al. The electronic capacitive voltage transformers error characteristics research and parameter optimization design[C]// *Power & Energy Society General Meeting*. New York, USA: IEEE, 2009: 1315-1321.
- [21] KITAK P, TICAR I, PIHLER J, et al. Application of the hybrid multi-objective optimization methods on the capacitive voltage divider[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(3): 1594-1597.
- [22] LONG Z, LIU S, LI W, et al. Design and performance of a wideband precision capacitive divider for AC and impulse voltage measurement[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(11): 115007.
- [23] 兰海涛, 司马文霞, 姚陈果, 等. 高压电网过电压在线监测数据采集方法研究[J]. *高电压技术*, 2007, 33(3): 79-82.
LAN Haitao, SIMA Wenxia, YAO Chenguo, et al. Study on data acquisition of overvoltage online monitoring system of high voltage power grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(3): 79-82.
- [24] 文 艺, 李建明, 李 淳. 500 kV 电网过电压在线监测装置的设计与分析[J]. *电测与仪表*, 2013, 11(50): 92-95.
WEN Yi, LI Jianming, LI Chun. Design and analysis of overvoltage on-line monitoring device for 500 kV power grid[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2013, 11(50): 92-95.
- [25] MA G M, LI C R, QUAN J T, et al. Measurement of VFTO based on the transformer bushing sensor[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(2): 684-692.
- [26] 张 晋, 黄海波, 梁基重, 等. 用于过电压监测的变压器套管末屏电压传感器的研制[J]. *变压器*, 2011, 48(3): 43-46.
ZHANG Jin, HUANG Haibo, LIANG Jizhong, et al. Development of transformer bushing end shield voltage sensor for monitoring over-voltage[J]. *Transformer*, 2011, 48(3): 43-46.
- [27] 司马文霞, 兰海涛, 杜 林, 等. 套管末屏电压传感器响应特性研

- 究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 172-176.
SIMA Wenxia, LAN Haitao, DU Lin, et al. Study on response characteristic of voltage sensor mounted at the tap of transformer bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 172-176.
- [28] 李开成, 江德长. 光纤电压传感器在电力系统和电器设备中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2001(4): 45-46.
LI Kaicheng, JIANG Dechang. Application of optical fiber voltage sensor in power system and electrical equipment[J]. Instrument Technique and Sensor, 2001(4): 45-46.
- [29] 王益成. 电光效应光纤电压传感器及其在高电压测量中的应用[J]. 高电压技术, 1990, 16(3): 46-48.
WANG Yicheng. Fiber-optic voltage sensors for electro-optic effect and its application in high voltage test[J]. High Voltage Engineering, 1990, 16(3): 46-48
- [30] ABB Inc. Instrument transformers application guide[R]. Pennsylvania, USA: ABB Inc, 2009.
- [31] ABB Inc. OMU optical metering unit[R]. Pennsylvania, USA: ABB Inc, 2010.
- [32] SANDERS G A, BLAKE J N, ROSE A H, et al. Commercialization of fiber-optic current and voltage sensors at NxtPhase[C]// Proceedings of the 15th Optical Fiber Sensors Conference. Portland, USA, 2002: 31-34.
- [33] RAHMATIAN F, CHAVEZ P P, JAEGER N A. 138 kV and 345 kV wide-band SF₆-free optical voltage transducers[C]// Proceedings of the Power Engineering Society Winter Meeting. New York, USA, 2002: 1472-1477.
- [34] SANTOS J C, TAPLAMACIOGLU M C, HIDAKA K. Pockels high-voltage measurement system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 8-13.
- [35] KANOE M, TAKAHASHI G, SATO T, et al. Optical voltage and current measuring system for electric power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(1): 91-97.
- [36] SAWA T, KUROSAWA K, KAMINISHI T, et al. Development of optical instrument transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 884-891.
- [37] 赵一男, 张国庆, 王贵忠, 等. 220 kV 自愈式光学电压互感器研制[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1135-1141.
ZHAO Yinan, ZHANG Guoqing, WANG Guizhong, et al. Development of 220 kV self-healing optical voltage transducer[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1135-1141.
- [38] 肖智宏, 于文斌, 张国庆, 等. 一种提高光学电压传感器温度稳定性的方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 106-112.
XIAO Zhihong, YU Wenbin, ZHANG Guoqing, et al. A method to improve temperature stability of optical voltage sensor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 106-112.
- [39] 宋人杰, 李虹波, 王晓东. 一种新型光电式一体化电流电压互感器[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 73-76.
SONG Renjie, LI Hongbo, WANG Xiaodong. A new type of optical integration current and voltage transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 73-76.
- [40] FARNOOSH R, PATRICK P, CHAVE Z, et al. 230 kV optical voltage transducers using multiple electric field sensors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2): 417-422.
- [41] 刘汐敬, 杨德伟, 于佳. 准互易反射式光路补偿技术[J]. 光电工程, 2013, 40(9): 41-45.
LIU Xijing, YANG Dewei, YU Jia. Quasi-reciprocal reflective optical circuit compensation technology[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(9): 41-45.
- [42] 司马文霞, 韩睿, 杨庆, 等. 双晶体温度补偿型非接触式光学过电压传感器[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3465-3473.
SIMA Wenxia, HAN Rui, YANG Qing, et al. Contactless optical overvoltage sensor based on dual-crystal compensation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3465-3473.
- [43] CHEN S, WANG H, LIN D, et al. Research on characteristics of non-contact capacitive voltage divider monitoring system under AC and lightning overvoltages[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(5): 1-3.
- [44] LAWRENCE D, DONNAN J S, LEEB S, et al. Non-contact measurement of line voltage[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(24): 8990-8997.
- [45] CHEN S, WANG H, LIN D, et al. Research on a new type of overvoltages monitoring sensor and decoupling technology[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(5): 1-4.
- [46] ZHANG Z, LI W, SUO H, et al. Non-contact miniature lightning overvoltage sensor[J]. Ferroelectrics, 2019, 549(1): 184-194.
- [47] HAN R, YANG Q, SIMA W, et al. Non-contact measurement of lightning and switching transient overvoltage based on capacitive coupling and pockels effects[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 139: 93-100.
- [48] KUO W K, KUO J Y, WU C J, et al. Non-contact bias voltage measurement using the electro-optic probing technique[J]. Measurement Science And Technology, 2008, 19(8): 1-6.
- [49] WANG H, ZHUANG C, ZENG R, et al. Transient voltage measurements for overhead transmission lines and substations by metal-free and contactless integrated electro-optic field sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1): 571-579.
- [50] YANG Q, SUN S, HAN R, et al. Intense transient electric field sensor based on the electro-optic effect of LiNbO₃[J]. AIP Advances, 2015, 5(10): 1-10.
- [51] MURASE H, OHSHIMA I, AOYAGI H, et al. Measurement of transient voltages induced by disconnect switch operation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1985, 104(1): 157-165.
- [52] YAMAGATA Y, TANAKA K. Suppression of VFTO in 1 100 kV GIS by adopting resistor-fitted disconnecter[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1996, 11(2): 872-880.
- [53] 张博, 李成榕, 孙泽来, 等. 测量快速暂态过电压的宽带预埋环传感器的研制[J]. 高电压技术, 2011, 27(6): 1398-1404.
ZHANG Bo, LI Chengrong, SUN Zelai, et al. Development of broadband sensor using floating ring electrode embedded in a spacer for measuring VFTO[J]. High Voltage Engineering, 2011, 27(6): 1398-1404.
- [54] 徐海瑞, 李成榕, 张博. 宽频带窗口式 VFTO 测量传感器研究[J]. 现代电力, 2011, 28(2): 1-6.
XU Hairui, LI Chengrong, ZHANG Bo. The research on broadband window VFTO measuring sensor in GIS[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(2): 1-6.
- [55] 孙泽来, 马国明, 郭攀辉, 等. 采用内置探头结构的 1 000 kV 特快速暂态过电压测量用窗口式传感器设计[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1426-1433.
SUN Zelai, MA Guoming, GUO Panhui, et al. Design of a VFTO port hole sensor for 1 000 kV based on inner probe structure[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1426-1433.
- [56] 岳功昌, 刘卫东, 陈维江. 气体绝缘开关设备中特快速暂态过电压的全过程测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 18-27.
YUE Gongchang, LIU Weidong, CHEN Weijiang. Measurement methods of very fast transient overvoltage in gas insulated switchgear with complete process[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 18-27.
- [57] MA G M, LI C R, CHEN W J, et al. A reliable wide-bandwidth VFTO sensor based on surface-mounted devices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1839-1846.
- [58] MA G M, LI C R, CHEN W J, et al. Very fast transient overvoltage measurement with dielectric window[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2410-2416.
- [59] 胡泉伟, 黄海波, 袁鹏, 等. 基于罗氏线圈原理的 500 kV 电网过电压监测系统的研究[J]. 高压电器, 2011, 47(5): 59-64.
HU Quanwei, HUANG Haibo, YUAN Peng, et al. Overvoltage monitoring system for 500 kV power grid based on rogowski coil[J]. High

- Voltage Apparatus, 2011, 47(5): 59-64.
- [60] 杜林, 黄旭, 司马文霞, 等. 基于容性设备泄漏电流的电网电压分频测量方法分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1307-1312.
DU Lin, HUANG Xu, SIMA Wenxia, et al. Analysis on power grid voltage frequency measurement method based on leakage current of capacitive equipment[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1307-1312.
- [61] LEWIS W W, FOUST C M. Lightning investigation on transmission lines-II[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1931, 50(3): 1139-1146.
- [62] OKABE S, TAKAMI J, TSUBOI T, et al. Discussion on standard waveform in the lightning impulse voltage test[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2013, 20(1): 147-156.
- [63] 王士彬, 孙才新, 姚陈果, 等. 10 kV 配网内外过电压在线监测系统及其波形分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(6): 64-66.
WANG Shibin, SUN Caixin, YAO Chenguo, et al. The internal and external overvoltages on-line monitoring system for 10 kV distribution network and the waveform analyses[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(6): 64-66.
- [64] 周凯, 张涛, 董秀成, 等. 基于电容分压的配电网过电压在线监测[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 86-89.
ZHOU Kai, ZHANG Tao, DONG Xiucheng, et al. On-line monitoring of overvoltage in power distribution network based on the capacitance divider[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 86-89.
- [65] 司马文霞, 张焯竟, 杨鸣, 等. 某变电站 10 kV 系统实测雷电侵入波过电压幅值与波形特征统计分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 214-222.
SIMA Wenxia, ZHANG Huangjing, YANG Ming, et al. Statistical analysis of the amplitude and waveform characteristics of intrusive lightning overvoltages measured from the 10 kV system of a substation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 214-222.
- [66] 杜林, 李欣, 司马文霞, 等. 110 kV 变电站过电压在线监测系统及其波形分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 535-543.
DU Lin, LI Xin, SIMA Wenxia, et al. Overvoltage on-line monitoring system for 110 kV substation and its waveforms analysis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 535-543.
- [67] 陈维江, 李志兵, 孙岗, 等. 特高压气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压特性的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 38-47.
CHEN Weijiang, LI Zhibing, SUN Gang, et al. Experimental research on the characteristics of very fast transient overvoltage in ultra high voltage gas insulated switchgear[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 38-47.
- [68] SHU Y B, CHEN W J, LI Z B, et al. Experimental research on very fast transient overvoltage in 1 100-kV gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 458-466.
- [69] 丁登伟, 庞理声, 莫乔卫, 等. 水电站 GIS 特快速暂态过电压在线监测系统构建及监测数据分析[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 57-65.
DING Dengwei, PANG Lisheng, MO Qiaowei, et al. Construction of very fast transient overvoltage on-line monitoring system and data analysis for GIS in the hydropower substation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 57-65.
- [70] CHEN W J, WANG H, HAN B, et al. Study on the influence of disconnecter characteristics on very fast transient overvoltages in 1 100-kV gas-insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 2037-2044.
- [71] 司马文霞, 兰星, 杨庆, 等. 变电站实测雷电侵入波统计特性及测试分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 21-27.
SIMA Wenxia, LAN Xing, YANG Qing, et al. Statistical properties and test analysis of the measured lightning invasion waves in a substation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 21-27.
- [72] LIU H, KE W, HAN R, et al. Research and application of a non-contact optical voltage sensor for the monitoring of lightning and switching overvoltage in EHV power grid[C]// International Conference on Lightning Protection. Estoril, Portugal: IEEE, 2016.
- [73] HAN R, YANG Q, SIMA W, et al. Non-contact measurement of lightning and switching transient overvoltage based on capacitive coupling and pockels effects[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 139(10): 93-100.
- [74] WANG H, ZHUANG C, ZENG R, et al. Transient voltage measurements for overhead transmission lines and substations by metal free and contactless integrated electro-optic field sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1): 571-579.
- [75] 张照辉. 真空断路器投切 10 kV 并联电抗器过电压机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
ZHANG Zhaohui. Field experiments and overvoltage mechanism of switching 10 kV shunt reactors by vacuum circuit breakers[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2015.
- [76] 魏旭, 周志成, 谢天喜, 等. 真空断路器投入并联电容器的过电压分析及防护[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3193-3198.
WEI Xu, ZHOU Zhicheng, XIE Tianxi, et al. Analysis and protection against overvoltages caused by vacuum circuit breakers switching on shunt capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3193-3198.
- [77] 杜宁, 关永刚, 张景升, 等. 40.5 kV 真空断路器开断并联电抗器的现场试验[J]. 清华大学学报: 自然科学版. 2010, 50(4): 517-520.
DU Ning, GUAN Yonggang, ZHANG Jingsheng, et al. Field tests of 40.5 kV vacuum circuit breakers switching off shunt reactors[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(4): 517-520.
- [78] 关永刚, 唐琦雯, 刘卫东, 等. 40.5 kV 真空断路器开断并联电抗器时过电压的产生机制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 124-132.
GUAN Yonggang, TANG Qiwen, LIU Weidong, et al. Overvoltage mechanism of switching off shunt reactors for 40.5 kV vacuum circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 124-132.
- [79] 韩亚楠, 韩彬, 项祖涛, 等. 特高压空合空操过电压差异性及其抑制措施分析[J]. 智能电网, 2014, 2(11): 43-47.
HAN Yanan, HAN Bin, XIANG Zutao, et al. Analysis on the difference of switching overvoltage and suppression measures in UHV transmission lines[J]. Smart Grid, 2014, 2(11): 43-47.
- [80] 林集明, 王晓刚, 班连庚, 等. 特高压空载变压器的合闸谐振过电压[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 5-10.
LIN Jiming, WANG Xiaogang, BAN Liangeng, et al. Resonance overvoltage caused by energizing no-load transformers in 1 000 kV AC transmission system[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 5-10.
- [81] 杜宁, 关永刚, 张景升, 等. 40.5 kV 真空断路器开断并联电抗器的过电压防护[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 345-349.
DU Ning, GUAN Yonggang, ZHANG Jingsheng, et al. Protections of overvoltages caused by 40.5 kV vacuum circuit breakers switching off shunt reactors[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 345-349.
- [82] CHEN S, YANG Q, WEI G, et al. Suppression measures for overvoltage caused by vacuum circuit breaker switching off 10-kV shunt reactor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 540-548.
- [83] 庞军. 基于电压行波的输电线路故障定位方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009: 13-14.
PANG Jun. Study on transmission line fault location method based on traveling voltage wave[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2009: 13-14.
- [84] 杨林, 王宾, 董新洲. 高压直流输电线路故障测距研究综述[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 185-191.
YANG Lin, WANG Bin, DONG Xinzhou. Overview of fault location methods in high voltage direct current transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 185-191.
- [85] NAN P, CHENG M H, RUI L, et al. Asynchronous fault location

- scheme for half-wavelength transmission lines based on propagation characteristics of voltage travelling waves[J]. IET Generation, Transmission Distribution, 2019, 13(4): 502-510.
- [86] 丁登伟, 韩先才, 张鹏飞, 等. 基于暂态电压监测的特高压 GIL 故障定位方法及工程应用[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 1092-1099. DING Dengwei, HAN Xiancai, ZHANG Pengfei, et al. Fault location method and engineering application in UHV GIL based on transient voltage monitoring[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 1092-1099.
- [87] FENG D, ZENG X, PAN L. Research on multi-terminal traveling wave fault location method in complicated networks based on cloud computing platform[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 19-19.
- [88] LI Z W, ZENG X J, YAO J G, et al. Wide area traveling wave based power grid fault network location method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63: 173-177.
- [89] YANG Q, YIN L, LIU H, et al. Measurement of lightning-induced overvoltage in power distribution lines using ceramic-capacitor insulator[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(3): 788-795.
- [90] CODINO A, WANG Z, RAZZAGHI R, et al. An alternative method for locating faults in transmission line networks based on time reversal[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(5): 1601-1612.
- [91] RAZZAGHI R, LUGRIN G, MANESH H M, et al. An efficient method based on the electromagnetic time reversal to locate faults in power networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1663-1673.
- [92] MATIAS M, RUSCHETTI C R, ÁLVAREZ RAÚL E, et al. Power transformers monitoring based on electrical measurements: state of the art[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(12): 2805-2815.
- [93] LI Z, JIANG W, QIU L, et al. Research situation analysis of on-line detection technology for power transformer winding deformation[J]. Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, 2020, 13(6): 831-840.
- [94] 夏珩轶, 唐跃林, 杨华忠, 等. 暂态过电压检测电力变压器绕组匝间短路故障[J]. 电测与仪表, 2015, 52(12): 73-76. XIA Hengyi, TANG Yuelin, YANG Huazhong, et al. Detecting shorted turns failure on the windings of power transformer by transient overvoltage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(12): 73-76.
- [95] 姚陈果, 赵仲勇, 李成祥, 等. 基于暂态过电压特性的电力变压器绕组变形故障在线检测[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 873-880. YAO Chenguo, ZHAO Zhongyong, LI Chengxiang, et al. Online detecting winding deformation of power transformer based on transient overvoltage[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 873-880.
- [96] SUN J, YANG Q, SU P, et al. Diagnosis of winding fault in three-winding transformer using lightning impulse voltage[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 175: 1-9.
- [97] YANG Q, CHEN Y, HAN R, et al. Transient overvoltage response performance of transformer windings with short-circuit fault[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(10): 2265-2272.
- [98] SIDHU T S, XU Z. Detection of incipient faults in distribution underground cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1363-1371.
- [99] WANG W, YAN X, LI S, et al. Failure of submarine cables used in high voltage power transmission: characteristics, mechanisms, key issues and prospects[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2021, 15(9): 1387-1402.
- [100] FESSOL F N, MOHD A A, ILLIAS H A. Influence of underground cable insulation parameters on transient overvoltages[C]//Power Engineering & Optimization Conference. Langkawi Island, Malaysia: IEEE, 2013: 362-365.
- [101] 李露露, 雍静, 曾礼强, 等. 基于系统电力扰动的交叉互联电缆绝缘整体老化在线监测[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3396-3405. LI Lulu, YONG Jing, ZENG Liqiang, et al. On-line monitoring of insulation overall aging for cross-bonded cables based on system power disturbances[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3396-3405.
- [102] YONG J, LI L, XU W. On-line cable condition monitoring using natural power disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1242-1250.



YANG Qing
Ph.D., Professor
Corresponding author

杨庆(通信作者)
1981—, 男, 博士, 教授, 博导
长期从事电力系统过电压及其绝缘配合和复杂环境下输电线路外绝缘特性及放电机理的研究
E-mail: yangqing@cqu.edu.cn



DONG Funing

董富宁
1997—, 女, 硕士生
主要从事电力系统电流监测技术的研究
E-mail: 20191102111t@cqu.edu.cn



LUO Mandan
Ph.D.candidate

罗曼丹
1994—, 女, 博士生
主要从事电力系统电压电流监测技术研究
E-mail: luomandan@cqu.edu.cn



SUN Jian
Ph.D. candidate

孙健
1994—, 男, 博士生
主要从事电力系统过电压与配电线路故障定位方法研究
E-mail: jung@cqu.edu.cn



CUI Haonan

崔浩楠
1996—, 男, 硕士生
主要从事变压器高频模型及配电网故障定位研究
E-mail: 201811021047@cqu.edu.cn

收稿日期 2021-05-18 修回日期 2021-06-01 编辑 曾文君