DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20201729

高电压比例标准装置技术综述

雷 民,姜春阳,李登云,龙兆芝 (中国电力科学研究院有限公司,武汉 430074)

摘 要: 高电压比例标准装置是检定、校准高电压测量设备的关键装置,代表了高电压比例测量领域的最高测量 能力。为此,结合国内外高电压比例标准技术的发展现状,分别介绍了工频高电压串联互感器、高电压双级互感 器和有源分压器等工频高电压计量领域的最新研究进展,通过技术对比表明电磁式比例标准装置的最高应用电压 已突破1000 kV,具有高稳定性和高准确度的特有优势,已完全取代了传统电容式比例标准。基于直流比例标准 的溯源方法介绍了各国最高计量机构研制的直流分压器,指出电阻分压器仍是直流比例标准装置的首选,其结构 形式取决于所适应的溯源方法。接着介绍了弱阻尼分压器、电容分压器等冲击电压比例标准装置,分析表明冲击 电压的测量已从主标准装置的研究逐渐转变为低压侧高准确度冲击信号测量方面的研究,抗干扰、低不确定度是 主要挑战。最后对上述比例标准关键技术内容进行了分析,并对高电压比例标准技术研究未来的方向和趋势进行 了讨论。

关键词: 高电压计量; 溯源技术; 比例标准; 互感器; 分压器

Review of High Voltage Ratio Standard Devices Technology

LEI Min, JIANG Chunyang, LI Dengyun, LONG Zhaozhi (China Electrical Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: High voltage ratio standard device is key to calibrate the high voltage measurement devices, and represents the highest measurement ability in the field of high voltage ratio measurement. Consequently, based on the current development of the high voltage ratio measurement technology around the world, the research achievements in the power frequency high-voltage series instrument transformer, two-stage instrument transformer, and active voltage divider are introduced. The technology comparison indicates that the rated voltage of inductive voltage ratio standard has been higher than 1 000 kV, and the capacitive ratio standards have been replaced completely. Moreover, the direct current voltage standard dividers developed by different national metrology institutes are introduced based on the DC ratio traceability methods. It is pointed out that the resistive voltage divider is still regarded as the first choice, and the schematic and structure will be different based on the traceability methods. Furthermore, the pulse voltage ratio standard devices including low damped divider, capacitive divider are introduced, and the main research has been changed from main impulse voltage divider to accurate measurement of the voltage signal of divider, however, anti-interference and uncertainty are the major challenges. In the end, the development trend and the key technologies of high voltage ratio standard devices are discussed.

Key words: high voltage measurement; traceability technology; ratio standards; instrument voltage transformers; voltage divider

0 引言

高电压精密测量是伴随电力工业进步而发展 的一种测量技术。从其测量的波形类型来分,主要 包括工频、直流和冲击电压信号。为保证量值的准 确可靠,高压测量设备应通过高压计量标准装置进 行量值溯源,依据被测对象的不同,溯源的方式多 为检定或校准。以比例测量原理研制的高压标准装 置具有较高的测量准确度,通常作为本国的最高计 量标准被广泛应用。

1831 年,法拉第发现了电磁感应现象;1882 年,Ferrant 和 Thompson 在英国申报了最早的电磁 式互感器专利;1891 年,德国建成了当时世界上第 一条 13.8 kV 输电线路,高电压互感器的研究开始 起步。然而,受到分布参数的影响,互感器无法应

基金资助项目:国家电网公司科技项目(JL71-09-001)。

Project supported by Science and Technology Program of SGCC (JL71-09-001).

用于冲击电压信号的测量。1909年,Weiker进行了标准球隙测量电压的研究。由于标准大气压下空气的击穿场强是已知量,而球隙间的静电场可以用静电学公式计算,据此可以测量出被试电压的峰值。目前,球隙测量的方式仍被应用于对冲击电压的测量中。对于直流信号的测量,普遍采用的装置是电阻分压器,相比于电磁耦合原理和球型电场原理,分压器原理上相对简单。1937年,Sienknecht和Klinzmann研制出了3 MV的直流电阻分压器。随后的20世纪中期到90年代,是高电压精密计量技术发展的黄金时期,双级互感器、感应分压器、标准电容器和有源分压器等相继出现,电磁理论与精密测量技术也得到了极大进步。

随着电力科技的进步,当前工频电压比例标准 装置已达到1000 kV,准确度水平优于0.02%;直 流电压比例标准装置达到1000 kV,测量不确定度 优于0.005%;冲击电压比例标准装置最高测量电压 达到2400 kV,测量不确定度优于0.5%。高电压比 例标准技术领域也出现了一些新理论、新技术,本 文将对工频、直流和冲击电压比例标准装置发展中 经典的、先进的和最新的计量测试技术和方法进行 介绍和总结,并对高电压计量技术需要进一步开展 的研究进行了探讨。

1 工频电压比例标准技术

常用的工频电压比例标准装置主要有分压器 和互感器。电阻分压器用于工频高电压测量,易受 发热、电晕、泄漏和分布参数等因素影响,其作为 工频比例标准装置时,稳定性和准确度也均不理想。 为满足更高电压等级以及更高测量准确度的要求, 压缩气体电容器被广泛使用[1]。起初,气体电容器 主要被用于电磁式比例标准装置的溯源,后来研究 人员设计了由多种压缩气体电容器与电子电路结合 构成的有源分压器用于量值传递。有源分压器具有 结构简单、变比灵活的特点。目前德国联邦物理技 术研究院 (Physikalisch-technische Bundesanstalt, PTB)、美国国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)仍将有源分压器 用于电磁式标准装置的溯源和对外校准中[2]。不过 由于压缩气体电容器的电容量与电极的结构直接相 关和其对温度的敏感性,压缩气体电容器用于溯源 和校准时,需要每次都进行自校准或量值确认[3-4]。 互感器用作比例标准装置时主要是采用双级互感器

与感应分压器。采用双级结构的 10 kV 电压互感器 误差不超过 0.001%, 感应分压器准确度更高, 双级 结构时可达 10⁻⁷ 量级。但是受到原理和制造工艺的 限制, 双级高电压互感器的电压等级一直没有超过 35 kV, 直到近两年, 研究人员设计了对称布置的新 型铁芯绕组结构, 使双级互感器原理最高应用电压 达到了 500 kV。

1.1 串联式电压互感器

为了满足1000 kV 特高电压交流变电站现场电 容式电压互感器的检定需要,国家高电压计量站采 用串联式电压互感器结构,建立了我国1000 kV串 联式工频电压比例标准装置[5]。串联式电压互感器 原理如图 1 所示, T1 和 T2 为两台 500 kV 单级标准 电压互感器; T3 是一台隔离互感器, 通过 T3, T1 和 T2 互感器实现了二次串联; U1 和 U2 为一次电压 和二次电压。隔离互感器是该类串联型标准电压互 感器的关键部件[6-7],隔离互感器一、二次绕组间的 隔离电压为互感器整体工作电压的 50%,同时还需 保证一定的测量准确度。为满足绝缘要求,隔离互 感器的一、二次绕组不能像常规隔离互感器那样紧 密绕制在一起,需要保持一定绝缘距离。如图2所 示,一、二次绕组间呈现了较大漏磁,引起误差。 为了减小该误差,通常在隔离互感器一次绕组上串 联电容器,抵消漏感。由于该类型互感器采用串联 式结构,将单台互感器1000kV的绝缘设计要求降 低至 500 kV,减小了设计难度。同时两台设备可拆 开运输,提高了使用的便捷性,上下两级互感器可 独立工作,现场可相互校准,保证了现场检定校准 工作量值的准确可靠。不过由于采用了电容来补偿 隔离互感器一次漏感, 电容器的电容量难以长期保 持稳定,标准测量装置还需要进行定期核查。1000 kV 串联式标准电压互感器如图 3 所示,整体准确度 等级达到 0.02 级[8-10]。





Fig.1 Principle of series voltage transformer (VT)



图 2 隔离互感器原理

Fig.2 Principle of isolation VT



1.2 高电压双级电压互感器

双级互感器原理由 H. B. Brooks 于 1922 年提 出^[11],最早应用于双级电流互感器,后来文献[12] 对其进行了改进。R. D. Cutkosky 在 1964 年首次提 出双级电压互感器^[13]。1968 年,英国国家物理实验 室(National Physical Laboratory, NPL)的 T. A. Deacon^[14]全面剖析了双级电压互感器原理及结构,如 图 4 所示,图中 N₁ 为励磁绕组,N₂和 N₄ 为比例绕 组,N₃ 为励磁绕组,C₁和 C₂ 分别为第一、二级铁 芯。 \dot{U}_1 和 \dot{U}_2 为一次绕组电压和二次输出电压, \dot{I}_2 为 第二级互感器励磁电流, \dot{I}_1 为第一级互感器励磁电 流,由于主要的励磁电流 \dot{I}_1 由高电压侧提供,故称 之为高电压励磁。

双级电压互感器的绕组工序一般是在主铁芯 上先绕制一次励磁绕组,接着安装第二级铁芯,再 绕制二次比例绕组,最后绕制一次比例绕组。这种



图 5 新型绕组结构的高电压双级互感器 Fig.5 New structure of two-stage VT

绕组结构下,一次励磁绕组与一次比例绕组将存在 较大电位差,同时一次励磁绕组的高压引线需穿过 比例绕组,在有限的空间内,两绕组的物理绝缘较 难处理。同时, 受绕组间分布电容的影响, 通过分 布电容的泄漏电流流入绕组,进而产生容性误差, 此前双级电压互感器的最高应用电压仅为 35 kV^[15-17]。为研制更高电压等级的双级电压互感 器,国家高电压计量站提出一种新型铁芯绕组布置 结构[18-19],如图5所示。与传统双级电压互感器不 同的是, 励磁绕组与比例绕组被分置于矩形铁芯两 端,并没有采用内外绕制的形式。第二级铁芯放置 于比例绕组一侧,这种设计避免了低压双级互感器 中比例绕组和励磁绕组内外绕组带来的绝缘与容性 泄漏问题。为了降低设备的整体高度,采用无套管 设计,如图6所示。将铁芯绕组全部放置于环氧外 筒内,内部充 SF6气体,并在铁芯绕组外采用金属 外屏蔽罩,减小外部环境的影响。研制出的 500 kV 双级电压互感器, 20%~120%额定电压范围内比值 误差为-6×10⁻⁶~1×10⁻⁶,相位误差为-6~-1 μrad。 不过该类型标准装置生产加工工艺较为复杂,整体 体积、质量较大,并不适合现场使用。

1.3 有源电容式电压比例标准装置

将压缩气体电容器与大容量固体电容串联,后 端配备电子单元即构成最基本的有源分压器^[20]。经 典结构的有瑞士哈弗莱(HAEFELY)生产的电子式 标准分压器 4860 和加拿大测量国际(Measurements International, MI)的 2500A 系列电流比较仪型电容 分压器。

如图 7 所示 HAEFELY 电子式标准分压器 4860 结构原理,前端采用高低压气体电容器串联,后端 采用高电压电压跟随电路并配合比例标准装置部分 实现多变比输出。Ca为高压臂电容器,Cb为低压臂 电容器,Uout 为经电子单元调理后的输出电压。该 原理的分压器要求后端电子单元具有较高的输入阻 抗,后端电子单元的输入阻抗对整体分压比的影响 可以简单理解为低压臂阻抗与电子单元输入阻抗的 比值。对于 10 nF 的低压臂电容,后端电子单元的 输入阻抗若为 10 GΩ,则连接电子单元后,其输入 阻抗影响约为 0.0032%,4860 标准分压器的电子单 元可实现 1 010 V 电压的直接输入,输入阻抗 10 GΩ,故其标称测量准确度为 0.005%~0.01%^[21]。

MI 公司生产的电容分压器如图 8 所示, U1 为 输入电压, U₂ 为输出电压, U_D 为检测电路输出电 压。Np1、Ns1、Ns2和 ND 分别为电流比较仪的一次 绕组、二次绕组 1、二次绕组 2 和检测绕组, Ci为 一次电流转换为电压用电容器, Ri、Rc、Rs1 和 Rs2 分别为检测绕组电流电压变换电阻、补偿电阻、增 益电阻1和增益电阻2该分压器基于电流比较仪原 理,通过电子线路驱动低压臂电容 CL 电流与高电压 侧 C_H 电容电流在比较仪中达磁势平衡,此时输出 电压与一次高电压比例与高低压臂电容器比例相 同[22]。该原理的分压器,消除了对于电子单元输入 阻抗的要求,在电路达到平衡时,图8中所有使用 的电路元件的准确度将不影响施加在 CL 和 CH 上电 压的比值,输出测量准确度取决于 CL 和 CH 稳定性。 产品中 CL 使用的是由殷瓦合金制作的低标准电容 器,具有极低的温度系数和电压系数。MI2502A的 测量准确度可达到 0.003%和 30 µrad^[23]。

PTB基于有源电流电压转换原理研制了一台电 子式电容分压器,如图9所示,图中高电压臂电容 电流流入低压电路,低压电路采用多层陶瓷电容作















Fig.8 Schematic of MI 2502A capacitive voltage divider





为低压采样单元,分别设置了 C_{L1} 到 C_{L17}共 17 组电容器,通过切换不同的电容器并联组合,可获得不同的输出电压,即不同的分压比,<u>U</u>out为输出电压, *R*_B和C_T分别为直流增益电阻和交流阻抗倍增电容, L_o和 G_p分别为地电位连接点和功率增益器件。该 方案可以有效地消除测量电缆对地电容对分压器量 值的影响。PTB 将其应用于不同电压等级的电磁式 电压互感器的溯源当中,测量不确定度小于 1×10⁻⁶ (*k*=2),其中 *k* 为不确定度扩展因子^[24]。

前述 3 种电容分压器结构的特点是采用压缩气体电容器作为高压臂元件,主要绝缘由高电压臂气体电容器承担。这种分压器能较为方便地实现不同的电压等级,并具有很好的相位特性,因此由压缩气体电容器构成的分压器常被用于变压器、电抗器等低功率因数下效率、损耗的测量。但由于采用了电容器作为分压元件,受到温度和电压系数的影响,相比于电磁式电压比例标准装置,分压器的长期稳定性稍差,在作为工作标准装置使用时,电容式分压器需要"即校即用",在低压下完成其分压比的校准,并使用该分压比开展高电压下的误差测量。

2 直流电压比例标准技术

与工频电压不同,世界各国的国家计量院几乎 均用直流电阻分压器作直流电压比例标准装置。直 流电阻分压器的原理如图 10 所示,图中 *R*h和 *R*l分 别为直流分压器的高压臂电阻和低压臂电阻。

直流电阻分压器的分压比量值 *k*_{DCV}, 按式(1) 计算

$$k_{\rm DCV} = \frac{U_1}{U_2} \tag{1}$$

直流电阻分压器在施加不同电压时,由于受电 阻阻值变化、泄漏电流等因素的影响,分压比量值 会不同,分压比随电压变化而发生的相对变化量用 分压比的电压系数表示。

而在研制直流分压器时,其主要结构一般与将 采用的溯源方法有关。作为国家最高标准,各国计 量机构均会设计和开发适合自身技术能力的自校准 方法,相应设计的直流分压器在结构上便会有差异。

2.1 基于评估法确定量值的直流分压器

评估法是通过定量分析不同电压下被测分压器的阻值变化、泄漏电流和电晕电流等因素对分压比的影响,评估出被测分压器全电压下的分压比电压系数,从而得到被测分压器全电压下的分压比。



Fig.10 Schematic of DC voltage divider

在电压等级较低时,分压器所用电阻数量较 少,可以通过试验测试分压器中每个电阻的温度系 数、电压系数等关键参数指标,然后依据测试结果 评估出分压器整体的阻值变化情况及对分压比的影 响。通过电路分析、电场仿真等理论方法可以分析 出泄漏电流和电晕电流等对分压比的影响。在电压 等级较低时,由于绝缘旁路数量少,而且绝缘电阻 远大于分压器阻值,因此泄漏电流对分压比的影响 很小,采用评估法时一般将泄漏电流的影响作为高 阶小量忽略掉。同样的,由于电压等级低,而且分 压器采用了多种均压措施,因此分压器几乎没有电 晕电流,采用评估法时一般将电晕电流的影响也作 为高阶小量忽略掉。

各国的国家计量院在 10~100 kV 电压等级范围 内一般使用评估法对分压比进行量值溯源,也有极 少数国家的国家计量院在 300 kV 电压等级也使用 评估法。日本某电工实验室研制的 10 kV 直流电阻 分压器,采用评估法获得了 10 kV 下的分压比,不 确定度为 5.8×10^{-7[25]};美国国家标准局研制的 10 kV 直流电阻分压器,采用评估法获得了 10 kV 下的分 压比,不确定度为 2×10^{-7[26]};英国国家物理实验室 研制的 100 kV 直流电阻分压器,采用评估法获得了 100 kV 下的分压比,不确定度为 5×10^{-6[27]}。

PTB 制的 100 kV 直流电阻分压器,结构如图 11 所示。分压器由经过老化处理的精密线绕电阻串 联而成,放置在充满 SF6 气体的屏蔽外壳内。由于 电阻本身的温度系数和电压系数很小,而且还有温 度调节装置使屏蔽外壳内部的温度保持恒定,因此 当分压器上施加的电压升高到工作电压时,分压器 电阻的阻值变化很小。同时采取在分压器测量电阻 的外侧安装屏蔽电极、用聚四氟乙烯棒做测量电阻 的绝缘支撑等措施减小电晕电流和泄漏电流。采用 评估法获得了分压器在 100 kV 下的分压比,不确定 度达到了 2×10-6[28]。

德国联邦物理技术研究院还研制了 300 kV 直 流电阻分压器,采用评估法获得了 300 kV 下的分压 比,不确定度达到了 2.8×10^{-5[29]}。

在电压等级较低(不超过 300 kV)时,由于电晕 电流和泄漏电流很小,分压比的电压系数主要是由 分压器电阻的阻值变化引起的。在这个电压等级下, 采用评估法是适用的。随着电压等级逐渐升高,防 止分压器起晕的难度越来越大,而且电压等级越高, 电阻数量就越多,绝缘支架旁路的数量也越多,泄 漏电流会逐渐增大,电晕电流和泄漏电流将成为影 响分压比电压系数的主要原因。用评估法很难评估 出电晕电流和泄漏电流对分压比的影响量,因此更 高电压等级下的分压比溯源需要采用其他方法。

2.2 采用泄漏电流法溯源的直流分压器

泄漏电流测量法是通过测量被测分压器的输入电流值和输出电流值,得到被测分压器的泄漏电 流值。根据泄漏电流的大小,确定出被测分压器全 电压下的分压比电压系数,从而得到被测分压器全 电压下的分压比。

澳大利亚国家计量研究院(National Measurement Institute Australia, NMIA)研制的 150 kV 分压 器被加拿大、日本、韩国、泰国、新加坡等多个国 家选作直流电压比例标准器^[30],其外形如图 12 所 示。分压器只有测量层,测量电阻呈螺旋形从上至 下排布,露置在空气中利用空气散热,单只测量电 阻外使用金属屏蔽罩以防止电晕。

将多节150 kV 分压器串联后,可以作为更高电 压等级的分压器使用。图13 就是由7节150 kV 分 压器串联起来的1000 kV 分压器^[31]。

分压器使用的是电压系数和温度系数都很小 的高稳定度高压精密电阻,并且经过筛选、匹配, 使分压器在不同电压下的整体阻值变化量接近于 零,同时,通过电场优化设计,减小电晕电流,使 得电晕电流对分压比的影响可以忽略,因此认为, 该分压器的分压比变化主要是由泄漏电流引起。

用 2 个采样电阻和 2 块数字电压表组成泄漏电 流测量系统: 2 个采样电阻分别串联在分压器的高 压端和接地端, 2 块数字电压表分别测量这 2 个采 样电阻上的电压值,其中进行高压端测量的数字电 压表始终工作在高电位。根据 2 个采样电阻的阻值 和 2 块数字电压表测量的电压值,可以计算出分压 器的输入电流和输出电流,通过式(2)可以得到分压



图 11 PTB 研制的 100 kV 直流分压器 Fig.11 100 kV DC voltage divider developed by PTB



图 12 NMIA 研制的 150 kV 直流分压器 Fig.12 150 kV DC voltage divider developed by NMIA



图 13 NMIA 研制的 1 000 kV 直流分压器 Fig.13 1 000 kV DC voltage divider developed by NMIA

器因泄漏电流影响而引起的输出电压相对变 化量。

$$\Delta V/V = \left(\frac{I_{\text{out}} - I_{\text{in}}}{2}\right) / I_{\text{out}}$$
(2)

式中: Δ*V/V* 为分压器的输出电压相对变化量; *I*_{out} 为分压器输出电流; *I*_{in} 为分压器输入电流。单台 150 kV 分压器在低电压和工作电压下的输出电压 相对变化不超过 5×10⁻⁶;由 7 节 150 kV 分压器串联 而成的 1 000 kV 电阻分压器,在低电压和工作电压 下的输出电压相对变化则达到了 10⁻⁴。澳大利亚国 家计量研究院将 150 kV 分压器与德国联邦物理技 术研究院的 100 kV 分压器进行比对,结果显示分压 比的相对偏差小于 2×10^{-6[32]}。

与评估法只对泄漏电流进行理论分析计算相 比,泄漏电流法通过试验测量获得了分压器的泄漏 电流大小,然后根据测量结果评定出泄漏电流对分 压比电压系数的影响。因此泄漏电流法相比于评估 法,更适用于分压比受泄漏电流影响较大的高电压 等级下分压比电压系数的评定。但是泄漏电流法在 评定泄漏电流对分压比电压系数的影响时,限定范 围过大,导致在1000 kV 电压下的分压比溯源准确 度偏低,而且对电晕电流的影响仍然是通过评估的 方式确定。

2.3 采用直流电压加法溯源的直流分压器

直流电压加法^[33]是通过直流电压加法试验的 测量结果,确定出被测分压器全电压下的分压比电 压系数,从而得到被测分压器全电压下的分压比。

文献[34]中对电压加法试验过程给出了详细介 绍,使用2只可以串联使用的辅助直流分压器,分 别对主分压器在 U/2 电压下进行2次测量(U表示施 加的直流电压大小),串联使用时再在 U 电压下进 行1次测量,便可计算得到主分压器 U/2 到 U 电压 的分压比误差变化的电压系数。

需要指出的是,2只辅助直流分压器串联使用 时承受的总电压虽然为U,但是每只辅助直流分压 器承受的电压为U/2,与辅助直流分压器单独使用 时承受的电压U/2相同。因此在整个加法试验过程 中,辅助直流分压器的工作电压并未改变,因此辅 助直流分压器的误差可以认为是不变的。

中国国家高电压计量站采用直流电压加法研制了1000 kV 直流标准分压器^[35],结构如图 14 所示。直流高电压通过高压导电杆施加到测量电阻层和屏蔽电阻层;绝缘内筒为有机玻璃筒;绝缘外筒为环氧玻璃纤维缠绕绝缘筒,外部没有伞裙,内部充氮气,上部和下部带有金属法兰,以便于安装;

散热外筒和盖板在绝缘外筒的顶部,散热外筒的外 表面和盖板的内表面带有环形散热片;底盘在绝缘 外筒的底部;主均压环和辅均压环安装在分压器的 顶部,辅均压环靠上,主均压环靠下。

图 15 为1000 kV 直流标准分压器和 2×500 kV 辅助标准分压器。图中,1为1000 kV 主标准,2 为500 kV(上节)辅助标准和500 kV(下节)辅助标准 的串联。

使用直流电压加法溯源得到主分压器从 100 kV 到 1 000 kV 的分压比,不确定度为 5×10⁻⁵。直流电 压加法也是一种基于试验测量的分压比溯源方法。



图 14 1 000 kV 直流标准分压器的结构





图 15 1000 kV 直流标准分压器和 2×500 kV 辅助标准分压器 Fig.15 1000 kV DC standard voltage divider and 2×500 kV auxiliary standard voltage divider

与泄漏电流测量法相比,直流电压加法的溯源准确 度更高,而且对分压比电压系数的评定更加全面, 能够综合体现电阻元件的阻值变化、泄漏电流、电 晕电流等对分压比电压系数的影响。

综上所述,评估法、泄漏电流法和直流电压加 法的适用范围及优缺点如表1所示。

3 冲击电压比例标准技术

冲击电压的测量技术起源于 20 世纪 30 年代。 为了模拟雷击电压信号,通过电容充放电的形式产 生冲击电压信号,并开始研究冲击电压的测量技术, 开展电气设备绝缘耐受试验^[36]。对于冲击电压,可 使用球隙测量。利用球隙 50%击穿电压测量冲击电 压^[37],测量电压分散性为 3%。为进一步提高测量 准确度,开始研制冲击电压测量装置。冲击电压测 量装置包括将高压冲击信号转换为可供测量仪器测 量的低压冲击信号的分压装置,以及将低压信号进 行二次分压并转换为数字信号的测量仪器。1980 年 前主要使用模拟示波器来测量冲击电压信号,并手 动计算波形参数。随着测量仪器的技术进步,目前 数据采集单元可直接将模拟信号转换为数字信号, 与计算分析软件配合实现冲击波形的自动测量,可 直接读取波形参数^[38]。

3.1 电阻型分压器

电阻型分压器是一种应用非常广泛的冲击电 压分压器类型,其优点为良好的响应特性以及极低 的温度系数,可保证其分压比的稳定性。杂散电容 是影响电阻分压器高频响应特性的主要因素^[39],电 阻分压器的额定电压越高,体积越大,电阻值越大, 响应特性越差,另外额定电压越高引起电阻丝发热, 也会导致阻值变化,因此电阻型分压器的额定电压 一般小于1500 kV,高压臂阻值小于20 kΩ^[36]。

电阻型冲击电压分压器按照结构可分为集中 式电阻分压器和分段式电阻分压器,如图 16 所示。 图 16(a)为集中式的电阻分压器,为改善冲击电压分 压器的高频响应特性,将集中的绕线高压电阻置于 绝缘内筒上以减小电阻对地杂散电容值,从而大幅 减小分压器的响应时间。由于对地杂散电容非常小, 因此不需要增加高压均压环进行电容补偿。为了均 匀分压器内部电场,电阻两端需要设计均压环,因 此电压等级越高,分压器的直径和体积越大,一般 来说集中式电阻分压器的额定电压不大于1000 kV。 图 16(b)为分段式电阻分压器,其高压电阻贯穿整

表1 三种方法的比较

Table 1	Comparison	of the three	methods
---------	------------	--------------	---------

名称	适用范围	优点	缺点
评估法	300 kV 及 以下	试验简单	是一种评估的方法,难以试 验验证,不适用高电压等级
泄漏电 流法	100 kV 及 以上	通过试验测量了 泄漏电流的影响	准确度偏低,电晕电流的影 响仍需通过评估
直流电 压加法	100 kV 及 以上	通过试验测量了 分压比电压系数	需要辅助标准分压器



个分压器高度,直径小,电压等级的限制主要为电 阻丝自身的绝缘,缺点是高压电阻的高度高,对地 杂散电容大,需要在高压段增加均压环对对地杂散 电容进行补偿。日本 Harada 研制的标准电阻分压器 就是采用的该结构^[40],为了改善分压器的高频特 性,将高压电阻进行分段,从高压端到地端,相同 长度的电阻值逐渐减小。

电阻型冲击分压器对冲击电压源来说为大负载,它的接入将大幅降低发生器的输出电压效率。 电阻型冲击分压器主要用于测量陡波、雷电截波以 及雷电全波等多种冲击电压,但由于电阻的热容量 限制,电阻分压器一般不适用于全波等长持续时间 的冲击电压测量。

3.2 弱阻尼电容分压器

弱阻尼电容分压器为目前最广泛使用的冲击 分压器类型。高压臂结构为多组油纸绝缘的脉冲电 容器和绕线高压电阻传感串联而成。该类型冲击分 压器的额定电压从数千伏至7500 kV,电压等级越 高,设备体积越大,阶跃波响应时间越长,一般高 压阻容分压器的阶跃响应时间为100~200 ns,高压 电容的温度系数一般为2×10⁻⁴ K⁻¹ 左右,受温度变 化的影响较大;阻容分压器的输出侧电缆的折反射 将在输出波形上叠加高频振动。因此动态特性、温 度变化的影响、长电缆匹配是制约冲击电压分压器 测量误差的主要影响因素。典型冲击电压分压器的 高压电阻约为 200~400 Ω,高压电容约为 400 pF, 时间常数约为 100 ns^[41]。由于冲击电压的传导过程 可等效为行波,因此增加高压臂的串联单元数可减 小分压器的阶跃响应时间^[42]。

PTB研制1000 kV 弱阻尼分压器作为德国国家 冲击标准分压器^[42],如图 17 所示,其高压电容为 150 pF,高压电阻 350 Ω。高压臂分为2个模块, 每个模块为20个高压陶瓷电容和高压电阻的串联。 中国电科院研制的2400 kV 弱阻尼分压器,作为线 性度校准标准装置,其高压臂由4个模块串联而成, 每个模块包括6个阻容串联结构。单位阻容串联结 构的高压电容为100 kV杂散电感小于40 nH的油纸 绝缘脉冲电容器,高压电阻为温度系数小于 1×10⁻⁵ K⁻¹的卡马丝绕制而成。

阻容型冲击分压器对于冲击电压源来说为轻 负载,发热非常小,电压等级高,适用于雷电全波、 操作全波等多种冲击电压波形的测量。但由于方波 响应时间较长,故不适用于波前截断的冲击电压波 形测量^[43]。

3.3 基于标准电容器的电容分压器

1980年前后,清华大学戚庆成、德国 A.Schwab 就开始研究使用标准电容器测量冲击电压波形的可 行性^[44]。作为工频电压标准器,高压标准电容器的 电压系数<3×10⁻⁵V⁻¹、温度系数<1×10⁻⁵K⁻¹,具有 极高的稳定性,且理论上高压电容量不随频率的变 化而变化。由于一般压缩气体标准电容器的电极系 统位于装置的上部,故高压电容和低压电容之间长 度较长的测量电缆会在测量波形上叠加高频振荡, 从而引起较大的测量误差。

图 18 为中国电科院研制的 1 200 kV 基于正立 式标准电容器的电容分压器的电路原理图^[45-46]。高 压标准电容器的电极系统位于装置的底部,置于屏 蔽壳体内部。电极系统通过支撑绝缘子稳固安装在 壳体上,以减小振动以及电场力对电容量的影响。 分压器采用双阻尼抑制技术,高压端阻尼电阻 *R*_{d1} 置于高压端用于阻尼分压器高压杂散电感引线引起 的振荡,取值为 200 Ω。低压端阻尼电阻 *R*_{d2}位于高、 低压电容器之间,用于阻尼电容器内部高压导杆的 杂散电感引起的振荡,取值为 50 Ω。*R*_k为匹配电阻,



(a) PTB 1 000 kV 分压器
 (b) 中国电科院 2 400 kV 分压器
 图 17 弱阻尼分压器
 Fig.17 Low damped voltage divider



图 18 基于标准电容器的阻容分压器 Fig.18 RC divider based on standard capacitor

用于匹配同轴电缆的波阻抗,取值为 50 Ω。M 为高 速数字记录仪 PXI-5124,S 为数字记录仪的屏蔽机 箱,双屏蔽电缆的外层屏蔽连接在机箱上,以消除 共模干扰。图中, *R*_{d1}、*R*_{d2} 为阻尼电阻,*C*_H 为高压 电容,*C*_L 为低压电容,C 为测量电缆。

分压器的刻度因数可根据式(3)计算

$$F = \frac{C_{\rm H} + C_{\rm L} + C_{\rm C}}{C_{\rm H}} \tag{3}$$

式中, Cc 为测量电缆电容。CL 和 Cc 可使用高精度 阻抗分析仪测量。

基于标准电容器的电容分压器抗干扰能力强, 不受外界带电体的影响,且测量电压范围覆盖工频 电压至冲击电压。缺点是受高压标准电容器自身体 积的影响,分压器的额定电压较低,高频特性受高 压电容量的影响。

综上所述,标准测量系统电压较低,一般在 1000 kV 左右,对于更高电压等级的冲击分压器的 校准,标准规定除了进行刻度因数校准外,还需进 行高压端线性度试验。对于线性度的测量方法,主 要包括与冲击电压发生器的充电电压的比较和与电 场测量仪的比较。其中与发生器充电电压比较的方 法的应用较为广泛,该方法的优点是:1)方法简单 方便,无需拆卸设备,试验时间较短:2)目前冲击 发生器制造技术日益成熟,使冲击电压发生器的自 身稳定性和可靠性大幅提高,这是该方法得以实施 的基础。缺点是测量结果与冲击电压发生器自身的 性能有直接关系,因此试验前需对冲击电压发生器 进行性能评估。而在使用电场测量仪进行线性度试 验前,需要先使用标准冲击测量系统对电场测量仪 的刻度因数进行实时校准,以确定最合适的布置位 置。该方法的优点为:布置简单、校准方便,不受 电压等级的限制,理论上可校准所有不同电压等级 的冲击电压分压器:缺点为:直接置于空间中,受 电晕、空间电磁场干扰影响大,构建稍不均匀场可 大幅度提高校准准确度,并减小电磁场干扰的影响。 电场测量仪的自身的线性度不能忽略时,校准结果 需进行修正。

4 发展与展望

高电压比例标准技术的进步与电力工业的发展息息相关。从测试的条件看,高电压比例标准装置的校准能力在过去 20 年的发展中主要集中在测试电压的不断提升,这与我国超特高电压电网的建设直接相关。

随着近年来电力系统中电力电子设备的大量 应用,建立更高频率交流电压比例标准装置成为趋势^[47]。在我国 GB/T 14549—93《电能质量公共电网 谐波》中,对互感器谐波测量的误差要求为比值差 <5%,相位误差<5°;GB/T 20840.8—2007 《电子 式电流互感器》中,对电子式互感器的谐波功率测 量准确度也提出了要求,最高至 13 次谐波时,比值 差<20%,相位差<20°;GB/T 17215.302—2013《交 流电测量设备特殊要求第2部分:静止式谐波有功 电能表》要求电能表对于不同谐波次数电能的计量 误差不超过 21.15%。而针对高电压计量设备的谐波 计量特性测试并未建立有国家电压比例标准装置, 在测试中常采用多种形式的分压器开展。未来谐波 电能作为法治计量的管理范畴时,则必须建立具有 宽频带测量能力的交流电压比例标准装置。

随着国防科研、航空航天领域尖端科学研究的 不断深入,对应用于这些领域中的直流电压测量准 确度的要求也越来越高^[47]。例如脉冲功率驱动的电 磁发射,发射曲线与电源的充电电压有直接关系, 其直流电压的准确与否直接决定了电磁炮的打击精 度。例如高能物理领域里面的粒子加速器,也需要 直流高电压测量准确性来保证。未来在满足直流电 网建设电压等级不断提升的需求的同时,不断提升 直流高电压的测量准确度仍然是主要发展方向。

对于传统的冲击电压标准测量装置,由于冲击 电压试验测量装置的电压等级不断提升,未来的发 展主要体现在额定电压的提升以及不断减小的测量 不确定度^[48]。另外根据现场校准环境的不同,对工 作标准测量装置的复杂环境适应性提出了更高的要 求,研制标准装置要考虑测量装置的可靠性和抗干 扰能力,使用光纤或者无线传输数据。随着测量技 术以及数据采集、传输技术的不断发展,基于电场 效应的冲击电场测量仪等也可作为分压器标定高电 压端线性度的标准装置。

最后,与所有计量技术一样,高电压电压比例 标准技术一直不断地向更稳定、更准确以及量值复 现更简单的方向发展。近些年来出现了光学原理的 电子式电压互感器,具有较高的测量频带,但在准 确度和稳定性方面还无法取代传统电磁式、电容式 比例标准装置。而量子技术更多的是解决基础量值, 或者说某个绝对量基标准的高准确度量值复现的问 题,但尚无比例标准量子化的方案。不过将传统电 磁测量技术与现代化电子技术结合已变成一种趋 势,有源分压器以及各种新型传感器就是最典型的 代表。随着高电压比例标准准确度的提高,也带动 了误差校验技术的进步。如基于美国国家仪器公司 的高端数字化测量设备以及高精度8位半数字多用 表的比例误差测量设备,可达到10-9量级的测量分 辨率,也很大程度上反向促进了高电压比例标准测 量准确度的提升。

5 结论

1) 工频电压比例标准装置方面,采用了将 2 台独立电压互感器经精密隔离互感器串联的技术方 案,已建立我国 1000 kV 电压比例标准,原理上该 方案可向更高电压拓展。采用对称布置的新型铁芯 绕组结构,双级电压互感器的最高应用电压提升至 500 kV,准确度等级优于 0.001%。将有源电子线路 与压缩气体电容器结合,可实现多种电容式分压器, 具有变比灵活,频带宽的特点。目前我国工频电压 比例标准仅开展 50 Hz 频率下的测试,就交流信号 而言,电力系统电能计量、信号采集等对更高频率、 至少包含到 50 次谐波的电压信号的测量需求激增, 拓宽交流稳态信号的测量频率是未来的发展趋势。

2)直流电压比例标准装置方面,各国的国家 级计量研究机构建立了10~300 kV 直流电压比例标 准,一般采用评估法进行溯源,不确定度可以达到 10⁻⁵或10⁻⁶量级。建立超/特高压直流电压比例标准 的国家较少,澳大利亚国家计量院采用泄漏电流法 建立了1000 kV 直流电压比例标准,电压系数为 1×10⁻⁴ V⁻¹;我国的国家高电压计量站采用直流电压 加法建立了1000 kV 直流电压比例标准,不确定度 达到了5×10⁻⁵。目前,我国直流输电最高电压为 ±1100 kV,为满足直流输电工程需要,我国直流电 压比例标准的电压等级仍需进一步提升。随着脉冲 功率、粒子加速器等前沿尖端领域技术研究的发展 以及直流输电技术的进步,对高压直流装置测量测 准确度提出了更高的要求,不断提升直流电压比例 标准装置的测量准确度水平将是未来的发展趋势。

3)冲击电压比例标准装置方面,高压部分仍 采用电阻分压或电容分压的方式,未来的发展主要 体现在额定电压和测量水平的提升;低压部分随着 数据采集装置和计算水平的提升,垂直分辨率 14 Bit、采样频率 200 MHz 的测量仪器已经应用于 冲击电压的测量,使用软件进行传递函数补偿是减 小测量误差的方法之一。根据现场校准环境的不同, 对工作标准测量装置的复杂环境适应性要求更高, 局域网等新型的数据传输方法将应用于工作标准装置。

参考文献 References

- FOORD T R. A 100 kV compressed-gas standard capacitor[J]. Journal of Scientific Instruments, 1957, 34(2): 68-70.
- [2] PETERSONS O, FITZPATRICK G J, SIMMON E D. An active high-voltage divider with 20 J-LVN uncertainty[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1997, 46(2): 430-434.
- [3] 姜春阳,刘浩,周峰,等.有源电容式分压器的研制[J].电测 与仪表,2019,56(6):148-152.
 JIANG Chunyang, LIU Hao, ZHOU Feng, et al. The development of an active capacitive voltage divider[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(6):148-152.
- [4] RUNGIS J, BROWN D E. Experimental study of factors affecting capacitance of high-voltage compressed-gas capacitors[J]. IEE Proceedings A - Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews, 1981, 128(4): 237-277.
- [5] 周 峰,岳长喜,雷 民,等.基于电压串联加法的1 000 kV国家工频电压计量标准[J].计量学报,2012,33(6):541-545. ZHOU Feng, YUE Changxi, LEI Min, et al. Establishment of national voltage ratio standard for 1 000 kV at power frequency based on the series voltage summation[J]. Acta Metrologica Sinica, 2012, 33(6):541-545.
- [6] 周 峰,郑汉军,雷 民,等. UHV 串联式 TV 高压隔离部分的有限元分析及优化[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 5-8.

ZHOU Feng, ZHENG Hanjun, LEI Min, et al. FEA and optimization design of high voltage isolation transformer in UHV series TV[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 5-8.

- [7] 雷 民,周 峰,章述汉,等.1000 kV 串联式标准 TV 的量值溯 源及稳定性[J].高电压技术,2010,36(1):98-102.
 LEI Min, ZHOU Feng, ZHANG Shuhan, et al. Traceability and stability of 1000 kV series standard TV[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1):98-102.
- [8] 周 峰,郑汉军,雷 民,等.1000 kV 串联式标准电压互感器的 研制[J].高电压技术,2009,35(3):464-469.
 ZHOU Feng, ZHENG Hanjun, LEI Min, et al. Development of 1 000 kV series standard potential transformer[J]. High Voltage Engineering, 2009,35(3):464-469.
- [9] 姜春阳,袁建平,杨世海,等.特高压标准电压互感器一体化装置 的紧凑化设计及关键技术研究[J].高压电器,2016,52(9):20-25. JIANG Chunyang, YUAN Jianping, YANG Shihai, et al. Compact design and research of key technologies for UHV standard voltage transformer integrated device[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9): 20-25.
- [10] ZHOU F, JIANG C Y, LEI M, et al. Development of ultrahigh-voltage standard voltage transformer based on series voltage transformer structure[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2019, 13(1): 103-107.
- [11] BROOKS H B, HOLTZ F C. The two-stage current transformer[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1922, 41: 382-393.
- [12] WEST J L, MILJANIC P N. An improved two-stage current transformer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1991, 40(3): 633-635.
- [13] CUTKOSKY R D. Active and passive direct-reading ratio sets for the comparison of audio-frequency admittances[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1964, 13(4): 243-250.
- [14] DEACON T A, HILL J J. Two-stage inductive voltage dividers[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1968, 115(6): 888-892.
- [15] 赵修民. 高压双级电压互感器的研究[J]. 电测与仪表, 1993(2): 17-20.

ZHAO Xiumin. Development of two-stage high voltage transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 1993(2): 17-20.

- [16] 彭时雄,宋雨虹,马玉祥. 35 kV 0.001 级及 110/3^{1/2} kV 0.002 级双 级电压互感器的研制[J]. 电力设备, 2005, 6(7): 10-16.
 PENG Shixiong, SONG Yuhong, MA Yuxiang. R & D on double level potential transformers of 35 kV with an accuracy of 0.001 and 110/3^{1/2} kV with an accuracy of 0.002[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(7): 10-16.
- [17] SHAO H M, LIN F P, LIANG B, et al. The development of $110/\sqrt{3}$ kV two-stage voltage transformer with accuracy class 0.001[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(6): 1383-1389.
- [18] LIU H, ZHOU F, CHEN L X, et al. The development of precision 500/√3 kV two-stage voltage transformer with high-voltage excitation[J].IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-7.
- [19] YIN X D, LIU H, LAN L, et al. Precision 500/√3 kV three-stage VT with double excitation[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2019, 13(9): 1239-1244.
- [20] 姜春阳,周峰,杨世海,等. 宽频电容式分压器的研制[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 151-156, 162.
 JIANG Chunyang, ZHOU Feng, YANG Shihai, et al. Development of broadband capacitive voltage divider[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 151-156, 162.
- [21] 哈弗莱公司. 哈弗莱标准分压器 4860 手册[EB/OL]. [2021-01-02]. http://pdf. directindustry. com/pdf/haefely-test-ag-hipotronics-inc/ 4860-electronic-divider-system/17027-622219. html#search-en-4860.

HAEFELY. HAEFELY 4960 manual online[EB/OL]. [2021-01-02]. http://pdf. directindustry.com/pdf/haefely-test-ag-hipotronics-inc/4860electronic-divider-system/17027-622219. html#search-en-4860.

- [22] 国际测量. MI2502 产品手册[EB/OL]. http://mintl. com/wp-content/uploads/2500A. pdf, 2019. International measurement. MI2502 manual online[EB/OL]. [2021-01-05]. http://mintl. com/wp-content/uploads/2500A. pdf, 2019.
- [23] MOORE W J M, MILIJANIC P N. The current comparator[M]. London: Peter Peregrinus Ltd. 1988.
- [24] MOHNS E, JIANG Chunyang, BADURA H, et al. A fundamental step-up method for standard voltage transformers based on an active capacitive high-voltage divider[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(6): 2121-2128.
- [25] HIRAYAMA H, KOBAYASHI M, MURAKAMI K, et al. 10 kV high-accuracy DC voltage divider[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1974, 23(4): 314-317.
- [26] CHILDERS C B, DZIUBA R F, LEE L H. A resistive ratio standard for measuring direct voltages to 10 kV[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1976, IM-25(4): 505-508.
- [27] KNIGHT R B D, MARTIN P. A high voltage divider having an uncertainty of 5 p. p. m. at 100 kV[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1993, 42(2): 568-570.
- [28] MARX R. New concept of PTBs standard divider for direct voltages of up to 100 kV[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(2): 426-429
- [29] PEIER D, GRAETSCH V. A 300 kV DC measuring device with high accuracy[C] // Third International Symposium on High Voltage Engineering. Milan, Italy: [s.n.], 1979: 1-4.
- [30] LI Y, RUNGIS J, KIM K T, et al. Interlaboratory comparison of high direct voltage resistor dividers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1999, 48(2): 158-161.
- [31] LI Y. Development of precision DC high voltage dividers[C] // 2010 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Daejeon, South Korea: IEEE, 2010: 569-570.
- [32] MARX R, LI Y, RUNGIS J. Comparison of two ultra-precision DC high voltage dividers developed at PTB and NML[C] // Proceedings of 13th International Symposium on High voltage Engineering (ISH). Delft, Netherlands: [s.n.], 2003: 541-544.
- [33] 章述汉,王乐仁. 基于电压加法原理的直流分压器校准方法[J]. 高 电压技术, 2006, 32(11): 53-56. ZHANG Shuhan, WANG Leren. Calibration method for high DC voltage dividers based on voltage summation[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 53-56.
- [34] LI D Y, LIU K P, LEI M, et al. Study on the ratio change measurement of 1 000 kV HVDC divider based on improved DC voltage summation method[J]. High Voltage, 2020, 5(2): 202-208.
- [35] 李登云,李 前,李 鹤,等.1000 kV 直流电阻标准分压器的电 场仿真计算和分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2875-2880. LI Dengyun, LI Qian, LI He, et al. Electric field calculation and analysis of 1 000 kV DC voltage standard divider[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 2875-2880.
- [36] 张仁豫,陈昌渔,王昌长.高电压试验技术[M].2版.北京,中国: 清华大学出版社, 2003. ZHANG Renyu, CHEN Changyu, WANG Changchang. High-voltage testing technology[M]. 2nd ed. Beijing, China: Tsinghua University
- Press, 2003. [37] IX-IEC. High-voltage test techniques-part 2: measuring systems: IEC 60060-2-2010[S], 2010.
- [38] 龙兆芝, 刘少波, 李文婷, 等, 冲击电压测量软件的验证及其比 对[J]. 高压电器, 2014, 50(6): 91-97. LONG Zhaozhi, LIU Shaobo, LI Wenting, et al. Verification and comparison of impulse voltage measuring software[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(6): 91-97.
- [39] HÄLLSTRÖM J, ARO M, ZHANG Y, et al. Progress of a worldwide comparison of LI measuring systems - round 1[C] // 12th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH). Bangalore, India: [s.n.], 2001: 1-7.

- [40] HARADA T, KAWAMUTA T, AKATSU Y, et al. Development of a high quality resistance divider for impulse voltage measurement[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1971, 90(5): 2247-2250
- [41] HAVUNEN J, PASSON S, HÄLLSTRÖM J. et al. Characterization of cable effects on a reference lightning impulse voltage divider[C]// 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM). Daejeon, Korea: [s.n.], 2020: 1-2.
- [42] KLAUS S. High impulse voltage and current measurement tech-niques[M]. Berlin, Germany: Springer, 2013.
- [43] 戚庆成,张子龙.利用高压标准电容器测量冲击电压[J].高电压技 术, 1985, 10(2): 1-5. QI Qingcheng, ZHANG Zilong. Measurement impulse voltage using high-voltage standard capacitor[J]. High Voltage Engineering, 1985, 10(2): 1-5.
- [44] 龙兆芝,李文婷,刘少波,等.基于标准电容器的工频、冲击两用 型分压器的研制[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1836-1843. LONG Zhaozhi, LI Wenting, LIU Shaobo, et al. Development of power-frequency and impulse-voltage voltage divider based on standard capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1836-1843.
- [45] LONG Z Z, LIU S B, LI W T, 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
- [46] 李建文,秦 刚,李永刚,等. 基于布莱克曼窗与窗宽比的 S 变换 电能质量扰动特征提取[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2769-2779. LI Jianwen, QIN Gang, LI Yonggang, et al. Feature extraction based on S-transform of blackman window and window ratio in power quality disturbances[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2769-2779.
- [47] 佘振球,刘 凯,张庆武,等.基于直流线路互感的电压突变量检 测的±1100 kV 直流输电换相失败抑制研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2780-2790 SHE Zhenqiu, LIU Kai, ZHANG Qingwu, et al. Commutation failure mitigation based on detecting the direct voltage difference caused by mutual inductance of transmission lines in ±1 100 kV HVDC systems[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2780-2790.
- [48] 赵 军,陈维江,王德林,等.特快速电磁暂态(VFT)试验平台的 研制[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 107-114. ZHAO Jun, CHEN Weijiang, WANG Delin, et al. Development of a very fast electromagnetic transient (VFT) test platform[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 107-114.



雷民

1963一, 男, 博士, 教授级高工 主要从事高电压大电流计量测试技术研究 E-mail: leimin@epri.sgcc.com.cn

Ph.D., Professor



姜春阳(通信作者) 1985--,男,硕士,高工 主要从事工频高电压计量测试技术研究 E-mail: jiangchunyang@epri.sgcc.com.cn

JIANG Chunvang Senior engineer

收稿日期 2020-12-11 修回日期 2021-05-25

编辑 曹昭君 冉沐晨