

10 kV 宽频直流电压互感器设计

钟立华¹, 潘峰¹, 李金莉¹, 纪伊琳¹, 宋宏天^{2,3}, 林晓明^{2,3}

(1. 广东电网有限责任公司计量中心, 广州 510080; 2. 南方电网科学研究院, 广州 510663; 3. 广东省电网智能量测与先进计量重点实验室, 广州 510700)

摘要: 10 kV 阻容分压原理的直流电压互感器在实际工况下的阻容匹配关系不易满足, 使其响应带宽不能满足要求。基于10 kV阻容分压原理的直流电压互感器在实际工况下的等效电路及其参数, 建立了实际工况下的频率特性传递函数模型。分析了直流电压分压比和频率特性的影响因素, 获得了分压电阻初始精度对直流电压分压比影响程度、分压电容初始精度和杂散电容对频率特性影响程度的定量结果。提出在阻容分压器低压臂并联阻容匹配单元的解决方法, 结合阻容分压器分压主体电阻电容参数的选取, 可通过匹配电阻校准直流电压分压比, 并通过匹配电容补偿直流电压互感器的频率特性。最后, 进行了样机试验, 结果表明匹配电阻将直流电压分压比10 000:5.015校准到了设计值10 000:5, 匹配电容使10 kV直流电压互感器在50 Hz~3 kHz的带宽内幅值误差从高达14%降低到接近1%。

关键词: 直流电压互感器; 阻容分压器; 阻容匹配; 频率特性

Design of 10 kV Wide Frequency DC Voltage Transformer

ZHONG Lihua¹, PAN Feng¹, LI Jinli¹, JI Yilin¹, SONG Hongtian^{2,3}, LIN Xiaoming^{2,3}

(1. Metrology Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Measurement and Advanced Metering of Power Grid, Guangzhou 510700, China)

Abstract: The resistance-capacitance matching (RCM) relationship of 10 kV DC voltage transformer(DCVT) based on the principle of resistance capacitance voltage division (RCVD) is not easy to meet under actual working conditions, making its bandwidth unable to meet the requirements. According to the the equivalent circuit and parameters of 10 kV DCVT based on the principle of RCVD under actual operating conditions, the frequency characteristic transfer function is established, and the influencing factors of DC voltage divider ratio and frequency characteristic are analyzed. The quantitative effect of the initial accuracy of the resistor on the DC voltage divider ratio and the degree of influence of the initial accuracy of the capacitor and stray capacitance on frequency characteristic are obtained. A method of parallel connection of the resistance capacitance matching unit (RCMU) in the low-voltage arm of RCVD is proposed, which combines the selection of resistance-capacitance parameters of the main body of RCVD, and the DC voltage divider ratio can be calibrated through the adjustable resistor in RCMU, and the frequency characteristics of the DCVT can be compensated through the adjustable capacitor in RCMU. Finally, a prototype experiment is conducted, and the results show that the matching resistance calibrates the DC voltage division ratio from 10 000:5.015 to the design value 10 000:5, and the matching capacitance reduces the amplitude error of 10 kV DC voltage transformer from 14% to nearly 1% within the bandwidth of 50 Hz to 3 kHz.

Key words: DC voltage transformer; resistance capacitance voltage divider; resistance capacitance matching; frequency characteristics

基金项目: 贵州省科技计划资助项目(黔科合支撑[2022]一般015); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20220200)。

Foundation item: Supported by Guizhou Provincial Science and Technology Program (Guizhou Science and Technology Cooperation Support [2022] General 015); the Science and Technology Project of the China Southern Power Grid Co., Ltd. (GDKJXM20220200) .

0 引言

随着直流输配电技术的发展,直流高压远距离输电网以及直流配电网成为现阶段建设的重点^[1-2]。直流配电网在新能源的接入便利性、供电经济性、可靠性等方面相对于交流电网的优势已经得到了充分论证^[3-4]。为了推动直流配电网的应用,具有宽频特性的直流电压测量装置有必要进行研发^[5]。

与交流配电网相比,直流配电网中电力电子设备的非线性控制^[6]使直流电网中存在除理想直流外的交流量,其高度电力电子化特征使谐波频域向高频延伸^[7],中国张北柔性直流工程的宽频振荡频带已达 4 kHz^[8],已有研究通过仿真发现变换器的脉宽调制会产生 2~150 kHz 范围内的电流谐波^[9]。

阻容分压式直流电压互感器在高压直流输电系统中发挥了重要的作用^[10-12],其测量原理简单、技术成熟,测量频带要求高压直流电压互感器在 50 Hz~3 kHz 内的谐波条件下比差不大于 3%^[13]。

阻容分压式电压互感器的测量带宽决定于高低压臂分压电阻和分压电容的匹配程度^[14-15],理论上满足阻容匹配关系时阻容分压器的响应与频率无关。而实际上阻容参数受初始精度、运行环境、杂散参数等影响很难达到阻容匹配^[16-17]。因此,研究阻容分压器的阻容匹配是实现宽频带直流电压互感器频响特性的关键。

文献[18]指出直流电阻分压器采用阻容分压的形式拥有良好的频率响应,但未考虑其他器件影响。文献[19]通过对影响频率特性的各单元关键参数进行优化设计,确保整机在 50~3 000 Hz 频率范围内幅值误差满足小于 3% 的要求。文献[20]通过对阻容式直流分压器系统中各组成部分频率传变特性的研究,通过调整低压臂电容值的方法减少了对地杂散电容的影响,使其测量带宽扩展到 10 kHz,但未具体讨论。文献[21]研究了高频大电压阻容分压网络的频率特性,通过在高压臂和低压臂分别并联单只集中电容来使阻容匹配关系得到满足,该方法不适用于真空浇筑的阻容分压器。文献[22]通过试验测试了高压臂的电阻和电容实际参数,再由阻容分压器和信号处理电路的数学模型计算出低压臂电阻值和电容值以此来实现阻容匹配,该方法需要将低压臂置于一次转换器中,一次主体需要通过一次转换器再连接高压地,具有一定的安全隐患。文

献[23]通过优化电容元件和电阻元件的选型,电容单元采用金属化聚丙烯薄膜结构设计,使其电容具有相同的负温度特性,而并联电阻采用正温度系数电阻,与电容温度特性相反且数值相近,以此消除温度的影响从而改善频率特性。

综合上述研究现状和分析,现有方案的思路虽然是通过改变高压臂或/和低压臂等效电容的方式以使阻容匹配关系得以满足,然而这些方法因为各自的局限性不适用于直流电压互感器中。本文提出在阻容分压器低压端并联阻容匹配单元的方式,并通过分压器主体参数的配合,在阻容分压器主体参数存在初始误差、杂散电容等实际工况下阻容匹配单元既可实现直流电压分压比的标定,同时实现了阻容匹配,拓宽了直流电压互感器的响应带宽。

1 10 kV 直流电压互感器原理及参数

1.1 10 kV 直流电压互感器构成

10 kV 直流电压互感器的测量原理如图 1 所示,阻容分压主体的高低压臂均为阻容并联结构,被测电压 U_{in} 连接至阻容分压器高压端,在低压端输出较小的电压信号 U_{out} 。电压互感器的分压比设计为 10 000 : 5,低压端输出电压 U_{out} 无需进行信号处理直接通过电缆与二次设备相连。

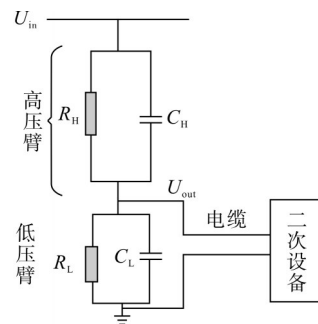


图 1 10 kV 直流电压互感器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of 10 kV DC voltage transformer

当一次直流母线上只有直流电压时,直流电压分压比 K_{Ndc} 为:

$$K_{Ndc} = \frac{R_H + R_L}{R_L} \quad (1)$$

式中: R_H 为高压臂等效电阻; R_L 为低压臂电阻。由式(1)可知,直流电压分压比由高低压臂电阻的阻值决定。而当一次电压为交流电压时,其分压比 K_{Nac} 为:

$$K_{\text{Nac}} = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} = \frac{R_L}{R_L + R_H \cdot \frac{1 + j\omega R_L C_L}{1 + j\omega R_H C_H}} \quad (2)$$

式中: ω 为一次电压频率; C_H 为高压臂等效电容; C_L 为低压臂电容。

当 $R_H C_H = R_L C_L$ 时,

$$K_{\text{Nac}} = \frac{C_H + C_L}{C_H} = \frac{R_H + R_L}{R_L} = K_{\text{Ndc}} \quad (3)$$

则谐波电压下的分压比 K_{Nac} 与直流电压下的分压比 K_{Ndc} 一致, 且与频率无关, $R_H C_H = R_L C_L$ 的条件称为阻容匹配关系。

本文设计的 10 kV 直流电压互感器高压臂由 5 节电阻电容的并联单元再串联构成, 额定工作电流设为 0.5 mA, 因此高压臂单只电阻的阻值为 4 M Ω , 高压臂总等效电阻为 20 M Ω 。低压臂电阻按照 10 000 : 5 的分压比计算, 阻值为 10.005 k Ω 。并联电容的容值以谐波电流不大于 1 mA 为设计依据, 计算出高压臂等效电容 C_H 为 80 pF, 单节阻容并联结构的电容量为 400 pF。为满足阻容分压器的响应带宽, 依据阻容匹配关系低压臂电容 C_L 为 159.92 nF。

2 实际工况下 10kV 直流电压互感器的传递特性

2.1 实际工况下 10kV 直流电压互感器等效电路

阻容分压器在实际工况下分压器主体中从高压端到低压端的串联单元之间存在杂散电容, 高低压臂的总等效杂散电容用 C_1 和 C_2 表示, 连接电缆也具有等效输入电阻和等效电容, 用 R_i 和 C_i 表示, 因此, 直流电压互感器在实际工况下的等效电路如图 2 所示。

在 ANSYS 平台上根据 10 kV 直流电压互感器的实际尺寸构建仿真模型, 仿真得到 C_1 为 27.776 pF、 C_2 为 2 752.5 pF。

10 kV 直流电压互感器的连接电缆长度不超过 5 m, 在谐波测量带宽内无需将电缆做分布参数模型处理; 另外电缆的后端通常接入具有高输入阻抗的隔离放大器, 因此, 电缆的输入等效电阻 R_i 在

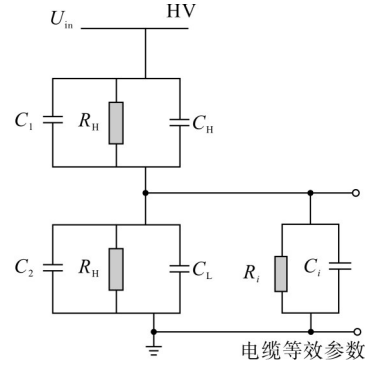


图2 阻容分压器实际工况下的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of RCVD under actual working conditions

100 M Ω 量级以上, 与低压端 10 k Ω 量级的电阻并联, 对分压比的影响为 0.01%, 可以忽略。传输电缆单位长度的电容为 90 pF/m, 5 m 长电缆总等效电容 C_i 为 450 pF。

在实际工况下高低压臂阻容参数的乘积分别为:

$$R_H C'_H = R_H (C_H + C_1) = 2.16 \times 10^{-3} \quad (4)$$

$$R_L C'_L = R_L (C_L + C_2 + C_i) = 1.63 \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中: C'_H 为实际高压臂等效电容; C'_L 为实际低压臂电容。因为高压臂杂散电容 C_1 的数量级与高压臂分压电容 C_H 相当, 而低压臂杂散电容 C_2 较分压电容 C_L 要小得多, 因此, $R_H C'_H > R_L C'_L$, 严重破坏了阻容匹配关系。为了使阻容匹配关系得以满足, 在阻容分压器分压电容参数取值时应使 C_H 偏低于理论设计值或者使 C_L 偏高理论设计值。本文设计的 10 kV 阻容分压器 C_H 取值为 80 pF, 而 C_L 取值为 200 nF, 高于设计值 159.92 nF。

2.2 直流电压下的传递特性

直流电压分压比决定于高低压臂分压等效电阻, 电缆输入端等效电阻阻值高, 对分压比的影响可忽略。分压电阻的阻值主要受初始精度、温度系数以及电压系数的影响。设高低压臂电阻 R_H 、 R_L 的初始阻值精度分别为 ΔR_H 、 ΔR_L , 电阻温度系数分别为 α_{TH} 、 α_{TL} , ΔT 为温度变化范围, α_{VCR} 为电阻的电压系数, 则在实际工况下由实际高低压臂电阻 R'_H 、 R'_L 可推导实际直流分压比 K'_{Ndc} 为:

$$K'_{\text{Ndc}} = \frac{R'_H + R_L}{R'_L} = \frac{R_H (1 + \Delta R_H) (1 + \alpha_{\text{TH}} \cdot \Delta T) (1 + \alpha_{\text{VCR}} \cdot V) + R_L (1 + \Delta R_L) (1 + \alpha_{\text{TL}} \cdot \Delta T)}{R_L (1 + \Delta R_L) (1 + \alpha_{\text{TL}} \cdot \Delta T)} \quad (6)$$

精密高压电阻的温度系数约为 $\pm 25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ，当高低压臂电阻选取同一批次同型号电阻时，其温度系数极为相近，可认为相等；精密高压电阻的电压系数为 $-0.2 \text{ ppm}/\text{V}$ ，连接于 10 kV 高压端的电阻阻值影响程度为 0.04% ，因此，电压系数的影响可以忽略。

综上所述，式(6)变为：

$$\begin{aligned} K'_{\text{Ndc}} &= \frac{R'_H + R'_L}{R'_L} \\ &= \frac{R_H(1 + R_H) + R_L(1 + \Delta R_L)}{R_L(1 + \Delta R_L)} \end{aligned} \quad (7)$$

实际直流电压分压比与设计额定分压比之间的误差 ε 为：

$$\varepsilon = \frac{K'_{\text{Ndc}} - K_{\text{Ndc}}}{K_{\text{Ndc}}} \times 100\% \quad (8)$$

当高低压臂分压电阻的阻值精度在 $\pm 1\%$ 范围时，变比误差随阻值精度的变化范围如图3所示。

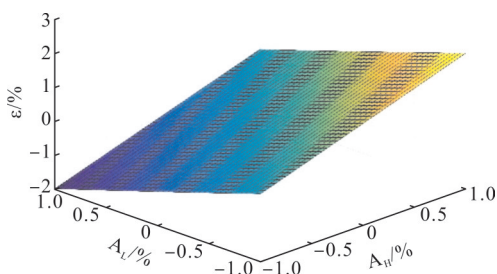


图3 高低压臂电阻的阻值精度对直流电压分压比的影响

Fig. 3 Influence of resistance accuracies of high and low voltage arm resistors on DC voltage divider ratio

从图3可知，当高低压臂电阻阻值误差相同时，对直流电压分压比无影响，但当 R_H 正偏差 1% 、而 R_L 负偏差 1% 时直流电压分压比的误差将超过 2% ，对于在二次单元中无分压比标定的直流电压互感器显然不可接受。

2.3 谐波电压下的传递特性

在谐波电压下直流电压互感器的传递函数如式(2)所示，直流电压分压比标定后的频率特性决定于各电容。实际工况下的谐波传递特性为：

$$\frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} = \frac{R'_L}{R'_L + R'_H \cdot \frac{1 + j\omega R'_L(C_L + C_2 + C_i)}{1 + j\omega R'_H(C_H + C_1)}} \quad (9)$$

从式(9)可知，高低压臂杂散电容 C_1 、 C_2 以及电缆等效电容 C_i 破坏了理论设计条件下的阻容匹配关系。当 C_H 、 C_L 选取同一厂家相同介质的产品时其电容温度系数分散性较小，温度特性对频率特性

的影响大为削弱。而电容值的初始差高达 $\pm 10\%$ ，对阻容分压器的频率特性影响极大。

由图4可知，不考虑杂散电容和电缆电容、且高低压臂电容为理想设计值时(曲线1)，其误差不受频率变化的影响；不考虑杂散电容和电缆电容但 C_H 、 C_L 存在初始容值误差时，可能使变比误差达 5% (曲线2和曲线3)；不考虑高低压臂电容初始误差时，考虑在实际工况下杂散电容以及电缆电容的影响，可能使变比误差高于 30% (曲线4)。

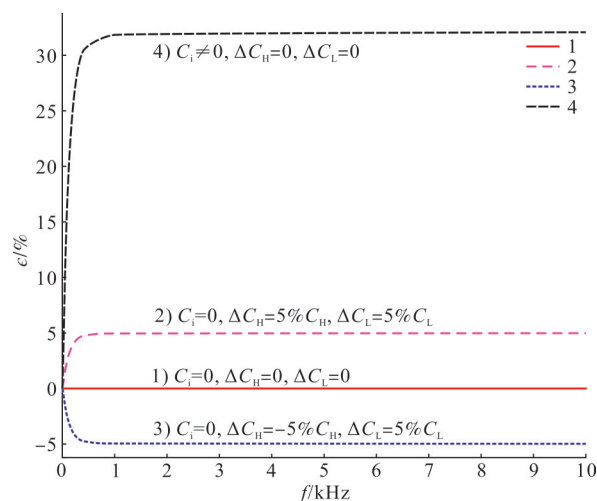


图4 电容容值变化对分压器幅频特性的影响

Fig. 4 Amplitude frequency characteristics of voltage transformers under different conditions for each capacitor

可见高低压臂分压电容的初始误差和杂散电容对直流电压互感器的频率特性影响都较大，不能满足相关技术标准的要求。因此，必须对频率特性进行补偿。

3 10 kV 宽频带直流电压互感器的阻容匹配

3.1 阻容匹配单元

阻容匹配单元包括匹配电阻和匹配电容，并联于阻容分压器主体的低压臂。此时，匹配单元、电缆等效参数和阻容分压器主体低压共同构成新的电压互感器的低压臂，如图5所示。通过阻容匹配单元中的匹配电阻可实现直流电压分压比的标定；通过匹配电容可实现阻容匹配，从而改善直流电压互感器的频率响应特性。

3.2 阻容匹配单元对直流电压分压比的校准

接入阻容匹配单元后的直流电压分压比为：

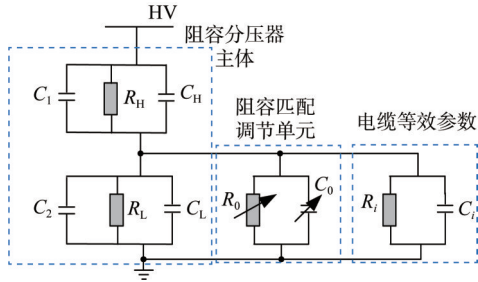


图 5 阻容分压器阻容匹配原理等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of resistive capacitance matching principle for impedance capacitance voltage divider

$$K'_{Ndc} = \frac{R_H + (R_L // R_0 // R_i)}{R_L // R_0 // R_i} \quad (10)$$

匹配电阻改变了等效的低压臂电阻, 在分压器主体分压电阻参数确定时, 选择 R_H 的阻值偏低于设计值或者使 R_L 的阻值高于设计值一定范围, 则通过 R_0 可将直流电压分压比较准到设计值。

在本文 10 kV 阻容分压器的设计中, R_H 、 R_L 的设计值分别为 20 M Ω 、10.005 k Ω , 按照阻容匹配单元的要求, R_H 的标称值选为 19 M Ω , R_L 的标称值选为 10 k Ω , 在标称值下的直流电压分压比为 10 000 V : 5.26 V, 通过匹配电阻 R_0 可将直流电压分压比标定到 10 000 V : 5 V。

3.3 阻容匹配单元改善频率响应特性

阻容匹配单元中的匹配电容则用来改善直流电压互感器的阻容匹配关系。直流电压互感器的阻容匹配关系变为:

$$R_H(C_H + C_1) = (R_L // R_0 // R_i) \cdot (C_L + C_2 + C_0 + C_i) \quad (11)$$

在实际工况下, 分析计算出高低压臂杂散电容的容值、低压臂连接电缆电容等参数, 改变匹配电容 C_0 的容值可使式(11)成立, 也即阻容匹配关系得以满足。

在本 10 kV 阻容分压器的设计中, C_H 、 C_L 的设计值分别为 80 pF、159.92 nF, 按照阻容匹配单元的要求, 结合杂散电容和电缆参数, C_H 的标称值选为 80 pF, C_L 的标称值选为 200 nF, 则根据阻容匹配关系计算可调电容的容值约 12.3 nF。

在上述参数下, 10 kV 直流电压互感器的幅频响应误差曲线如图 6 所示。

从图 6 可知, 增加阻容匹配单元后在 0~10 kHz 的频率范围内最大变比误差为 0.004%, 10 kV 直流电压互感器的频率特性得到了很好的补偿。

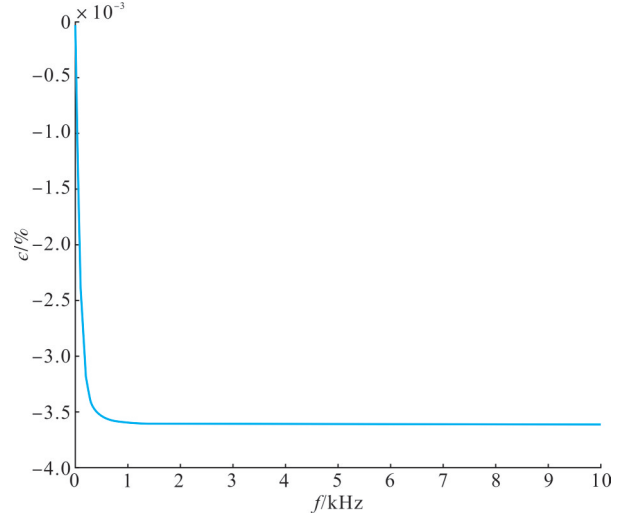
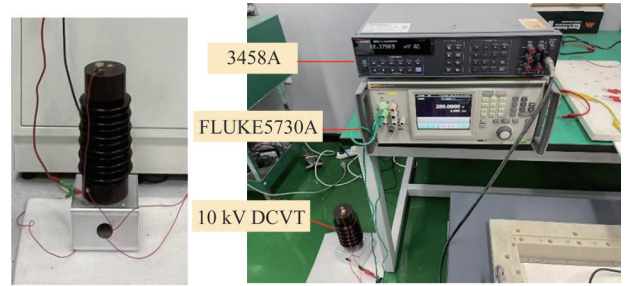


图 6 阻容匹配后的频率特性仿真结果

Fig. 6 Simulation results of frequency characteristics with RCMU

4 样机实测

对研制的 10 kV 直流电压互感器样机进行了频率特性测试, 采用 FLUKE5730A 多功能校准器作为标准电压源, 测试照片如图 7 所示。



(a) 样机照片

(b) 样机测试照片

图 7 样机测试照片

Fig. 7 Prototype test photo

参考直流输电系统直流电压测量装置技术标准^[15]中关于频率响应的测试方法要求谐波试验电压应不低于 1 kV。本测试中考虑到标准文献[15]中直流电压测量装置的额定电压均高于本研究中的 10 kV 样机, 另外受 FLUKE5730A 输出电压的限制, 因此选取频率响应测试电压为 200 V。

测试时, FLUKE5730A 输出电压幅值 200 V, 频率变化范围为 0~3 kHz。直流电压互感器的输出由 KEYSIGHT3458A 进行测量。分别测试在不接阻容匹配单元以及接入阻容匹配单元并调节后 10 kV 直流电压互感器的输出电压, 测试数据见表 1, 有

无阻容匹配单元时的变比误差随频率的变化曲线如图 8 所示。

表 1 10 kV 直流电压互感器频率特性测试数据
Tab. 1 Frequency characteristic test data of 10 kV DCVT

频率/Hz	无阻容匹配单元		阻容匹配单元调节后	
	二次输出/V	变比误差/%	二次输出/V	变比误差/%
0	0.100 30	0.30	0.100 0	0.00
50	0.113 42	13.42	0.100 1	0.10
100	0.114 12	14.12	0.100 1	0.14
200	0.114 30	14.30	0.100 2	0.17
300	0.114 31	14.31	0.100 3	0.26
400	0.114 35	14.35	0.100 3	0.34
500	0.114 38	14.38	0.100 5	0.46
600	0.114 36	14.36	0.100 5	0.52
700	0.114 37	14.37	0.100 6	0.59
800	0.114 39	14.39	0.100 6	0.65
900	0.114 38	14.38	0.100 7	0.70
1 000	0.114 42	14.42	0.100 7	0.75
1 200	0.114 45	14.45	0.100 8	0.82
2 000	0.114 43	14.43	0.101 0	1.01
3 000	0.114 45	14.45	0.101 2	1.15

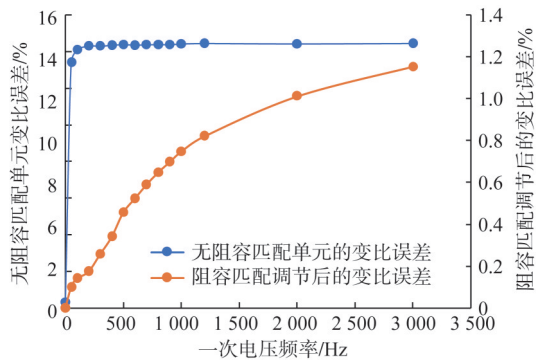


图 8 有无阻容匹配单元时的变比误差曲线

Fig. 8 Ratio error curves with or without RCMU

从图 8 测试结果可知,阻容分压器未接入阻容匹配单元时的直流电压分压比误差为 0.3%;随着一次电压频率的变化,由于阻容参数不匹配,变比误差高达 14%。接入阻容匹配单元后,通过匹配电阻校准了直流电压分压比;匹配电容使阻容参数的匹配关系得到改善。测试结果表明,在 0~3 kHz 的频率范围内的变比误差最大值为 1.15%。本测试结果未能使匹配关系完全满足,是因为本方案中匹配电容的调节分别率为 10 nF,阻容匹配关系未能完全满足。

5 结语

本文通过对 10 kV 阻容分压器实际工况下的传变模型分析了分压电阻初始精度对直流电压分压比的影响、分压电容初始精度和杂散电容以及电缆电容对频率响应的影响。本文提出在阻容分压器低压臂并联阻容匹配单元的方法,实现对直流电压分压比的校准和频率特性的改善。

该方法利用匹配电阻改变直流电压分压比,利用匹配电容满足阻容匹配关系,通过仿真验证了阻容匹配单元的有效性。最后对 10 kV 直流电压互感器样机进行了频率特性测试,测试结果证明了本文方法可以校准直流电压分压比和改善频率特性。下一步将模拟实际工况开展全压直流叠加谐波电压情况下互感器频率特性研究。

参考文献

- [1] 杨艳会. 以新能源消纳为约束的交直流配电网供电模式研究[D]. 北京:华北电力大学, 2021.
- [2] 黄碧月,辛清明,赵晓斌,等. 大规模光伏电站孤岛经柔性直流送出的电压特性[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 3-13. HUANG Biyue, XIN Qingming, ZHAO Xiaobin, et al. Voltage characteristics of large-scale islanded PV station transmission via VSC-HVDC [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 3-13.
- [3] 黄小光. 中低压直流配电网关键控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学, 2021.
- [4] 李嘉贤,刘灏,付宇,等. 非接触式交流电压探头设计与电压测量方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(11): 120-129. LI Jiaxian, LIU Hao, FU Yu, et al. Non-contact AC voltage probe design and voltage measuring method [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(11): 120-129.
- [5] 翟少磊,肖勇,廖耀华,等. 直流分压器频率响应现场试验源及试验方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(8): 87-94. ZHAI Shaolei, XIAO Yong, LIAO Yaohua, et al. Field test power supply and test method for frequency response of DC voltage divider [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(8): 87-94.
- [6] 陈鹏伟,肖湘宁,陶顺. 直流微网电能质量问题探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 148-158. CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, TAO Shun. Discussion on power quality problems for DC microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 148-158.
- [7] 李海波,赵宇明,刘国伟,等. 基于时序仿真的商业楼宇交流与直流配电系统能效对比[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 4194-4206. LI Haibo, ZHAO Yuming, LIU Guowei, et al. The time sequential simulation based energy efficiency comparison of AC and DC distribution power system in commercial buildings [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19): 4194-4206.
- [8] 陈朝迁. 直流配电网电能质量分析与治理措施研究[D]. 北

- 京:华北电力大学, 2020.
- [9] YAGHOUBI J, ZARE F, RATHNAYAKE H. Current harmonics generated by motor side converter: new standardizations [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 2868 – 2880.
- [10] 谭炳源, 王奇, 刘青松, 等. 特高压换流站直流分压器校准模型研究 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(2): 183 – 188.
TAN Bingyuan, WANG Qi, LIU Qingsong, et al. Research on calibration model of DC divider in the UHV converter station [J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2020, 53(2): 183 – 188.
- [11] 陈琳依, 李登云, 刘开培, 等. 1 100 kV 直流电阻标准分压器电场仿真分析和方案设计 [J]. 高压电器, 2020, 56(4): 140 – 147.
CHEN Linyi, LI Dengyun, LIU Kaipei, et al. Electric field simulation analysis and scheme design of 1 100 kV DC resistance standard voltage divider [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 140 – 147.
- [12] 刘伟, 叶艳军, 胡继华, 等. ± 800 kV 直流电压测量装置原理及绝缘结构分析 [J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(7): 45 – 54.
LIU Wei, YE Yanjun, HU Jihua, et al. Principle and insulation structure analysis of the 800 kV DC voltage measuring device [J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(7): 45 – 54.
- [13] 中国电器工业协会. 高压直流输电系统直流电压测量装置: GB/T 26217—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [14] 许灵洁, 周永佳, 周琦. 常用高压阻容分压器频率特性的研究 [J]. 浙江电力, 2011, 30(7): 13 – 15.
XU Lingjie, ZHOU Yongjia, ZHOU Qi. A study on the frequency characteristics of commonly used high-voltage resistive capacitive voltage dividers [J]. Zhejiang Electric Power, 2011, 30(7): 13 – 15.
- [15] 唐登平, 郑欣, 雷鸣, 等. 直流电子式电压互感器的误差特性分析 [J]. 电测与仪表, 2021, 58(2): 107 – 111.
TANG Dengping, ZHENG Xin, LEI Ming, et al. Analysis of error characteristics of DC electronic voltage transformers [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2021, 58(2): 107 – 111.
- [16] 郑欣, 唐登平, 雷鸣, 等. 柔性直流输电用直流阻容式电压互感器的建模与计量特性分析 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(8): 747 – 754.
ZHENG Xin, TANG Dengping, LEI Ming, et al. Modeling and metrological characteristics analysis of DC resistance capacitive voltage transformers for flexible DC transmission [J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2021, 54(8): 747 – 754.
- [17] 韩笑, 刘建婷, 张益伟, 等. 柔性直流配网继电保护关键技术评述 [J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 1 – 9.
HAN Xiao, LIU Jianting, ZHANG Yiwei, et al. Review of key technologies for relay protection in flexible DC distribution networks [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2022, 59(3): 1 – 9.
- [18] SPERLING E, SCHEGNER P. A possibility to measure power quality with RC-divider [C]// 2013 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, June, 10 – 13, 2013, Stockholm, Sweden. Stevenage: CIRED2013 S2, 1 – 4.
- [19] 张旭乐, 陈刚, 王群峰, 等. 基于数字量输出的直流电压测量装置频率传变特性研究及误差分析 [J]. 计量与测试技术, 2023, 50(3): 25 – 29.
ZHANG Xule, CHEN Gang, WANG Qunfeng, et al. Research on frequency transmission characteristics and error analysis of DC voltage measurement device based on digital output [J]. Measurement and Testing Technology, 2023, 50(3): 25 – 29.
- [20] NGUYEN P H, 韩民晓. 直流阻容式电压互感器用于直流输电谐波电压测量的研究 [J]. 电工电能新技术, 2015, 34(3): 54 – 60.
NGUYEN P H, HAN Minxiao. Research on DC resistance capacity voltage transformer for harmonic voltage measurement in DC transmission [J]. New Technologies in Electrical Energy, 2015, 34(3): 54 – 60.
- [21] 苟轩, 王增增. 高频大电压阻容分压网络的频率特性研究 [J]. 中国测试, 2018, 44(12): 152 – 156.
GOU Xuan, WANG Zengzeng. Research on frequency characteristics of high-frequency high voltage resistive capacitive voltage divider networks [J]. China Testing, 2018, 44(12): 152 – 156.
- [22] 徐敏锐, 张旭乐, 卢树峰, 等. 适用于柔性输电网络的直流测量装置交直流混叠准确度标定技术研究 [J]. 计量与测试技术, 2023, 50(3): 14 – 18.
XU Minrui, ZHANG Xule, LU Shufeng, et al. Research on accuracy calibration technology for AC/DC aliasing of DC measurement devices suitable for flexible transmission networks [J]. Measurement and Testing Techniques, 2023, 50(3): 14 – 18.
- [23] 杨桂平, 郭毅. 阻容分压型电子式电压互感器研究与设计 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(3): 96 – 101.
YANG Guiping, GUO Yi. Study and design on electronic voltage transformer based on resistance-capacitance divider [J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2018, 39(3): 96 – 101.

收稿日期: 2023-06-13; 网络首发日期: 2024-02-20

作者简介:

钟立华(1977), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电能计量和智慧用电技术;

潘峰(1984), 男, 通信作者, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为电能计量和智慧用电技术, pf6601@163.com;

李金莉(1995), 女, 助理工程师, 学士, 研究方向为电能计量与互感器特性。