

# 高压分压器分布电容补偿的研究

蒋力<sup>a</sup>, 傅鹏<sup>a</sup>, 潘圣民<sup>a</sup>, 刘保华<sup>a</sup>, 李云娜<sup>b</sup>

(中科院 a 等离子体物理研究所; b 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 电阻分压器的测量精度和响应时间受自身分布电容的影响较大, 尤其是高压分压器。由于高压分压器本身高压臂和低压臂的阻值均比较大, 分布电感影响较小, 分布电容对测量精度的影响将占据主导地位。为此, 本文提出在高压臂两端串联均压环的方法均衡分压器高压侧电场分布, 提高分压器性能。并且通过对分压器传递函数的相频和幅频特性进行理论分析, 提出一种分布电容补偿的方法。试验证明这种补偿方法是正确的, 满足工程要求。

**关键词:** 电阻分压器; 分布电容; 分布电感; 均压环; 传递函数; 电场

**中图分类号:** TM 151 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3932(2010)09-0061-04

## 1 引言

EA ST 超导托卡马克核聚变实验装置是中科院等离子体物理研究所承担的国家大科研项目, 承担着人类未来能源的探索研究任务, 它于 2007 年成功建立并投入运行。为了达到更好的实验结果, 需要配备强大的加热系统。EA ST 二次加热的配套装置低杂波电流驱动系统 (LHCD) 需要一套参数 60 kV /100 A 直流高压电源<sup>[1]</sup>。该电源的反馈调节要求电压测量具有高的精度和较快的响应速度 (电压幅值误差  $\leq 1\%$ , 相角误差  $\leq 5^\circ$ ) 为此, 选择无感电阻组成的电阻分压器<sup>[2-5]</sup>作为电压传感器, 如图 1 所示。高压臂电阻 20 M $\Omega$ , 低压臂电阻 2 k $\Omega$ , 分压器比 10 000: 1<sup>①</sup>

为了提高分压器绝缘性能, 防止高压电晕放电, 分压器整体浸入变压器油中。并在高压臂两端串联 110 kV 均压环。使得分压器在变压器油中的电场分布得到有效改善<sup>[6-10]</sup>。均压环均衡了分压器高压侧电场分布, 如图 2 所示。提高了分压器的测量精度。

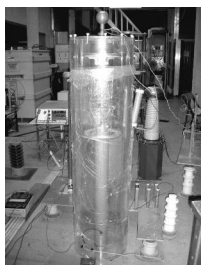


图1 分压器实物图

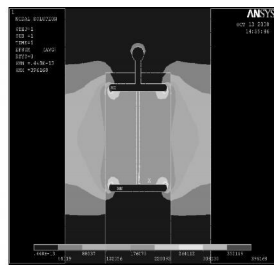


图2 高压臂电阻附近电场分布

来了不可忽略的影响。通过对分压器传递函数的频率特性分析, 提出在低压臂电阻并联电容的办法进行补偿, 取得令人满意的结果。

## 2 分压器频率特性<sup>[11-14]</sup>

分压器低压电阻并联电容补偿均压环分布电容对测量精度的影响, 其等效电路如图 3 所示。

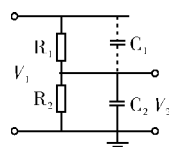


图 3 分压器分布电容示意图

从图 3 可以知道该电阻分压器分压比为:

$$k(j\omega) = 1 + \frac{\frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1}}{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}}$$

$$= 1 + \frac{R_1}{R_2} \left[ \frac{1 + \omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2}{1 + \omega^2 R_1^2 C_1^2} - j\omega \frac{R_1 C_1 - R_2 C_2}{1 + \omega^2 R_1^2 C_1^2} \right]$$

令:

$$A = 1 + \frac{R_1}{R_2} \times \frac{1 + \omega^2 R_1 R_2 C_1 C_2}{1 + \omega^2 R_1^2 C_1^2}$$

$$B = \frac{R_1}{R_2} \times \frac{R_1 C_1 - R_2 C_2}{1 + \omega^2 R_1^2 C_1^2}$$

则:

$$k(j\omega) = A - j\omega B \tag{1}$$

从式 (1) 可以知道, 当正确选择补偿电容  $C_2$  使得  $R_1 C_1 - R_2 C_2 = 0$  时, 电阻分压器变比为  $k = 1 +$

① 收稿日期: 2010-08-12(修改稿)

基金项目: 国家发展计划委员会“投资(1998)1303号项目”

$\frac{R_1}{R_2}$  是一个理想的电阻分压器, 其幅值误差和相角误差为零。但是由于电容  $C_1$  为分压器高压臂均压环间分布电容的等效值, 使得等式  $R_1 C_1 = R_2 C_2$  很难成立, 分压器存在相角和幅值误差不可避免。当补偿电容  $C_2$  不能满足  $R_1 C_1 = R_2 C_2$  条件时, 分压器的传递函数为:

$$G(s) = \frac{1}{k(s)} = \frac{\frac{R_2}{1 + sR_2 C_2}}{\frac{R_1}{1 + sR_1 C_1} + \frac{R_2}{1 + sR_2 C_2}}$$

$$= \frac{sR_1 R_2 C_1 + R_2}{sR_1 R_2 (C_1 + C_2) + (R_1 + R_2)}$$

$$= \frac{C_1}{C_1 + C_2} + \frac{\frac{R_2 C_2 - R_1 C_1}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)^2}}{sR_1 R_2 (C_1 + C_2) + (R_1 + R_2)}$$

当分压器输入端施加一个正弦信号:

$$r(t) = A_m \sin \omega t$$

其拉普拉斯变换为:

$$R(s) = \frac{A_m \omega}{s^2 + \omega^2} = \frac{A_m \omega}{(s + j\omega)(s - j\omega)}$$

所以分压器输出为:

$$V_2(s) = \left[ \frac{C_1}{C_1 + C_2} + \frac{\frac{R_2 C_2 - R_1 C_1}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)^2}}{sR_1 R_2 (C_1 + C_2) + (R_1 + R_2)} \right] \times \frac{A_m \omega}{(s + j\omega)(s - j\omega)} \quad (2)$$

由式 (2) 可以看出  $U_2(s)$  共有三个极点, 一个零点, 所以式 (2) 可以改写为:

$$V_2(s) = \frac{X_2}{sR_1 R_2 (C_1 + C_2) + (R_1 + R_2)} + \frac{Z}{(s + j\omega)}$$

$$+ \frac{\bar{Z}}{(s - j\omega)} + X_1 A_m \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \quad (3)$$

式中:  $X_1, X_2, Z, \bar{Z}$  ——常数, 对式 (3) 进行拉普拉斯反变换可以得到:

$$v_2(t) = B_1 e^{-\alpha t} + Z e^{-j\omega t} + \bar{Z} e^{j\omega t} + B_2 \sin \omega t$$

式中:  $\alpha, B_1, B_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} A_m$  为常有理数。如果系统是稳定的, 那么  $V_2(s)$  的极点全部位于  $s$  的左半平面上, 这样当  $t \rightarrow \infty$  时候, 系统响应的瞬态分量等于零, 稳态响应为:

$$u_{w1}(t) = Z e^{-j\omega t} + \bar{Z} e^{j\omega t} + B_2 \sin \omega t \quad (4)$$

系数:

$$Z = H(s) \frac{A_m \omega}{s^2 + \omega^2} (s + j\omega) \Big|_{s=-j\omega} = -\frac{A_m}{2j} H(-j\omega)$$

$$\bar{Z} = H(s) \frac{A_m \omega}{s^2 + \omega^2} (s - j\omega) \Big|_{s=j\omega} = \frac{A_m}{2j} H(j\omega)$$

其中

$$H(j\omega) = \frac{\frac{R_2 C_2 - R_1 C_1}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)^2}}{j\omega R_1 R_2 (C_1 + C_2) + (R_1 + R_2)}$$

将  $Z, \bar{Z}$  代入式 (4) 可以得到:

$$u_{w1}(t) = \frac{A_m}{2j} [H(j\omega) e^{j\omega t} - H(-j\omega) e^{-j\omega t}] + B_2 \sin \omega t$$

$$u_{w1}(t) = \frac{A_m}{2j} [H(j\omega) e^{j\omega t} - H(-j\omega) e^{-j\omega t}]$$

$$+ B_2 \left( \frac{j}{2} e^{j\omega t} - \frac{j}{2} e^{-j\omega t} \right) \quad (5)$$

又因为:

$$H(j\omega) = G(j\omega) + \frac{B_2}{A_m}$$

代入式 (5), 所以:

$$u_{w1}(t) = \frac{A_m}{2j} [G(j\omega) e^{j\omega t} - G(-j\omega) e^{-j\omega t}]$$

由于  $G(j\omega)$  和  $G(-j\omega)$  为共轭函数, 于是:

$$G(j\omega) = |G(j\omega)| e^{j\varphi}$$

$$G(-j\omega) = |G(-j\omega)| e^{-j\varphi}$$

其中:

$$G(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) = |G(j\omega)| e^{j\varphi}$$

$$\varphi = \arctan \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}$$

所以分压器稳态响应改写为:

$$u_{w1}(t) = \frac{A_m}{2j} |G(j\omega)| [e^{j(\omega t + \varphi)} - e^{-j(\omega t + \varphi)}]$$

$$= A_m |G(j\omega)| \sin(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

由式 (6) 知, 对于一个确定参数分压器系统加入一个正弦信号, 它的稳态响应也是一个同频率的正弦信号, 其幅值和相移只和分压器的自身参数有关。输出幅值是输入正弦信号的  $|G(j\omega)|$  倍, 而其相移  $\varphi = \angle G(j\omega)$ , 也就是说, 分压器的幅值和相移误差由分压器自身的结构特点决定。对同一个分压器来说, 优化设计分压器的结构, 合理选择补偿电容  $C_2$  是提高分压器测量精度的重要方法。

根据式 (6), 图 4 图 5 分别是不同补偿电容下 Matlab 计算分压器的分压比和相角曲线。

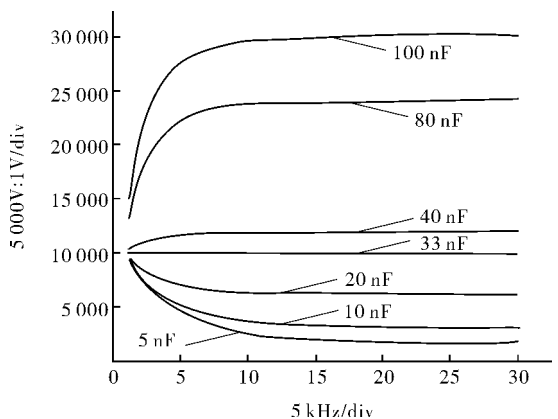


图 4 不同频率和补偿电容的分压器幅值

从曲线中可以看出:

- (1) 正确补偿时, 系统幅值及相角误差都为零。
- (2) 欠补偿时, 分压器变比减小相位滞后, 且在低频处, 相角误差达到最大值, 变比误差较小; 高频处相角误差较小, 变比误差达到最大值。
- (3) 过补偿时, 分压器变比增大相位超前, 且在低频处, 相角误差达到最大值, 变比误差较小。高频处相角误差较小, 变比误差达到最大值。

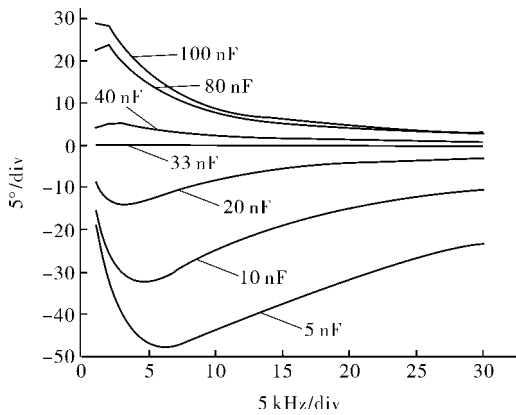


图 5 不同频率和补偿电容的分压器相角

### 3 试验结果分析

试验所用的工具有 TekP6015A 高压示波器探头, 分压比 1 000: 1, Agilent 示波器, 自主研制的电阻型分压器。

图 6 给出了分压器和 TekP6015A 高压探头对 10 kV 高压直流电源的测试结果, 图 7 是 58 kV 的测试结果。从图 7 中可以看出, 分压器波形跟踪性能好。

图 8 是在采用 PSM (pulse step module) 技术的 60 kV (空载) 高压电源下的测试结果。分别在相同电压等级下测试 10 组数据计算平均值与 Tek 高压探头相比较的结果。纵坐标是 Tek 高压探头测量结果, 横坐标是分压器测量值。

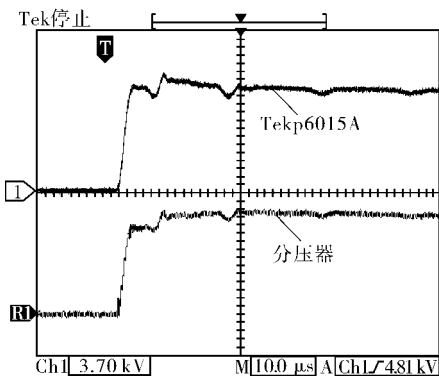


图 6 分压器 10 kV 阶跃响应

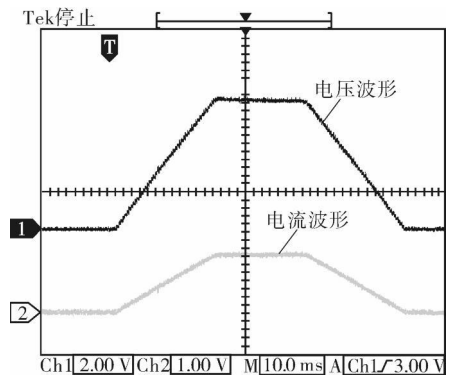


图 7 电源 58 kV /55 A 电压和电流波形

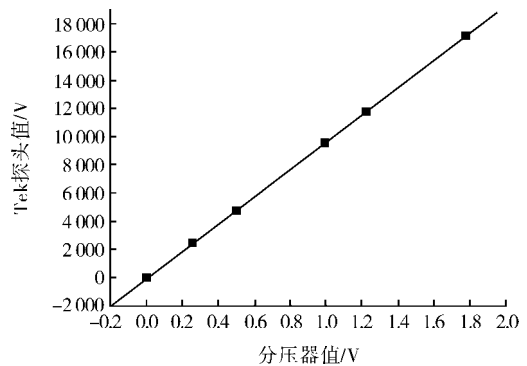


图 8 分压器稳态测量值

校准后的测试结果表明分压比与理论误差小于 0.5%, 相角误差小于 2°。其直流稳态测试时线性度较好, 精度高, 满足工程需求。

### 4 结 论

该分压器最主要的特点如下:

- (1) 利用均压环间分布电容代替传统阻容分压器高压臂并联的电容。
- (2) 均压环改善分压器高压臂附近电场分布, 避免电晕现象产生。
- (3) 均压环间电场强度最大处小于变压器油击穿场强。
- (4) 低压臂并联电容, 有效地补偿了由于均压环间分布电容对分压器分压比和相角造成的影响。
- (5) 由于试验在开放状态下进行, 信号输入输出容易受到外界干扰。输出波形叠加许多高频干扰, 实际使用时, 分压器处于完全屏蔽环境中, 且负载阻抗是和测量引线波阻抗完全匹配的。高频干扰基本可以衰减。
- (6) 理论计算与实验测量有比较好的一致性。

参考文献:

[1] BARUAH U K, PATEL P J BANDYOPADHYAY M, et al Power Supply System for 1 000 s Neutral Beam Injector[C] // Fusion Engineering 17th IEEE/NPSS Symposim. 1997 1133

- [ 2 ] HARADA T, TASUO K. Development of a High Quality Resistance Divider for Impulse Voltage Measurements [ J ]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1971, PAS-90 ( 5 ): 2247- 2250
- [ 3 ] 牛海清,林 莘,朱 松.电阻式传感器的结构设计及误差特性 [ J ].东北电力技术, 2002 ( 1 ): 4- 7
- [ 4 ] 邬昌峰.一种测量高压快脉冲用电阻分压器的设计 [ J ].高压电器, 2006 42( 5 ): 362- 364
- [ 5 ] 邬昌峰,蒋全兴,何 鹏,等.新型脉冲分压器的分析与误差补偿 [ J ].高压电器, 2008 44( 2 ): 168- 171
- [ 6 ] 冯慈璋.电磁场 [ M ].北京:高等教育出版社, 1983
- [ 7 ] 阎照文. ANSYS10.0 工程电磁分析技术与实例详解 [ M ].北京:中国水利水电出版社, 2006
- [ 8 ] 王富耻,张朝晖. ANSYS10.0 有限元分析理论与工程应用 [ M ].北京:电子工业出版社, 2006
- [ 9 ] 孙明礼,胡仁喜,崔海蓉. ANSYS10.0 电磁学有限元分析实例指导教程 [ M ].北京:机械工业出版社, 2007
- [ 10 ] 朱德恒,严 璋.高电压绝缘 [ M ].北京:清华大学出版社, 1992
- [ 11 ] 阿·施瓦伯.高电压测量技术 [ M ].北京:电力工业出版社, 1982
- [ 12 ] 邱关源.电路 [ M ].北京:高等教育出版社, 2002
- [ 13 ] KUO B C. Automatic Control Systems [ M ]. 8th ed 北京:高等教育出版社, 2003.
- [ 14 ] 胡寿松.自动控制原理 [ M ].第 4 版.北京:科学出版社, 2002

### Research of Equalizing High Voltage Divider Stray Capacitance

JIANG Li, FU Peng<sup>a</sup>, PAN Shengmin<sup>a</sup>, LIU Bao-hua<sup>a</sup>, LIYun-na<sup>b</sup>

(*a. Institute of Plasma Physics; b. Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences Hefei 230031, China*)

**Abstract** It is an important impact on measurement veracity and response time of the resistance divider for the stray capacitance, especially high voltage divider. Because both of high voltage arm and low voltage arm resistance were large and its stray inductance are little impact on performance of divider, it is a key role in measuring veracity for stray capacitance. A new method adding shielding ring was provided to poise the distribution of electric field and improve the performance of divider. By theory analysis of divider transfer function of magnitude-frequency characteristics and phase-frequency characteristics, a new method equalizing stray capacitance could be conclude. It is proved that this new method is accurate by experiment.

**Key words** resistance divider, stray capacitance, stray inductance, shielding ring, transfer function, electric field