

DOI: 10.7667/PSPC180521

# 新能源发电上网关口计量用互感器二次负荷 分析及选型建议

张龙<sup>1</sup>, 徐二强<sup>1</sup>, 赵玉富<sup>1</sup>, 田闽哲<sup>1</sup>, 王国卉<sup>1</sup>, 高利明<sup>1</sup>, 罗辉勇<sup>1</sup>, 郭伟<sup>2</sup>

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052;  
2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

**摘要:** 随着光伏、风电等新能源迅猛发展, 新能源发电装机容量比重日益增大。作为关口电能计量装置的重要组成部分, 互感器二次负荷的大小对其误差存在不可忽视的影响。对河南电网新能源发电上网关口计量用互感器二次负荷进行了全面统计。结果显示, 大部分新能源互感器二次负荷额定容量配置过大, 既不满足规程要求, 也对计量误差造成了不利影响。实际试验表明, 二次负荷选择不合理会造成计量误差偏移, 甚至超差。最后, 提出了新能源发电上网关口计量用互感器二次负荷的选型建议, 供从事电能计量工作相关技术人员参考。

**关键词:** 风电; 光伏; 计量用互感器; 发电上网关口; 二次负荷

## Analysis and selection proposal of secondary load of metering transformer in new energy generation gateways

ZHANG Long<sup>1</sup>, XU Erqiang<sup>1</sup>, ZHAO Yufu<sup>1</sup>, TIAN Minzhe<sup>1</sup>, WANG Guohui<sup>1</sup>, GAO Liming<sup>1</sup>, LUO Huiyong<sup>1</sup>, GUO Wei<sup>2</sup>  
(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

**Abstract:** With the rapid development of new energy, such as photovoltaic and wind power, the installed capacity of new energy generation which has been an important part of power energy is increasing. As a vital part of gateway electric energy metering device, secondary load has a non-ignorable influence on error of transformer. This paper makes a comprehensive statistics of the secondary load of metering transformers in new energy generation gateways of Henan power grid. Results show that most of the secondary loads of metering transformers are too large, which is not only unable to meet the requirements of the regulation, but also makes a negative effect on the metering error. Practical experiment shows that unreasonable selection of secondary load leads to deviation of metering error, even exceeding to the error limit. Finally, it puts forward the selection proposals for the secondary load of metering transformer in new energy generation gateways, which provides reference for technicians engaged in electrical energy measurement.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2018QN072) and Science and Technology Project of State Grid Henan Electric Power Company (No. 52170217001C).

**Key words:** wind power; photovoltaic; metering transformer; generation gateway; secondary load

## 0 引言

近年来, 以风电和光伏发电为代表的新能源发电以独特的优势得到最大限度的开发。风电和光伏发电具有投资少、发电灵活、与环境兼容好<sup>[1-8]</sup>等特点, 在促进河南省节能减排、低碳经济发展方面起

到了积极的作用。《河南省“十三五”可再生能源发展规划》指出, 至2020年, 河南省风电装机容量达600万千瓦以上, 光伏装机容量达500万kW以上。然而, 风电和光伏发电具有一定的不确定性, 输出机规模的增大, 给电网潮流分布<sup>[9]</sup>、稳定运行<sup>[10-11]</sup>、功率在额定容量内随机波动<sup>[12]</sup>。随着风电、光伏装电能计量<sup>[13]</sup>等带来一定影响。

新能源发电上网关口互感器计量绕组二次负荷的选择是否科学合理, 对关口计量装置综合误差有

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2018QN072); 国网河南省电力公司科技项目资助(52170217001C)

很大影响<sup>[14]</sup>。很多新能源发电上网关口点设置在电网变电站侧，部分变电站已投运多年，互感器二次输出按照电能表、指示仪表、继电保护等综合容量设计，二次额定负荷选择很大，有的甚至达到300 VA。而经现场实际测试，关口计量用互感器二次回路负荷很小，这对关口计量装置科学、准确计量有着很大影响。

文献[15]从部分省公司各自随机抽取一个 500 kV 和 220 kV 变电站，对 110 kV 等级及以上的互感器二次参数进行统计，并根据分析结果提出了相关建议；文献[16]基于电压互感器电磁模型，分析了互感器二次负荷对误差影响的机理，制定了二次负荷配置原则并将其应用于江苏电网计量装置改造中。但目前缺乏对新能源发电上网关口互感器进行全面统计和分析。为了深入研究新能源发电上网关口计量用互感器二次负荷情况，对河南电网统调新能源发电上网关口互感器二次负荷情况进行了统计和分析，并提出了互感器二次负荷的选型建议。

## 1 统计数据及分析

根据《河南电网调度控制管理规程》规定，装机容量大于 10 MW 的风电场、装机容量大于 6 MW 的太阳能电站均属于省网统调电厂。截止到 2017 年底，河南省新能源(风电、光伏等)统调发电上网关口点一共有 99 个，包括电磁式电流互感器(Current Transformer, CT) 297 只；电压互感器(Potential Transformer, PT)288 只，其中电容式电压互感器(CVT)186 只，电磁式电压互感器 102 只。

### 1.1 电压互感器

#### 1.1.1 220 kV 电压互感器

根据统计结果，220 kV 电压互感器一共有 42 只，计量绕组额定二次负荷统计结果如图 1 所示，实际二次负荷结果如图 2 所示。

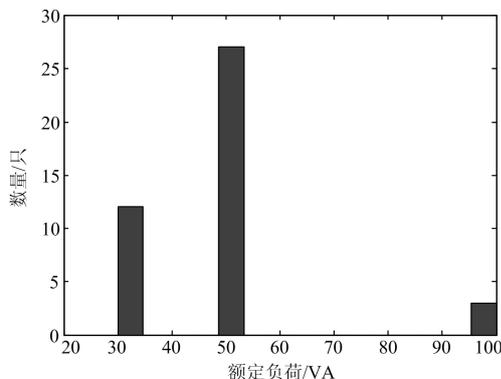


图 1 220 kV 电压互感器额定二次负荷  
Fig. 1 Rated secondary load of 220 kV PT

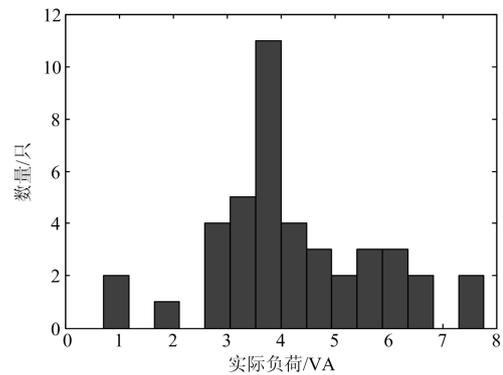


图 2 220 kV 电压互感器实际二次负荷  
Fig. 2 Actual secondary load of 220 kV PT

由统计结果可以看出，220 kV 电压互感器计量绕组额定二次负荷主要为 30 VA、50 VA 和 100 VA，其中 50 VA 及以上的占 72%左右。现场实测发现，实际二次负荷均小于 8 VA，且二次负荷小于 5 VA 的占 70%。

#### 1.1.2 110 kV 电压互感器

根据统计结果，110 kV 电压互感器一共有 228 只，计量绕组额定二次负荷统计结果如图 3 所示，实际二次负荷结果如图 4 所示。

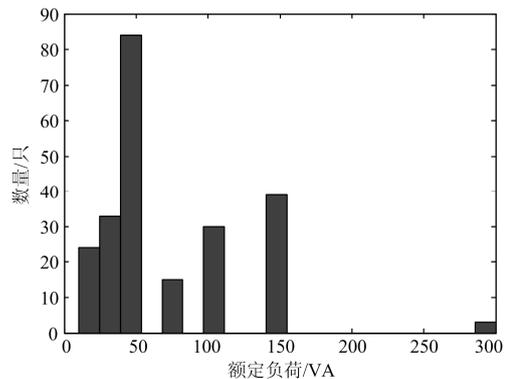


图 3 110 kV 电压互感器额定二次负荷  
Fig. 3 Rated secondary load of 110 kV PT

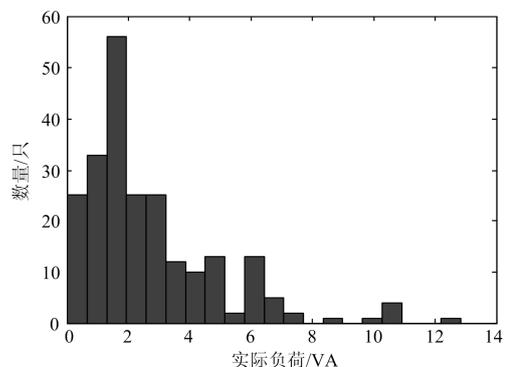


图 4 110 kV 电压互感器实际二次负荷  
Fig. 4 Actual secondary load of 110 kV PT

由统计结果可以看出, 110 kV 电压互感器计量绕组额定二次负荷主要分布在 10~100 VA, 其中 50 VA 及以上的占 75%左右, 有个别额定负荷比较大的甚至达到 300 VA。现场实测发现, 实际二次负荷均小于 13 VA, 且二次负荷小于 5 VA 的约占 86%。

### 1.1.3 35 kV 电压互感器

根据统计结果, 35 kV 电压互感器一共有 18 只, 计量绕组额定二次负荷统计结果如图 5 所示, 实际二次负荷结果如图 6 所示。

由统计结果可以看出, 35 kV 电压互感器计量绕组额定二次负荷均为 30 VA。现场实测发现, 实际二次负荷均小于 7 VA, 且二次负荷小于 5 VA 的约占 78%。

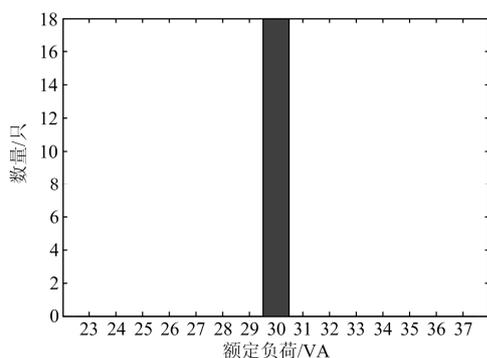


图 5 35 kV 电压互感器额定二次负荷

Fig. 5 Rated secondary load of 35 kV PT

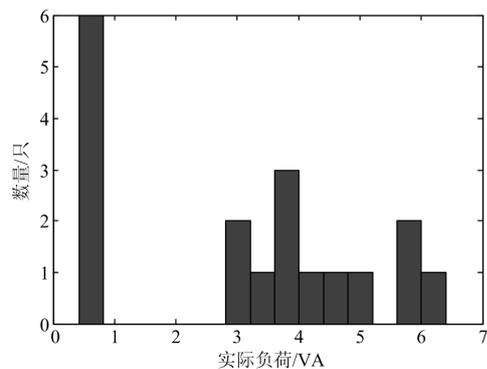


图 6 35 kV 电压互感器实际二次负荷

Fig. 6 Actual secondary load of 35 kV PT

## 1.2 电流互感器

### 1.2.1 220 kV 电流互感器

根据统计结果, 220 kV 电流互感器一共有 36 只。其中, 二次额定电流  $I_N$  为 5 A 的有 30 只, 其计量绕组额定二次负荷统计结果如图 7 所示, 实际二次负荷结果如图 8 所示。

二次额定电流  $I_N$  为 1 A 的有 6 只, 其额定负荷均为 50 VA, 实际二次负荷如图 9 所示。

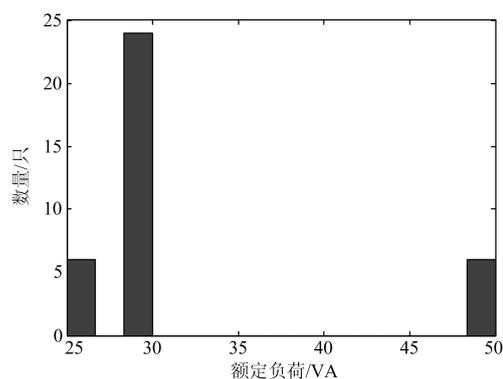


图 7 220 kV CT 额定二次负荷 ( $I_N=5$  A)

Fig. 7 Rated secondary load of 220 kV CT ( $I_N=5$  A)

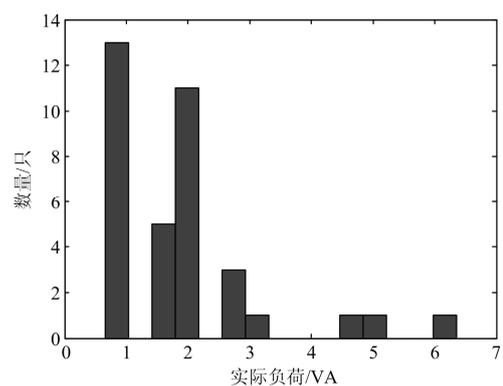


图 8 220 kV 电流互感器实际二次负荷 ( $I_N=5$  A)

Fig. 8 Actual secondary load of 220 kV CT ( $I_N=5$  A)

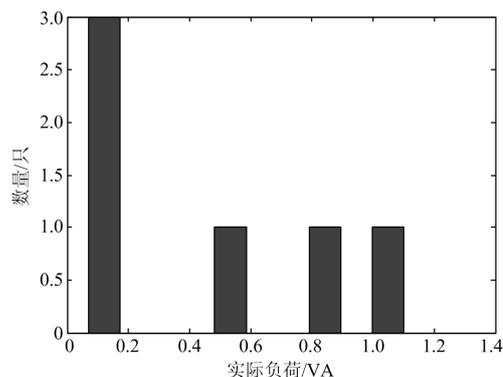


图 9 220 kV 电流互感器实际二次负荷 ( $I_N=1$  A)

Fig. 9 Actual secondary load of 220 kV CT ( $I_N=1$  A)

由统计结果可以看出, 220 kV 电流互感器二次负荷主要为 25 VA、30 VA 和 50 VA。而通过现场对实际负荷进行测试发现, 实际二次负荷均小于 7 VA, 且二次负荷小于 5 VA 的占 97%。

### 1.2.2 110 kV 电流互感器

根据统计结果, 110 kV 电流互感器一共有 231 只。其中, 二次额定电流  $I_N$  为 5 A 的有 213 只, 其计量绕组额定二次负荷统计结果如图 10 所示, 实际

二次负荷结果如图 11 所示。

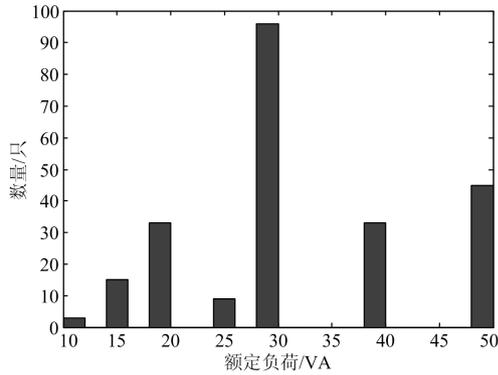


图 10 110 kV 电流互感器额定二次负荷(IN=5 A)  
Fig. 10 Rated secondary load of 110 kV CT (IN=5 A)

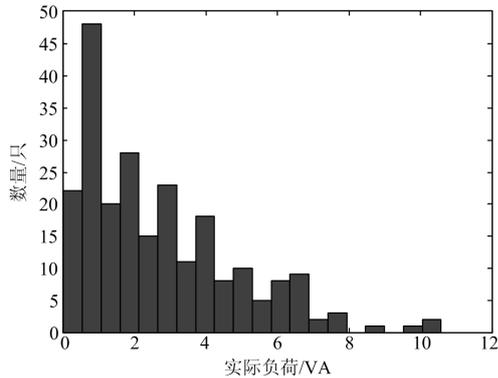


图 11 110 kV 电流互感器实际二次负荷(IN=5 A)  
Fig. 11 Actual secondary load of 110 kV CT (IN=5 A)

二次额定电流 IN 为 1 A 的有 18 只, 其计量绕组额定二次负荷统计结果如图 12 所示, 实际二次负荷结果如图 13 所示。

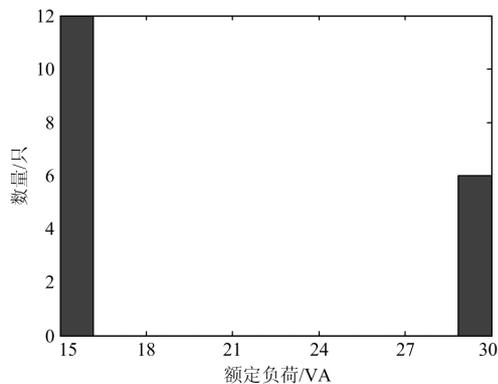


图 12 110 kV 电流互感器额定二次负荷(IN=1 A)  
Fig. 12 Rated secondary load of 110 kV CT (IN=1 A)

由统计结果可以看出, 电流互感器二次负荷主要分布在 10~50 VA, 其中 30 VA 及以上的占 74% 左右。现场对实际负荷进行测试发现, 实际二次负荷均小于 11 VA, 且二次负荷小于 5 VA 的约占 85%。

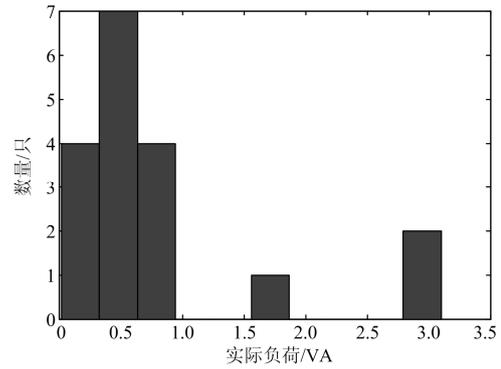


图 13 110 kV 电流互感器实际二次负荷(IN=1 A)  
Fig. 13 Actual secondary load of 110 kV CT (IN=1 A)

### 1.2.3 35 kV 电流互感器

根据统计结果, 35 kV 电流互感器一共有 30 只。其中, 二次额定电流 IN 为 5 A 的有 24 只, 其计量绕组额定二次负荷统计结果如图 14 所示, 实际二次负荷结果如图 15 所示。

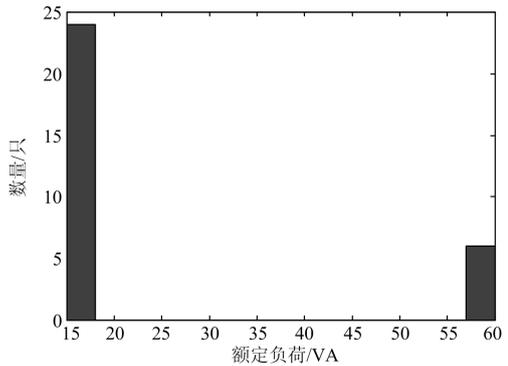


图 14 35 kV 电流互感器额定二次负荷(IN=5 A)  
Fig. 14 Rated secondary load of 35 kV CT (IN=5 A)

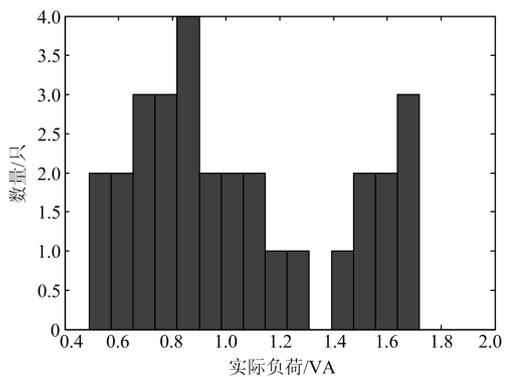


图 15 35 kV 电流互感器实际二次负荷(IN=5 A)  
Fig. 15 Actual secondary load of 35 kV CT (IN=5 A)

二次额定电流 IN 为 1 A 的有 6 只, 其计量绕组额定二次负荷均为 15 VA, 实际二次负荷如图 16 所示。

由统计结果可以看出, 35 kV 电流互感器二次负荷主要为 15 VA 和 60 VA。通过现场对实际负荷进行测试发现, 实际二次负荷均小于 2 VA。

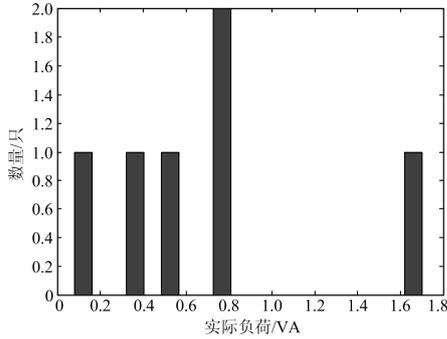


图 16 35 kV 电流互感器实际二次负荷( $I_N=1$  A)

Fig. 16 Actual secondary load of 35 kV CT ( $I_N=1$  A)

### 1.3 小结

由统计结果可以看出, 河南电网新能源发电上网关口所用互感器计量绕组额定二次负荷选择不合理, 绝大部分二次负荷选择过大, 而实际负荷很小, 造成互感器计量绕组长期在轻载情况下运行。

DL/T 448-2016<sup>[17]</sup>中规定, “互感器二次负荷的选择应保证接入其二次回路的实际负荷在 25%~100%额定负荷范围内。二次回路接入静止式电能表时, 电压互感器额定二次负荷不宜超过 10VA, 额定二次电流为 5 A 的电流互感器额定二次负荷不宜超过 15 VA, 额定二次电流为 1 A 的电流互感器额定二次负荷不宜超过 5VA”。国家电网公司标准 Q/GDW 1480-2015《分布式电源接入电网技术规定》中, 对电能计量的要求为“每个计量点均应装设双向电能计量装置, 其设备配置和技术要求符合 DL/T 448 的相关规定”。

## 2 互感器等效模型

### 2.1 电流互感器

$r_1$  和  $X_1$  是一次绕组的电阻和电抗,  $g_0$  和  $b_0$  是铁芯的励磁电导和电纳,  $r_2$  和  $X_2$  是二次绕组的电阻和电抗,  $r_b$  和  $X_b$  是二次负荷的电阻和电抗。图 17 中变压器是理想变压器。电流互感器 T 型等效电路如图 18。

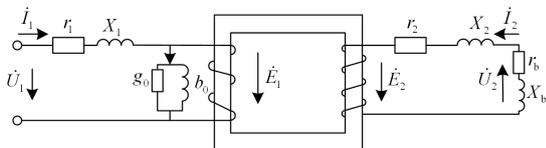


图 17 电流互感器工作原理图

Fig. 17 Principle diagram of CT

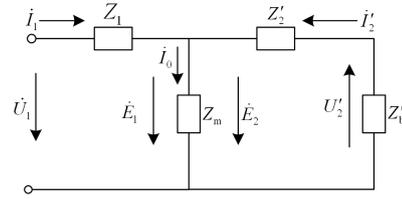


图 18 电流互感器 T 型等效电路

Fig. 18 T-type equivalent circuit of CT

电流互感器的误差<sup>[18]</sup>可表示为

$$\varepsilon = \frac{k\dot{I}_2 - \dot{I}_1}{\dot{I}_1} = \frac{-\dot{I}'_2 - \dot{I}_1}{\dot{I}_1} = -\frac{\dot{I}_0}{\dot{I}_1} = -\frac{Z'_2 + Z'_b}{Z_m} \quad (1)$$

电流互感器二次负荷增加时,  $Z'_2 + Z'_b$  的模值变大, 而  $Z_m$  由于励磁电流的变大而略有变大, 但变大的程度很小, 远小于  $Z'_2 + Z'_b$  变大的幅度, 从而使  $\frac{Z'_2 + Z'_b}{Z_m}$  的模值变大, 造成比值差向负方向变化, 相位差向正方向变化。

### 2.2 电压互感器

电压互感器分为电磁式电压互感器和电容式电压互感器(CVT)。电磁式电压互感器与电流互感器原理相同, 将图 17 中电流向量换成电压向量即得到电磁式电压互感器原理图。图 19 为 CVT 的等效原理图<sup>[19]</sup>。

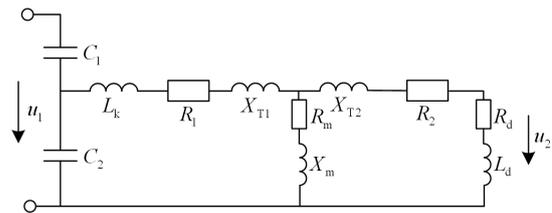


图 19 CVT 等效电路图

Fig. 19 Equivalent circuit of CVT

其中,  $L_k$  为补偿电抗器的电感;  $R_1$  为中间变压器一次绕组电阻与补偿电抗器电阻之和;  $X_{T1}$  和  $X_{T2}$  分别为中间变压器一次绕组漏电抗和二次绕组漏电抗值(归算到一次侧);  $R_2$  为中间变压器二次绕组的电阻值(归算到一次侧);  $Z_m$  为中间变压器的励磁阻抗;  $L_d$  和  $R_d$  分别为归算到一次侧的负载;  $u_2$  为二次输出电压。

将中间变压器与二次负载利用戴维南定理等效为中间变压器的输入阻抗  $R_0$  与  $L_0$ , 将电磁单元中间变压器的输入阻抗等效为等值电阻与电感串联, 构建简化的 CVT 二次负荷模型<sup>[20]</sup>, 如图 20 所示。

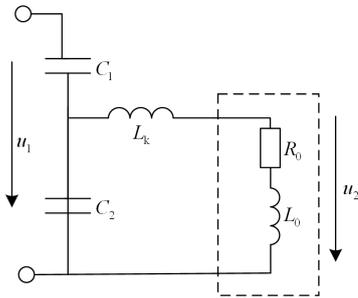


图 20 简化的 CVT 二次负荷电路图

Fig. 20 Simplified circuit of CVT secondary load

比值差为

$$f = \frac{\left(\frac{C_1 + C_2}{C_1}\right) \sqrt{(\omega^2 C_1 L_0)^2 + (\omega C_1 R_0)^2}}{\sqrt{[\omega^2 (L_k + L_0)(C_1 + C_2) - 1]^2 + [\omega (C_1 + C_2) R_0]^2}} - 1 \quad (2)$$

相位差为

$$\delta = \tan^{-1}\left(-\frac{R_0}{\omega L_0}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{-\omega (C_1 + C_2) R_0}{\omega^2 (L_k + L_0)(C_1 + C_2) - 1}\right) \quad (3)$$

当其他外部条件相同，负载的功率因数一定时（即  $\frac{R_d}{\omega L_d}$  一定），则  $\frac{R_0}{\omega L_0}$  一定，随着二次负载大小的变化，中间变压器等效输入阻抗  $R_0$  与  $L_0$  随之发生变化，由式(2)和式(3)可推出，CVT 比值差和相位差均发生变化。

### 3 实例分析

选取 3 只河南电网某新能源发电上网关口用电电压互感器进行现场试验。试验选取的标准电压互感器型号为 HJB-220G2 精密电压互感器，准确度等级为 0.02 级，其一次电压选择  $110/\sqrt{3}$  kV，二次电压  $100/\sqrt{3}$  V。其额定负载为 0~0.25 VA，功率因数为 1。

被检互感器型号为 TYD110/ $\sqrt{3}$ -0.02 H，(1a, 1n)为 0.2 级，额定负荷 150 VA；(2a, 2n)为 0.5 级，额定负荷 150 VA；(3a, 3n)为 0.5 级，额定负荷 150 VA。计量绕组实际二次负荷分别取 1.25 VA, 2.5 VA, 5 VA, 10 VA, 20 VA, 30 VA, 50 VA, 75 VA, 100 VA 和 150 VA 进行计量绕组误差试验，角差均合格，3 只互感器比值差(100% $U_N$ )如图 21 所示。

从图 21 中可以看出，由于 3 只互感器额定负荷较大，在额定负荷时互感器比值差分别为-0.224%，-0.216%，-0.227%，超出了检定规程中规定的误差范围。

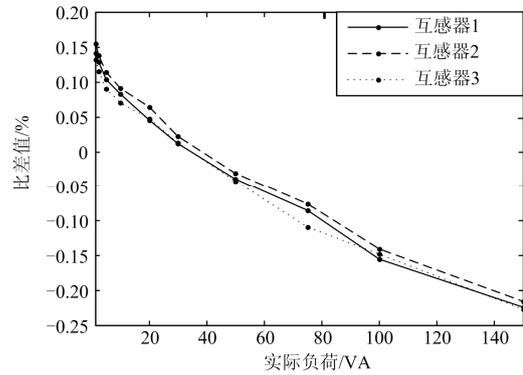


图 21 不同实际负荷下的比值差

Fig. 21 Ratio error of different actual loads

### 4 结论

科学合理地选择新能源发电上网关口计量用互感器二次负荷至关重要，它对关口电能计量装置综合误差有重要影响。根据统计及分析结果，提出以下几条建议：

(1) 对于母线型电压互感器，计量绕组额定二次负荷建议不大于 30 VA；对于线路型电压互感器，计量绕组额定二次负荷建议不大于 10 VA。

(2) 从电气设计上要求，优先选择专用线路电压互感器作为关口计量用电压互感器。

(3) 对于电流互感器，二次额定电流为 1 A 的，计量绕组额定二次负荷建议不大于 5 VA；二次额定电流为 5 A 的，计量绕组额定二次负荷建议不大于 15 VA。

### 参考文献

- [1] LUO C L, OOI B T. Frequency deviation of thermal power plants due to wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 708-711.
- [2] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10):146-154.  
ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [3] YAN R F, SAHA T K, MODI N, et al. The combined effects of high penetration of wind and PV on power system frequency response[J]. Applied Energy, 2015, 145(5): 320-330.
- [4] MA Z, CHEN H, CHAI Y. Analysis of voltage stability uncertainty using stochastic response surface method related to wind farm correlation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 211-219. DOI: 10.1186/s41601-017-0051-3.

- [5] 江卓翰,何禹清,曹丽璐,等.基于改进遗传算法的含分布式电源和储能装置配电系统网络重构[J].电力系统保护与控制,2018,46(5):68-72.  
JIANG Zhuohan, HE Yuqing, CAO Lili, et al. Reconfiguration of distribution network with distributed generations and energy storing devices based on improved genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 68-72.
- [6] 贾成真,王灵梅,孟恩隆,等.基于风电场集中储能的风储柔性控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(6):30-37.  
JIA Chengzhen, WANG Lingmei, MENG Enlong, et al. Research on flexible control strategy based on the centralized storage joint with wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 30-37.
- [7] 税月,刘俊勇,高红均,等.考虑风电不确定性的电气能源系统两阶段分布鲁棒协同调度[J].电力系统自动化,2018,42(13):43-50.  
SHUI Yue, LIU Junyong, GAO Hongjun, et al. Two-stage distributed robust cooperative dispatch for integrated electricity and natural gas energy systems considering uncertainty of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 43-50.
- [8] 欧阳波,易灵芝,何巨龙,等.风电接入的电力系统电能质量扰动的检测与定位[J].电力系统保护与控制,2018,46(6):143-150.  
OUYANG Bo, YI Lingzhi, HE Julong, et al. Detection and localization of power quality disturbance for power system connected with wind energy generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 143-150.
- [9] 王锐,顾伟,孙蓉,等.基于概率最优潮流的风电接入能力分析[J].电网技术,2011,35(12):214-220.  
WANG Rui, GU Wei, SUN Rong, et al. Analysis on wind power penetration limit based on probabilistically optimal power flow[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 214-220.
- [10] 潘雄,张龙,黄家栋,等.基于Sobol序列和混合Copula的含风电和光伏电力系统暂态稳定分析[J].太阳能学报,2015,36(7):1622-1631.  
PAN Xiong, ZHANG Long, HUANG Jiadong, et al. Transient stability analysis of power system integrated with wind farms and photovoltaic plants based on Sobol sequence and mixed-Copula[J]. Acta Energetica Sinica, 2015, 36(7): 1622-1631.
- [11] 张龙,黄家栋,王莉莉.风速相关性对电力系统暂态稳定的影响[J].电力系统保护与控制,2014,42(6):77-83.  
ZHANG Long, HUANG Jiadong, WANG Lili. Impact of wind speed correlation on transient stability of power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 77-83.
- [12] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):1-8.  
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.
- [13] 于海波,林繁涛,白静芬,等.新能源发电并网中电能计量问题的研究[J].电测与仪表,2012,49(11):57-60.  
YU Haibo, LIN Fantao, BAI Jingfen, et al. Studies on the power metering problem for grid-connected new energy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(11): 57-60.
- [14] 王春庆,赵玉富,周琪,等.电能计量装置运行现状浅析[J].电测与仪表,2010,47(7):26-28.  
WANG Chunqing, ZHAO Yufu, ZHOU Qi, et al. The analysis of present operational situation for electrical energy metering device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(7): 26-28.
- [15] 陈晓明,王晓琪,吴士普,等.互感器二次负荷调查统计与分析[J].高压电器,2014,50(5):64-68.  
CHEN Xiaoming, WANG Xiaoqi, WU Shipu, et al. Statistics and analysis of secondary load in instrument transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5): 64-68.
- [16] 杨世海,周赣,周峰,等.多绕组电压互感器二次负荷配置原则及其工程应用[J].高电压技术,2015,41(1):202-208.  
YANG Shihai, ZHOU Gan, ZHOU Feng, et al. Configuration principle of secondary load of multi-winding potential transformer and its engineering application[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 202-208.
- [17] 电能计量装置技术管理规程:DL/T 448-2016[S].
- [18] 王乐仁.电力互感器检定及应用[M].北京:中国计量出版社,2010.
- [19] 赵修民.电压互感器[M].太原:山西教育科学出版社,1990.
- [20] 李永森.电容式电压互感器误差特性影响因素研究[D].重庆:重庆大学,2016.  
LI Yongsen. Study on the influence factors on the error characteristics of the capacitor voltage transformer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

收稿日期:2018-05-04; 修回日期:2018-08-06

作者简介:

张龙(1989—),男,通信作者,工学硕士,工程师,主要从事互感器的试验及研究工作; E-mail: zhanglong4ever@163.com

徐二强(1979—),男,高级工程师,长期从事电能计量研究及管理工作;

赵玉富(1976—),男,工学硕士,高级工程师,长期从事电能计量技术和电磁测量方面的研究工作。

(编辑 姜新丽)