

一体化高压电能表传感和供能技术的研究

传统的高压电能计量装置由高压部分的电压传感器、电流互感器以及低压部分的电能计量装置组成，系统的整体准确度无法确定，并且存在容易窃电的缺点。提出一种直接在高压端进行电能计量的一体化高压电能表方案，将电子式互感器和电子式电能表相结合。该系统采用低功率铁心线圈电子式电流互感器和电容分压型电子式电压互感器作为传感单元，并且通过高压母线感应取能，实现隔离式在线供电。实验数据表明，所采用的电压和电流互感器以及供能电路可以满足工程需求。

鲁义宽/鄂尔多斯职业学院自动化与信息系



鲁义宽/副教授

关键词/Keywords

高压电能表 ·
一体化 ·
LPTA ·
电容分压 ·
感应取能 ·

高压电能计量表可以向供电商和用户提供电能计量信息，保证发电、供电和用电三方在电能结算中的利益^[1]。传统的高压电能表由高压部分的电压互感器、电流互感器和低压部分的电能计量表构成，这种分体式的设计方案存在以下问题^[2]：①高压部分主要进行电压和电流信息的采集，无法直接完成电能计量，系统的整体准确度无法确定；②对低压部分进行电能计量，容易在计量回路上实施窃电；③装置的测量和信息传输环节较多，在实际工程应用中可靠性较低，高低压部分之间的传输通道受到干扰，容易出现数据丢失；④严重的铁磁谐振可能会击穿和损坏传统电压互感器，此外用油做绝缘材料的互感器长时间运行后会出现绝缘性能降低的情况，存在安全隐患。

针对传统高压电能表的不足，本文提出一种直接在高压端进行电能计量的一体化高压电能表方案，将电子式互感器和电子式电能表相结合。电流传感单元采用低功率铁心线圈电子式电流互感

器（LPTA）；电压传感单元采用电容分压型电子式电压互感器；供能电路采用高压母线感应取能，实现隔离式在线供电。采用两表法计量电能，通过电容分压型电子式电压互感器和LPTA采集电压和电流信息，通过感应取能电路实现对电能表直接供能。实验结果表明所设计的电流、电压传感器和供能电路能满足运行需求。

一体化高压电能表

图1为一体化高压电能表的整体方案，该方案分为高压侧模块和低压侧模块，高压侧模块和低压侧模块两部分通过光纤传输数据。整个高压计量模块安装在高压母线侧，直接对电压互感器的输出信息进行计算处理，避免了电压互感器信号在传输到低压侧过程中的二次压降，此外模块与外界的数据传递采用光纤通信，实现安全绝缘，并能有效防止窃电。与采用电磁式高压电流互感器、电压互感器的高压电能表相比，该系统采用电子式互感器，其体积和重量都显著减小。

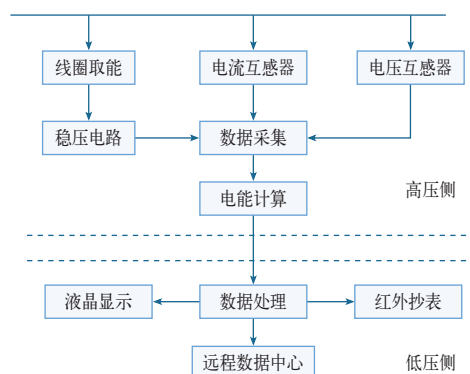


图1 系统整体结构

配电网通常采用的是中性点不接地系统, 普遍采用两表法来进行电能计量, 即通过测量AB相间电压、CB相间电压以及A相和C相的相电流即可得到三相的总功率。本文提出的一体化高压电能表将电子式互感器和电能表技术相结合, 原理如图2所示。

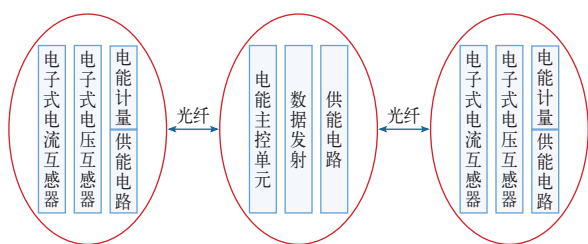


图2 一体化高压电能表原理

该电能表主要由A相电能计量单元、C相电能计量单元和B相电能综合单元三部分构成。其中相间电压和相电流的测量分别由电容分压式电压互感器和LPTA作为传感头; 供能部分通过线圈取电方式直接从高压侧获取电源, 为高压电能表供电。

电压、电流传感器设计

1. 电压传感器

采用分压原理的电压互感器主要有电阻分压、电容分压和阻容分压三种类型。由于电阻和大地以及电阻之间存在杂散电容, 导致电压信号发生相位漂移而引起相位误差。在运行过程中, 消耗的有功功率导致电阻发热, 进而引起阻值变化和分压比变化, 电阻分压器和阻容分压器存在使用局限, 而电容式电压不存在以上问题^[3], 因此本方案选用电容分压器, 其原理如图3所示。

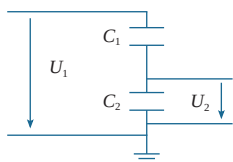


图3 电容分压器原理

在理想状态下, 根据基本的电路理论可知输出电压为

$$U_2 = \frac{C_h}{C_1 + C_h} U_1 = K_0 U_1 \quad (1)$$

式中, K_0 为理想状态下的分压比。

在实际应用过程中, 电容分压器的电容元件和大地或接地屏蔽之间存在的杂散电容将导致分压比变化。此外并列运行的电容分压器会相互影响, 对邻相和隔相的电容造成干扰作用, 综合考虑以上影响, 实际运行的电容分压器三相电压表达式为

$$\begin{pmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & K_2 & K_3 \\ K_2 & K_1 & K_3 \\ K_3 & K_2 & K_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, K_1 为电容分压器不受影响下的分压比; K_2 为邻相电容分压器影响下的分压比; K_3 为隔相电容分压器影响下的分压比。

将电容分压器按具有均匀分布参数的电路进行分析, 可分别得到 K_1 、 K_2 和 K_3 的表达式为

$$K_1 = \left(1 + \frac{2C_s - C_r}{4C_t + 2C_s + C_r} \right) K_0 \quad (3)$$

式中, C_t 为电容分压器中串联电容元件的总容值; C_s 为电容分压器与高压线路间的杂散电容; C_r 为电容分压器的电容元件和大地间的杂散电容。

$$K_2 = C_1 + \sum_{j=2}^{n-1} C_j \frac{C_h/(j-1)}{C_h/(j-1) + C_h/(n-j) + C_1} + C_n \frac{C_h/(n-1)}{C_h/(n-1) + C_1} \quad (4)$$

$$K_3 = C_1 + \sum_{i=2}^{n-1} C_i \frac{C_h/(i-1)}{C_h/(i-1) + C_h/(n-i) + C_1} + C_n \frac{C_h/(n-1)}{C_h/(n-1) + C_1} \quad (5)$$

式中, C_h 为电容分压器高压臂串联电容单元的电容; C_1 为电容分压器低压臂电容; C_j 为考虑邻相分压器中第 j 个电容元件板的杂散电容作用下的等效电容; C_i 为考虑隔相分压器中第 i 个电容元件板的杂散电容作用下的等效电容。

电容会受到温度的影响, 且其容量会发生变化。图3中的高压臂和低压臂采用相同物理属性的电容, 可以有效减少温度变化对分压比 K_0 的影响。假设电容容量随温度变化的百分比为 δ , 且认为电容分压器各电容的温度均发生相同变化, 则此时电容分压器的分压比为

$$K'_0 = \frac{C_h(1+\delta)}{C_l(1+\delta)+C_h(1+\delta)} = \frac{C_h}{C_h+C_l} \quad (6)$$

由式(6)与式(1)对比可知 $K_0=K'_0$ ，采用串联相同电容方法可有效消除温度系数电容对分压器分压比的影响。

2. 电流传感器

低功率电流互感器(LPTA)是一种电磁式电流互感器，它具有输出灵敏度高、性能稳定的优点。如图4所示，LPTA主要由一次绕组、铁心和损耗极小的二次绕组组成。二次绕组并联取样电阻，线圈绕组将一次母线电流转换为二次小电流，取样电阻将二次电流转换为正比于一次电流的小电压信号输出。

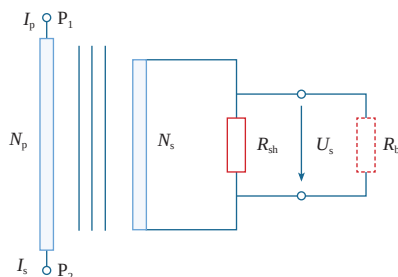


图4 LPTA示意图

图中， P_1 、 P_2 分别为一、二次接线端子； N_p 、 N_s 分别为一、二次绕组的匝数； I_p 、 I_s 分别为一、二次电流； R_{sh} 为取样电阻； R_b 为负载阻抗。

由于LPTA的输出电压 $U_s = I_s R_{sh}$ ，设计过程中，在LPTA的输出电压确定的情况下， R_{sh} 的取值由二次电流 I_s 决定。根据磁动势平衡定律可得

$$I_s = \frac{N_p}{N_s} I_p \quad (7)$$

则输出电压为

$$U_s = R_{sh} \frac{N_p}{N_s} I_p \quad (8)$$

通常LPTA采用铜导线绕制二次绕组，设铜导线的长度和截面积分别为 L_1 和 S_1 ，电阻率为 ρ ，则二次电阻为

$$R_2 = \rho \frac{L_1}{S_1} \quad (9)$$

考虑二次电阻、取样电阻以及二次电流 I_2 ，二次绕组感应电动势 E_2 计算表达式为

$$E_2 = I_2(R_2 + R_{sh}) \quad (10)$$

铁心中的磁通密度峰值计算公式为

$$B_m = \frac{E_2 \times 10^8}{4.44 f N_2 S_2 K} \quad (11)$$

式中， f 为额定频率； N_2 为二次绕组的匝数； S_2 为铁心截面积； K 为铁心叠片系数，取 $K=0.93$ 。

根据 B_m 从铁心材料的磁化曲线和铁心损耗角曲线查得损耗角 α 和 H 。

再根据 H 和平均磁路长度 L_2 可求得励磁磁动势

$$I_0 N_1 = H L_2 \quad (12)$$

LPTA的比差为

$$f = \frac{I_0 N_1}{I_1 N_1} \sin(\varphi + \alpha) \quad (13)$$

式中， α 为二次绕组的阻抗角。

LPTA的角差为

$$\delta = \frac{I_0 N_1}{I_1 N_1} \cos(\varphi + \alpha) \times 3438 \quad (14)$$

供能技术

常用的高压在线取能分为电容分压取能、激光取能和感应线圈取能。电容分压取能需考虑取能电路和后续电路之间的电气隔离，对过电压防护和电磁兼容有较高的要求；激光取能需要控制温度，保证激光输出功率的稳定，同时受激光输出功率的限制，特别是光电转换效率的影响，激光取能提供的能量有限，制作成本高；感应线圈取能是利用电磁感应原理，通过取能线圈从高压母线或线路上感应交流电压，然后经过整流、滤波和稳压后输出稳定电压^[5]，此供能方式体积小、结构紧凑、绝缘封装简单且使用安全，为本方案采用，其工作原理如图5所示。

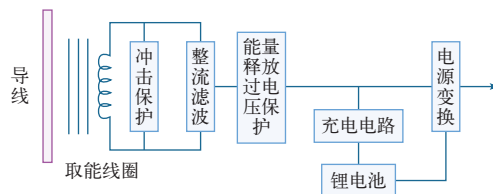


图5 感应线圈取能电路原理

1. 线圈铁心材料

为了减小起动电流以及降低电能损耗，取能

线圈要选择初始磁导率较高的材料。同时铁心要在尽可能小的电流下达到饱和,进而抑制取能线圈的功率输出,因此要选用饱和磁感应强度较低的铁心材料。根据以上原则,应选择饱和磁感应强度良好、磁导率大的纳米晶磁材料作为取能线圈铁心。

2. 过电压保护与能量泄放

雷电冲击以及瞬时故障都会造成较大的电流,整流滤波后的直流电压会随着母线电流升高而升高;线圈铁心饱和后,也会感应较高的电压,同时可能烧毁电路元器件。为了防止出现这种现象,需要采取相应的过电压保护措施。本文采用图6所示的过电压保护电路,当整流桥输出电压 U_{dc} 较高时,MOSFET导通,电路进入工作状态,多余能量通过大功率电阻 R 泄放掉;当整流桥输出电压 U_{dc} 较低时,电路不工作,因此不会影响电源起动电流。

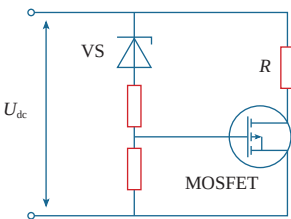


图6 过电压保护电路

3. 整流桥电路

TA取能线圈从一次母线感应出的交流电压经过整流滤波处理后,将得到宽范围的直流电压。本文选用具有高转换效率和宽输入范围的LM2576,该DC-DC转换模块可将6~63 V的输入电压变换成+5 V的输出电压。为了抑制因释放电路造成的输入电压瞬间跌落,通过在DC-DC模块的输入端安装电容,实现一定时间内给模块提供维持电压并吸收电压尖峰的目的。

4. 锂电池储能

采用感应线圈取能方式,在小电流情况下,电源输出功率很小,不足以为数据收发传输提供足够的大功率电能,因此在取能电路中需加入锂电池,实现瞬间大功率供电。锂离子电池的寿命长,充放电次数达500~1 000次,即使大功率、高频度使用,其循环寿命也大大高于镍镉、镍氢电池,锂离子电池无记忆效应,可随时补充,使电

池效能充分发挥。

测试

1. 电容分压电子互感器

为了测试电容分压器的线性度,需调整高压侧的输入电压,分别记录比值误差和相位差,结果如表1所示。

表1 电容分压器的线性度测试

一次电压/V	比值误差 (%)	相位差 (°)
50	0.254	0.841 2
100	0.457	0.775 7
200	0.347	0.794 9
500	0.394	0.856 1
1 000	0.465	0.861 5
5 000	0.497	0.793 8
10 000	0.514	0.876 4

表1中数据表明:在一次电压变化时,分压器的比值误差小于1%,相位差小于1°,满足实际的工程需求。

为了测试电容分压器的温度特性,依次从25 ℃升温到50 ℃,然后恢复到25 ℃,再降到-30 ℃,每个温度维持15 min。在每一个温度下,调整一次电压为额定值的20%~120%,测试得到分压器的比值误差和相位差,结果如表2所示。

表2 电容分压器的温度特性测试

温度/℃	比值误差 (%)	相位差 (°)
25	0.354~0.367	0.785 6~0.787 6
30	0.247~0.259	0.843 2~0.850 4
40	0.456~0.487	0.871 6~0.873 4
50	-0.245~-0.214	0.793 8~0.795 7
-5	0.489~0.493	0.918 2~0.919 7
-10	-0.513~-0.506	0.873 5~0.874 6
-20	0.468~0.479	0.794 2~0.800 4
-30	-0.476~-0.468	0.842 6~0.846 7

表2中数据表明分压器的温度特性符合工程需求。温度变化后,分压器输出电压值的比值误差和相位差变化较小,比值误差变化低于1%,相位差变化小于1°。

2. 低功率电流互感器

当一次电流为100 A时,设计的低功率电流互

感器（LPTA）可以输出1 V电压信号。为了测试LPTA的比值误差和相位差的线性度，调整一次输入电流，记录比值误差和相位差，结果如表3所示。

表3 LPTA的线性度测试

一次电流/A	比值误差 (%)	相位差 (°)
10	0.05	0.56
20	0.03	0.53
50	-0.04	0.46
100	0.02	0.44
120	0.03	0.35
150	0.04	0.34
200	0.04	0.23

表3中数据表明所设计的LPTA的比值误差和相位差都较小，满足0.2级准确度要求。

为了测试LPTA的温度特性，采用与分压器中类似的温度循环实验，记录比值误差和相位差，结果如表4所示。

表4 LPTA的温度特性测试

温度/℃	比值误差 (%)	相位差 (°)
25	0.018	0.06
30	0.017	0.05
40	0.018	0.04
50	0.016	0.05
-5	0.016	0.04
-10	0.017	0.06
-20	0.018	0.04
-30	0.017	0.04

表4中数据表明温度变化时，LPTA的比值误差和相位差仍有很好的线性度。

3. 取能电路

系统设计的取能电路额定输出电压为5 V，改变母线侧的电流，记录整流输出的电压和经过DC-DC模块稳压后的最终输出电压，实验数据如表5所示。

实验表明，稳压电路能在流过母线电流1~5 000 A的范围内稳定输出5 V电压，实验结果表明设计已经基本达到预期的目的。

结束语

本文提出一种直接在高压端进行电能计量的

表5 取能电路测试数据

一次电流/A	整流后电压/V	稳压后电压/V
1	2.58	5.00
5	2.82	5.00
10	3.14	5.00
20	3.45	5.00
30	4.26	5.00
50	5.24	5.00
100	8.15	5.00
150	9.47	5.00
300	12.64	5.00
500	13.45	5.00
600	14.72	5.00
800	16.27	5.00
1 000	17.34	5.00
1 500	19.67	5.00
3 000	23.47	5.00
5 000	25.12	5.00

一体化高压电能表方案，将电子式互感器和电子式电能表相结合。电流传感单元采用低功率铁心线圈电子式电流互感器；电压传感单元采用电容分压型电子式电压互感器，并且采用高压母线感应取能，实现隔离式在线供电。实验数据表明，本文采用的电压、电流互感器以及供能电路满足工程需求。

参考文献

[1] 刘欣, 杨北革, 王健, 等. 新型高压电能表的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(9): 88-91.

[2] 胡顺, 徐芝贵. 高压电能表的研制进展[J]. 电测与仪表, 2008, 45(1): 1-3.

[3] 王红星, 张国庆, 蔡兴国, 等. 电容分压型电子式电压互感器研究与设计[J]. 电力自动化设备, 2009(10): 83-87.

[4] 方春恩, 李伟, 王军, 等. 10 kV低功率电子式电流互感器LPCT的研究[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 312-318.

[5] 李先志, 杜林, 陈伟根, 等. 输电线路状态监测系统取能电源的设计新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 76-80.

(收稿日期: 2015-03-03) EA