工频交变磁场对电子式电能表的计量影响

基于 OIML 制定的 R46 对电子式电能表在防交变磁场干扰提出了要求，研究磁场角度和励磁电流如何影响电子式电能表的电能计量。通过定性分析得出，交变磁场产生的感应电流使得电子式电能表功率因素角发生改变，其变化量与磁场引入的电能误差成余弦曲线关系。采用微机远程控制装置实现全自动检定，得到工频磁场干扰最不利相位和磁场角度。最后提出改造电能表工艺及结构的可行性建议。

熊浩[1] 周新华[2] 邓志军[2] 邓文[2] 彭浴辉[2]/1.云南电网有限责任公司电力科学研究院 2.长沙天恒测控技术有限公司

熊浩/高级工程师

关键词/Keywords
交变磁场 · 最不利相位和磁场 · 电能计量 · 功率因数 · 全自动检定 ·

0 引言

我国是电子式电能表生产大国，生产和研发能力也已经能够满足国内市场的不同需求，而且价格优势明显，在市场上具有一定的竞争力。但随着我国智能电网建设进程的不断推进以及相应的居民递增式阶梯电价改革模式的提出，对电能表等相关电能计量工具的要求也随之提高。目前国际法制计量组织（OIML）制定的 R46 电能表国际建议草案中[1]，对电能表提出了新的要求，尤其是在防磁场干扰防窃电方面提出了更高要求。

电能表一般采用电阻网络对电压进行采样，电流一般采用锰铜分流器或互感器进行采样[2]，两者对交变磁场干扰较为敏感。外加交变磁场在被测仪表的电流测量回路中产生感应电流，在测量电能误差时，会引入相位和幅值误差。下面将讨论交变磁场是怎样影响电子式电能表误差的，以及如何确定最不利励磁电流相位和最不利磁场角度。

1 亥姆霍兹线圈

根据右手螺旋定则，亥姆霍兹线圈通交流电流可产生沿轴方向的较大均匀交变磁场。图 1 为新型亥姆霍兹线圈结构示意图。0 点是亥姆霍兹线圈

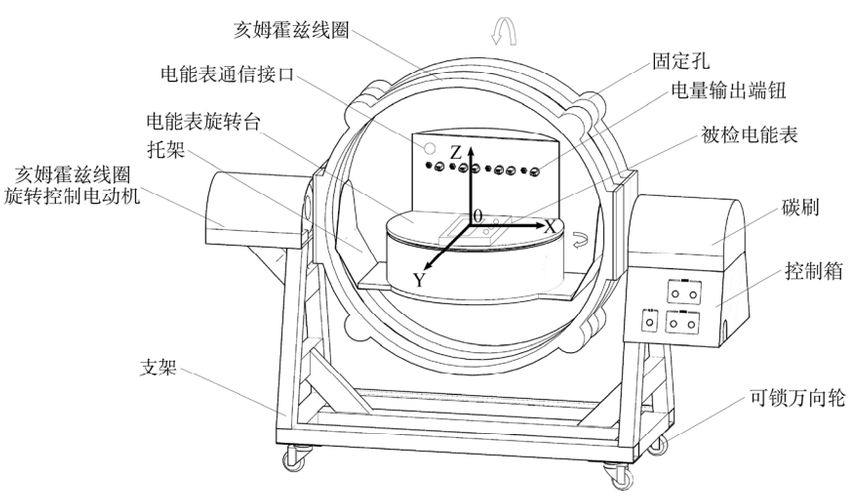

图 1 新型亥姆霍兹线圈结构示意图

中国知网 https://www.cnki.net

几何中心，Y 轴为亥姆霍兹线圈轴向方向。亥姆霍兹线圈通过电动机控制绕 X 轴方向 0~360°旋转[3-4]，使线圈能停留在任意角度。电能表旋转台通过托架与亥姆霍兹线圈连接。将被检电能表置于电能表旋转台上，通过计算机程控或手动控制。电能表可以在 XOY 平面内 0~360°旋转，并可停留在任意方向。

随着亥姆霍兹线圈旋转，交变磁场 B 在 YOZ 平面旋转。由亥姆霍兹线圈旋转产生的交变磁场可看成一对相互交变的振荡磁偶极子 M_1 和 M_2[5]，旋转磁偶极子数学模型如图 2 所示。

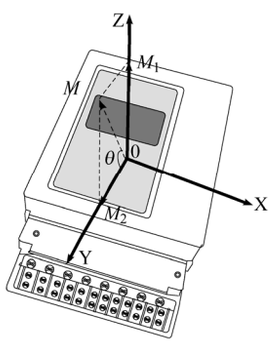

图 2　旋转磁偶极子数学模型

图 2 中，Y 轴同亥姆霍兹线圈轴向一致且垂直电能表 Y 正交截面。假设亥姆霍兹线圈旋转角度为 θ，则正交磁偶极子等效为

$$\overrightarrow{M_1}=\overrightarrow{M}\sin\theta \tag{1}$$

$$\overrightarrow{M_2}=\overrightarrow{M}\cos\theta \tag{2}$$

$$\overrightarrow{M}=\sqrt{\overrightarrow{M_1^2}+\overrightarrow{M_2^2}} \tag{3}$$

随着亥姆霍兹线圈旋转，磁场方向 $\overrightarrow{M}$ 不断变化，此时正交磁偶极子大小改变。设亥姆霍兹线圈原始角度为 0°，如图 2 所示。当 θ=0°或 θ=180°时，此时磁场垂直通过电能表 Y 正交截面。当 θ=90°或 θ=270°时，$\overrightarrow{M_1}=\overrightarrow{M}$、$\overrightarrow{M_2}=0$，此时磁场垂直通过电能表 Z 正交截面。将被检表顺（逆）时针旋转 90°即可以对电能表 X 正交截面进行试验。

2　误差分析

当电能表在交变磁场干扰下，计算电能误差 δ_i 时会引入相位误差和幅值误差。

$$\begin{aligned}\delta_i&=\frac{W'-W}{W}=\frac{U'I'\cos(\varepsilon+\varphi)-UI\cos\varphi}{UI}\\&=\frac{U'I'\cos(\varepsilon+\varphi)}{UI}-\cos\varphi\end{aligned} \tag{4}$$

式中，W' 为相位误差和幅值误差的电能值。下文以单相电能表为例进行分析，三相电能表亦然。

根据规程《JJF12453—2010 安装式电能表型式评价大纲 特殊要求静止式有功电能表（0.2S、0.5S、1 和 2 级）》要求[6]，$\cos\varphi=1$，即 $\varphi=0°$。φ_U 为 A 相电压相位，令 $\varphi_U=0°$。产生工频干扰，励磁电流的频率 f=50 Hz。励磁电流 $I=I_m\sin(2\pi ft+\Delta\varphi)$，其中 $\Delta\varphi$ 为励磁电流与工作电压的相位差[7-9]。

$$M=M_m\sin\left(2\pi ft+\Delta\varphi-\frac{\pi}{2}\right) \tag{5}$$

$$\begin{aligned}\Delta U&=-\frac{d\Phi}{dt}=-nS\frac{dM}{dt}\\&=-2\pi fns\frac{M_m}{\sqrt{2}}\cos\left(2\pi ft+\Delta\varphi-\frac{\pi}{2}\right)\end{aligned} \tag{6}$$

式中，以图 1 中 0 点处磁场进行分析得出

$$M\approx0.716\frac{\mu_0 NI}{R}\approx0.5mT \tag{7}$$

$$\overrightarrow{M_1}=\overrightarrow{M}\cos\theta \tag{8}$$

$$\overrightarrow{M_2}=\overrightarrow{M}\sin\theta \tag{9}$$

$$\begin{aligned}\Delta I_1&=\frac{\Delta U_1}{R_1}\\&=\frac{-2\pi fns_1\frac{B_M}{\sqrt{2}}\cos\left(2\pi ft+\Delta\varphi-\frac{\pi}{2}\right)\cos\theta}{R_1}\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}\Delta I_2&=\frac{\Delta U_2}{R_2}\\&=\frac{-2\pi fns_2\frac{B_M}{\sqrt{2}}\cos\left(2\pi ft+\Delta\varphi-\frac{\pi}{2}\right)\cos\theta}{R_2}\end{aligned} \tag{11}$$

式中，S_1 为垂直于 M_1 电流变换回路面积；S_2 为垂直于 M_2 电流变换回路面积；R_1 为 M_1 磁场作用的电流变换回路等效电阻；R_2 为 M_2 磁场作用的电流变换回路等效电阻。

当 θ 为定值时，感应电流同励磁电流成 90°，励磁电流相位改变，感应电流 ΔI 使电能表电流

中国知网 https://www.cnki.net

相位旋转了ε，使得电能表功率因数角由0°变成ε。图3为电压电流相位矢量图。

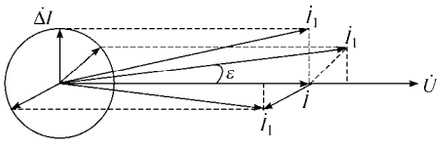

图3　电压电流相位矢量图

如图3可知，$-90° \le \varphi_{\Delta I} \le 90°, \delta_i \ge 0$；$90° \le \varphi_{\Delta I} \le 270°, \delta_i \ge 0$。

$$\delta_i = \frac{U'I'\cos\varepsilon}{UI} - 1 = \frac{I_1\cos\varepsilon}{I} - 1 = k\cos\varepsilon - 1$$

$$\delta = \delta_i - \delta_0 = k\cos\varepsilon - 1 - \delta_0$$

$$k = \frac{\sqrt{\Delta I^2 + I^2}}{I}$$

式中，δ_0为未加工频磁场，测量的电能误差；δ_i为工频磁场干扰下的电能误差；δ为工频磁场引入的电能误差。

图4为磁场引入的电能误差同功率因数角变化量曲线图。

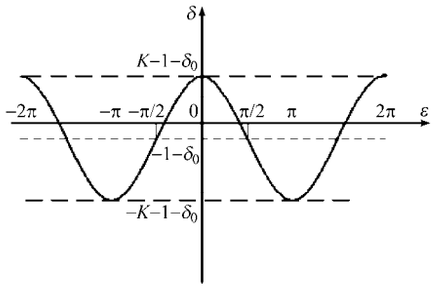

图4　δ与ε曲线

由图4可知，电能误差δ是功率因数角变化量ε的余弦函数。当叠加电流相位与电能表相位同向或反向时，即励磁电流同电能表工作电压成90°或270°时，产生的电能误差最大。

同理当$\varphi_{\Delta I}$为定值时，随着磁场方向θ改变，有效磁场大小改变，感应电流会发生变化，δ也会随之改变。

3　测量原理

一些厂家检定电能表时，需手摇亥姆霍兹线圈旋转，磁场角度会引入较大的误差。仅能检定几个磁场角度的影响，检测数据单一。同时需要大量的人力成本，不适合应用于大批量检测电能表。本文设计的装置，由微机控制实现全自动化测量。利用精密步进电动机准确调节磁场偏转角度，实现磁场0~360°全方位干扰，检测最不利励磁电流相位和磁场方向。

计算机通过RS 232通信接口发送命令至控制台，调节源装置输出电压电流至标准表和被检表，使其正常工作，测量被检电能表误差δ_0[9]。然后调节源装置输出励磁电流至亥姆霍兹线圈，使亥姆霍兹线圈几何中心磁场强度H达到400 A/m。根据设定的磁场角度，调节亥姆霍兹线旋转。在不同的磁场角度改变励磁电流与电能表工作电压相位角，计算电能误差δ_i。测试完毕后，顺时针旋转电能表90°，再测量电能误差。最后通过比较δ_0和δ_i值，计算出磁场引入的电能误差。

$$\delta = \delta_i - \delta_0$$

当测试点超出误差允许范围，控制台发出报警信号[10]。图5为检定三相四线电能表的原理图。

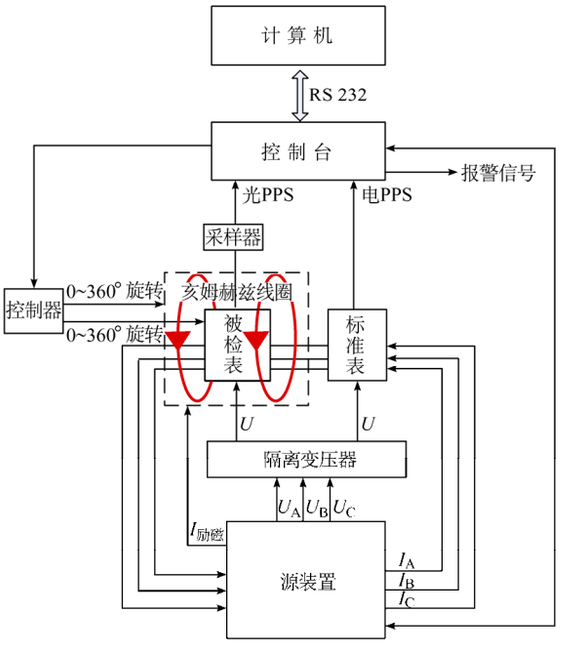

图5　检定三相四线电能表原理图

4　试验

4.1　试验项目

不同磁场角度θ下，测试不同$\Delta\varphi$磁场引入的

中国知网 https://www.cnki.net

电能误差。

4.2 试验设备

1）源装置：准确度为 0.05 级。

2）励磁源：磁场强度为 0~400 A/m，准确度为 0.1 级。

3）亥姆霍兹线圈：直径为 1 m，磁通势为 400 安匝。

4）电能表旋转台。

5）被检电能表。

4.3 测试数据

1）0.5 级三相三线电子式多功能电能表（变换电路为互感器）规格：3×100 V，3×1.5 A，5 000 imp/kW • h。表 1 为磁场垂直作用电能表 X、Y、Z 正交截面磁场引入的电能误差。

表 1　三相三线电能表磁场引入误差

Δφ		0°	90°	180°	270°
δ（%）	X 面	–0.01	0.05	0.004	0.05
	Y 面	–0.01	0.02	–0.01	–0.03
	Z 面	–0.01	–0.02	0.01	0.02

表 1 中，Δφ为励磁电流同电能表工作电压的相位差。

2）1.0 级单相电子式多功能电能表（变换电路为分流器），规格：220 V，5 A，3 200 imp/kW • h。表 2 为磁场垂直作用于电能表 X、Y、Z 正交截面磁场引入的电能误差。

表 2　单相电能表磁场引入误差

Δφ		0°	90°	180°	270°
δ（%）	X 面	–0.02	–0.08	–0.04	0.04
	Y 面	0.01	0.09	0.05	–0.07
	Z 面	0.03	1.61	–0.03	–1.63

表 2 中，根据 R46 要求$\delta \leq \pm 1.3\%$，测量 1.0 级单相电能表 Z 正交截面，$\Delta\varphi=90°$或$\varphi=270°$时，误差超差。

建议电能表添加高磁导率屏蔽层且分流器电压测量线尽量缩短，经过测量磁场引入电能误差减少且在 R46 要求范围内。

图 6 为试验 2 中单相电能表误差曲线图。红色曲线为$\Delta\varphi=90°$时，改变磁场方向θ，磁场引入误差关系。蓝色曲线为励磁电流与工作电压相位角与电能误差关系。

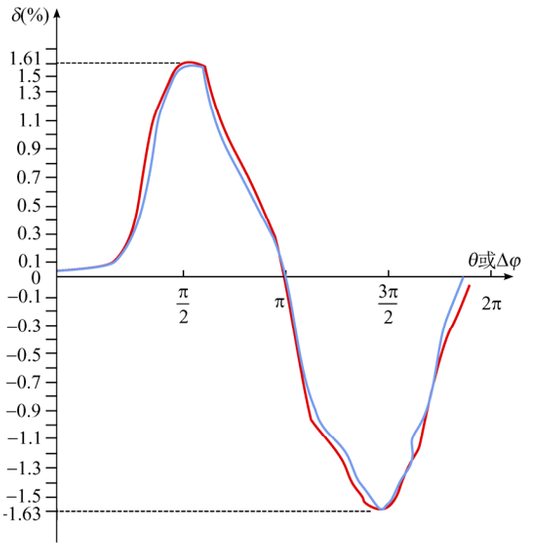

图 6　磁场引入的误差同励磁电流同电能表工作相位、磁场角度的曲线图

5　结束语

针对电能表抗工频磁场干扰的要求，将理论和试验相结合，找出“最不利相位”和最不利磁场方向。其中“最不利相位”为励磁电流与工作电压成 90°和 270°，最不利磁场方向为垂直方向，即所定义的电能表 Z 截面，这是因为大多数电子式电能表中互感器、分流器采用平躺的安装方式。

电能表生产厂家为了提高抗电磁干扰能力，可在电能表壳内衬添加薄层高磁导率材料作为总屏蔽层，减少电磁干扰。将分流器电压输出信号线拧成双绞线，再接入 PCB 板上，减少有效磁通。同时分流器电压测量导线应尽量短，减小导线的寄生电感、电容，减少有效磁场面积。分流器和互感器为磁场敏感元件，放置的位置也十分重要。

参考文献

[1] R46．Active electrical energy meters [S].

[2] 周碧红，石雷兵，韩志强，等．工频外磁场对电子式电能表影响[J]．上海计量测试，2011（6）：50-53．

[3] 陈念，何永周，任芳林，等．2 维全自动亥姆霍兹线圈磁块测量方法[J]．强激光与粒子束，2014，24（8）：1941-1946．

（下转第 134 页）

中国知网 https://www.cnki.net

4 结束语

将贝叶斯网络应用于电力系统短期负荷预测，给出了贝叶斯网络的数学模型和简要构建方法，归纳了常见的影响负荷的因素，并根据关联因素（参数）推导网络中相应的概率，从而能够确定负荷预测处于何种状态，实现负荷预测。算例分析表明，基于贝叶斯网络的短期负荷预测方法是有效的，且较之多元回归线性预测法具有一定的优越性。贝叶斯网络具有很强的不确定推理能力，同时具备数据挖掘的功能，通过历史数据的分析得出统计规律，符合大数据分析的趋势，该方法可为负荷预测提供一种新的预测思路。

参考文献

[1] 廖旎焕，胡智宏，马莹莹．电力系统短期负荷预测方法综述[J]．电力系统保护与控制，2011，39（1）：147-152．
[2] 张翠芝，智明．泰州电网负荷特性分析及符合预测[J]．江苏电机工程，2011，30（4）：45-47．
[3] 张林，罗晓初，徐瑞林，等．基于时间序列的电力负荷预测新算法研究[J]．电网技术，2006，30：595-599．
[4] 彭鹏，彭佳红．基于多元线性回归模型的电力负荷预测研究[J]．中国安全生产科学技术，2011，7（9）：158-161．
[5] 朱斌，刘晓军．应用人工神经网络算法进行短期负荷预测[J]．江苏电机工程，2006，25（1）：57-59．
[6] 高山，张凌浩，李军红，等．节假日短期负荷预测的一种实用算法[J]．江苏电机工程，2002，21（2）：19-21．
[7] 张素香，赵丙镇，王风雨，等．海量数据下的电力负荷短期预测[J]．中国电机工程学报，2015，35（1）：37-42．
[8] 黄影平．贝叶斯网络发展及其应用综述[J]．北京理工大学学报，2013，33（12）：1211-1219．
[9] 郑翠芳．基于贝叶斯网络的软件缺陷预测技术研究与应用[D]．绵阳：中国工程物理研究院，2006．
[10] 刘学艺，刘祥官，王文慧．贝叶斯网络在高炉铁水硅含量预测中的应用[J]．钢铁，2005，40（3）：17-20．
[11] 郑长江，葛升阳，郑树康．基于贝叶斯网络的交通事件持续时间预测[J]．华东交通大学学报，2014，31（5）：50-55．
[12] 徐计，张桂芸．基于贝叶斯网络的一种牛奶产量预测研究[J]．计算机工程与科学，2008，30（10）：15-18．
[13] 韩焱红，矫梅燕，陈静，等．基于贝叶斯理论的集合降水概率预报方法研究[J]．气象，2013，39（1）：1-10．
[14] 朱明敏．贝叶斯网络结构学习与推理研究[D]．西安：西安电子科技大学，2013．
[15] 董雷，周文萍，张沛，等．基于动态贝叶斯网络的光伏发电短期概率预测[J]．中国电机工程学报，2013，33（2）：38-45．

作者简介
周玉（1982-），男，工程师，主要研究方向为计量管理、用电信息采集。

（收稿日期：2015-12-10）EA
（编辑：崔岩）

（上接第 129 页）

[4] 成大先．机械设计手册[M]．北京：机械工业出版社，
[5] 田雨，王成林．有源交变磁场导向定位方法及实验研究[J]．电子测量技术．2011，34（10）：4-7．
[6] JJF1245.3—2010 安装式电能表型式评价大纲 特殊要求 静止式有功电能表（0.2S、0.5S、1 和 2 级）[S]．
[7] Colonel Wm．T Mclyman．变压器与互感器设计手册[M]．4 版．北京：中国电力出版社，2014．
[8] Slawomir，Tumansk．Handbook of Magnetic Measurements[M]．北京：机械工业出版社，2011．
[9] JJG596—2012 电子式交流电能表检定规程[S]．
[10] 李宝树．电磁测量技术[M]．北京：中国电力出版社，2007．

作者简介
熊浩（1962-），男，高级工程师，主要研究方向为电测计量。

（收稿日期：2015-12-10）EA
（编辑：崔岩）

中国知网 https://www.cnki.net