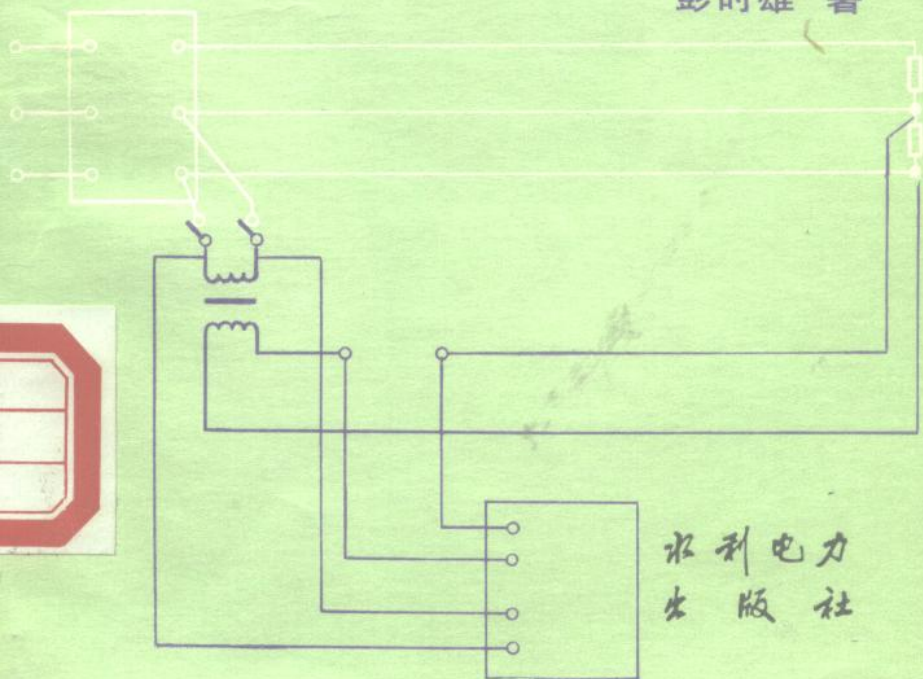


电压互感器 二次导线压降 引起电能计量误差的 测试计算及改进技术

彭时雄 著



水利电力
出版社

电压互感器二次导线压降 引起电能计量误差的 测试计算及改进技术

彭时雄 著

水利电力出版社

内 容 简 介

全书共五章。第一章介绍电能计量综合误差的测试与计算方法以及减小综合误差的技术改进措施。第二章介绍电压互感器二次导线压降及其带来电能计量误差的测试方法与计算方法。第三章介绍电压互感器二次导线压降及其引起的比差、角差、电能计量误差与回路参数间的关系。第四章介绍电压互感器二次回路电缆线的容许电阻值、容许长度及所需截面。第五章介绍降低电压互感器二次导线压降、计量误差与电费损失的技术改进措施。

本书可供从事电磁测量及电能计量工作的技术人员及工人阅读,也可供电力设计部门从事二次回路设计工作的技术人员参考。

电压互感器二次导线压降引起 电能计量误差的测试计算及改进技术

彭时雄 著

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

水利电力出版社印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

787×1092毫米 32开本 5.25印张 115千字

1987年12月第一版 1987年12月北京第一次印刷

印数00001—11490册

ISBN 7-120-00062-4/TM·48

15143·6496 定价: 1.25元

前 言

电能计量综合误差过大是电业普遍存在的一个关键问题。它直接影响电业各项技术经济指标的正确计算和用户电费的公正计收，影响电业和社会的经济效益，影响国家的财政收入。随着发电量、供电量与用电量的日益增长，这一问题也越来越突出。因此，努力提高电能计量的综合准确水平，是一项刻不容缓的重要任务。

本书针对电能计量技术问题，介绍电能计量综合误差的测试计算方法以及降低综合误差的技术改进措施。

电能计量的综合误差是由电压互感器的合成误差、电流互感器的合成误差、电度表的误差、电压互感器二次导线压降所引起的计量误差所组成。根据华北电网普查测试的结果，在这四项误差中，电压互感器二次导线压降引起的计量误差往往是最大的。由于二次导线压降过大，造成少计发电量、供电量、用电量，以致少收电费，造成发供电量不平衡、线损出现负数；造成省与省之间联网线路送受电量无法正确结算；地区之间电量分配出现纠纷等事例，也屡见不鲜。为此，本书着重介绍电压互感器二次导线压降引起电能计量误差的测试计算及其改进技术。

在我国，这一技术的研究是近年来出现的一项新课题。在国外文献中，还未查到有关介绍电压互感器二次导线压降引起计量误差的测试线路和测试方法方面的资料。有关介绍电压互感器二次导线压降引起计量误差的计算方法方面的资

料也为数不多，而且所介绍的计算方法只适用于某种特定的接线方式，具有一定的局限性。

本书是我们多年来从事这项技术研究的一个总结。书中提出了一整套简便实用、准确可靠的测试方法、测量线路和计算方法。归结起来，有五种简便测试方法，即互感器试验器法，小量限高内阻电压表法，小量限高内阻电压表和数字相位表法之一，小量限高内阻电压表和数字相位表法之二，相位伏安表法。这些测量方法的优点是基于测差原理，所以测量准确度高（与非测差方法相比，测量误差降低400倍）；无需高准确度测试仪器与仪表（与非测差方法相比，达到相同的测量准确度，所用仪器、仪表的准确度容许降低400倍）；测试结果受电源波动的影响小；简便易行，设备停电与否均可测试。

书中介绍了各种常见接线方式和负载情况下电压互感器二次导线压降及由它带来的计量误差的计算方法和计算公式，可供电力设计部门设计计算电压互感器二次回路时参考之用。

书中介绍了五种降低电压互感器二次导线压降引起电能计量误差和电费损失的技术措施和改进方法。这些技术改进措施，简便易行，具有实用价值。

上述测试改进技术已在国内电网推广应用，并已取得显著的经济效益。

根据不完全的统计，近几年来，华北电网应用这一技术，共查出少计电量6.4亿kW·h，经过改进，每年增计了电量2.94亿kW·h，增益为589万元。如果将兄弟电网推广应用取得的效益计算在内，则年增益已超过1000万元。

本书在内容的安排上，本着先易后难、先简后繁的原

则，实用的内容在前，理论分析及公式推导在后，并每讨论完一种测试计算方法都举例说明其实际应用。

由于水平所限，书中不免存在缺点，甚至错误，欢迎读者批评指出。

作 者

1986.7

目 录

前 言

第一章 电能计量的综合误差	1
第一节 概述	1
第二节 互感器合成误差计算公式的推导	1
第三节 电流互感器合成误差的计算方法	6
第四节 电压互感器合成误差的计算方法	9
第五节 电压互感器二次导线压降引起的计量误差	9
第六节 电能计量综合误差对电费影响的测试举例	10
第七节 电能计量综合误差的计算公式	19
第八节 减小电能计量综合误差的方法	22
第二章 电压互感器二次导线压降及其带来计量误差的测试计算方法	26
第一节 概述	26
第二节 互感器试验器法	30
第三节 小量限高内阻电压表法	45
第四节 小量限高内阻电压表和数字相位表法之一	51
第五节 小量限高内阻电压表和数字相位表法之二	60
第六节 电压表、电流表、相位表法或相位伏安表法	64
第三章 电压互感器二次导线压降及其引起的比差、角差、电能计量误差与回路参数间的关系	91
第一节 几种常见的接线方式和负载情况下的关系式	91
第二节 根据回路参数计算二次导线压降及由它引起的比差、角差、计量误差的实例	97

第三节	根据电压互感器二次负载电流值、相角值及二次导线压降引起的比差、角差值推算二次导线电阻值	101
第四节	根据电压互感器二次负载电流值、相角值及二次导线压降值推算二次导线电阻值	106
第五节	电压互感器二次导线压降引起的比差和角差出现负值或正值的分析	110
第六节	电压互感器二次导线压降引起的计量误差与二次回路参数及一次回路 φ 角的关系	115
第四章	电压互感器二次回路电缆线的容许电阻值、容许长度及所需截面	120
第一节	概述	120
第二节	电压互感器二次导线的容许电阻值	121
第三节	电压互感器二次导线的容许长度及所需截面	126
第五章	降低电压互感器二次导线压降带来的计量误差及电费损失的技术改进措施	133
第一节	装设专用二次回路	133
第二节	加粗电压互感器二次导线截面、减小接点接触电阻	136
第三节	双母线供电情况下, 尽可能缩短 b 相公共电缆线的长度	136
第四节	将电度表调快 $-\epsilon_r\%$, 以抵消二次导线压降所引起的负误差 $\epsilon_r\%$	137
第五节	采用电压误差补偿器来补偿二次导线压降引起的比差和角差	138
附录一	电压互感器的误差计算公式	145
附录二	由任一负载下电压互感器的误差推算出其实际运行负载下误差的计算公式	148
附录三	根据相电压误差推算线电压误差的公式	155
主要参考文献		160

第一章 电能计量的综合误差

随着电力工业的发展，发电量、供电量与用电量日益增长，对计量电能的准确度要求愈来愈高。为此，不仅要求装用准确等级较高的互感器和电度表，还应通过综合误差测试计算，研究对策，提高综合计量准确水平，以确保电力设备的安全经济运行、电业各项技术经济指标的正确计算和用电计费的公正合理。

下面介绍三相三线方式下，电能计量综合误差的计算方法。

第一节 概 述

电能计量的综合误差是下述几项误差的代数和，

- (1) 电度表的误差 ε_w ;
- (2) 电流互感器的合成误差 ε_{LH} ;
- (3) 电压互感器的合成误差 ε_{YH} ;
- (4) 电压互感器二次导线压降引起的计量误差 ε_v 。

电能计量的综合误差 ε 可用下式表达，

$$\varepsilon = \varepsilon_w + \varepsilon_{LH} + \varepsilon_{YH} + \varepsilon_v \quad (1-1)$$

第二节 互感器合成误差计算 公式的推导

三相三线计量方式下， YH 和 LH 的合成误差 ε 可用下式

表达:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_h &= \varepsilon_{YH} + \varepsilon_{LH} \\
 &= \frac{(f_{u_{ab}} + f_{I_a}) + (f_{u_{cb}} + f_{I_c})}{2} \\
 &\quad + \frac{(\delta_{I_a} - \delta_{u_{ab}}) + (\delta_{u_{cb}} - \delta_{I_c})}{119.087} \\
 &\quad + \frac{(f_{I_c} + f_{u_{cb}}) - (f_{I_a} + f_{u_{ab}})}{3.4641} \operatorname{tg} \varphi \\
 &\quad + \frac{(\delta_{I_a} - \delta_{u_{ab}}) + (\delta_{I_c} - \delta_{u_{cb}})}{68.755} \operatorname{tg} \varphi \quad (1-2)
 \end{aligned}$$

式中 f_{I_a} 及 δ_{I_a} ——第一相电流互感器的比差(%)和角差(');

f_{I_c} 及 δ_{I_c} ——第三相电流互感器的比差(%)和角差(');

$f_{u_{ab}}$ 及 $\delta_{u_{ab}}$ ——电压互感器二次线电压 U_{ab} 的比差(%)和角差(');

$f_{u_{cb}}$ 及 $\delta_{u_{cb}}$ ——电压互感器二次线电压 U_{cb} 的比差(%)和角差(');

φ ——高压三相线路负载阻抗角。

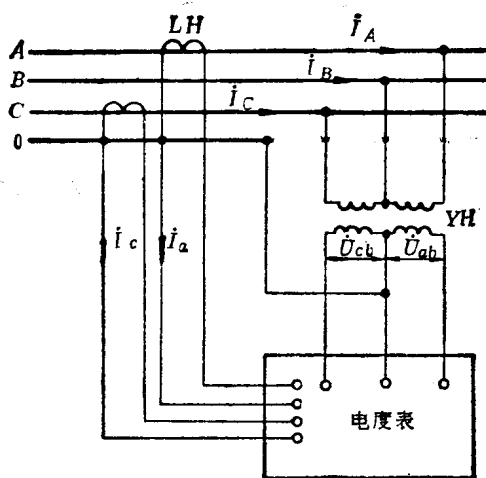
互感器合成误差计算公式(1-2)的推导如下:接有一只三相二元有功电度表、两台电流互感器和两台电压互感器,供计量三相三线电路有功电能的接线和相量图如图1-1所示。

一次侧实际有功功率为:

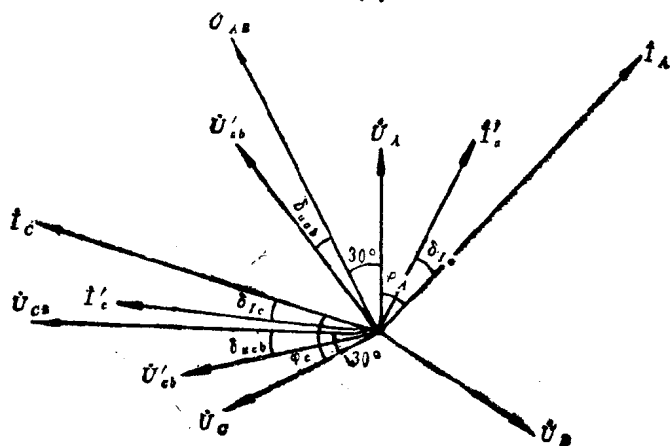
$$P_1 = U_{AB} I_A \cos(\varphi_A + 30^\circ) + U_{CB} I_C \cos(\varphi_C - 30^\circ)$$

二次侧测得有功功率为:

$$\begin{aligned}
 P_2 &= U_{ab} I_a \cos[(\varphi_A + 30^\circ) + (\delta_{u_{ab}} - \delta_{I_a})] \\
 &\quad + U_{cb} I_c \cos[(\varphi_C - 30^\circ) + (\delta_{u_{cb}} - \delta_{I_c})]
 \end{aligned}$$



(a)



(b)

图 1-1 三相三线电路接线和相量图

(a)接线图; (b)相量图

$$= \frac{U_{AB} I_A}{K_U K_I} \times \left(1 + \frac{f_{uab}}{100} \right) \left(1 + \frac{f_{Ia}}{100} \right) \cos[(\varphi_A + 30^\circ) + (\delta_{uab} - \delta_{Ia})] + \frac{U_{CB} I_C}{K_U K_I} \times \left(1 + \frac{f_{ucb}}{100} \right) \left(1 + \frac{f_{Ic}}{100} \right) \times \cos[(\varphi_C - 30^\circ) + (\delta_{ucb} - \delta_{Ic})]$$

式中 φ_A, φ_C —— $\dot{U}_A$ 与 $\dot{I}_A$ 间的相角、 $\dot{U}_C$ 与 $\dot{I}_C$ 间的相角。

将二次侧测得的有功功率 P_2 乘以电压互感器的电压比 K_U 和电流互感器的电流比 K_I ，即可得出一次侧有功功率的计算值：

$$P'_1 = K_U K_I P_2 \\ \approx U_{AB} I_A \left(1 + \frac{f_{uab} + f_{Ia}}{100} \right) [\cos(\varphi_A + 30^\circ) \cos(\delta_{uab} - \delta_{Ia}) - \sin(\varphi_A + 30^\circ) \sin(\delta_{uab} - \delta_{Ia})] \\ + U_{CB} I_C \left(1 + \frac{f_{ucb} + f_{Ic}}{100} \right) [\cos(\varphi_C - 30^\circ) \cos(\delta_{ucb} - \delta_{Ic}) - \sin(\varphi_C - 30^\circ) \sin(\delta_{ucb} - \delta_{Ic})]$$

因角差 δ_{uab} 、 δ_{ucb} 、 δ_{Ia} 及 δ_{Ic} 小，故有：

$$\cos(\delta_{uab} - \delta_{Ia}) \approx 1$$

$$\cos(\delta_{ucb} - \delta_{Ic}) \approx 1$$

$$\text{又因 } 1' = \frac{\pi}{180 \times 60} \text{ rad} = \frac{0.0290888}{100} \text{ rad, 如果 } \delta \text{ 以分}$$

(') 为单位，则有：

$$\sin(\delta_{uab} - \delta_{Ia}) \approx \frac{0.0290888}{100} (\delta_{uab} - \delta_{Ia})$$

$$\sin(\delta_{ucb} - \delta_{Ic}) \approx \frac{0.0290888}{100} (\delta_{ucb} - \delta_{Ic})$$

$$\therefore P'_1 \approx U_{AB} I_A \left(1 + \frac{f_{uab} + f_{Ia}}{100} \right) [\cos(\varphi_A + 30^\circ)$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{0.0290888}{100}(\delta_{uab}-\delta_{I_a})\sin(\varphi_A+30^\circ) \Big] \\
& + U_{CB}I_C \left(1 + \frac{f_{u_{cb}}+f_{I_c}}{100} \right) \Big[\cos(\varphi_C-30^\circ) \\
& -\frac{0.0290888}{100}(\delta_{u_{cb}}-\delta_{I_c})\sin(\varphi_C-30^\circ) \Big]
\end{aligned}$$

互感器的合成误差 ε_h 用下式表达:

$$\varepsilon_h = \frac{P'_1 - P_1}{P_1} \times 100 (\%)$$

$$\begin{aligned}
& \approx \left\{ U_{AB}I_A(f_{u_{ab}}+f_{I_a})\cos(\varphi_A+30^\circ) + U_{CB}I_C(f_{u_{cb}} \right. \\
& \quad \left. + f_{I_c})\cos(\varphi_C-30^\circ) \right\} / \{ U_{AB}I_A\cos(\varphi_A+30^\circ) \\
& \quad + U_{CB}I_C\cos(\varphi_C-30^\circ) \} + \{ 0.0290888 [(\delta_{I_a} \\
& \quad - \delta_{u_{ab}})U_{AB}I_A\sin(\varphi_A+30^\circ) + (\delta_{I_c} - \delta_{u_{cb}}) \\
& \quad \times U_{CB}I_C\sin(\varphi_C-30^\circ)] \} / \{ U_{AB}I_A\cos(\varphi_A \\
& \quad + 30^\circ) + U_{CB}I_C\cos(\varphi_C-30^\circ) \} \quad (\%)
\end{aligned}$$

当三相电路均衡对称时, 即 $U_{AB}=U_{CB}$, $I_A=I_C$, $\varphi_A=\varphi_C=\varphi$ 时, 上式可改写为:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_h \approx & \left\{ (f_{u_{ab}}+f_{I_a})(\cos\varphi\cos30^\circ-\sin\varphi\sin30^\circ) \right. \\
& \left. + (f_{u_{cb}}+f_{I_c})(\cos\varphi\cos30^\circ+\sin\varphi\sin30^\circ) \right\} \\
& \div \{ \sqrt{3}\cos\varphi \} + \{ 0.0290888(\delta_{I_a} \\
& - \delta_{u_{ab}})(\sin\varphi\cos30^\circ+\cos\varphi\sin30^\circ) \\
& + 0.0290888(\delta_{I_c}-\delta_{u_{cb}})(\sin\varphi\cos30^\circ \\
& - \cos\varphi\sin30^\circ) \} \div \{ \sqrt{3}\cos\varphi \}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left[\frac{f_{I_a} + f_{I_c}}{2} + \frac{0.0290888}{2\sqrt{3}} (\delta_{I_a} - \delta_{I_c}) \right. \\
&\quad + \frac{1}{2\sqrt{3}} (f_{I_c} - f_{I_a}) \operatorname{tg} \varphi + \frac{0.0290888}{2} \\
&\quad \times (\delta_{I_a} + \delta_{I_c}) \operatorname{tg} \varphi \left. \right] + \left[\frac{f_{u_{ab}} + f_{u_{cb}}}{2} + \frac{0.0290888}{2\sqrt{3}} \right. \\
&\quad \times (\delta_{u_{cb}} - \delta_{u_{ab}}) + \frac{1}{2\sqrt{3}} (f_{u_{cb}} - f_{u_{ab}}) \operatorname{tg} \varphi \\
&\quad \left. - \frac{0.0290888}{2} (\delta_{u_{ab}} + \delta_{u_{cb}}) \operatorname{tg} \varphi \right] \\
&= \left[\frac{f_{I_a} + f_{I_c}}{2} + \frac{\delta_{I_a} - \delta_{I_c}}{119.087} + \left(\frac{f_{I_c} - f_{I_a}}{3.4641} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{\delta_{I_a} + \delta_{I_c}}{68.755} \right) \operatorname{tg} \varphi \right] + \left[\frac{f_{u_{ab}} + f_{u_{cb}}}{2} + \frac{\delta_{u_{cb}} - \delta_{u_{ab}}}{119.087} \right. \\
&\quad \left. + \left(\frac{f_{u_{cb}} - f_{u_{ab}}}{3.4641} - \frac{\delta_{u_{ab}} + \delta_{u_{cb}}}{68.755} \right) \operatorname{tg} \varphi \right] (\%) (1-3)
\end{aligned}$$

式中第一项是电流互感器的合成误差 ε_{CT} ；第二项是电压互感器的合成误差 ε_{PT} 。即：

$$\varepsilon_h = \varepsilon_{CT} + \varepsilon_{PT}$$

第三节 电流互感器合成误差的计算方法

由上面的推导结果可知，三相三线电路中电流互感器的合成误差按下式计算：

$$\varepsilon_{CT} = \left[\frac{f_{I_a} + f_{I_c}}{2} + \frac{\delta_{I_a} - \delta_{I_c}}{119.087} + \left(\frac{f_{I_c} - f_{I_a}}{3.4641} \right. \right.$$

$$\left. + \frac{\delta_{I_c} + \delta_{I_e}}{68.755} \right) \operatorname{tg} \varphi \right] (\%) \quad (1-4)$$

式中 φ 为高压三相线路负载阻抗角，在一段时间（几个月或一年）内， φ 的平均值 φ_m 可根据接于电压互感器和电流互感器二次侧的三相无功电度表和三相有功电度表在此期间所累计的无功电量 W_r 和有功电量 W_e ，按下式计算：

$$\operatorname{tg} \varphi_m = \frac{W_r}{W_e} \quad (1-5)$$

f_{I_a} 、 f_{I_c} 、 δ_{I_a} 及 δ_{I_c} 之值可选取一年或几个月内的平均负荷电流下测得的电流互感器的比差和角差值。平均负荷电流的百分数 $\frac{I}{I_H} \times 100\%$ ，按下式计算：

$$\begin{aligned} & \frac{I}{I_H} \times 100(\%) \\ &= \frac{W_e \times 100000}{\sqrt{3} U_2 I_{2H} \cos \varphi \times K_I K_U \times t \times 24} (\%) \quad (1-6) \end{aligned}$$

式中 t —— 时间（天）；

K_I —— 电流互感器额定电流比；

K_U —— 电压互感器额定电压比；

W_e —— 在 t 天内，三相有功电度表累计的电量（kW·h）^①。

由式（1-4）可以看出，电流互感器合成误差的大小取决于互感器的比差、角差及线路电流的相角。而电流互感器的比差和角差又是电流的函数，故电流互感器的合成误差 ε_{cr} 随着线路电流 I_1 及其相角 φ 的变化而变化。由于运行线路中的电流及其相角是经常变化的，甚至每时每刻都在变化，显

① “kW·h” 即以往所惯用的单位“度”。

然YH的合成误差值也是经常变化的，甚至每时每刻不同。为简化计算，此处按一段时间（一年或几个月）内的平均电流及其相角的平均值进行计算。

例：某电厂通过一条35kV送电线向用户供电。其供电情况如下：1980年1~10月，电度表累计的有功电量 W_p 为10590.3万kW·h，累计的无功电量 W_r 为7242.9万kvar·h。装用的互感器倍率 $K_I K_V$ 为42000。YH的误差已测出，现计算电流互感器的合成误差。

解：由式（1-5）可得：

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{W_r}{W_p} = \frac{7242.9}{10590.3} = 0.684$$

$$\cos \varphi = 0.825$$

由式（1-6）可得：

$$\begin{aligned} & \frac{I}{I_H} \times 100\% \\ &= \frac{10590.3 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 100 \times 5 \times 0.825 \times 42000 \times 304 \times 24} \approx 50\% \end{aligned}$$

已测得50% I_H 下电流互感器的误差为：

$$f_{I_a} = -0.95\%, \quad \delta_{I_a} = 28.5', \quad f_{I_c} = -0.87\%, \quad \delta_{I_c} = 34'$$

将算得的 $\operatorname{tg} \varphi$ 值及测得的 f_{I_a} 、 δ_{I_a} 、 f_{I_c} 、及 δ_{I_c} 之值代入式（1-4），可得：

$$\begin{aligned} e_{CT} &= \frac{-0.95 - 0.87}{2} + \frac{28.5 - 34}{119.1} \\ &+ \left[\frac{-0.87 - (-0.95)}{3.464} + \frac{28.5 + 34}{68.76} \right] \\ &\times 0.684 = -0.32(\%) \end{aligned}$$

第四节 电压互感器合成误差 的计算方法

三相三线电路中，电压互感器的合成误差 ε_{PT} 按下式计算：

$$\varepsilon_{PT} = \left[\frac{f_{uab} + f_{ucb}}{2} + \frac{\delta_{ucb} - \delta_{uab}}{119.087} + \left(\frac{f_{ucb} - f_{uab}}{3.4641} - \frac{\delta_{uab} + \delta_{ucb}}{68.755} \right) \operatorname{tg} \varphi \right] (\%) \quad (1-7)$$

例：前例所述线路，已知有功电量 W_a 为 10590.3 万 kW·h，无功电量 W_r 为 7242.9 万 kvar·h。实际运行条件下电压互感器的误差为：

$f_{uab} = +0.81\%$ ， $\delta_{uab} = 18.4'$ ， $f_{ucb} = +0.86\%$ ， $\delta_{ucb} = 21'$ ，求电压互感器的合成误差。

解： $\operatorname{tg} \varphi = \frac{W_r}{W_a} = \frac{7242.9}{10590.3} = 0.684$

将 $\operatorname{tg} \varphi = 0.684$ 代入式 (1-7)：

$$\varepsilon_{PT} = \frac{0.81 + 0.86}{2} + \frac{21 - 18.4}{119.1} + \left(\frac{0.86 - 0.81}{3.464} - \frac{18.4 + 21}{68.76} \right) \times 0.684 = +0.47 (\%)$$

第五节 电压互感器二次导线压降 引起的计量误差

由于电压互感器与电度表间的二次连接导线上有电压降，导致电度表端电压 ($\dot{U}'_{ab}$ 、 $\dot{U}'_{cb}$) 不等于电压互感器二次