

利用本地量测量电力系统功角方法及误差分析

西安交通大学 张保会 葛耀中

摘 要

本文叙述了利用装置安装端的电压,电流经补偿系统联系阻抗上压降得到对端电势和经补偿运算得到对端电势相位测量功角的原理。提出比较本端电势和联络线电流的相位测量功角。给出三种方法测量误差受运行方式变化,地区负荷、两侧电势不等、阻抗角不均匀的影响,供根据不同的要求和系统情况选择使用。

一 前言

电力系统中各发电机间的功角是直接反应电力系统稳定运行水平的状态量。功角的测量广泛用于电力系统静态稳定的监视和暂态稳定破坏的预测当中。功角测量的精度与技术经济条件、系统的等值等因素有关,一直是人们关心的问题之一。

目前对于功角的测量可以分为两类,一类是使用两端的电势相量进行相位比较,这需要一定的通讯设备和占用通道,在通道非常拥挤的输电线上实现往往比较困难。另一类是在简单的系统中,仅利用本端的有关电气量通过补偿或运算的方法得到对端的电势或其相位测量两端间的功角。这种方法简单、不占用通讯设备,在目前的实际系统中和安全自动装置的研究中已有采用。本文就其测量原理简要说明,并给出测量误差的表达式和曲线,以便在采用时有一个误差的定量概念,并根据需要选择不同的方法。

二 补偿阻抗法

1. 测量原理

对图 1 所示简单系统,若功角测量装置安装在 M 端,取用母线电压 \dot{U}_M 和线路电流 \dot{I}_L 经补偿运算可以得到:

$$\dot{E}_M = \dot{U}_M + \dot{I}_L \cdot Z_M \quad (1)$$

$$\dot{E}_N = \dot{U}_M - \dot{I}_L (Z_L + Z_N) \quad (2)$$

比较 \dot{E}_M 、 \dot{E}_N 的相位可以得到等值系统的功角。

由(1)(2)式看出,经补偿得到的电势 \dot{E}_M 、 \dot{E}_N 与实际电势是否相同在于上二式中第二项是否正确补偿了阻抗上压降有关,以下分析能影响正确补偿的主要因素。

2. 运行方式变化对功角测量精度的影响:

图1的简单系统等值为图2的阻抗图,不同运行方式下系统的实际参量用带有下标S的符号表示,补偿参量和测量得到的参量不带下标S。

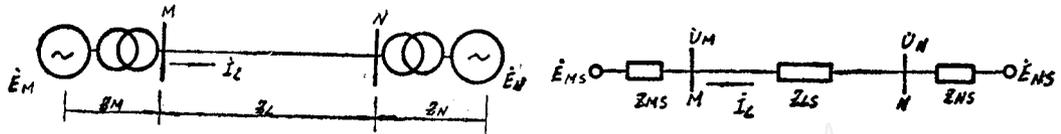


图1简单系统图

图2等值阻抗图

取任意状态下M、N两端实际电势差的大小为相对值1,则:

$$|\Delta \dot{E}_s| = |\dot{E}_{Ms} - \dot{E}_{Ns}| = |I_L (Z_{Ms} + Z_{Ls} + Z_{Ns})| = |I_L Z_{zs}| = 1$$

当实际的运行方式与补偿的运行方式不一致时有表示实际量与测量量关系的相量图见图3。

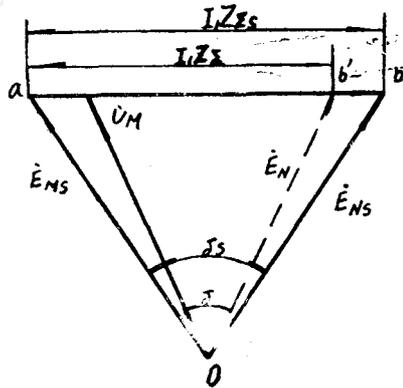


图3运行方式变化时功角测量误差

当 $|\dot{E}_{Ms}| = |\dot{E}_{Ns}|$ 时:

$$|\dot{E}_{Ms}| = \frac{1}{2 \sin(\delta_s/2)} \quad (3)$$

在 $\triangle oab'$ 中由余弦定理:

$$E_N = \sqrt{E_{Ms}^2 + (I_L \cdot Z_z)^2 - 2I_L \cdot Z_z E_{Ms} \cos\left(\frac{180^\circ - \delta_s}{2}\right)} \quad (4)$$

将(3)代入(4)整理得:

$$E_N = \frac{1}{2 \sin(\delta_s/2)} \sqrt{1 + I_L Z_z (I_L Z_z - 1) 4s^2 \sin^2(\delta_s/2)}$$

由正弦定理:

$$\frac{I_L Z_z}{\sin \delta} = \frac{E_N}{\cos(\delta_s/2)}$$

$$\begin{aligned} \therefore \delta &= \sin^{-1} [I_L Z_E \cos(\delta_s/2) / E_N] \\ &= \sin^{-1} [I_L Z_E \sin \delta_s / \sqrt{1 + I_L Z_E (I_L Z_E - 1) \sin^2 \frac{\delta_s}{2}}] \end{aligned} \quad (5)$$

将 $I_L Z_{ES} = 1$ 代入(5)

$$\delta = \sin^{-1} [K \sin \delta_s / \sqrt{1 + K(K-1)4 \sin^2(\delta_s/2)}] \quad (6)$$

其中 $K = Z_E / Z_{ES}$

若即使运行方式变化 \dot{E}_{MS} 也可以正确测量, 功角测量误差由于 \dot{E}_N 与 \dot{E}_{NS} 不一致所产生, 功角误差 $\Delta \delta = \delta_s - \delta$ 是运行功角 δ_s 和 K 的函数, 曲线如图 4。

$$\Delta \delta = f_1(\delta_s, K)$$

由此可见, 运行功角 δ_s 越大 $\Delta \delta$ 越大,

K 越偏离 1, $\Delta \delta$ 亦越大。

3. 地区负荷的影响

一般系统都带地区负荷, 若用恒定阻抗表示见图 5。

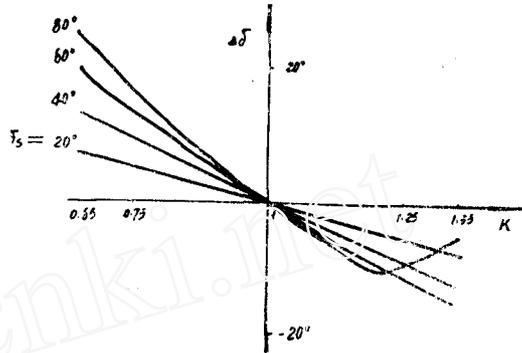


图 4 运行方式变化时误差曲线

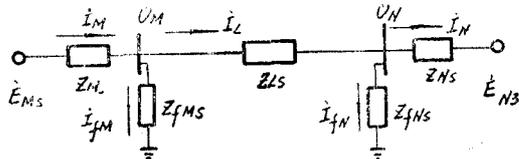


图 5 带地区负荷的双机系统

$$\dot{E}_{MS} = \dot{U}_M + \dot{I}_M \cdot Z_{MS} \quad (7)$$

$$\dot{E}_{NS} = \dot{U}_M - \dot{I}_L \cdot Z_{LS} - \dot{I}_N \cdot Z_{NS} \quad (8)$$

将 \dot{I}_M 、 \dot{I}_N 用 \dot{I}_L 、 \dot{I}_M 表示后代入(7)、(8)得:

$$\dot{E}_{MS} = \dot{U}_M \left(1 + \frac{Z_{MS}}{Z_{fMS}} \right) + \dot{I}_L Z_{MS} \quad (9)$$

$$\dot{E}_{NS} = \dot{U}_M \left(1 + \frac{Z_{NS}}{Z_{fNS}} \right) - \dot{I}_L (Z_{LS} + Z_{NS} + Z_{NS} \cdot \frac{Z_{LS}}{Z_{fNS}}) \quad (10)$$

若在测量回路中使用:

$$\dot{E}_M = \dot{U}_M + \dot{I}_M Z_{MS} \quad (11)$$

$$\dot{E}_N = \dot{U}_M - \dot{I}_L (Z_L + Z_N) \quad (12)$$

由于(8)、(12)两式不一致引起测量误差。为简化分析, 取完全补偿的方式 $(Z_L + Z_N) = (Z_{LS} + Z_{NS})$ 仅分析地区负荷影响。

$$\dot{E}_{NS} - \dot{E}_N = \frac{Z_{NS}}{Z_{fNS}} (\dot{U}_M - \dot{I}_L Z_{LS}) = \frac{Z_{NS}}{Z_{fNS}} \cdot \dot{U}_{NS} \quad (13)$$

取 \dot{U}_{NS} 为参考方向, 考虑 $\frac{Z_{NS}}{Z_{fNS}}$ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 变化, \dot{E}_N 的端点位于图 6 的扇形域 abc 中。

4. 两侧电势幅值不等
不引起功角测量误差。

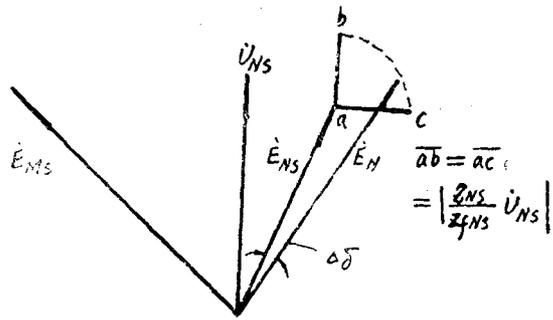


图6 地区负荷引起功角测量误差

三 补偿运算法

1. 测量原理

对于图1系统，假定全系统阻抗角均匀，见图7电压相量图。

作 $\overrightarrow{o'c}$ 平行 \dot{E}_{NS} ，则 $\triangle o'ac$ 与 $\triangle oab$ 相似

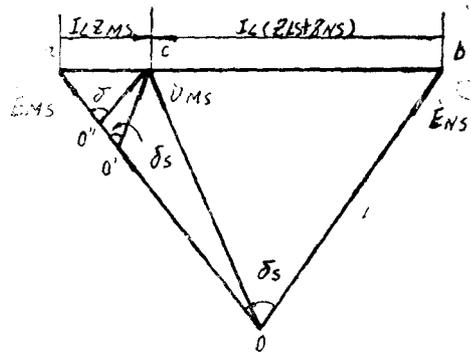


图7 功角测量原理图

$$\frac{\overrightarrow{oo'}}{\overrightarrow{oa}} = \frac{Z_{LS} + Z_{NS}}{Z_{MS} + Z_{LS} + Z_{NS}}$$

$$\overrightarrow{o'c} = \dot{U}_{MS} - \overrightarrow{oo'} = \dot{U}_{MS} - \dot{E}_{MS} \cdot \frac{Z_{LS} + Z_{NS}}{Z_{ES}} \quad (14)$$

比较 \dot{E}_{MS} 、 $\overrightarrow{o'c}$ 间的相位差就是功角 δ 。

2. 运行方式变化对功角测量精度的影响

若运行方式变化，测量得到的不再是 $\overrightarrow{o'c}$ ，而是 $\overrightarrow{o''c}$ ，如图7中所示。

$$\overrightarrow{o''c} = \dot{U}_{MS} - \dot{E}_{MS} \frac{Z_L + Z_N}{Z_E} \quad (15)$$

假定 $|\dot{E}_{MS}| = |\dot{E}_{NS}|$

则 $\triangle ao'c$ 是等腰 \triangle ，取 $|\dot{E}_{MS} - \dot{U}_{MS}|$ 相对值为 1。

$$\overrightarrow{o'a} = \frac{1}{2 \sin(\delta_s/2)} = |\dot{E}_{MS} \cdot \frac{Z_{MS}}{Z_{ES}}|$$

设 $\frac{Z_{MS}}{Z_{XS}}$ 实数:

$$|\dot{E}_{MS}| = \frac{1}{2 \sin(\delta_s/2)} \cdot \frac{Z_{XS}}{Z_{MS}} \quad (16)$$

在 $\triangle o''ac$ 中: $\overline{o''a} = |\dot{E}_{MS} \cdot \frac{Z_M}{Z_X}|$

$$\begin{aligned} \overline{o''c} &= \sqrt{\overline{o''a}^2 + \overline{ac}^2 - 2 \overline{o''a} \cdot \overline{ac} \cos\left(\frac{180^\circ - \delta_s}{2}\right)} \\ &= \sqrt{\left|\dot{E}_{MS} \frac{Z_M}{Z_X}\right|^2 + 1^2 - 2 \left|\dot{E}_{MS} \frac{Z_M}{Z_X}\right| \sin(\delta_s/2)} \end{aligned} \quad (17)$$

由正弦定理:

$$\begin{aligned} \frac{\overline{ac}}{\sin \delta} &= \frac{\overline{o''c}}{\sin\left(\frac{180^\circ - \delta_s}{2}\right)} \\ \sin \delta &= \frac{\overline{ac}}{\overline{o''c}} \cos(\delta_s/2) \end{aligned} \quad (18)$$

将 (16)、(17) 代入 (18) 整理得:

$$\delta = \sin^{-1} \left[\sin \delta_s / \sqrt{K_X^2 + (1 - K_X) 4 \sin^2(\delta_s/2)} \right] \quad (19)$$

其中 $K_X = \frac{Z_M}{Z_{MS}} \cdot \frac{Z_{XS}}{Z_X}$

误差角 $\Delta\delta = f_2(\delta_s, k_X)$ 曲线

如图 8 所示。

3. 地区负荷的影响

使用图 5 的等值电路, 假定 \dot{E}_{MS}

可正确测得则 $\Delta\delta$ 是因图 9 中 $\overline{o''c}$ 与

实际的 N 侧电势 \dot{E}_{NS} 不平行所致,

$\overline{o''c} // \dot{E}_N$, $\overline{o''c}$ 与 \dot{E}_{NS} 间的夹角就是

$\Delta\delta$ 。图 9 给出 \dot{E}_{NS} 端点可能落入

的范围为域 nqhpq。可以看出当 \dot{I}_L

越小, N 侧的有功负荷越大, \dot{E}_{NS} 的端点越靠近 q 点, $\Delta\delta$ 越大。

按图 4 规定的正方向:

$$\dot{E}_{NS} = \dot{U}_N - \dot{I}_N Z_{NS} = \dot{U}_N - \dot{I}_L Z_{NS} + \dot{U}_N \frac{Z_{NS}}{Z_{fNS}} \quad (20)$$

令 $K_1 = \left| \frac{Z_{NS}}{Z_{fNS}} \right| \quad \phi = \alpha_{NS} - \alpha_{fNS} \quad (\phi = 0^\circ \sim 90^\circ)$

$$\dot{E}_{NS} = \dot{U}_N - \dot{I}_L Z_{NS} + K_1 \dot{U}_N e^{j\phi} \quad (21)$$

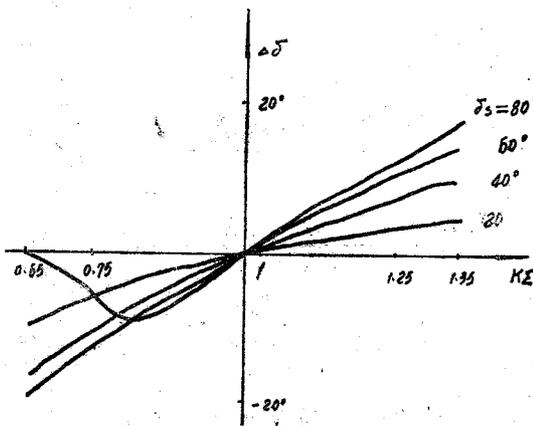


图 8 $\Delta\delta = f_2(\delta_s, k_X)$ 曲线

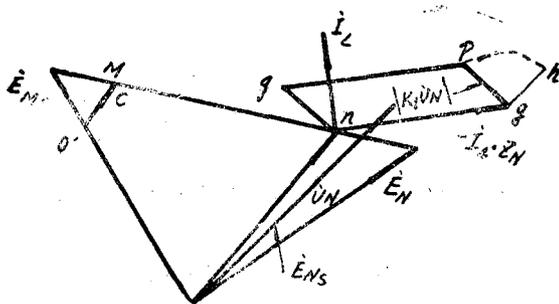


图9 地区负荷的影响

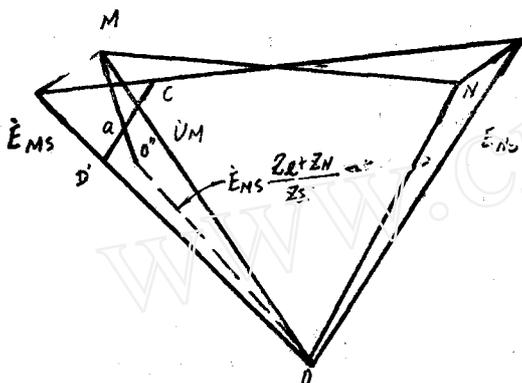


图10 阻抗角不均匀的影响

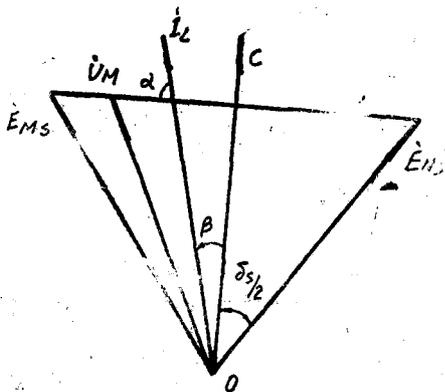


图11 相位比较法原理图

见图11相量图，线路电流 \dot{I}_L 滞后电势差 \dot{E}_{MN} 的角度 α 是系统阻抗角，与功角的大小无关。过 o 作 \dot{E}_{MN} 的垂直平分线 \vec{oc} ， \dot{E}_{Ms} 与 \vec{oc} 的夹角是 $\frac{1}{2}$ 的功角。取 \dot{E}_{MN} 的方向为参考， \dot{I}_L 、 \vec{oc} 间的相位关系与 δ_s 无关。

$\vec{oc} // (\dot{I}_L e^{-j\beta})$ ，比较 \vec{oc} 与 \dot{E}_{Ms} 的相位就是比较电流 $\dot{I}_L e^{-j\beta}$ 与 \dot{E}_{Ms} 的相位，而 \dot{I}_L 很

4. 两侧电势不等时，只要补偿阻抗正确，不产生功角测量误差。

5. 阻抗角不均匀的影响
实际的阻抗角往往不均匀，设：

$$Z_X = Z_{XS} = |Z_{XS}| e^{j\alpha}$$

$$Z_M = Z_{MS} = |Z_{MS}| e^{j\alpha_1}$$

$$Z_L + Z_N = |Z_{LS} + Z_{NS}| e^{j\alpha_2}$$

$$= |Z_{LS} + Z_{NS}| e^{j\alpha_2}$$

一般说来： $\alpha > \alpha_2$

按照(15)式得到N侧电势相位为图10中 $\vec{o''M}$ 的相位。

$$\vec{o''M} = \dot{U}_M - \dot{E}_{Ms} \frac{Z_L + Z_N}{Z_X}$$

$$= \dot{U}_M - \dot{E}_{Ms} \left| \frac{Z_L + Z_N}{Z_X} \right| e^{-j(\alpha - \alpha_2)}$$

(22)

$$\text{令 } \vec{o'o} = \dot{E}_{Ms} \left| \frac{Z_L + Z_N}{Z_X} \right|$$

过 o' 作 $\vec{o'c} // \dot{E}_{Ns}$ 则直线 $\vec{o''M}$ 与 $\vec{o'c}$ 的夹角就是 $\Delta\delta$ 。当 δ_s 越大，阻抗角越不均匀， $\Delta\delta$ 越大。

四 相位比较法

1. 测量原理

对图1系统假定：

$$|\dot{E}_{Ms}| = |\dot{E}_{Ns}|, \text{ 阻抗角均匀}$$

方便取得。

$$\delta = 2 \arg \frac{\dot{E}_{MS}}{\dot{I}_L e^{-j\beta}} \quad (23)$$

$$\beta = 90^\circ - \alpha \quad (24)$$

β 是系统阻抗角的余角。可见 δ 的测量与阻抗的大小无关，只与阻抗角 α 有关。

2. 运行方式变化的影响

同理若 β 只能对应某一运行方式下阻抗角的余角，当运行方式变化阻抗角变化时，有误差角：

$$\Delta\delta = 2(\alpha_s - \alpha) \quad (25)$$

一般说来，运行方式变化时联系阻抗变化较大而阻抗角变化不大，特别是超高压系统。

例如：

$$\begin{aligned} Z_{MS} &= j0.2, & Z_{LS} &= 1.5e^{j80^\circ}, & Z_{NS} &= j0.1 \\ Z_M &= j0.15, & Z_L &= 1e^{j80^\circ}, & Z_N &= j0.1 \end{aligned}$$

则 $\Delta\delta = 2 \times (81.66^\circ - 81.995^\circ) = -0.67^\circ$

3. 地区负荷的影响

对于图5系统，两侧的电势差：

$$\dot{E}_{MNS} = \dot{U}_M \left(\frac{Z_{MS}}{Z_{fMS}} - \frac{Z_{NS}}{Z_{fNS}} \right) + \dot{I}_L \left(Z_{MS} + Z_{LS} + Z_{NS} + Z_{LS} \cdot \frac{Z_{NS}}{Z_{fNS}} \right) \quad (26)$$

为简化分析假定： $\frac{Z_{MS}}{Z_{fMS}} = \frac{Z_{NS}}{Z_{fNS}}$

$$\dot{E}_{MNS} = \dot{I}_L \left(Z_{MS} + Z_{LS} + Z_{NS} + Z_{LS} \frac{Z_{NS}}{Z_{fNS}} \right) \quad (27)$$

取 \dot{E}_{MNS} 的方向为参考 \dot{I}_L 的方向由 $Z_{MS} + \frac{Z_{NS}}{Z_{fNS}} \cdot Z_{LS}$ 决定，设：

$$Z_{MS} + Z_{LS} \frac{Z_{NS}}{Z_{fNS}} = |Z_{MS} + Z_{LS} \frac{Z_{NS}}{Z_{fNS}}| e^{j\alpha_{sf}}$$

误差角 $\Delta\delta$ 为：

$$\Delta\delta = 2(\alpha_{sf} - \alpha) \quad (28)$$

4. 阻抗角不均匀的影响

β 取系统平均阻抗角的余角，阻抗角不均匀不产生误差。

5. 两端电势幅值不等的影

当两端电势的幅值不等时，图12中 oc 的方向不再是功角平分线的方向。

由(23)式测得的 δ 是 $\angle aob'$ ，实际的功角是 $\angle aob$ ，在 $\triangle aob$ 中：

$$E_{MS} \cos \delta_1 = E_{NS} \cos \delta_2$$

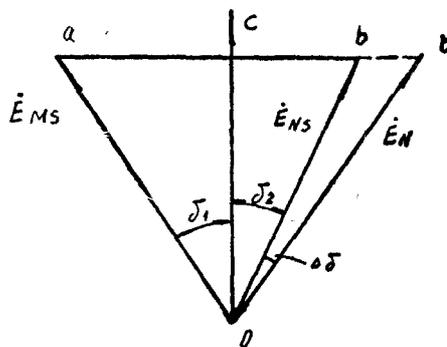


图12 两端电势幅值不等引起的误差

$$\delta_2 = \cos^{-1} [K_E \cos \delta_1] \quad (29)$$

其中 $K_E = \frac{E_{MS}}{E_{NS}}$

$$\begin{aligned} \Delta\delta &= (\delta_2 - \delta) \\ &= (\delta_1 + \delta_2) - (\delta_1 + \delta_1) \\ &= \delta_2 - \delta_1 \end{aligned} \quad (30)$$

$\Delta\delta$ 与两侧电势比值 K_E 、运行状态有关，曲线如图13。

图13中当功角较小时误差很大，当功角接近稳定边缘时，误差较小。

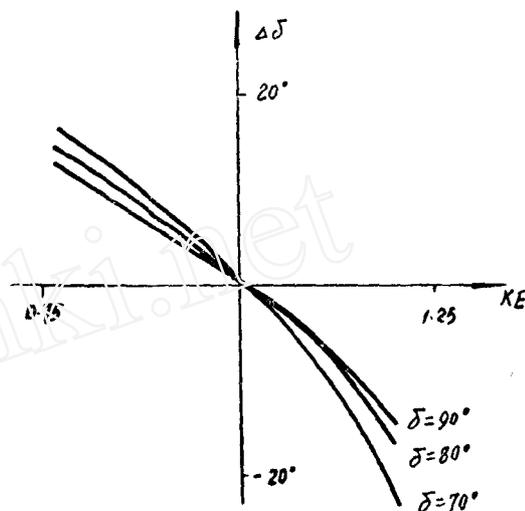


图13 $\Delta\delta = f_3(\delta_1, K_E)$ 曲线

五 结论

1. 补偿阻抗法和补偿运算法受运行方式变化影响较大，且功角越大误差越大。适用于运行方式变化不大，运行功角不大的场合。

2. 相位比较法受两端电势不等影响较大，且运行功角越小误差越大。当运行功角大于 70° 后， $\Delta\delta$ 较小。适用于两侧电势差不大的系统中，特别是监测功角大于某一定数值后系统解列或采取其它系统安全措施的安全自动装置中。

3. 以上三种测量法都存在不同程度的误差，但是实现简单，仅利用一端的电气量。

4. 应当研究利用一端量的功角测量新方法，提高测量精度，克服上述各因素的影响。

参考文献

1. 张保会《用相位比较法远距离测量振荡中心电压》继电器 1985年第1期
2. 徐显华等《便携式电力系统功角测量装置》电网技术 1985年第1期
3. P. Bonanomi《phase angle measurements with synchronized clocks principle and applications》IEEE PAS-100 No. 12 1981年