

一种新型的微机发电机失步 预测及失步保护方案

宋聚忠 张项安

林 韩

姚晴林

许昌继电器研究所 (461000) 福建省电力局中试所 (350003) 合肥工业大学 (230009)

摘要 本文介绍一种利用简单的矢量比相方式在单片机上实现的发电机振荡失步预测新方法,在预知发电机将要失步的前提下,通过一种简单的查表计算,直接求出当前振荡时的最大的功角 δ_{\max} ,这样就能非常准确地做出是否将要失步的判断,而且一旦失步,将迅速跳闸,本方案已部分通过动模试验,效果良好。

关键词 振荡 比相 预测 失步

概述

对大型发电厂来说,发电机一旦失步将造成很大的危害并危及整个系统的安全,故一般大型发电机都要求装设失步保护。目前比较实用的发电机失步保护方案,大都比较复杂,不易整定,尤其用微机实现起来比较困难,可靠性不稳定。可以说还没有一种比较简捷明了的微机失步保护,至于微机失步预测就更少了。如果在发电机将要失步前,能及时预测出来,并采取相应的有效措施,避免造成停机和危害,是非常理想的,而且越早越好。本文在这方面做了尝试。

1 系统振荡情况分析

设发电机的电势为 \dot{E}_G , 内阻抗为 Z_G , 经联系阻抗 Z_L 与电势为 \dot{E}_S , 内阻为 Z_S 的系统并联运行, 其等效电路和电流电压的相量图如图 1 所示。

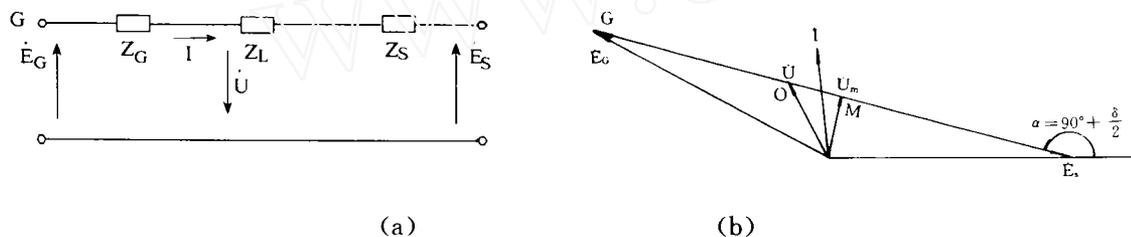


图 1 系统振荡分析图

当发电机与系统之间发生振荡时, \dot{E}_G 与 \dot{E}_S 之间的夹角 δ 不断发生变化。假设 $E_G = E_S =$ 定值, 并以 \dot{E}_S 为参考相量, 则:

$$\dot{E}_G = \dot{E}_S e^{j\delta} \quad (1)$$

由于发电机与系统之间无并联分支, 图 b 中的 M 可看作 G、S 两点间综合阻抗 Z_Y 的中点, 其中 $Z_Y = Z_G + Z_L + Z_S$, 为方便起见, 假定系统中阻抗 Z_L 及 Z_S 的阻抗角均相等。

收稿日期: 1995-02-24

发电机与系统之间的电势差为：

$$\dot{E}_\delta = \dot{E}_G - \dot{E}_S = \dot{E}_S (e^{j\delta} - 1)$$

$$\dot{E}_\delta = 2E_s \sin \frac{\delta}{2} e^{j\alpha} \quad (2)$$

其中： $\alpha = \arctg \frac{\sin \delta}{\cos \delta - 1} = 90^\circ + \frac{\delta}{2}$

电压产生的均衡电流为：

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_\delta}{Z_Y} = \frac{2E_s}{Z_Y} \sin \frac{\delta}{2} e^{j(\alpha - \theta_Y)} \quad (3)$$

其中： θ_Y 为发电机与系统之间综合阻抗 Z_Y 的阻抗角， Z_Y 为综合阻抗的模。 E_s 及 I 的绝对值都是 $\delta/2$ 的函数，在振荡过程中，角 δ 随时间变化， E_δ 和 I 的绝对值也随之变化。

由图 b 可知，任意点 O 的电压为：

$$\dot{U} = \dot{E}_G - I (Z_Y/2 - Z_{Om}) \quad (4)$$

其中： Z_{Om} 为图中 O，M 两点之间的阻抗。

因各阻抗角相等，则：

$$\frac{Z_{Om}}{Z_Y} = \frac{z_{om}}{z_Y}$$

将 1、3 两式代入 4 中，可求出任意点 θ 的电压

$$\dot{U} = E_s \left(\frac{1}{2} - \frac{Z_{Om}}{Z_Y} \right) + E_s \left(\frac{1}{2} + \frac{Z_{Om}}{Z_Y} \right) e^{j\delta} \quad (5)$$

在振荡过程中， Z_{om} ， Z_Y 都是常数，若等效电势 E_G 和 E_s 的大小不变，则随角 δ 变化，式 5 表示的是一个圆，其圆心相量 \dot{U}_c 和半径相量 \dot{U}_r 可直接求出：

$$\dot{U}_c = E_s \left(\frac{1}{2} - \frac{Z_{Om}}{Z_Y} \right)$$

$$\dot{U}_r = E_s \left(\frac{1}{2} + \frac{Z_{Om}}{Z_Y} \right) e^{j\delta} \quad (6)$$

由 3 式可知：

$$\dot{I} = \frac{2E_s}{Z_Y} \sin \frac{\delta}{2}$$

$$\dot{I}_\delta' = \frac{2E_s}{Z_Y} \cos \frac{\delta}{2}, \quad \frac{1}{2} = E_s \cos \frac{\delta}{2} \quad (7)$$

由 5 式的：

$$\dot{U} = \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{Z_{Om}}{Z_Y} \right) + \left(\frac{1}{2} + \frac{Z_{Om}}{Z_Y} \right) \cos \delta + j \left(\frac{1}{2} + \frac{Z_{Om}}{Z_Y} \right) \sin \delta \right] \dot{E}_s$$

故知：

$$\dot{U} = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{2} - \frac{Z_{Om}}{Z_Y} \right) + \left(\frac{1}{2} + \frac{Z_{Om}}{Z_Y} \right) \cos \delta \right]^2 + \left(\frac{1}{2} + \frac{Z_{Om}}{Z_Y} \right)^2 \sin^2 \delta} \cdot \dot{E}_s \quad (8)$$

$$\text{化简得： } \dot{U} = \sqrt{\cos^2 \frac{\delta}{2} + \left(2 \frac{Z_{Om}}{Z_Y} \sin \frac{\delta}{2} \right)^2} \cdot \dot{E}_s \quad (9)$$

故有：

$$\dot{U}_\delta' = \frac{1}{2} \cdot \frac{-2 \cos \frac{\delta}{2} \cdot \sin \frac{\delta}{2} \cdot \frac{1}{2} + 2 \cdot 2 \frac{Z_{Om}}{Z_Y} \sin \frac{\delta}{2} \cdot \frac{2 \cdot Z_{Om}}{Z_Y} \cdot \cos \frac{\delta}{2} \cdot \frac{1}{2}}{\sqrt{\cos^2 \frac{\delta}{2} + \left(2 \cdot \frac{Z_{Om}}{Z_Y} \sin \frac{\delta}{2} \right)^2}} \cdot \dot{E}_s$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{-\cos \frac{\delta}{2} \sin \frac{\delta}{2} + 4 \frac{Z_{om}^2}{Z_Y^2} \cdot \cos \frac{\delta}{2} \sin \frac{\delta}{2}}{\cos \frac{\delta}{2} \sqrt{1 + (2 \frac{Z_{om}}{Z_Y} \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta}{2})^2}} \cdot E_s$$

$$\text{即: } U_{\delta}' = -\frac{1}{2} \cdot \frac{(Z_Y^2 - 4Z_{om}^2) \cdot \sin \frac{\delta}{2}}{Z_Y \cdot \sqrt{Z_Y^2 + 4Z_{om}^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\delta}{2}\right)}} \cdot E_s \quad (10)$$

10 式和 7 式相比得:

$$\begin{aligned} \frac{U_{\delta}'}{I_{\delta}'} &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{(Z_Y^2 - 4Z_{om}^2) \cdot \sin \frac{\delta}{2}}{Z_Y \cdot \sqrt{Z_Y^2 + 4Z_{om}^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\delta}{2}\right)}} \cdot E_s / \frac{E_s}{Z_Y} \cdot \cos \frac{\delta}{2} \\ &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{(Z_Y^2 - 4Z_{om}^2) \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta}{2}}{\sqrt{Z_Y^2 + 4Z_{om}^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\delta}{2}}} \\ &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{Z_Y^2 - 4Z_{om}^2}{\sqrt{Z_Y^2 \cdot \operatorname{ctg}^2 \frac{\delta}{2} + 4Z_{om}^2}} \end{aligned} \quad (11)$$

由图 b 可见: $Z_Y^2 - 4Z_{om}^2 > 0$

$$\text{故得: } \frac{U_{\delta}'}{I_{\delta}'} < 0 \quad (12)$$

因为: $U_t' = U_{\delta}' \cdot \delta_t', \quad I_t' = I_{\delta}' \cdot \delta_t'$

$$\text{得: } \frac{U_t'}{I_t'} = \frac{U_{\delta}' \cdot \delta_t'}{I_{\delta}' \cdot \delta_t'} = \frac{U_{\delta}'}{I_{\delta}'} \quad (13)$$

$$\text{由 12、13 两式得: } \frac{U_t'}{I_t'} < 0 \quad (14)$$

这里需指出的是: 在正常运行时, $\delta_t' = 0, U_t', I_t' = 0$, 式 13 无实际意义。

由式 14 可以得出结论, 在系统振荡时, 系统上任意点的电压对时间的变化率和电流对时间的变化率的变化方向是相反的, 而它们的差异程度则是功角 δ 的函数, 当 $\delta = \pi$ 时(即发生非稳定振荡), $\frac{U_t'}{I_t'}$ 有最小值:

$$\frac{U_t'}{I_t'} = -\frac{Z_Y^2 - 4Z_{om}^2}{4Z_{om}^2}$$

$\frac{U_t'}{I_t'}$ 与 δ 的关系曲线如图 2 所示。

这样看来, U_t' 及 I_t' 在 $\delta = \pi$ 时变化差异最大, 而且方向相反, 但事实上, 其变化率都为零, 这是因为在 $\delta = \pi$ 时, U_t', I_t' 都为 0, 式 13 无实际意义。但在其它点上, 式 13 仍然成立。

根据 7、10 两式可分别绘出 I_{δ}', U_{δ}' 对 δ 的关系曲线(以稳定振荡为例)如图 3 所示。

当系统稳定振荡时, δ 在 δ_{\min} 到 δ_{\max} 之间往复变化, 系统一旦进入非稳定振荡, δ 将在 $0 \sim 2\pi$ 内变化, 因 $I_t' = I_{\delta}' \cdot \delta_t', U_t' = U_{\delta}' \cdot \delta_t'$, 故 I_t', U_t' 与 δ 的关系曲线分两种情况: $\delta_t' > 0$ 及 $\delta_t' < 0$

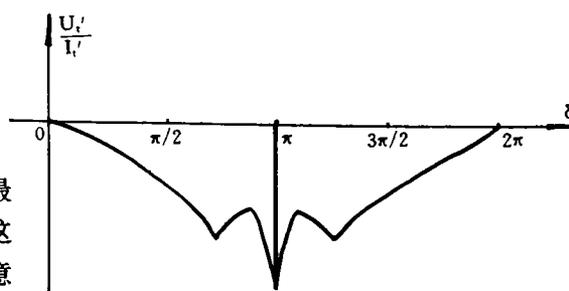


图 2 非稳定振荡时 $\frac{U_t'}{I_t'}$ — δ 的关系曲线

<0,如图4所示。

若假设 $\delta' = \text{常数}$, 则 I_1', U_1' 的最大值可分别求出, 很明显, $\delta=0$ 时, I_1' 有最大值: $\frac{E_s}{Z_Y} d_{\delta}$, 令 $U_1' = 0$, 并化简得:

$$(Z_Y^2 - 4Z_{om}^2) \cdot \cos^3 \frac{\delta}{2} + 4Z_{om}^2 \cos \frac{\delta}{2} + 4Z_{om}^2 \cos \frac{\delta}{2} - 4Z_{om}^2 = 0$$

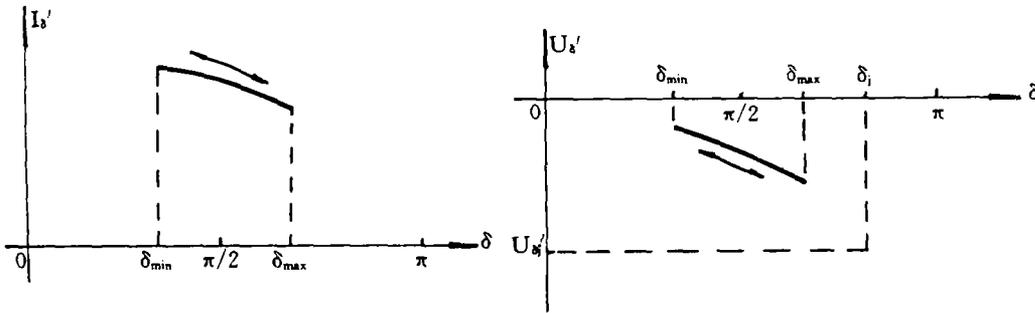


图3 $I_1', U_1' - \delta$ 的关系曲线

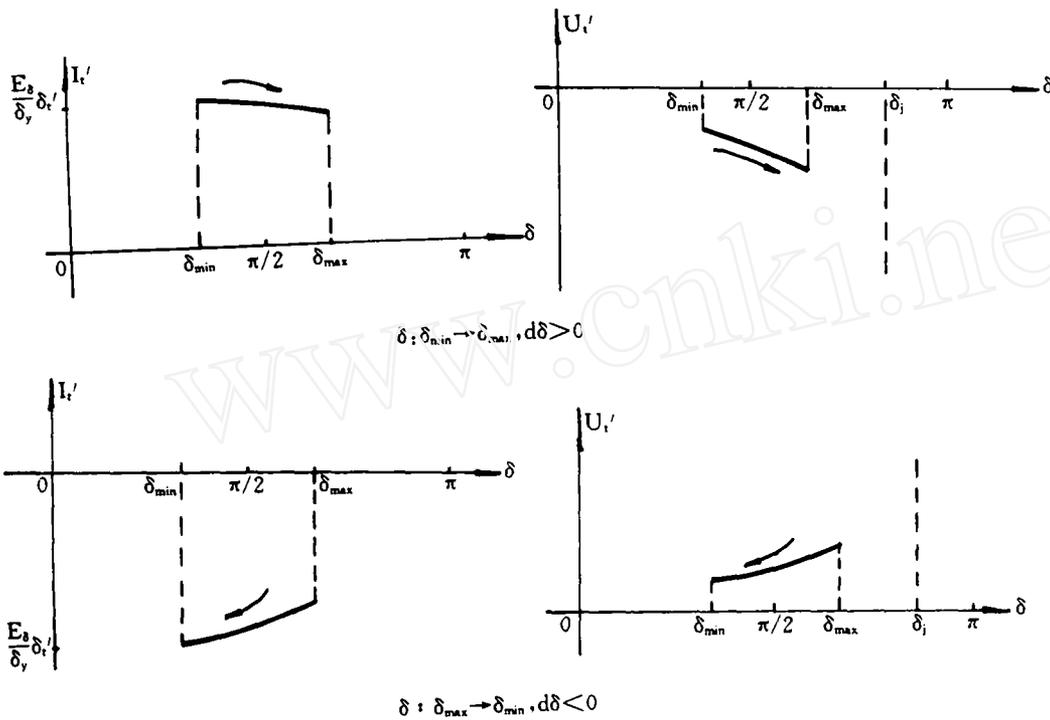


图4 $I_1', U_1' - \delta$ 的关系曲线(稳定振荡)

此方程比较复杂, 若令 $Z_Y = 0.5, Z_{om} = 0.05$, 可估算出一有效根 $\delta_j = 146^\circ$, 此时 U_1' 有最大值, 也即当 $\delta = \delta_j$ 时, U_1' 变化最强烈, 如图4所示。

由图4可见, 当 $d\delta > 0$ 时, $I_1' > 0, U_1' < 0$, 而当 $d\delta < 0$ 时, $I_1' < 0, U_1' > 0$ 时, 同时还可以得出, I 在 $\delta = \delta_{min}$, U 在 $\delta = \delta_j$ 时变化最大, I 在 $\delta = \delta_{max}$, U 在 $\delta = \delta_{min}$ 及 δ 接近 π 时, 变化最小, 当发

生非稳定振荡时, $\delta_{\min} = 0, \delta_{\max} = \pi$, 这样, 当 $d\delta > 0$ 时, $\Delta I_1 > 0, \Delta U_1 < 0$, $d\delta < 0$ 时, $\Delta I_1 < 0, \Delta U_1 > 0$, 其中 $\Delta I_1, \Delta U_1$ 分别为正序电流及正序电压的增量。相量图见图 5 所示:

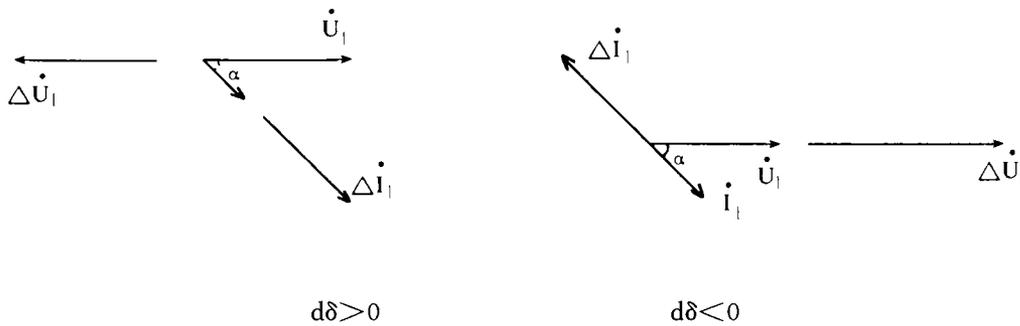


图 5 振荡时相量图

由相量图可见, ΔI_1 始终超前于 ΔU_1 。

2 保护安装处内、外部故障时情况分析

当系统发生故障时, 相当于在故障点叠加一电压源 ΔE , 它在保护安装处产生的正序电压分量为 ΔU_1 , 保护检测到的正序电流分量为 ΔI_1 , 发生内外部故障时的正序等效原理图见图 6 所示。

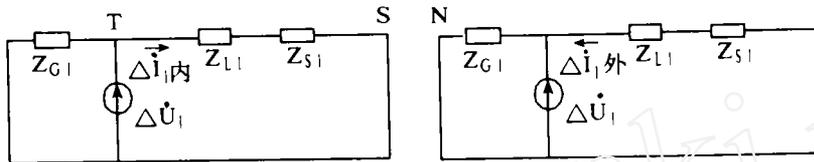


图 6 内、外部故障等效图

由图 6 可得:

$$\Delta I_{1\text{内}} = \frac{\Delta U_1}{Z_{L1} + Z_{S1}} \cdot e^{-j\alpha}$$

当 Δ 取足够小时, 可直接得出:

$$I_1' = \frac{1}{Z_{L1} + Z_{S1}} U_1', \text{ 即 } \frac{U_1'}{I_1'} = \frac{1}{Z_{L1} + Z_{S1}} > 0$$

同理, 外部故障时有:

$$\Delta I_{1\text{外}} = \frac{-\Delta U_1}{Z_{G1}} e^{-j\alpha}, \text{ 得出:}$$

$$I_1' = -\frac{1}{Z_{G1}} U_1', \text{ 即 } \frac{U_1'}{I_1'} = -\frac{1}{Z_{G1}} < 0$$

内、外部故障开始时的矢量图见图 7 所示。

内外部故障切除时的相量图见图 8 所示。

由相量图可见, 当发生内部故障时, ΔU_1 超前 ΔI_1 , 而发生外部故障时, ΔI_1 超前 ΔU_1 。

3 方案的提出

总结 2、3 两部分的分析, 可得出, 当内部故障时, ΔU_1 超前 ΔI_1 , 当外部故障或系统发生振

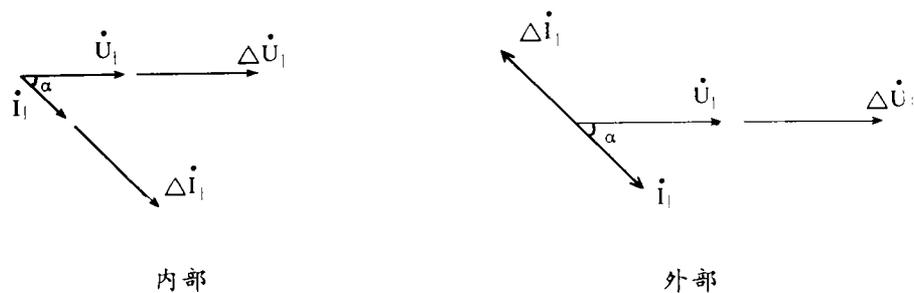


图7 故障开始时的相量图

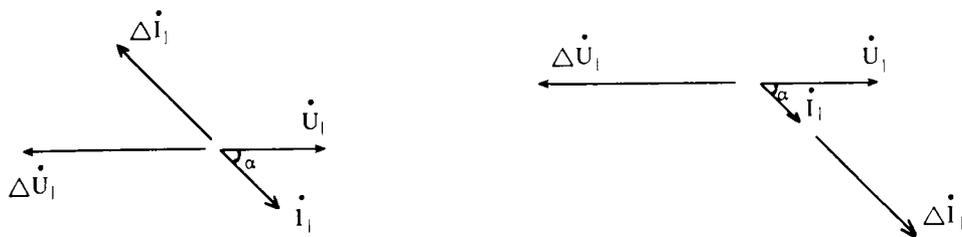


图8 故障切除时的相量图

荡时, $\Delta \dot{I}_1$ 超前 $\Delta \dot{U}_1$, 故只要判断出 $\Delta \dot{I}_1$ 超前 $\Delta \dot{U}_1$, 即判为外部故障或系统发生振荡。但当外部发生故障时, 故障会很快被切除, 持续时间很短, 所以只要延时躲过外部故障, 就可以正确反应出系统是否已发生振荡。该延时可整定为求 $\Delta \dot{U}_1$ 及 $\Delta \dot{I}_1$ 的数据窗的宽度 ΔT , 因为即使外部故障由后备保护切除, 时间较慢, 也已远大于上述的 ΔT , 但这时 $\Delta \dot{U}_1$ 及 $\Delta \dot{I}_1$ 已不再反应故障量, 也即保护将不再反应。当确认系统已发生振荡, 但系统是否一定要失步, 还要看 δ 及 $d\delta/dt$ 的变化趋势。

由 1 中的 11、13 两式可见, 在系统给定的条件下, 即 Z_Y 、 Z_{om} 已知时, 通过计算 $\frac{\dot{U}_1'}{\dot{I}_1'}$ 即 $\Delta \dot{U}/\Delta \dot{I}$, 可直接估算出一个振荡周期内的 δ 的最大值 δ_{max} , 根据 δ 的变化趋势, 并参考振荡角速度的变化, 就可进行失步预测及失步判断了。

例如: 设本系统参数如图 9 所示。

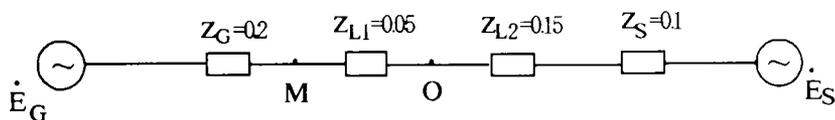


图9 系统说明图

由图可知: $Z_Y = Z_G + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_S = 0.5$

$$Z_{om} = \frac{Z_Y}{2} + Z_G = 0.05$$

设 $K = \left| \frac{U_i'}{I_i'} \right|$, 则:

$$K = \left| -\frac{1}{2} \cdot \frac{Z_Y^2 - 4Z_{om}^2}{\sqrt{Z_Y^2 \text{ctg}^2 \frac{\delta}{2} + 4Z_{om}^2}} \right|$$

$$= \frac{1}{2} \frac{Z_Y^2 - 4Z_{om}^2}{\sqrt{Z_Y^2 \text{ctg}^2 \frac{\delta}{2} + 4Z_{om}^2}}$$

化简得:

$$\text{ctg}^2 \frac{\delta}{2} = \frac{(Z_Y^2 - 4Z_{om}^2) - 16K^2 Z_{om}^2}{4K^2 \cdot Z_Y^2}$$

故有: $\delta = 2\text{arctg}\left(\frac{1}{2KZ_Y}\sqrt{(Z_Y^2 - 4Z_{om}^2) - 16K^2 Z_{om}^2}\right)$ (15)

将 $Z_Y = 0.5, Z_{om} = 0.05$ 代入 15 式得:

$$\delta = 2\text{arccctg}\left(\frac{1}{K}\sqrt{(0.24)^2 - 0.04K^2}\right)$$

可见, δ 与 K 在 $[0 < \delta < \pi]$ 区域内是一一对应的, 通过 K 的变化可直接反应出 δ 的变化, 下面为本例中的 $\delta-K$ 对应关系表。

K	0	0.064	0.080	0.138	0.235	0.393	0.473	0.522
δ	0	30	37	60	90	120	130	135

K	0.578	0.010	0.717	0.900	1.100	1.171	1.199	1.200
δ	140	143	150	160	170	175	178	180

设静稳极限 $\delta_{ij} = 90^\circ$, 当考虑人工静稳时, $\delta_{ij} = 120^\circ$, 若额定功角 $\delta_c = 37^\circ$ 时, 动稳极限角 $\delta_{dj} = 180^\circ - 37^\circ = 143^\circ$ 。当 $K < 0.235$ 即 $\delta_{max} < 90^\circ$ 时, 虽然系统有轻微振荡, 但比较稳定, 当 $90^\circ < \delta_{max} < 120^\circ$, 即 $1.235 < K < 0.393$ 时, 系统进入人工静稳状态, 振荡开始加剧, 但仍处于静稳状态, 不会有失步的危险, 但要为采取相应措施作准备; 当 $K > 0.393$ 时, 系统已进入动稳状态, 如果这时 K 继续增大的话, 系统就有可能失去稳定而失步, 此时就应马上采取相应措施, 若发电机频率低于正常值时, 在不过负荷的条件下, 尽量多出力, 或同时采取减负荷等相应措施。

因为动稳极限角是理论值, 系统很难达到, 故在 δ 等于 δ_{dj} 之前, 系统已失步。若 δ_{max} 继续逼近 $\delta_{dj} = 143^\circ$, 即 $K \rightarrow 0.616$, 例如: 当 $\delta_{max} = 135^\circ$, 此时 $K = 0.522$ 。这时可基本上断定失步已不可避免, 又若此时 $d\delta/dt$, 即 $\Delta K [= K(0) - K(0 - \Delta t)]$, $K(0)$ 为当前时刻的 K 值, $K(0 - \Delta t)$ 为单位时间 Δt 前的 K 值] 又大于一整定值, 则判定系统必将失步, 应立即发预报信号。如果 ΔK 很大, 已超过某一定值, 则直接判定系统将失步, 一旦 δ_{max} 等于或大于 δ_{dj} , 发电机则已失去同步, 系统已剧烈振荡, 此时应立即跳闸, 但为避免在振荡电流最大时切除发电机, 还应继续检测 K 值 (δ_{max}), 待 δ 变到最小时, 立即发跳闸命令。

4 保护算法的实现

本方案用到的量为机端三相电压和机端三相电流, 采样后, 首先进行滤波和滤序的数据处理, 计算出 I_i 和 U_i 再求出增量 ΔI_i 和 ΔU_i , 利用下述的判据即可进行判断。

设 \dot{x}, \dot{y} 为两相量, 若 $\dot{x}(k)y(k-1) - x(k-1)y(k) > 0$, 则 \dot{y} 超前于 \dot{x} , 否则, \dot{x} 超前于 \dot{y} , 该判据的证明很简单, 设 \dot{x}, \dot{y} 为两正弦相量, $x(t) = A\sin\omega t, y(t) = B\sin(\omega t + \alpha)$:

$x(t) \cdot y(t - \Delta t) - x(t - \Delta t) \cdot y(t) = A \cdot B \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin\alpha$ 当每周波采样 12 点时, $\omega\Delta t = 30^\circ$, 此时上式写成:

$$x(k) \cdot y(k-1) - Y(k) \cdot x(k-1) = \frac{1}{2} AB\sin\alpha$$

故在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内, 上式大于 0, 则 $0 < \alpha < 180^\circ$, 即 y 超前于 x 。

利用上述判据, 首先进行同步振荡的检测, 若 ΔI_1 超前于 ΔU_1 不成立, 则说明系统未发生振荡, 程序将直接返回, 若 ΔI_1 超前 ΔU_1 经延时后仍然成立, 则说明系统已发生振荡, 这时就要继续计算 K 及其变化量 ΔK , 因 $K, \Delta K$ 与 $\delta, d\delta/dt$ 相对应, 经计算查表可直接估算出 δ 及 $d\delta/dt$, 根据 δ_{max} 及 $d\delta/dt$ 就可以进行判断。

为保证运算的精度, 计算 $\Delta U/\Delta I$ 时要用双字或采用浮点运算, 利用高性能十六位单片机, 在采样频率为 600Hz 时, 是可以完成运算和判断的。

对于实际系统, 在不同的运行方式下, 发电机与系统之间的联系阻抗是不同的, 故 Z_V, Z_{om} 是变化的, 但可根据不同的运行方式和状态, 把 Z_V, Z_{om} 不同值下的 $\delta-K$ 对应关系存在不同数据区里, 在具体判断时去分别查表计算。

保护简单框图, 见图 10 所示。

5 结论

这种利用单片机来实现的发电机失步预测及失步保护方案, 预测准确可靠, 保护动作迅速, 计算量小, 实用方便, 但难免会有不足之处, 其实用性还要受到现场的进一步考验和必要的改进。

参考文献

- 1 宋聚忠. 600MW 大型发电机—变压器组微机成套保护装置的研制(部分工作). 合肥工业大学硕士研究生毕业论文. 1991, 4
- 2 王维俭、侯炳蘊. 大型机组继电保护理论基础. 第二版, 1988, 5

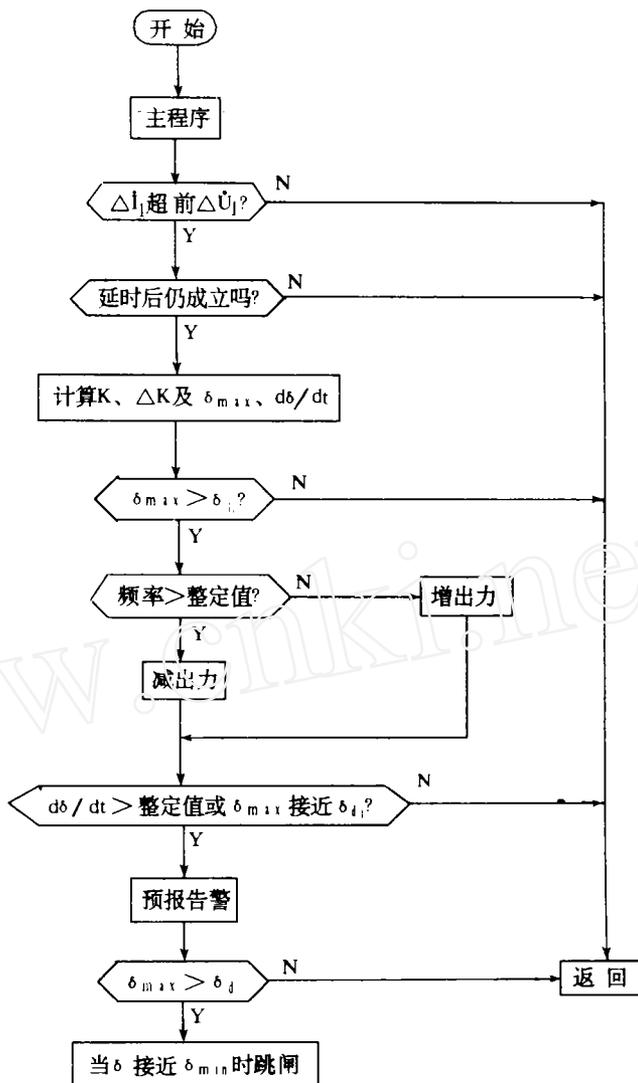


图 10 保护简单框图