

滑差在新型发电机失磁保护中的应用

合肥工业大学 汪象侃 姚晴林 阿城继电器厂 李炳珠

摘 要

文献[1]列出了发电机失磁后达稳态异步运行时平均滑差、滑差变化规律和波动范围的数学公式,我们认为值得商榷,本文从理论上对发电机失磁后滑差的变化规律及在失磁保护中的应用作了简要分析。

前 言

电力系统正常运行时,所有并网运行的发电机都以同步转速 n_1 旋转。当某一台发电机发生失磁故障时,该发电机逐渐与系统失去同步,即发电机的转速 n 不等于系统的同步速 n_1 。我们称:

$$S = n_1 - n / n_1 \quad (1)$$

为转差率,简称转差或滑差。由于失磁发电机的转速 n 高于同步转速 n_1 ,故滑差为负值。

一 发电机失磁后滑差的变化规律

电力系统正常运行时,发电机与系统同步,滑差 S 为零。图1为系统接线图。

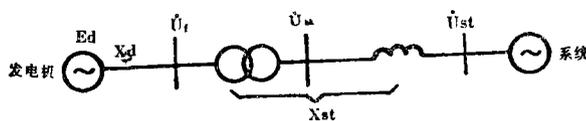


图1 电力系统接线图

发电机向系统输送的有功功率表示为:

$$P_{s,t} = \frac{E_d U_{st}}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U_{s,t}^2 (X_d - X_q)}{2 X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin 2\delta \quad (2)$$

发电机发生失磁后的转子运动方程式为:

$$T_j \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_j - P_{s,t} = P_a \quad (3)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_N S$$

式中; P_j : 原动机的输入功率

P_a : 转子加速功率

$P_{s,t}$: 发电机输出的有功功率 T_j : 转子惯性时间常数 δ : 功率角

发电机失磁后的短暂时间内, 如文献[2]指出, 由于同步电势 E_d 的衰减时间常数 T_d' 与转子惯性时间常数 T_j 不匹配, 且由滑差引起的滑差电势为零, 所以发电机输出的有功功率将稍微下降, 而后很快上升。故这段时间内, 输出的有功功率小于原动机的输入功率, 即 $d\delta/dt > 0$, 有滑差出现。但功率不平衡很快结束, 故滑差 S 值很小。在以后的等有功过程中, 因为功率平衡, 即:

$$T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} = 0$$

所以, $\frac{d\delta}{dt} = \omega_N S$ 为常数。

当发电机进入异步运行阶段后, 因原动机的输入功率始终大于输出的有功功率, 即 $\frac{d^2\delta}{dt^2} > 0$, 所以滑差逐渐增大, 同时由于滑差而引起异步功率也逐渐增大。考虑等有功过程中也有滑差 S , 所以发电机向系统输送的有功功率在失磁后整个过程可表示为:

$$\begin{aligned}
 P_{s,t} = & \frac{(E_{d0} + (E_{d0} - E_{d0})e^{-t/T_d'}) U_{s,t} \sin\delta + \frac{U_{s,t}^2}{2}}{X_{d\Sigma}} \\
 & \cdot \frac{X_d - X_d'}{X_{d\Sigma} X_{d\Sigma}} \sin 2\delta + \frac{V_{s,t}^2}{2} \left[\frac{X_d - X_d'}{X_{d\Sigma} \cdot X_{d\Sigma}'} \cdot \frac{ST_d'}{1 + (ST_d')^2} \right. \\
 & + \frac{X_d' - X_d''}{X_{d\Sigma}' \cdot X_{d\Sigma}''} \cdot \frac{ST_d''}{1 + (ST_d'')^2} \\
 & \left. + \frac{X_q - X_q''}{X_{q\Sigma} \cdot X_q''} \cdot \frac{ST_q''}{1 + (ST_q'')^2} \right] \\
 & - \frac{U_{s,t}}{2} \cdot \left[\frac{X_d - X_d'}{X_{d\Sigma} \cdot X_{d\Sigma}'} \cdot \frac{ST_d'}{\sqrt{1 + (ST_d')^2}} \right. \\
 & \sin(2\delta + \text{tg}^{-1} \frac{1}{ST_d'}) + \frac{X_d' - X_d''}{X_{d\Sigma}' \cdot X_{d\Sigma}''} \cdot \frac{ST_d''}{\sqrt{1 + (ST_d'')^2}} \\
 & \sin(2\delta + \text{tg}^{-1} \frac{1}{ST_d''}) - \frac{X_q - X_q''}{X_{q\Sigma} \cdot X_q''} \cdot \frac{ST_q''}{\sqrt{1 + (ST_q'')^2}} \\
 & \left. \sin(2\delta + \text{tg}^{-1} \frac{1}{ST_q''}) \right] \quad (4)
 \end{aligned}$$

发电机的平均异步功率即上式中第3项。

$$\begin{aligned}
 P_{s,t} = & \frac{U_{s,t}^2}{2} \left[\frac{X_d - X_d'}{X_{d\Sigma} \cdot X_{d\Sigma}'} \cdot \frac{ST_d'}{1 + (ST_d')^2} \right. \\
 & + \frac{X_d' - X_d''}{X_{d\Sigma}' \cdot X_{d\Sigma}''} \cdot \frac{ST_d''}{1 + (ST_d'')^2} + \frac{X_q - X_q''}{X_{q\Sigma} \cdot X_q''} \\
 & \left. \cdot \frac{ST_q''}{1 + (ST_q'')^2} \right] \quad (5)
 \end{aligned}$$

当原动机的输入功率等于平均异步功率时, 发电机进入稳定异步运行。此时, 滑差

S的平均值不再增大,而保持某一确定的值。但实际上,由于式(4)中第一项同步功率、第二项凸极功率、第四项交变异步功率的影响,滑差S是在波动的。

发电机失磁后滑差变化情况见图2。图中所示滑差S为平均值。发电机在稳态异步运行时滑差变化情况见图3。

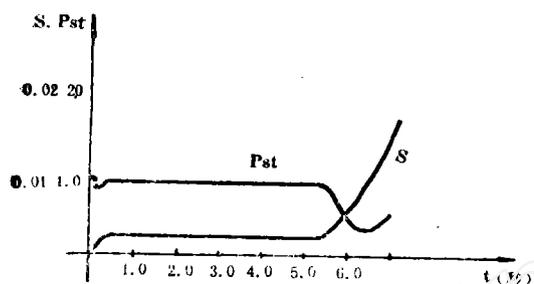


图2 汽轮发电机失磁后S和P变化曲线

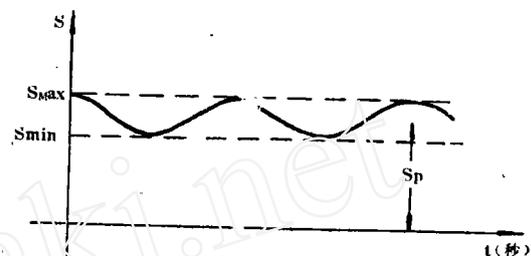


图3 汽轮发电机全失磁达稳态异步运行S的变化曲线

发电机失磁后滑差S的大小与发电机的异步转矩特性、原动机调速器的调速特性及失磁前的有功输出有关。图4示出了汽轮发电机、有阻尼绕组的水轮发电机、无阻尼绕组的水轮发电机的平均异步转矩 M_{YP} 与转差S的关系。假定各电机的调速特性曲线 $M_i = F(s)$ 相同, M_i 为原动机的输入功率。图中 M_{YP1} 、 M_{YP2} 、 M_{YP3} 与 M_i 的交点为各发电机全部失磁后的稳态异步运行点。各交点所对应的 $S_{\infty 1}$ 、 $S_{\infty 2}$ 、 $S_{\infty 3}$ 为各电机稳态异步运行时的平均转差率。可以看出,汽轮发电机的平均异步转矩 M_{YP} 大,所以平均转差率 S_{∞} 小,为百分之零点几,大约0.1~0.5%,输出的有功功率较大,几乎能保持失磁前的全部负荷。因此,在系统电压不致崩溃的前提下,汽轮发电机允许无励磁运行的时间较长。而水轮发电机的平均异步转矩 M_{YP} 较小,有阻尼绕组的水轮发电机比无阻尼绕组的水轮发电机的 M_{YP} 虽大些,但在多数情况下阻尼绕组的容量较小,因此,水轮发电机失磁后达稳态异步运行时输出的有功功率较小,而转差率却很大,通常为 $S_{\infty} = 3 \sim 5\%$,

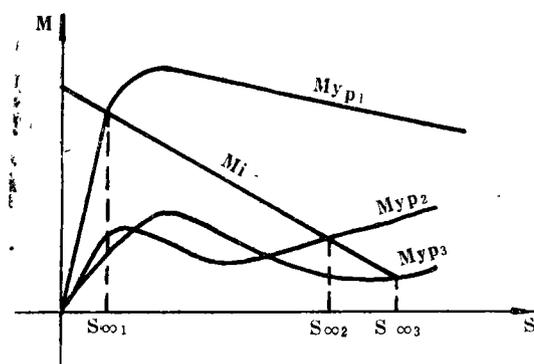


图4 发电机的平均异步转矩 M_{YP} 与转差S的关系曲线

M_{YP1} —汽轮发电机 M_{YP2} —有阻尼绕组的水轮发电机
 M_{YP3} —无阻尼绕组的水轮发电机

在这样大的转差下,机组产生强烈震动,阻尼绕组有过热的危险。此外,由于水轮发电机的 X_d 较小,异步运行时的定子电流较大,所以水轮发电机全部失磁后进行异步运行只允许持续几秒钟。在这段时间内,可尝试将偶然跳闸的灭磁开关重新合闸或将输出有功功率减小到凸极功率以下,以求恢复同步。否则,就应将机组自系统中快速切除。

水轮发电机异步运行时转差S可

由式(5)求出,对于汽轮发电机,考虑转子近似对称,当全失磁达稳态异步运行时,平均异步功率与滑差S的关系可简化为:

$$P_{s,p} = \frac{U_{s,t}^2 (X_d - X_d')}{X_{d\Sigma} \cdot X_{d\Sigma}'} \cdot \frac{ST_d'}{1 + (ST_d')^2} \quad (6)$$

滑差S可从式(6)解出:

$$S_{c,p} = \frac{U_{s,t}^2 (X_d - X_d') \pm \sqrt{[U_{s,t}^2 (X_d - X_d')]^2 - 4(P_{s,p} X_{d\Sigma} X_{d\Sigma}')^2}}{2P_{s,p} \times X_{d\Sigma} X_{d\Sigma}' T_d'} \quad (7)$$

文献[1]认为公式(6)中S很小,而 T_d' 通常为1秒左右,故式(6)中 $(ST_d')^2$ 可以忽略,则滑差可由下式求出:

$$S_{c,p} = \frac{P_{s,p} X_{d\Sigma} X_{d\Sigma}'}{U_{s,t}^2 (X_d - X_d') T_d'} \quad (8)$$

这里举一例说明上述说法是否正确。

例:某汽轮发电机经联系电抗 $X_{l,t}$ 与无穷大电网并联运行,发电机参数为: $P_{e,t} = 100$ 兆瓦, $\cos\varphi_{e,t} = 0.8$, $X_d = 1.9$, $X_d' = 0.24$, $T_{d0} = 9$ 秒,以上各电抗的标么值均对发电机的额定视在容量 $S_{e,t}$ 而言。这台发电机在有功功率输出 $P = 0.8P_{e,t}$, $U_{s,t} = 1$, $\cos\varphi = 0.8$ 的情况下全失磁达稳态异步运行后,转差率 $S = 0.14\%$,求:

(1) 当 $X_{l,t}$ 从0变化到 ∞ 时,求 ST_d' 值。

(2) 当 $X_{l,t} = 0.26$,分别用式(7)和式(8)求 $S_{c,p}$ 值,并与该题所给S比较。

解:(1) 根据公式 $T_d' = \frac{X_d + X_{l,t}}{X_d + X_{l,t}} T_{d0}$

$$\text{当 } X_{l,t} = 0 \text{ 时, } T_{d1}' = \frac{0.24}{1.9} \times 9 = 1.13 \text{ 秒}$$

$$\text{当 } X_{l,t} = \infty \text{ 时, } T_{d2}' = \frac{0.24 + \infty}{1.9 + \infty} \times 9 = 9 \text{ 秒}$$

$$\text{所以, } ST_{d1}' = \frac{0.14}{100} \times 1.13 \times 314 = 0.497 \text{ 弧度}$$

$$ST_{d2}' = \frac{0.14}{100} \times 9 \times 314 = 3.96 \text{ 弧度}$$

(2) 当 $X_{l,t} = 0.26$, $T_d' = 2.1$ 秒

根据公式(7)

$$S = \frac{1^2 \times (1.9 - 0.24) \pm \sqrt{[1 \times (1.9 - 0.24)]^2 - 4 \times (0.8 \times 2.16 \times 0.5)^2}}{2 \times 0.8 \times 2.16 \times 0.5 \times 2.1 \times 314}$$

$$\approx 0.001456 = 0.1456\%$$

根据公式(8)

$$S = \frac{0.8 \times 2.16 \times 0.5}{314 \times 1^2 \times (1.9 - 0.24) \times 2.1} \approx 0.0008 = 0.08\%$$

从计算结果可知:

(1) 当 $X_{l,t}$ 从0变化到 ∞ 时, ST_d' 在0.497到3.96范围内变化,所以,

$(ST'_d)^2$ 不可忽略。

(2) 如 $(ST'_d)^2$ 被忽略, 计算误差相当大, 利用式(7)的相对误差为: $S\% = 4\%$, 而利用式(8)为: $S\% = 43\%$ 。所以式(8)不可作为平均滑差的计算公式。

文献[1]之所以推导出式(8)是认为S很小。但实际上本公式中S不是滑差, 而是 $\omega_N S$, 证明从略, 请看文献[2]有关章节。

顺便指出, 文献(1)中所列变化滑差 S_1 也不正确。因为全失磁达稳态异步运行时, E_d 的变化规律为:

$$E_d + T'_d \frac{dE_d}{dt} = (T_{d0} - T'_d) U_{d0} \sin \delta \frac{d\delta}{dt} \quad (9)$$

上式中, 如认为 $T'_d \frac{dE_d}{dt} = 0$, 则应:

1. $T'_d = 0$, 实际上, 如例题所示, $T'_d \neq 0$, 所以这种条件不成立。

2. $\frac{dE_d}{dt} = 0$, 即 $E_d = \text{常数}$, 但在稳态异步运行时, E_d 的数值为:

$$E_d = \frac{U_{d0} (X_d - X'_d) ST'_d}{X'_{d\Sigma} [1 + (ST'_d)^2]} (\sin \delta - ST'_d \cos \delta) \quad (10)$$

上式是在认为S为常数下求出, 实际S为变量, 即 E_d 变化更大, 故 $\frac{dE_d}{dt} \neq 0$ 。

因此, 文献[1]所列公式:

$$E_{d1} = - (T_{d0} - T'_d) U_{d0} \cos \delta \frac{d\delta}{dt} \quad (11)$$

是不正确的。

对失磁后滑差S的精确求解, 应将式(3)、式(4), 调速器特性公式和异步转矩特性公式联立求解。

二 滑差的影响及允许滑差

发电机失磁后, 滑差增大将对系统和发电机本身产生不良影响, 主要表现为:

1. 对系统的影响

当发电机失磁后, 励磁机供给的强制性励磁电流下降, 发电机从电网吸收无功, 定子和转子产生磁场, 维持异步运行, 且向系统送出有功。以汽轮发电机为例, 发生全失磁, 进入稳定异步运行时, 吸取无功功率的平均值为:

$$Q_{11} = - \frac{U_{d0}^2}{X'_{d\Sigma}} \left[1 + \frac{(X_d - X'_d) (ST'_d)^2}{2 X'_{d\Sigma} [1 + (ST'_d)^2]} \right] \quad (12)$$

上式中只有S值变化大, 所以 Q_{11} 主要取决于滑差S的数值大小。根据分析, 汽轮发电机满负荷下全失磁达稳态异步运行时, 自系统吸取的无功功率平均值 Q_{11} 与机组额定有功功率之比为 $0.9 \sim 1.2 P_{d0}$, 如考虑正常运行时发电机输出无功功率为 $0.6 P_{d0}$, 则可认为发电机失磁后, 将给系统造成 $1.5 \sim 1.8 P_{d0}$ 的无功缺额。若系统无功贮备不

足, 则可能使系统中有关点的电压显著下降, 甚至电压崩溃。

2. 对失磁发电机的影响

1) 使转子过热

发电机失磁后, 转子的转速高于同步速, 因此, 转子要切割定子磁场, 在转子表面上感应出电流, 该感应电流沿转子端部构成闭合回路, 使转子电阻增加, 转子电阻与滑差的关系如图 5 所示, 其解析式为:

$$r_{B_s} = (r_{BK} + r_{B0}) \sqrt{S} + r_{B0} \quad (13)$$

式中: r_{BK} 为 $S = 1$ 时转子归算电阻,

r_{B0} 为 $S = 0$ 时转子归算电阻

r_{B_s} 为 $S = S$ 时的转子归算电阻

此外, 转子表面的感应电流在转子表面形成涡流, 使转子发热增加。

转子中的损耗为:

$$\Delta P_B = 3 I_B'^2 r_{B_s} = (P_{s_i} + \Delta P_{s_i}) S \quad (14)$$

式中: P_{s_i} 为发电机输出功率

ΔP_{s_i} 为定子中的功率损耗

$I_B'^2$ 为转子归算电流

从上式可以看出, 当 P_{s_i} 一定时, 损耗与滑差成正比。因此, 失磁发电机维持的有功越大, 失步运行的滑差越大, 转子发热亦越严重。

2) 使定子过电流倍数增大:

发电机的定子电流可用下式表示:

$$I = \sqrt{\frac{P^2 + Q^2}{U^2}} \quad (15)$$

式中, P 、 Q 、 U 分别为发电机的有功功率、无功功率和定子电压。

发电机失磁后, 在维持较大有功功率的情况下, 由于机端电压下降, 定子将过电流。此外, 失磁发电机从系统吸收的无功功率随滑差的增大而增大。因此, 滑差使过电流倍数增大。对于大型汽轮发电机, 当全失磁后, 定子过电流的倍数最大可达 2~3 倍额定电流。

3) 对于直接冷却高利用率的大型汽轮发电机, 其平均异步转矩的最大值较小, 惯性常数也相对降低, 转子在横、纵轴方面, 也呈现较明显的不对称。由于这些原因, 在重负荷下失磁后, 这种发电机的转矩及有功功率要发生剧烈的周期性振动。对于水轮发电机, 平均异步转矩最大值更小, 以及转子纵、横轴明显不对称, 在重负荷下失磁运行时, 振动更为剧烈。这种情况下, 将有很大甚至超过额定值的电磁转矩周期性作用到发电机的轴系上, 并通过定子传送到机座上, 随着滑差增大, 振动更剧烈。

从以上分析可知, 滑差 S 的大小对发电机失磁后能否继续异步运行和系统的稳定性有着直接的影响。大量的理论分析和试验证明, 在发电机发生失磁后, 继续异步运行的基本条件是:

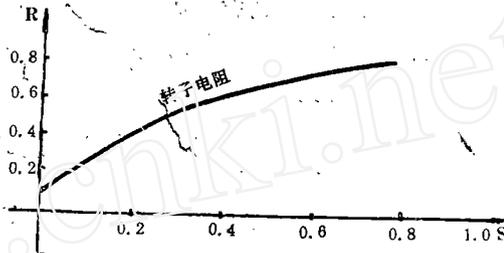


图 5 转子电阻与滑差的关系

1) 系统方面有足够的无功功率储备,即在发电机失磁后,发电机从发出无功到吸取无功,给系统造成的无功缺额,不致引起系统电压崩溃,通常是采用接在发电机所连主变压器高压侧的低电压继电器进行监视。

2) 发电机定子电流(平均值)不应超过过负荷规定所允许的电流和时间。例如,如异步运行时间如不超过15~30分钟,电流不应超过1.05~1.1倍额定电流。通常采用发电机过负荷保护进行监视。

3) 转子损耗对气体表面冷却和内冷式汽轮发电机不应超过发电机的额定励磁损耗,公式表示为:

$$S = 4P_2 / P_1 \quad (16)$$

式中: $4P_2$ 为发电机额定励磁损耗,等于转子额定电压乘以额定电流

P_1 为发电机的额定功率

对双水内冷式汽轮发电机不应超过 $1/3$ 倍的额定励磁损耗,公式表示为:

$$S = \frac{1}{3} 4P_2 / P_1 \quad (17)$$

4) 对水轮发电机,异步运行时间较短,发热问题不为突出,但因异步运行时滑差较大,故应考虑振动问题,但因水轮发电机制造不成系列,所以异步运行时间的长短及对应滑差值,应根据机组本身数据,调速器工作特性等由各厂家和运行单位决定。

但是,归根结底,上述四个基本条件都是与滑差值紧密相关,例如,如果使发电机失磁后的输出有功功率下降到0.5~0.6倍额定值,按式(7)所计算的滑差值下降很多,定子电流通常为接近或略超过于额定值,同理,所吸取的无功功率也会下降很多。

因此,发电机发生失磁故障后,一方面应迅速降低有功,将滑差值减小;另一方面应对滑差变化的数值进行监视,当滑差过大时,造成对系统和发电机的安全有威胁时,立即将失磁发电机切除。

三 滑差元件的工作原理及应用

为把发电机失磁后所造成的危害减小到最低限度,最近,我们研制了一种新型原理的失磁保护,其中应用了滑差元件。这里首先介绍它的工作原理。

从公式(4)可以看出,汽轮发电机全失磁后的有功功率是按 $2st$ 变化的,所以在有功功率变换器后按一滑差分量滤过器就可以测量出滑差的大小来,图6和图7分别为滑差元件的原理方框图和波形图。

整定原则如下:

$$\text{发电机的转差 } S = \frac{\omega_c - \omega}{\omega_c} = \frac{2\pi f_c - 2\pi f}{2\pi f_c} = \frac{f_c - f}{f_c} = \frac{f_s}{50} \quad (18)$$

式中, f_c 为系统频率 f 为发电机频率 f_s 为滑差频率

$$\text{滑差周期: } T_s = 1 / f_s \quad (19)$$

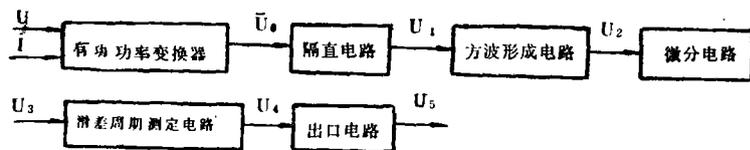
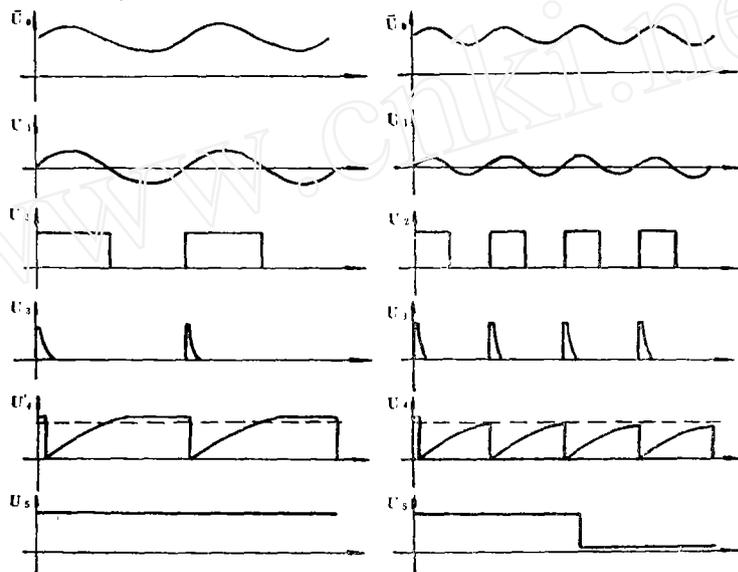


图6 滑差元件的原理方框图



(a) 滑差较小 (b) 滑差较大

图7 滑差元件的波形图

将式(19)代入式(18)得:

$$S = 1/50T_s \text{ 或 } T_s = 0.02/S \quad (20)$$

从式(20)可以看出,用滑差周期的长短可以表示滑差的大小。例如:取 $S = 1\% = 0.1$,则对应的滑差周期为 $T_s = 2$ 秒

可知:如果要使滑差元件在发电机的滑差大于某一值时动作,则可以换成使滑差元件在滑差时间 T_s 小于某一时间时动作。

发电机失磁失步运行时,其有功功率按2倍滑差频率摆动, T_s 为变化周期,则 $T_s' = \frac{1}{2}T_s$ 代入式(20)得:

$$S = 1/(50 \times 2 T_s') \quad \text{或} \quad T_s' = 0.01/S \quad (21)$$

从图7可以看出,当滑差较小时,输出电压为高电平,滑差元件不动作。而当滑差较大时,输出电压 U_5 为一连续低电平,滑差元件动作。

在失磁保护中我们应用滑差元件,其作用是:

1) 作为汽轮发电机能否稳定异步运行的依据。当汽轮发电机失磁后,滑差将增大;而滑差元件是按式(16)或式(17)进行整定,则当滑差小于规定动作值时,滑差元件不动作说明汽轮发电机可长期稳定异步运行;而当滑差元件大于动作值时,表明转子损耗则可能超过额定励磁损耗,滑差元件立即动作,和失磁判据共同出口,切除发电机。这一点明显改善了目前失磁继电器不能判断汽轮发电机失磁后能否稳定异步运行的缺点。对于水轮发电机,如果用滑差元件作为异步运行一段时间的依据,失磁保护的工作性能也将有所改善。

2) 对于采用有功转子判据为,判据的失磁继电器,当发电机发生失磁,进入异步运行时,励磁电压 U_L 和有功功率 P_{11} 都在随滑差 S 波动。当这种波动较大时,则有可能与 P_{11} 成正比的动作电压 U_p 小于制动电压 U_L ,即判据不满足,继电器将动作不可靠。但是,因进入异步运行后,滑差值较大,可利用滑差元件作为有功转子判据的自保持,这样使有功转子判据动作可靠。

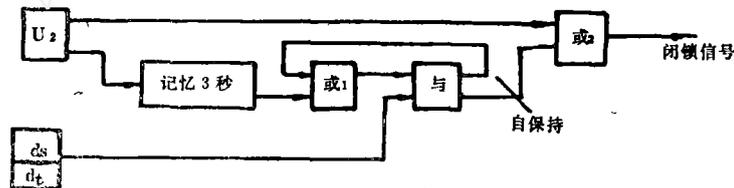


图8 振荡闭锁元件方框图

3) 与负序电压构成振荡闭锁元件

为了躲过系统短路和振荡时对失磁保护的影响,可利用滑差元件与负序电压元件共同构成闭锁元件,其方框图见图8所示。

正常运行时及发电机发生失磁时,没有负序电压出现,“或”门没有输出,不闭锁失磁保护。

当发电机出口处或系统发生不对称短路时,持续性负序电压 U_2 出现,“或₂”门有输出,闭锁失磁保护。当短路切除后,“或₂”门输出立即消失。

如果系统发生三相短路、短路引起系统振荡、正常操作引起振荡时,都有瞬间负序电压 U_2 出现,“ U_2 ”动作,并记忆3秒钟。在这段时间内,如果振荡引起功角 δ 已拉开,所以滑差速率元件动作,“与”门开放,经“或₂”门输出闭锁信号,另一方面经或₁门自保持,直到系统恢复同步时才返回,所以可靠地防止了在较严重的振荡情况下失磁保护可能误动作。

这样,就使失磁保护取消了防止振荡和短路进行必要的延时,使失磁保护动作时间大为提前,为发电机迅速减载,保证系统和发电机的安全运行创造了有利条件。

滑差元件采用集成运放电路,已成功应用在最新式失磁保护中,根据我们所做的大量试验,证明它具有性能良好、接线简单、动作可靠的特点。

参考文献

1. 李玉海,失磁发电机的滑差及在失磁保护中的应用,电力系统自动化 1984NO.1
2. 姚晴林,《同步发电机失磁及其保护》,机械工业出版社 83年9月