

中国电机工程学会
1963年年会学术论文选集

电力系统专业

中国工业出版社

中国电机工程学会

1963年年会学术论文选集

电力系统专业

中国电机工程学会1963年年会
电力系统专业論文选集編輯小組 編

中国工业出版社

**中国电机工程学会
1963年年会学术論文选集
电力系统专业**

中国电机工程学会 1963 年年会 編
电力系统专业論文选集編輯小組

*

水利电力部办公厅图书編輯部編輯（北京阜外月坛南营房）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

北京市书刊出版业营业許可証出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行，各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张18·字数381,000

1965年1月北京第一版·1965年1月北京第一次印刷

印数0001—4,550·定价（科七）2.70元

*

统一书号：15165·3549（水电-466）

前 言

中国电机工程学会于1963年10月在北京举行的年会上，进行了有关电力系统、电机和输电线路杆塔三个专业的学术活动。在这次学术活动中电力系统专业着重讨论了有关电力系统稳定及经济运行方面的问题。会议共收到论文70篇，其中属于提高电力系统稳定技术措施的有13篇；属于电力系统非正常运行方式的有7篇；属于电力系统稳定计算及准则的有9篇；属于电力系统计算工具的有9篇；属于电力系统经济调度及自动调频的有11篇；属于电力系统其它方面的论文有21篇。由于会上只宣读和讨论了前五个方面的论文，故仅在这个范围内共选择了18篇，汇编成本论文选集出版（电机和输电线路杆塔专业论文选集另行分册出版）。

在论文选集的编辑中曾邀请了许多有关的专家、教授担任审查工作，承他们热情协助，提出了许多宝贵意见，保证了本论文选集的顺利出版，谨此表示感谢。

由于各项条件的限制，在编辑工作中难免有错误之处，希读者指正。

中国电机工程学会1963年年会

电力系统专业论文选集编辑小组

1964.5.25.

同步发电机按频率调节励磁时的 静态稳定^①

浙江大学 馬大強

【提要】 本文分析証明，在一机到无穷大电源的简单系统中，同步发电机按频率偏差及其微分调节励磁的效果，与按其它参数(δ , I 等)调节励磁的效果基本上相同。但在两个有限容量电厂构成的电力系统中，按频率偏差及其微分调节励磁时，静态稳定极限显著降低。

在同步发电机上采用强力自动调节励磁装置，可以把系统静态稳定极限提高到线路功率极限，已经在理论上和实践得到了证实。在强力调节励磁中，应该取用什么运行参数作为调节参数，是一个值得研究的问题。为了保证当负荷变化时电压的稳态值比较平稳恒定，强力调节器的比例调节部分，一般取电压和电流作为调节参数。按参数微分调节部分，可以取电流(ΔI)、电压(ΔU)、运行角($\Delta \delta$)或频率(Δf)作为调节参数。根据分析和实验可知，微分部分按电压偏差调节，当放大系数很大时会发生振荡，因此实现上有困难(文献1)，一般不采用。

取运行角 $\Delta \delta$ 作为调节参数时，必须有特殊的遙远测角设备，这就降低了调节励磁装置运行的可靠性，在实际工作中，也不予采用。

取电流(ΔI)作为调节参数，是比较切实可行的方法。但如分析指出(文献2)，在一个电厂内有許多发电机组的情况下，如果每台机组上的调节励磁装置各自按每台发电机本身的定子电流偏差(ΔI_f)调节，整个系统的实际稳定区要缩小，因而系统的稳定极限要降低。如果取用公共运行参数作为每台机组上调节励磁装置的调节参数，就可避免上述缺陷。线路总电流是一种公共参数。分析証明，按线路总电流调节励磁与按运行角 $\Delta \delta$ 调节励磁的效果基本上相同。但是，为了取得线路总电流信号，必須在电厂出线高压侧装設高压电流互感器，同时也必須用电缆线路把信号引入装設在电厂内的调节励磁装置，这样也将使调节励磁装置运行的可靠性降低。在电厂有較多的或不同方向的出线的情况下，如何取得电流信号，更有一定的困难。按发电机电势或端电压的频率偏差调节时，可以避免上述缺点。因为频率是每台机组的公共参数，而频率偏差信号，可以直接从发电机本身取得。这对调节励磁装置的运行，带来了很大的可靠性和灵活性。因此，按频率偏差及其微分调节励磁，是切实可行的有一定优点的办法。

本文就简单的输电系统(一个电厂到无穷大电源)和两个有限容量电厂組成的输电系统的两种情况(当一个电厂的机组上装有按频率偏差调节的强力调节励磁装置时)进行靜

① 陈栋林、陶元兴同志参加計算工作。

态稳定的分析, 并与按其它运行参数 (ΔI 、 $\Delta \delta$) 调节的效果作一比较。

系统结构示意图如图 1 所示。

一、受端系统看作为无穷大功率的系统时, 根据图 1, 可写出微振荡方程式组, 联解可得,

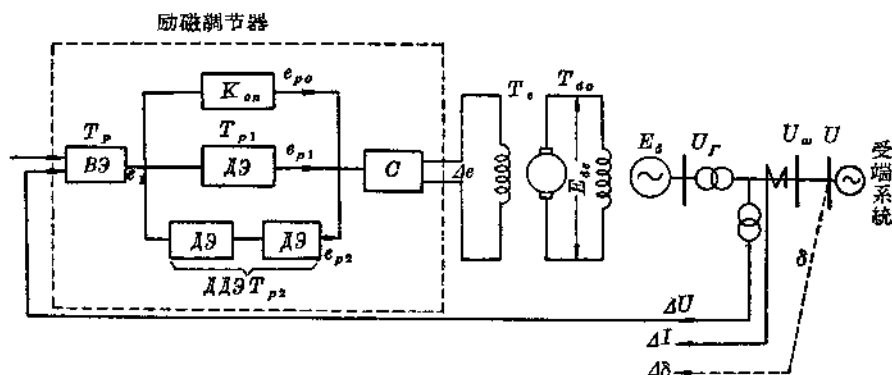


图 1 具有强力励磁调节器的输电系统示意图

$$(a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5) \Delta \delta_{12} = -P'_{B_d} W(p) \Delta H \quad (1)$$

式中 $a_0 = M_1 T_e T_p T'_d$;

$$a_1 = M_1 (T_e + T_p) T'_d + M_1 T_p T_e;$$

$$a_2 = M_2 T'_d + M_1 (T_e + T_p) + S_{B_d}' T_e T_p T'_d;$$

$$a_3 = S_{B_d}' (T_e + T_p) T'_d + S_{B_d} T_e T_p + M_1;$$

$$a_4 = S_{B_d}' T'_d + S_{B_d} (T_e + T_p);$$

$$a_5 = S_{B_d};$$

$$T'_d = \frac{P_{B_d}'}{P'_{B_d}'} T_{d0};$$

$$P'_{B_d} = \left. \frac{\partial P}{\partial E_d} \right|_{\delta_{12} = \text{常数}};$$

$$P'_{B_d}' = \left. \frac{\partial P}{\partial E_d'} \right|_{\delta_{12} = \text{常数}};$$

$$S_{B_d} = \left. \frac{\partial P}{\partial \delta} \right|_{E_d = \text{常数}};$$

$$S_{B_d}' = \left. \frac{\partial P}{\partial \delta} \right|_{E_d' = \text{常数}};$$

M_1 ——送端电厂等值机组的惯性常数;

δ_{12} ——送端电厂等值机组的空载电势 E_d 与受端高压母线电压的相角, 度;

T_{d0} ——等值机的磁场绕组时间常数 (定子开路时), 秒;

T_e ——等值机的励磁机磁场绕组的时间常数, 秒;

T_p ——调节器整流元件的时间常数, 秒。

E_{d0} ——发电机的稳态空载电势；

E'_d ——发电机的暂态电势；

E_d ——发电机的空载电势；

Π ——所选取的调节参数。

P_{E_d} 、 $P_{E'_d}$ ——用空载电势和暂态电势表示的功率方程式。

$$W(p)\Delta\Pi = \left(K_0 + \frac{K_1 p}{1 + T_{p1} p} + \frac{K_2 p^2}{1 + T_{p2} p} \right) \Delta\Pi \quad (2)$$

式中 T_{p1} 和 T_{p2} ——调节器一次微分元件和二次微分元件的时间常数，秒。

当忽略 T_{p1} 和 T_{p2} 时，

$$W(p)\Delta\Pi = (K_0 + K_1 p + K_2 p^2) \Delta\Pi \quad (3)$$

调节参数 Π 可以是线电流、发电机电压 (U_r)、线路端电压 (U_u)、发电机电势 (E_d) 与受端系统间的夹角 (δ) 或系统中某一点的频率 (Δf)。但不论按照那一种参数调节， $\Delta\Pi$ 均可以表示为 $\Delta\delta_{12}$ 的函数，如：

$$\Delta\Pi = (C_{1\Pi} p^2 + C_{2\Pi}) \Delta\delta_{12} \quad (4)$$

方程式 (1) 的右边可以写成：

$$-P'_{E_d} W(p) \Delta\Pi = -W(p) (C'_{1\Pi} p^2 + C'_{2\Pi}) \Delta\delta_{12} \quad (5)$$

$C'_{1\Pi}$ 和 $C'_{2\Pi}$ 的表示式列在表 1 中。

表 1

系 数 \ 调节参数 $\Delta\Pi$	$\Delta\delta$	ΔI	$-\Delta U$	Δf_{U_r}
$C'_{1\Pi}$ ($\Pi = \delta, I, U, f$)	0	$-I'_{E_d} M_1$	$\frac{P'_{E_d}}{P'_{U_u}} M_1$	$\frac{P'_{E_d}}{S_2} M_1 \left(1 - \frac{P'_{2E_d}}{P'_{E_d}} - \frac{P'_{2U_r}}{P'_{3U_r}} \right)$
$C'_{2\Pi}$ ($\Pi = \delta, I, U, f$)	P'_{E_d}	$I'_0 P'_{E_d} - I'_{E_d} S_{E_d}$	$\frac{P'_{E_d}}{P'_{U_u}} S_{U_u}$	$P'_{E_d} \left(1 - \frac{P'_{2E_d}}{P'_{E_d}} \frac{S_{E_d}}{S_2} - \frac{P'_{2U_r}}{P'_{3U_r}} \frac{S_3}{S_2} \right)$

如前所述，强力调节器的比例部分和微分部分，可以按照不同参数调节。假定比例部分按参数 $\Delta\Pi_0$ 调节，其放大系数为 $K_{0\Pi}$ ；一次微分部分按参数 $\Delta\Pi_1$ 调节，其放大系数为 $K_{1\Pi}$ ；二次微分部分按参数 $\Delta\Pi_2$ 调节，其放大系数为 $K_{2\Pi}$ 。在忽略 T_{p1} 和 T_{p2} 的情况下，方程式 (1) 的右边为：

$$K_{0\Pi} \Delta\Pi_0 + K_{1\Pi} p \Delta\Pi_1 + K_{2\Pi} p^2 \Delta\Pi_2 = \{ K_{0\Pi} [C'_{1\Pi_0} p^2 + C'_{2\Pi_0}] + K_{1\Pi} p [C'_{1\Pi_1} p^2 + C'_{2\Pi_1}] + K_{2\Pi} p^2 [C'_{1\Pi_2} p^2 + C'_{2\Pi_2}] \} \Delta\delta_{12}$$

方程式 (1) 可以写成如下形式：

$$[a_0 p^5 + (a_1 + \Delta a_1) p^4 + (a_2 + \Delta a_2) p^3 + (a_3 + \Delta a_3) p^2 + (a_4 + \Delta a_4) p + (a_5 + \Delta a_5)] \Delta\delta_{12} = 0 \quad (6)$$

调节系统的特征方程式为：

$$a_0 p^5 + (a_1 + \Delta a_1) p^4 + (a_2 + \Delta a_2) p^3 + (a_3 + \Delta a_3) p^2 + (a_4 + \Delta a_4) p + (a_5 + \Delta a_5) = 0 \quad (7)$$

当比例部分按照电压电流的偏差调节, 其它部分按发电机电压频率偏差及其微分调节时, K_{0H} 为 K_{0I} 和 K_{0U} ; K_{1H} 为 K_{1I} ; K_{2H} 为 K_{2I} ; ΔH_0 为 ΔU 和 ΔI ; $\Delta H_1 = \Delta f_{U_r}$; $\Delta H_2 = \Delta f_{U_r}$, 则

$$\begin{aligned} -P'_{B_d} W(p) \Delta H &= K_{0I} \Delta I + K_{0U} \Delta U + K_{1I} \Delta f_U + K_{2I} p \Delta f_U \\ &= [K_{0I} (C'_{IU} p^2 + C''_{IU}) + K_{0U} (C'_{UV} p^2 + C''_{UV}) + (C'_{IU} p^2 + C''_{IU}) (K_{1I} p + K_{2I} p^2)] \Delta \delta_{12} \end{aligned}$$

式中 $\Delta a_1 = K_{2I} C'_{IU}$;

$$\Delta a_2 = K_{1I} C'_{IU};$$

$$\Delta a_3 = K_{0I} C'_{IU} + K_{0U} C'_{UV} + K_{2I} C''_{IU} = K_{0I} C'_0 + K_{2I} C''_{IU};$$

$$\Delta a_4 = K_{1I} C''_{IU};$$

$$\Delta a_5 = K_{0I} C''_{IU} + K_{0U} C''_{UV} = K_{0I} C''_0.$$

系统在某一运行方程式下, 特征方程式的系数 $a_0, \dots, a_5$ 都是常数, 而放大系数 K_{0I} , K_{0U} , K_{1I} 和 K_{2I} 则是待整定的数值。在实际运行中, 根据维持发电机或高压母线电压稳态值接近于恒定值的要求, 且保持特征方程式常数项大于零的条件, 首先给定 K_{0I} 和 K_{0U} 的数值。然后可用 D 划分法, 求出在各种运行方式下, 保证系统稳定的 K_{1I} 和 K_{2I} 变化区域。 K_{1I} 和 K_{2I} 的表示式为:

当 $T_{p1} = T_{p2} = 0$ 时,

$$K_{1I} = -\frac{R_2(\omega)}{N_2(\omega)}, \quad K_{2I} = -\frac{R_1(\omega)}{Q_1(\omega)}. \quad (8)$$

当 $T_{p1} \neq 0$, $T_{p2} \neq 0$ 时,

$$\left. \begin{aligned} K_{1I} &= -\frac{R_2(\omega)}{N_2(\omega)} \cdot \frac{(1 + \omega^2 T_{p1}^2) \left[1 + \frac{R_1(\omega)}{R_2(\omega)} \omega T_{p2} \right]}{1 + \omega^2 T_{p1} T_{p2}}, \\ K_{2I} &= -\frac{R_1(\omega)}{Q_1(\omega)} \cdot \frac{(1 + \omega^2 T_{p2}^2) \left[1 - \frac{R_2(\omega)}{R_1(\omega)} \omega T_{p1} \right]}{1 + \omega^2 T_{p1} T_{p2}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 $R_1(\omega) = a_0 \omega^5 - a_2 \omega^3 + a_4 \omega$;

$$N_2(\omega) = \omega (-C'_{IU} \omega^2 + C''_{IU});$$

$$R_2(\omega) = a_1 \omega^4 - (a_3 + K_{0I} C') \omega^2 + a_5 + K_{0I} C'';$$

$$Q_1(\omega) = -\omega^2 (C'_{UV} \omega^2 + C''_{UV}).$$

二、受端为有限大容量的系统时, 假定受端等值发电机没有自动调节励磁装置, 且等值发电机为隐极机。可以写出微振荡方程式组, 联解可得:

$$\begin{aligned} (a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5) \Delta \delta_{12} \\ = -(M_2 P'_{1B_d} - M_1 P'_{2B_d}) P'_{1B_d} W(p) \Delta H \end{aligned} \quad (10)$$

$$W(p) \Delta H = \left(K_{0H} + \frac{K_{1H} p}{1 + T_{p1} p} + \frac{K_{2H} p^2}{1 + T_{p2} p} \right) \Delta H \quad (11)$$

或当忽略, T_{p1} , T_{p2} 时

$$W(p)\Delta\Pi=(K_{0H}+K_{1H}p+K_{2H}p^2)\Delta\Pi \quad (12)$$

式中

$$\begin{aligned} a_0 &= P'_{1B_d} T_d T_e T_p M_1 M_2; \\ a_1 &= P'_{1B_d} T_e T_p M_1 M_2 + T'_d (T_e + T_p) M_1 M_2; \\ a_2 &= T_e T_p T_{d0} [M_1 (P'_{2B_d} S_{B_{d1}} - P'_{2B_d} S'_{B_{d1}} - P'_{1B_d} S_{B_{d2}}) \\ &\quad + P'_{1B_d} S_{B_{d1}} M_2] (T_e + T_p) M_1 M_2 P'_{1B_d} + P'_{1B_d} T_{d0} M_1 M_2; \\ a_3 &= T_e T_p (M_2 S_{B_{d1}} - M_1 S_{B_{d2}}) P'_{1B_d} + (T_e + T_p) T_{d0} [M_1 (P'_{2B_d} S_{B_{d1}} \\ &\quad - P'_{2B_d} S'_{B_{d1}} - P'_{1B_d} S_{B_{d2}}) + P'_{1B_d} S_{B_{d1}} M_2] + P'_{1B_d} M_1 M_2; \\ a_4 &= (T_e + T_p) (M_2 S_{B_{d1}} - M_1 S_{B_{d2}}) P'_{1B_d} + T_{d0} [M_1 (P'_{2B_d} S_{B_{d1}} - P'_{2B_d} S'_{B_{d1}} \\ &\quad - P'_{1B_d} S_{B_{d2}}) + P'_{1B_d} S_{B_{d1}} M_2]; \\ a_5 &= (M_2 S_{B_{d1}} - M_1 S_{B_{d2}}) P'_{1B_d}; \end{aligned}$$

δ_{12} ——送端电厂等值机组的电势与受端等值机组电势间的相角，度；
 M_2 ——受端等值电厂的惯性常数；
 P_{1B_d} , $P_{1B'_d}$ ——送端电厂用空载电势和暂态电势表示的功率方程式；
 P_{2B_d} ——受端等值电厂用空载电势表示的功率方程式。

$$P'_{1B_d} = - \frac{\partial P_{1B_d}}{\partial E_{d1}} \bigg|_{\delta_{12}=\text{常数}};$$

$$P'_{1B'_d} = - \frac{\partial P_{1B'_d}}{\partial E'_d} \bigg|_{\delta_{12}=\text{常数}};$$

$$P'_{2B_d} = - \frac{\partial P_{2B_d}}{\partial E_{d2}} \bigg|_{\delta_{12}=\text{常数}};$$

$$S_{B_{d1}} = - \frac{\partial P_{1B_d}}{\partial \delta_{12}} \bigg|_{E_{d1}=\text{常数}, E_{d2}=\text{常数}};$$

$$S_{B'_{d1}} = - \frac{\partial P_{1B'_d}}{\partial \delta_{12}} \bigg|_{E'_{d1}=\text{常数}, E_{d2}=\text{常数}};$$

$$S_{B_{d2}} = - \frac{\partial P_{2B_d}}{\partial \delta_{12}} \bigg|_{E_{d1}=\text{常数}, E_{d2}=\text{常数}}.$$

1. 如果取 ΔI 、 ΔU 等作为调节参数，它们也可以写成 $\Delta \delta_{12}$ 的函数。方程式 (10) 的右边为如下的形式：

$$-(M_2 P'_{1B_d} - M_1 P'_{2B_d}) P'_{1B'_d} W(p) \Delta \Pi = W(p) (C'_{1H} p^2 + C''_{1H}) \Delta \delta_{12}$$

C'_{1H} 和 C''_{1H} 的表示式列在表 2 中。

当按发电机电势或电压的频率偏差调节时，也可以把调节参数表示为相对角偏差 $\Delta \delta_{12}$ 的函数。

2. 当按发电机电压 U_F 的频率调节时, 可以求出 Δf_U 的表示式^①:

表 2

C_{II}	$\Delta \delta_{12}$	ΔI	$-\Delta U$
C'_{II}	0	$-M_1 M_2 P'_{1E_d} I'_{E_d}$	$\frac{P'_{1E_d} P'_{1E_{d1}} M_1 M_2}{P'_{1U}}$
C''_{II}	$-(M_2 P'_{E_{d1}} - M_1 P'_{2E_d}) P'_{1E_d}$	$-P_{1E_d} I'_{E_{d1}} (M_2 S_{E_{d1}} - M_1 S_{E_{d2}}) + P'_{1E_d} (M_2 P'_{1E_d} - M_1 P'_{2E_d}) I'_{E_d}$	$\frac{1}{P'_{1U}} [P'_{1E_{d1}} P'_{1E_d} (M_2 S_{E_{d1}} - M_1 S_{E_{d2}}) + (S_U - S_{E_{d1}}) P'_{1E_{d1}} (M_2 P'_{2E_d} - M_1 P'_{2E_d})]$

$$\Delta f_U = p \Delta \delta_{UF} = \frac{p D_1(p)}{D(p)} \Delta \delta_{12}$$

$$D(p) = [(P''_{1UF} S_{2UF} - P'_{2UF} S_{1UF})(M_1 P'_{2E_d} - M_2 P'_{1E_d})] p^3$$

$$D_1(p) = -M_1 M_2 (P'_{2E_d} P''_{1UF} - P'_{1E_d} P'_{2UF} + P'_{2UF} P'_{1UF}) p^4$$

$$- [M_1 P'_{2E_d} (S_{2UF} P''_{1UF} - S_{E_{d1}} P'_{2UF}) + M_1 S_{E_{d2}} (P'_{1E_d} P'_{2UF} - P'_{1UF} P'_{2UF}) + M_2 P''_{1UF} (S_{E_{d1}} P'_{2E_d} - S_{E_{d2}} P'_{1E_d}) + M_2 P'_{2UF} (S_{E_{d1}} P'_{1UF} - S_{1UF} P'_{1E_d})] p^3 - (S_{2UF} P'_{1UF} - S_{1UF} P'_{2UF})(P'_{2E_d} S_{E_{d1}} - P'_{1E_d} S_{E_{d2}})$$

$$\Delta f_U = \frac{\Delta_4 p^4 + \Delta_2 p^2 + \Delta_0}{[(P''_{1UF} S_{2UF} - P'_{2UF} S_{1UF})(M_2 P'_{1E_d} - M_1 P'_{2E_d})] p} \Delta \delta_{12}$$

$$= (\Delta_4 p^2 + p \Delta_2 + \frac{\Delta_0}{p}) \Delta \delta_{12} \quad (13)$$

式中 $\Delta_4 = \frac{M_1 M_2 (P'_{2E_d} P''_{1UF} - P'_{1E_d} P'_{2UF} + P'_{2UF} P'_{1UF})}{(P''_{1UF} S_{2UF} - P'_{2UF} S_{1UF})(M_1 P'_{2E_d} - M_2 P'_{1E_d})}$

$$\Delta_2 = \frac{M_1 P'_{2E_d} (S_{2UF} P''_{1UF} - S_{E_{d1}} P'_{2UF}) + M_1 S_{E_{d2}} (P'_{1E_d} P'_{2UF} - P'_{1UF} P'_{2UF})}{(P''_{1UF} S_{2UF} - P'_{2UF} S_{1UF})}$$

$$+ \frac{M_2 P''_{1UF} (S_{E_{d1}} P'_{2E_d} - S_{E_{d2}} P'_{1E_d}) + M_2 P'_{2UF} (S_{E_{d1}} P'_{1UF} - S_{1UF} P'_{1E_d})}{(M_1 P'_{2E_d} - M_2 P'_{1E_d})}$$

$$\Delta_0 = \frac{(S_{2UF} P''_{1UF} - S_{1UF} P'_{2UF})(P'_{2E_d} S_{E_{d1}} - P'_{1E_d} S_{E_{d2}})}{(P''_{1UF} S_{2UF} - P'_{2UF} S_{1UF})(M_1 P'_{2E_d} - M_2 P'_{1E_d})}$$

方程式 (8) 的右边可以写成,

① 見附录 2

$$-(M_2 P'_{1B_d} - M_1 P'_{2B_d}) P'_{B_d} W(p) \Delta\pi = -W(p) \left(C'_{fv} p^3 + C''_{fv} p + \frac{C''_{fv}}{p} \right) \Delta\delta_{12} \quad (14)$$

$$C'_{fv} = \frac{M_1 M_2 (P'_{2B_d} P''_{1v_f} - P'_{1B_d} P'_{2v_f} + P'_{2v_f} P'_{1v_f}) P'_{1B_d}}{P''_{1v_f} S_{2v_f} - P'_{2v_f} S_{1v_f}}$$

$$C''_{fv} = \frac{P'_{1B_d} [M_1 P'_{2B_d} (S_{2v_f} P'_{1v_f} - S_{B_d1} P'_{2v_f}) + M_1 S_{B_d2} (P'_{1B_d} P'_{2v_f} - P'_{1v_f} P'_{2B_d})]}{P''_{1v_f} S_{2v_f}}$$

$$+ \frac{M_2 P''_{1v_f} (S_{B_d1} P'_{2B_d} - S_{B_d2} P'_{1B_d}) + M_2 P'_{2v_f} (S_{B_d1} P'_{1v_f} - S_{1v_f} P'_{1B_d})}{-P'_{2v_f} S_{1v_f}}$$

$$C''_{fv} = \frac{P'_{1B_d} (P'_{2B_d} S_{B_d1} - P'_{1B_d} S_{B_d2})}{P''_{1v_f} S_{2v_f} - P'_{2v_f} S_{1v_f}}$$

和上述一样，比例部分仍按电流和电压调节，忽略 T_{p1} 和 T_{p2} 时，根据公式(10)，调节系统的特征方程式为：

$$a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5 + K_0 (C'_0 p^3 + C''_0)$$

$$+ K_{1f} \left(C'_{fv} p^3 + C''_{fv} p + \frac{C''_{fv}}{p} \right)$$

$$+ K_{2f} p \left(C'_{fv} p^3 + C''_{fv} p + \frac{C''_{fv}}{p} \right) = 0 \quad (15)$$

$$\text{或 } a_0 p^5 + (a_1 + \Delta a_1) p^4 + (a_2 + \Delta a_2) p^3 + (a_3 + \Delta a_3) p^2 + (a_4 + \Delta a_4) p^2$$

$$+ (a_5 + \Delta a_5) p + \Delta a_6 = 0 \quad (16)$$

式中： $\Delta a_1 = K_{2f} C'_{fv}$;

$$\Delta a_2 = K_{1f} C'_{fv};$$

$$\Delta a_3 = K_0 C'_0 + K_{2f} C''_{fv};$$

$$\Delta a_4 = K_{1f} C''_{fv};$$

$$\Delta a_5 = K_0 C''_0 + K_{2f} C''_{fv};$$

$$\Delta a_6 = K_{1f} C''_{fv};$$

其中： $K_0 C'_0 = K_{0f} C'_{fv} + K_{0v} C'_{fv}$;

$$K_0 C''_0 = K_{0f} C''_{fv} + K_{0v} C''_{fv}.$$

在特征方程式(16)中，有四个待整定的放大系数 K_{0f} 、 K_{0v} 、 K_{1f} 和 K_{2f} 。根据维持发电机电压近于恒定的要求， K_{0f} 和 K_{0v} 为给定值。因此，应用D划分法求出系统稳定的 K_{1f} 、 K_{2f} 变化区域。

K_{1f} 和 K_{2f} 的表示式为：

当 $T_{p1} = T_{p2} = 0$ 时，

$$K_{1f} = -\frac{R_1(\omega)}{N_1(\omega)}, \quad K_{2f} = \frac{R_2(\omega)}{Q_2(\omega)}. \quad (17)$$

当 $T_{p1} \neq 0$, $T_{p2} \neq 0$ 时:

$$K_{1f} = -\frac{R_1(\omega)}{N_1(\omega)} Y(\omega), \quad K_{2f} = -\frac{R_2(\omega)}{Q_2(\omega)} Z(\omega) \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{式中 } R_1(\omega) &= a_0 \omega^5 - a_2 \omega^4 + a_4 \omega^3; \\ N_1(\omega) &= Q_1(\omega) = C'_{fE} \omega^4 - C''_{fE} \omega^3 + C'_{fE} \omega; \\ R_2(\omega) &= a_1 \omega^4 - (a_3 + K_0 C'_0) \omega^3 + a_5 + K_0 C''_0; \\ Y(\omega) &= \frac{(1 + \omega^2 T_{p1}^2) \left[1 - \frac{R_2(\omega)}{R_1(\omega)} \omega T_{p2} \right]}{1 + \omega^2 T_{p1} T_{p2}}; \\ Z(\omega) &= \frac{(1 + \omega^2 T_{p2}^2) \left[1 + \frac{R_1(\omega)}{R_2(\omega)} \omega T_{p1} \right]}{1 + \omega^2 T_{p1} T_{p2}}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

3. 当按发电机电势 E_{d1} 的频率偏差调节时,

$$\Delta f_E = p \Delta \delta_1 = \left(C_{1f} p + \frac{C_{2f}}{p} \right) \Delta \delta_{12} \text{ ①,}$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } C_{1f} &= \frac{P'_{1E_d} M_2}{P'_{1E_d} M_2 - P'_{2E_d} M_1}, \\ C_{2f} &= \frac{P'_{2E_d} S_{E_{d1}} - P'_{1E_d} S_{E_{d2}}}{P'_{1E_d} M_2 - P'_{2E_d} M_1}. \end{aligned}$$

方程式 (10) 的右边可以写成:

$$\begin{aligned} & - (M_2 P'_{1E_d} - M_1 P'_{2E_d}) P'_{1E_d} W(p) \Delta \Pi \\ & = -W(p) \left[P'_{1E_d} P'_{1E_d} M_2 p + \frac{P'_{1E_d} (P'_{2E_d} S_{E_{d1}} - P'_{1E_d} S_{E_{d2}})}{p} \right] \Delta \delta_{12} \\ & = -W(p) \left(C'_{fE} p + \frac{C''_{fE}}{p} \right) \Delta \delta_{12} \quad (20) \end{aligned}$$

$$\text{式中 } C'_{fE} = P'_{1E_d} P'_{1E_d} M_2; \quad C''_{fE} = P'_{1E_d} (P'_{2E_d} S_{E_{d1}} - P'_{1E_d} S_{E_{d2}}) M_2.$$

系统的特征方程式为(考虑 T_{p1} , T_{p2}):

$$\begin{aligned} & a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5 \\ & = - \left\{ K_0 (C'_0 p^2 + C''_0) + \frac{K_{1f}}{1 + T_{p1} p} \left(C'_{fE} p + \frac{C''_{fE}}{p} \right) \right. \\ & \quad \left. + \frac{K_{2f}}{1 + T_{p2} p} \left(C'_{fE} p + \frac{C''_{fE}}{p} \right) \right\} \quad (21) \end{aligned}$$

$$K_{1f} = \frac{R_1(\omega)}{N_2(\omega)} Y(\omega), \quad K_{2f} = \frac{R_2(\omega)}{Q_2(\omega)} Z(\omega) \quad (22)$$

式中 $N_2(\omega) = Q_2(\omega) = C'_{fE} \omega^2 - C''_{fE}$

$R_1(\omega)$ 、 $R_2(\omega)$ 和 $Z(\omega)$ 、 $Y(\omega)$ 均见 (19) 式。

① 见附录 2。

三、某系統按頻率調節勵磁時的靜態穩定計算。

S 电厂四台机組，送出有功功率 240 兆瓦，其中地方負荷 20 兆瓦， M 地区从系統吸收有功功率 45 兆瓦。

受端系統 A 变电所高压母綫电压維持为 200 千伏， M 变电所高压母綫电压为 205 千伏。

計算中不考虑电机磁路饱和，而計及电机凸极效应、綫路电阻和充电电容。負荷用恒定阻抗代替。基准功率 $S_0 = 100$ 兆伏安，基准电压 $U_0 = 220$ 千伏。

S 电厂发电机参数为： $P_n = 72.5$ 兆瓦， $\cos \varphi_n = 0.85$ ， $U_n = 13.8$ 千伏， $X_d = 0.923$ ， $X'_d = 0.305$ ， $X''_d = 0.204$ ， $X_q = 0.589$ ， $X'_q = 0.209$ ， $T_{d0} = 3.47$ 秒， $M_1 = 9.3$ 秒（每台机）。

輸电綫参数，额定电压 220 千伏，全长 330 公里， $X_0 = 0.4$ 欧/公里， $C_0 = 0.012$ 微法/公里。受端等值发电机的参数为： $M_2 = 58.4$ 秒。

1. 受端系統作为无穷大电源时，令 A 变电所高压母綫电压維持为恒定值 200 千伏，或 0.91； M 变电所高压母綫电压为 205 千伏或 1.025。此时，系統等值电路如图 2 所示。

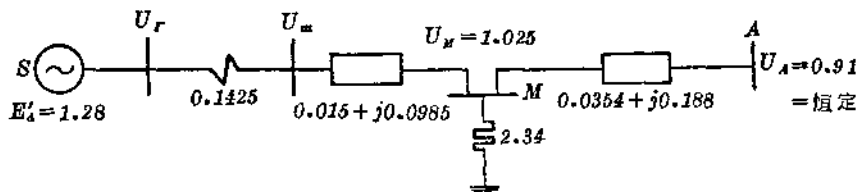


图 2 受端作为无穷大电源时的等值电路

S 电厂輸送功率为 240 兆瓦、綫路功率为 220 兆瓦时， S 电厂发电机的空载电势与 U_A 的夹角 $\delta_{1,0} = 41.0^\circ$ ，此时发电机空载电势 $E_d = 1.56$ ；暂态电抗后电势 $E'_d = 1.28$ ；高压母綫电压 $U_m = 1.125$ 。

比例部分按高压母綫电压偏差 (ΔU_m) 及綫电流偏差 (ΔI) 調節。这样，按电压偏差比例調節部分的放大系数，可以取得較小，而电压降落按电流偏差調節加以补偿，使保証电压稳态值在不大的范围内变化。令 $K_{0v} = 30$ ， $K_{0I} = 0.9$ ，这样，发电机从空載到滿載时， U_r 的偏差不大于额定电压的 3%。

系統运行稳定极限角 $\delta_{1,PP}$ 决定于特征方程式的常数项。当不計 T_{P1} 和 T_{P2} 时，常数项 $a_0 + \Delta a_0 = 0$ ， $\delta_{1,PP} = 120^\circ$ ；如果計及 T_{P1} 和 T_{P2} ，特征方程式为七阶，其常数项为 $a_7 + \Delta a_7 = a_0 + \Delta a_0$ 。所以由 $a_7 + \Delta a_7 = 0$ 的条件所决定的极限角仍为 $\delta_{1,PP} = 120^\circ$ 。

图 3 表示用 D 划分法按 (9) 式作出的 K_{1r} 和 K_{2r} 区域图。励磁机磁場的时间常数 $T_c = 0.3''$ ， $T_P = 0.02''$ ，調節器的时间常数 $T_{P1} = 0.02''$ ， $T_{P2} = 0.04''$ 。图中 $\delta_{1,0} = 41^\circ$ 。相当于原始运行方式； $\delta_{1,0} = 117.1^\circ$ 相当于綫路角 (U_m 与 U_A 的夹角) 为 90° 时的运行方式。

图 4、图 5 分別作出了按角度 $\delta_{1,0}$ 調節和按綫电流 ΔI 調節时的稳定区域图。比較图 3、图 4 和图 5 可見，按发电机頻率調節时与按角度 $\delta_{1,0}$ 調節的效果基本上相同。

2. 受端系統作为有限容量电源时，系統等值电路如图 6 所示。

正常情况下， S 电厂送出功率仍为 240 兆瓦，綫路功率为 220 兆瓦。 A 变电所高压母綫电压 $U_A = 0.91$ ， M 变电所高压母綫电压 $U_M = 1.025$ ， S 电厂高压母綫电压 $U_m = 1.125$ 。此

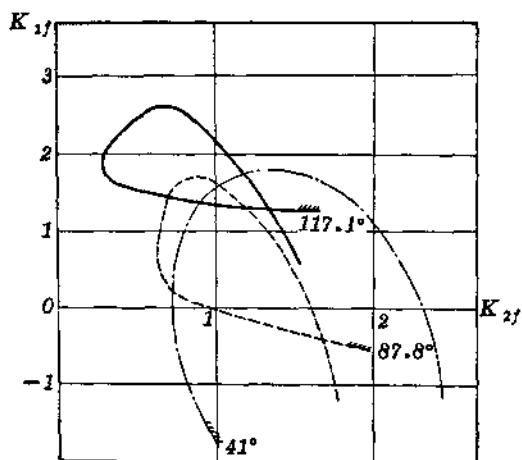


图 3 按 ΔU 、 ΔI 、 Δf_U 、 $p\Delta f_U$ 调节时
各种运行情况下的稳定区
 $T_e=0.3''$, $T_{p1}=0.02''$, $T_{p2}=0.04''$ 受端为
无穷大容量系统

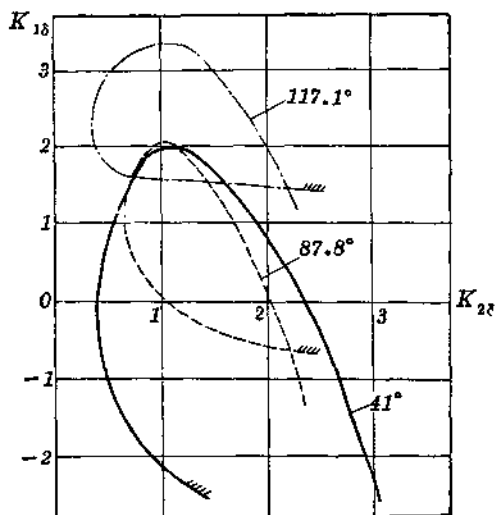


图 4 按 ΔU 、 ΔI 、 $p\Delta\delta$ 、 $p^2\Delta\delta$ 调节时各
种运行情况下的稳定区
 $T_e=0.3''$, $T_{p1}=0.02''$, $T_{p2}=0.04''$ 受端为
无穷大容量系统

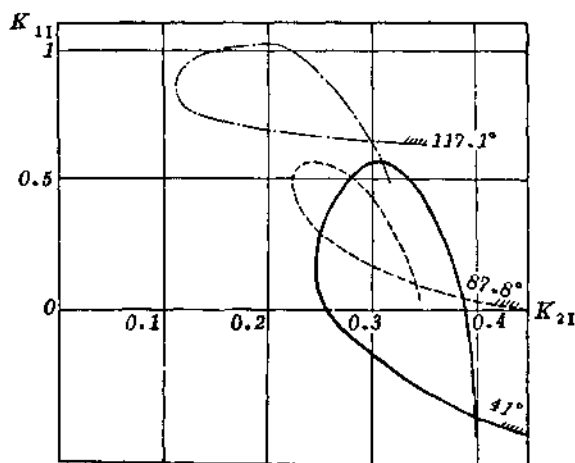


图 5 按 ΔU 、 ΔI 、 $p\Delta U$ 、 $p\Delta I$ 、 $p^2\Delta I$ 调节时各种运行情况下的稳定区
 $T_{p1}=0.02''$, $T_{p2}=0.04''$, $T_e=0.3''$ 受端为无穷大容量系统

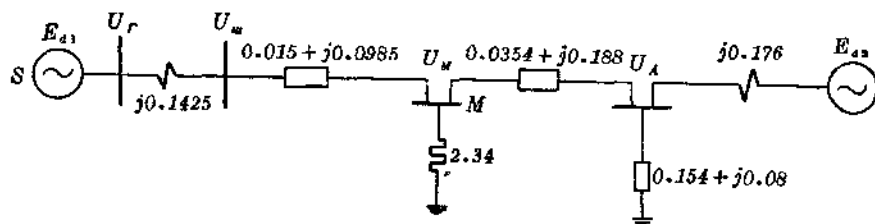


图 6 受端系统为有限容量电源时的等值电路

时, S 电厂发电机空载电势 $E_{a1}=1.56$, 暂态电势 $E'_d=1.28$, 受端系统等值电机的空载电势 $E_{a2}=1.425$ 。这时, E_{a1} 与 E_{a2} 间夹角 $\delta_{120}=21.4^\circ$ 。

调节器比例部分的放大系数仍为 $K_{0f}=0.9$, $K_{0U}=30$ 。

当按频率偏差及其一次微分调节时, 由特征方程式 (16) 和 (21) 可知, 方程式的系数均为正值, 因此稳定极限角不由特征方程式的系数决定。

当调节器的微分部分按其它参数 ($\Delta\delta$, ΔI , ΔU) 调节时, 不难证明, 稳定极限角决定于特征方程式的常数项 $a_5 + \Delta a_5 = 0$ ($T_{p1}=0$, $T_{p2}=0$) 或 $a_7 + \Delta a_7 = 0$ ($T_{p1} \neq 0$, $T_{p2} \neq 0$)。在给定的 $K_0=30$ 和 $K_{0f}=0.9$ 的情况下, 稳定极限角为 $\delta_{12HP}=105^\circ$ 。

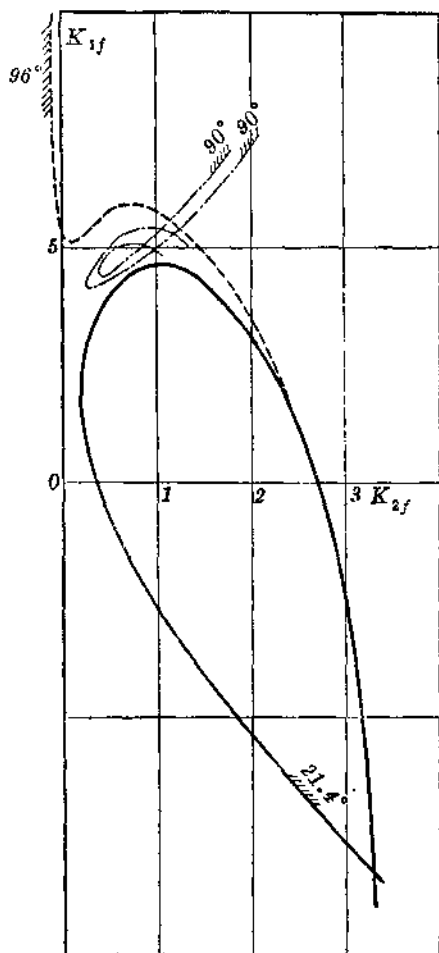


图 7 按 ΔU 、 ΔI 、 Δf_U 、 $p\Delta f_U$ 调节时的稳定区
 $T_{p1}=0.02''$, $T_{p2}=0.04''$, $T_e=0.3''$; 受端为有限容量系统; 虚线——表示在 Δ 变电所母线电压保持恒定时按同样调节方式的稳定区 ($\delta_{12}=90^\circ$)

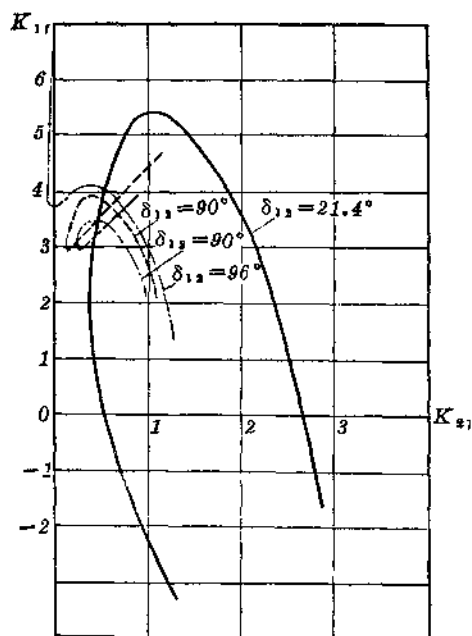


图 8 按 ΔU 、 ΔI 、 Δf_E 、 $p\Delta f_E$ 调节时各种运行情况下的稳定区
 $T_{p1}=0.02''$, $T_{p2}=0.04''$, $T_e=0.3''$; 受端为有限容量系统; 虚线——为 U_A 恒定时 $\delta_{12}=90^\circ$ 时的稳定区

图 7、图 8 作出按发电机电压及发电机电势的频率偏差及其一次微分调节时 K_{1f} 和 K_{2f} 的稳定区。图 9、图 10 作出按 ΔI 、 $\Delta\delta$ 调节时的稳定区, 励磁机励磁绕组的时间常数 $T_e=0.3''$, $T_p=0.02''$, 调节器时间常数为 $T_{p1}=0.02''$, $T_{p2}=0.04''$ 。图中 $\delta=21.4$ 为系

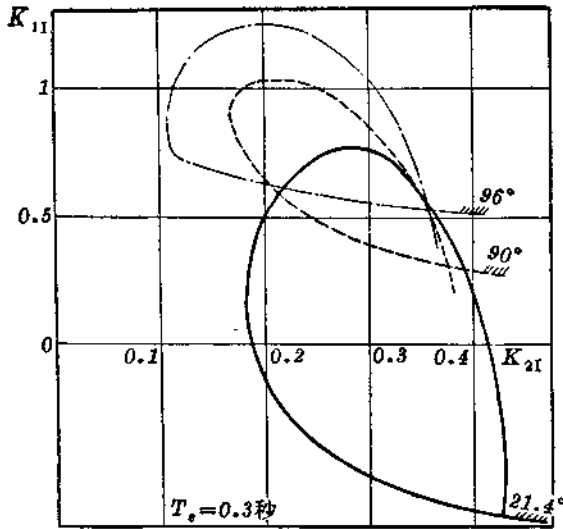


图 9 按 ΔU 、 ΔI 、 $p\Delta U$ 、 $p\Delta I$ 、 $p^2\Delta I$ 调节时各种运行情况下的稳定区
 $T_{p1}=0.02''$, $T_{p2}=0.04''$, $T_e=0.3''$
 受端为有限容量系统

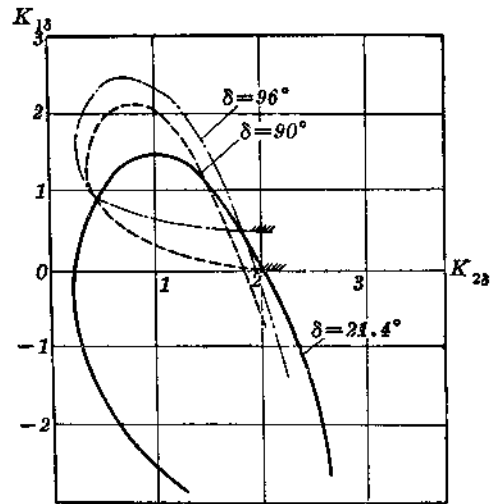


图 10 按 ΔU 、 ΔI 、 $p\Delta\delta$ 、 $p^2\Delta\delta$ 调节时各种运行情况下的稳定区
 $T_e=0.3''$, $T_{p1}=0.02''$, $T_{p2}=0.04''$
 受端为有限容量系统

统原始运行方式。可见，当按频率偏差及其微分调节时，在运行角 $\delta_{12}=90^\circ$ 附近，稳定区已经很小。当 $\delta_{12}=96^\circ$ 时，已无稳定区；而按其它参数调节时，从原始运行方式到极限运行方式，都有足够大的稳定区。

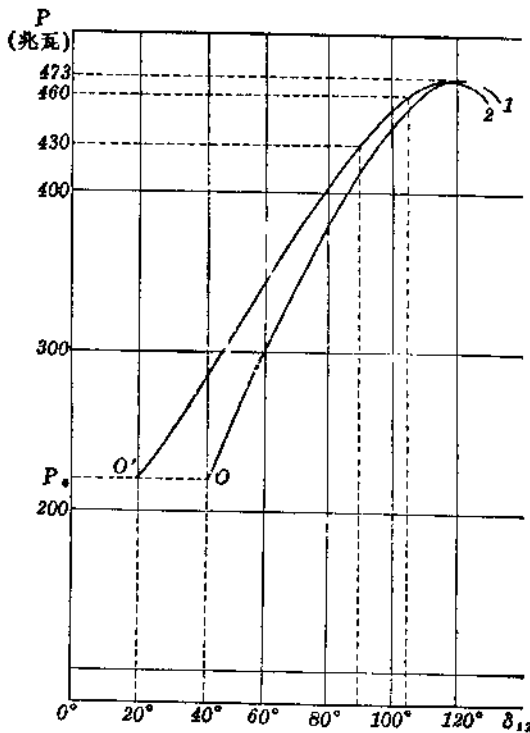


图 11 功率特性曲线
 1—受端为无穷大系统；2—受端为有限容量系统 ($U_A=0.91$)

四、结论

1. 强力调节器的微分部分按频率偏差及其一次微分调节，在调节器的运行上有较大的方便性、灵活性和可靠性。特别是当电厂出线较多或有方向不同的出线时，这种调节方式可以克服获得信号的困难，而调节器的工作，也不会受到电厂内机组切换的影响。

2. 当受端系统为无穷大电源时，按频率偏差调节实际上就是按相对角的微分调节。静态稳定极限可以达到线路功率极限。

3. 当受端系统为有限大容量时，按发电机电势或端电压偏差及其微分调节时，根据分析可知，在运行角 $\delta_{12}=90^\circ$ 附近，已达到静态稳定极限，因此稳定极限功率也相应地降低。

4. 由图11的功率曲线可见，当受端为无穷大电源时，稳定极限功率为 473 兆

瓦；当受端为有限容量电源时，按频率偏差及其微分调节时的稳定极限功率（相当于 $\delta_{12} = 90^\circ$ ）约在430兆瓦左右。如果按其它参数调节（ $\Delta\delta$, ΔI ），则极限功率（相当于 $\delta_{12} = 105^\circ$ ）为460兆瓦。

5. 在受端系统为有限容量的情况下，按频率偏差及其微分调节励磁时稳定极限降低的原因，可以粗略地认为，（14）式和（20）式中出现了按相对角 $\Delta\delta_{12}$ 积分调节的各项的缘故。这种按相对角积分调节的效果是在系统的微振荡过程中，产生了负的阻尼作用，使系统总的阻尼转矩降低。

附录 1

受端为无穷大容量的电源时，发电机电压 U_r 的频率偏差与 $\Delta\delta_{12}$ 的关系。

频率偏差是指系统中某一点电压矢量对同步参考矢量相角偏移的一次微分。当受端为无穷大电源时，受端系统恒定电压 U

（图12）的矢量也就是同步参考矢量。因此，发电机电势或端电压的频率偏差，也就是相对角 $\Delta\delta_{12}$ 和 $\Delta\delta_{v_r}$ 的一次时间导数。

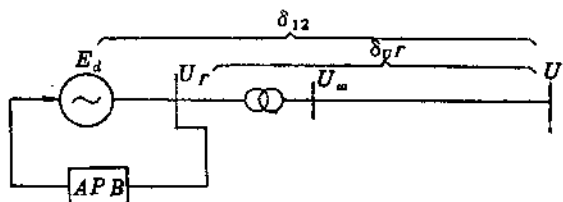


图 12

送端电厂的功率可以表示为下列三种形式：

$$1) P = P_1(E_d, U, \delta_{12}), \quad (23)$$

$$2) P = P_2(E_d, U_r, \delta_{12} - \delta_{v_r}), \quad (24)$$

$$3) P = P_3(U_r, U, \delta_{12}). \quad (25)$$

发电机转子运动方程式：

$$M_1 p^2 \Delta\delta_{12} = -\Delta P, \quad (26)$$

$$\text{由 (23) 式, } \Delta P = P'_{1E_d} \Delta E_d + S_{E_d} \Delta\delta_{12}. \quad (27)$$

$$\text{由 (24) 式, } \Delta P = P'_{2E_d} \Delta E_d + P'_{2v_r} \Delta U_r + S_2 (\Delta\delta_{12} - \Delta\delta_{v_r}), \quad (28)$$

$$\text{由 (25) 式, } \Delta P = P'_{3v_r} \Delta U_r + S_3 \Delta\delta_{12} \quad (29)$$

式中

$$P'_{1E_d} = \left. \frac{\partial P_1}{\partial E_d} \right|_{\delta_{12}=\text{常数}}, \quad S_{E_d} = \left. \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{12}} \right|_{E_d=\text{常数}},$$

$$P'_{2E_d} = \left. \frac{\partial P_2}{\partial E_d} \right|_{\substack{\delta_{12}-\delta_{v_r}=\text{常数} \\ U_r=\text{常数}}}, \quad P'_{2v_r} = \left. \frac{\partial P_2}{\partial U_r} \right|_{\substack{E_d=\text{常数} \\ \delta_{12}-\delta_{v_r}=\text{常数}}},$$

$$S_2 = \left. \frac{\partial P_2}{\partial (\delta_{12} - \delta_{v_r})} \right|_{\substack{E_d=\text{常数} \\ U_r=\text{常数}}}, \quad P'_{3v_r} = \left. \frac{\partial P_3}{\partial U_r} \right|_{\delta_{12}=\text{常数}},$$

$$S_3 = \left. \frac{\partial P_3}{\partial \delta_{12}} \right|_{U_r=\text{常数}}.$$

联解（26）、（27）、（28）、（29）四式得到：