

## 内 容 提 要

本书较全面地介绍了国产10~30万kW(QFQS-200-2、QFSS-200-2、SQF-100-2、QFS-125-2、QFS-300-2型等)汽轮发电机的结构、原理、励磁系统及其有关运行问题。全书分上、下册,共四篇,21章。上册有第一篇、第二篇,介绍大功率汽轮发电机的结构、原理及特性。下册有第三篇及第四篇,第三篇较全面地介绍了国产10~30万kW汽轮发电机采用的同轴交流励磁机它励静止半导体励磁系统及自动调节励磁装置,第四篇深入地叙述了汽轮发电机的振动,轴电流、磁化及退磁;定子绕组防电晕及防电腐蚀;不对称运行;进相运行;失磁后的异步运行等有关运行问题。

本书主要供在单机容量为10~30万kW的火力发电厂中从事电气专业检修、运行、调试的工人和技术人员阅读,也适用于在其它部门从事这方面工作的工程技术人员及有关院校师生参考。

## 大功率汽轮发电机及其运行

### 下 册

西安电力学校 张道纲 曹广恩 朱松健

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 23.75印张 539千字 1插页

1986年12月第一版 1986年12月北京第一次印刷

印数0001—2990册 定价4.90元

书号 15143·6151

# 目 录

## 第三篇 励磁系统

|      |                           |     |
|------|---------------------------|-----|
| 第十一章 | 励磁系统的作用 .....             | 1   |
| 第一节  | 概述 .....                  | 1   |
| 第二节  | 发电机正常运行时励磁电流的调整 .....     | 2   |
| 第三节  | 并列运行各发电机间无功功率的合理分配 .....  | 4   |
| 第四节  | 自动调节励磁对系统动态稳定的影响 .....    | 8   |
| 第五节  | 自动调节励磁对系统暂态稳定的影响 .....    | 14  |
| 第六节  | 励磁系统在大信号下的动态性能准则 .....    | 19  |
| 第七节  | 发电机的灭磁 .....              | 23  |
| 第十二章 | 励磁系统分类及各类励磁系统简介 .....     | 33  |
| 第一节  | 励磁系统发展概况 .....            | 33  |
| 第二节  | 励磁系统分类 .....              | 35  |
| 第三节  | 它励式励磁系统 .....             | 36  |
| 第四节  | 自励式励磁系统 .....             | 44  |
| 第五节  | 混合式励磁系统 .....             | 48  |
| 第十三章 | 同轴交流励磁机它励静止硅整流励磁系统 .....  | 50  |
| 第一节  | 概述 .....                  | 50  |
| 第二节  | 交流励磁机 .....               | 54  |
| 第三节  | 感应子发电机 .....              | 61  |
| 第四节  | 永磁发电机 .....               | 67  |
| 第五节  | 自动灭磁开关 .....              | 73  |
| 第六节  | 感应调压器 .....               | 77  |
| 第七节  | 励磁系统中常用的半导体整流电路 .....     | 80  |
| 第八节  | 硅整流装置的保护及发电机转子过电压问题 ..... | 97  |
| 第十四章 | 自动调节励磁装置 .....            | 106 |
| 第一节  | 概述 .....                  | 106 |
| 第二节  | 电压测量比较单元 .....            | 113 |
| 第三节  | 调差单元 .....                | 124 |
| 第四节  | 综合放大单元 .....              | 128 |
| 第五节  | 移相触发单元 .....              | 161 |
| 第六节  | 稳压单元 .....                | 201 |
| 第七节  | 自励恒压单元 .....              | 215 |

|      |                                                     |     |
|------|-----------------------------------------------------|-----|
| 第十五章 | 同轴交流励磁机它励静止半导体励磁系统实例 .....                          | 224 |
| 第一节  | QFQS-200-2型汽轮发电机半导体励磁系统 .....                       | 224 |
| 第二节  | TQN-100-2型、QFS-200-2型、QFQS-200-2型汽轮发电机半导体励磁系统 ..... | 237 |
| 第三节  | SQF-100-2型汽轮发电机半导体励磁系统 .....                        | 241 |
| 第四节  | QFS-300-2型 (QFS-125-2型) 汽轮发电机半导体励磁系统 .....          | 256 |

#### 第四篇 有关汽轮发电机运行的几个问题

|       |                                  |     |
|-------|----------------------------------|-----|
| 第十六章  | 有关汽轮发电机组振动的几个问题 .....            | 265 |
| 第一节   | 临界转速的基本概念 .....                  | 266 |
| 第二节   | 汽轮发电机组强迫振动的振源及处理 .....           | 272 |
| 第三节   | 油膜自激振荡及其消除的基本方法 .....            | 283 |
| 第十七章  | 汽轮发电机组的轴电流、磁化和退磁 .....           | 295 |
| 第一节   | 汽轮发电机组的轴电流和磁化 .....              | 295 |
| 第二节   | 汽轮发电机组磁化后的退磁 .....               | 301 |
| 第十八章  | 汽轮发电机定子绕组的防电晕措施和电腐蚀问题 .....      | 305 |
| 第一节   | 发电机定子绕组的防电晕措施 .....              | 305 |
| 第二节   | 发电机定子线棒环氧粉云母绝缘的电腐蚀问题 .....       | 313 |
| 第十九章  | 汽轮发电机的不对称运行 .....                | 317 |
| 第一节   | 汽轮发电机不对称运行时的负序电流 .....           | 318 |
| 第二节   | 负序电流对发电机的影响 .....                | 319 |
| 第三节   | 汽轮发电机承受负序电流的能力 .....             | 322 |
| 第四节   | 汽轮发电机的负序温升试验 .....               | 325 |
| 第二十章  | 汽轮发电机的进相运行 .....                 | 329 |
| 第一节   | 考虑静态稳定对进相运行的限制 .....             | 330 |
| 第二节   | 因定子端部发热对进相运行的限制 .....            | 337 |
| 第三节   | 考虑静态稳定和定子端部温升限制后的发电机运行限额曲线 ..... | 345 |
| 第二十一章 | 汽轮发电机失磁后的异步运行 .....              | 346 |
| 第一节   | 发电机由失磁到失步 .....                  | 347 |
| 第二节   | 发电机失步后的稳定异步运行 .....              | 350 |
| 第三节   | 汽轮发电机异步运行试验 .....                | 364 |

#### 附录

|    |                                             |     |
|----|---------------------------------------------|-----|
| 表一 | 国产汽轮发电机它励静止硅整流励磁系统中交流励磁机及交流副励磁机有关技术数据 ..... | 366 |
| 表二 | 具有同轴交流励磁机的大功率汽轮发电机励磁系统电气设备配套表 .....         | 367 |
| 表三 | 国产10~30万kW汽轮发电机自动调节励磁装置主要单元配置情况表 .....      | 370 |

|            |     |
|------------|-----|
| 参考文献 ..... | 372 |
|------------|-----|

### 第三篇 励磁系统

## 第十一章 励磁系统的作用

### 第一节 概 述

发电机的励磁系统是发电机励磁供电电源系统的总称。如图11-1-1所示，它主要由励磁供电电源装置 $LD$ 、自动调节励磁装置 $ZTL$ 、手动调节励磁装置 $STL$ 组成，此外还有强行励磁、强行减磁及灭磁装置等（后者在图中未示出）。包括发电机在内的整个系统称为励磁控制系统。

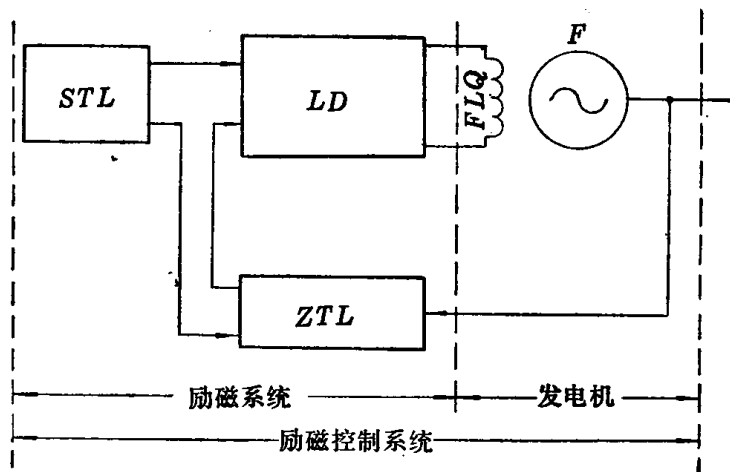


图 11-1-1 励磁系统定义的图示

$F$ —发电机； $FLQ$ —发电机励磁线圈； $LD$ —励磁供电电源装置； $ZTL$ —自动调节励磁装置； $STL$ —手动调节励磁装置

例如，图11-1-2所示的是中小型汽轮发电机及各型水轮发电机常用的一种它励式励磁系统，即与发电机同轴的直流励磁机的励磁系统。这里，同轴直流励磁机就是励磁系统中的供电电源装置，励磁机分激磁场变阻器 $R_c$ 就是手动调节励磁装置。这种它励式（即由发电机本身以外的电源供电的）励磁系统的励磁供电电源装置的工作与发电机的运行状态基本无关。又如图11-1-3绘出了为各型容量同步发电机可采用的自并励的励磁系统。这里，发电机本身就是励磁系统的供电电源，并接在发电机端的励磁变压器 $LB$ 就是励磁供电电源装置，它经可控硅整流器 $KGZ$ 整流后供电给发电机励磁线圈 $FLQ$ 。这种励磁系统励磁供电电源装置的工作与发电机的运行状态有关。关于励磁系统的分类及各种励磁系统的优缺点将在第十二章中叙述。

励磁系统是发电机的重要组成部分，它对电力系统及发电机本身的安全运行有很大的影响，励磁系统的主要作用如下：

- (1) 在正常运行条件下供给同步发电机的励磁电流，并根据发电机所带负荷的情况相应地调整励磁电流，以维持发电机电压为给定值；
- (2) 使并列运行的各发电机间所带的无功功率得到合理地分配；
- (3) 提高电力系统的动态稳定性及输电线路的传输能力；
- (4) 提高电力系统的暂态稳定性，提高继电保护装置工作的明确性，以及加速异步电动机自启动的过程；
- (5) 在发电机内部出现短路故障时，进行灭磁，以减小故障损坏程度；
- (6) 根据运行要求对发电机实行最大励磁限制及最小励磁限制。

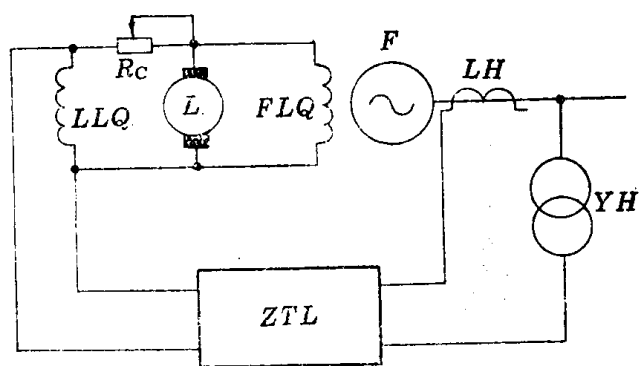


图 11-1-2 同轴直流励磁机的励磁系统简图  
F—发电机；FLQ—发电机的励磁线圈；L—励磁机；  
LLQ—励磁机的励磁线圈；R<sub>c</sub>—励磁机分激磁场变阻器；ZTL—自动调节励磁装置；YH—电压互感器；  
LH—电流互感器

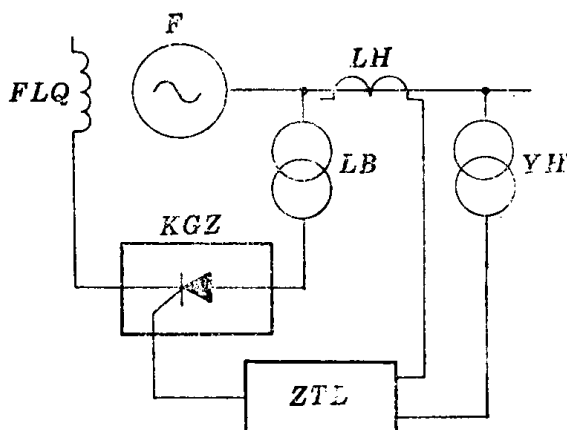


图 11-1-3 自并励励磁系统简图  
LB—励磁变压器；KGZ—可控硅整流器

## 第二节 发电机正常运行时励磁电流的调整

发电机正常运行时调整励磁电流的目的是保证发电机在各种负荷情况下的端电压为预先给定的数值。如图11-2-1(a)所示，由于励磁供电电源装置输出电流  $I_{FLQ}$  送入发电机励磁线圈  $FLQ$ （即转子绕组），于是它就在同步发电机中建立磁场，使定子绕组产生相应的感应电势  $\dot{E}_a$ 。改变电流  $I_{FLQ}$  的大小，也就改变了电势  $\dot{E}_a$  的大小。发电机正常带负荷电流为  $\dot{I}_r$  的情况下，发电机端电压  $\dot{U}_r$  与定子电势  $\dot{E}_a$  的关系（当忽略了定子电阻的影响时）可近似地如下表示〔并参见图11-2-1(b)所示的等效电路〕：

$$\dot{U}_r = \dot{I}_r jX_a = \dot{E}_a \quad (11-2-1)$$

式中  $X_a$ ——发电机纵轴同步电抗。

图11-2-1(c)绘出了发电机带负荷时的简化相量图。通常， $\dot{I}_r$  是感性电流，它在相位上落后于定子电压  $\dot{U}_r$  一个负荷阻抗角  $\varphi$ 。 $\dot{I}_r$  可分为有功部分  $\dot{I}_p$  和无功部分  $\dot{I}_q$ ，它们在  $jX_a$  上产生的压降  $\dot{I}_p jX_a$  和  $\dot{I}_q jX_a$  分别绘在相量图上。以  $o$  点为圆心，用  $|\dot{E}_a|$  为半径，画弧交  $\dot{U}_r$  的延长线上于  $a$  点，因为  $\dot{I}_p jX_a$  几乎与  $\dot{E}_a$  垂直，所以可近似认为

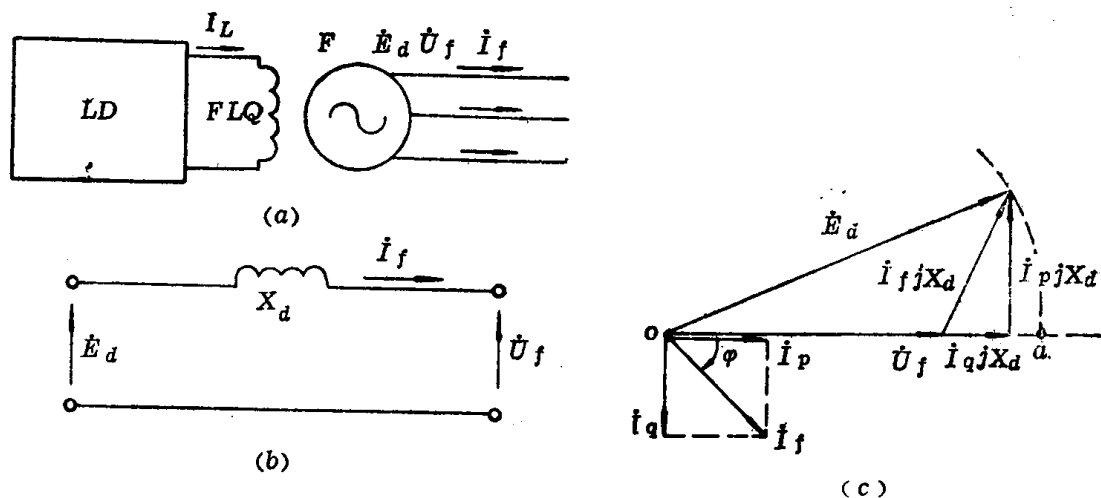


图 11-2-1 发电机正常运行时的等效电路及简化相量图

(a)解释性电路；(b)发电机正常运行时的等效电路；(c)发电机带感性负荷时的简化相量图

$$|\dot{E}_d| = |\overline{oa}| \approx |\dot{U}_f| + |\dot{I}_q j X_d| \quad (11-2-2)$$

或写为

$$E_d \approx U_f + I_q X_d \quad (11-2-3)$$

(11-2-3) 式说明了负荷电流的无功分量  $I_q$  是造成发电机感应电势  $E_d$  与端电压  $U_f$  之间差值的主要因素。换句话说，当发电机负荷电流  $I_f$  变化时，尤其是无功负荷  $I_q$  变化时，要保证端电压  $U_f$  不变，必须相应地调整  $I_{FLQ}$  的大小来改变电势  $E_d$  值。注意，若无功负荷为容性时，则 (11-2-3) 中的  $I_q$  应为负值。

从发电机外特性曲线  $U_f = f(I_f)$  上也可以看出上述结果。外特性曲线  $U_f = f(I_f)$  是指 [在一定的功率因数  $\cos \varphi$  下] 发电机端电压  $U_f$  与定子电流  $I_f$  之间的关系曲线，如图 11-2-2 所示。

因为定子电流有功分量  $I_p$  的改变对电压  $U_f$  的变化影响不大，而且在现代同步发电机的

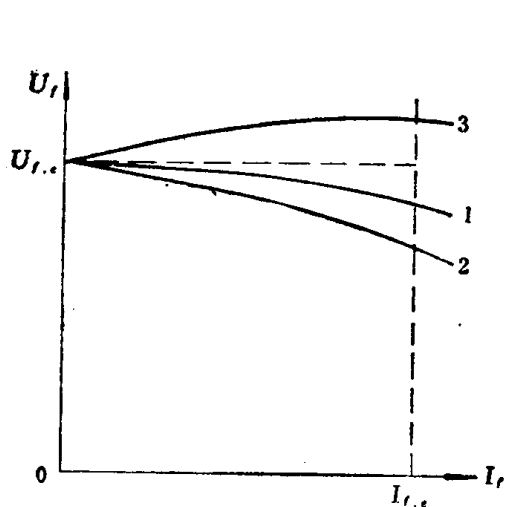


图 11-2-2 发电机外特性曲线  $U_f = f(I_f)$

1— $\cos \varphi = 1, \varphi = 0$ ; 2— $\cos \varphi = 0.8, \varphi > 0$ ; 3— $\cos \varphi = 0.8, \varphi < 0$ ;  $U_{f..}$ —发电机额定电压;  $I_{f..}$ —发电机额定电流

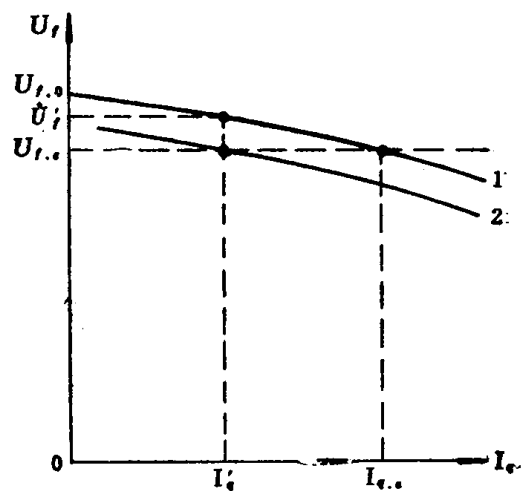


图 11-2-3 发电机的调压特性曲线  $U_f = f(I_q)$

励磁系统中装设有自动调节励磁装置（利用改变相位关系）可尽力做到发电机端电压 $U_f$ 仅随定子电流的无功分量 $I_q$ 而改变，所以，我们通常就用调压特性曲线 $U_f = f(I_q)$ （如图11-2-3所示）来讨论励磁调节问题。

从调压特性曲线 $U_f = f(I_q)$ 的曲线1上看，当发电机带定子电流无功分量（感性）为额定值 $I_{qe}$ 时，发电机端电压为额定值 $U_{fe}$ ；当无功分量降至 $I'_q$ 时，则端电压就升高至 $U'_f$ ，为了要维持发电机电压为 $U_{fe}$ 值，就必须减少发电机的励磁电流，使调压特性曲线从图11-2-3中曲线1的位置降至曲线2的位置。反之亦然。

以上讨论的是单台发电机在正常运行时励磁电流的调整问题。

调节孤立运行的发电机的励磁电流，将会改变发电机的端电压，而对发电机发出无功功率是多少影响很小。当发电机在电力系统中并列运行时，改变其中一台发电机的励磁电流就会引起各并列的发电机间无功功率的重新分配。

### 第三节 并列运行各发电机间无功功率的合理分配

并列运行各发电机间无功功率如何合理地分配需用图11-2-3所示之同步发电机的调压特性曲线 $U_f = f(I_q)$ 来说明。特性曲线 $U_f = f(I_q)$ 的倾斜度通常用调差系数 $\delta$ 来表示。调差系数 $\delta$ 的定义是当负荷电流的无功分量 $I_q$ 由零变化至其额定值 $I_{qe} = I_{fe} \sin \varphi_e$ 时发电机电压的相对变化值。 $\delta$ 的定义也可用公式表示如下：

$$\delta = \frac{U_{f0} - U_{fe}}{U_{fe}} 100\% \quad (11-3-1)$$

式中  $U_{fe}$ ——发电机额定电压；

$U_{f0}$ ——负荷电流无功分量等于零时发电机的电压。

习惯规定：认为电压随负荷增加而下降时的调差系数为正（如图11-2-3所示）；当电压随负荷增加而上升时的调差系数为负；若电压不随负荷增加（或减少）而改变时，则其调差系数为零，即调压特性是条水平线。调差系数为零（ $\delta = 0$ ）的调压特性曲线称为无差调节特性曲线；调差系数不为零（ $\delta \neq 0$ ）的调压特性曲线则称为有差调节特性曲线。

图11-2-3所示的有差调压特性曲线以曲线1为例可认为是一条倾斜的直线，根据相似三角形定理可写出下列方程式：

$$I'_q = \frac{U_{f0} - U'_f}{U_{f0} - U_{fe}} I_{qe} \quad (11-3-2)$$

将（11-3-1）式代入（11-3-2）式中，可得调压特性曲线方程的另一种表示形式：

$$I'_q = \frac{1}{\delta} \frac{U_{f0} - U'_f}{U_{fe}} I_{qe} \quad (11-3-3)$$

上式用标么值表示时可写为：

$$I'_{q*} = \frac{1}{\delta} (U_{f0*} - U'_{f*}) \quad (11-3-4)$$

式中

$$I'_{q*} = \frac{I'_q}{I_{qe}}$$

$$U_{f0*} = \frac{U_{f0}}{U_{f0*}}$$

$$U'_{f*} = \frac{U'_f}{U_{f0*}}$$

若无功负荷为 $I''_{q*}$ 时, 则有

$$I''_{q*} = \frac{1}{\delta}(U_{f0*} - U'_{f*}) \quad (11-3-5)$$

调压特性方程若用变量形式表示, 即用(11-3-5)式减去(11-3-4)式, 则得:

$$\Delta I_{q*} = -\frac{1}{\delta} \Delta U_{f*} \quad (11-3-6)$$

在(11-3-6)式中:  $\Delta I_{q*} = I''_{q*} - I'_{q*}$ ;  $\Delta U_{f*} = U''_{f*} - U'_{f*}$ , 负号表示在 $\delta > 0$ 时无功负荷增长将引起机端电压下降, 反之亦然。

### 一、在机端并列运行的各发电机间无功功率的分配

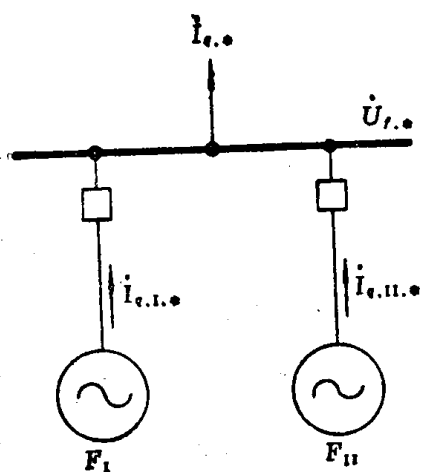
首先讨论具有有差调节特性( $\delta > 0$ ), 而调差系数不等的发电机在发电机电压母线上并列运行时的无功功率分配问题。如图11-3-1, 两台发电机并列在公共母线上, 则两台发电机的端电压是一样的。当系统无功负荷变化时, 两台发电机端电压变化量是相同的, 而两台发电机所带无功负荷的变化量则是不相等的。例如, 两台发电机均为空载时, 发电机端电压, 即公共母线电压为 $U_{f0*}$ ; 当系统无功负荷增长为 $I'_{q*}$ 时, 两台发电机( $F_I$ 与 $F_{II}$ )分别带无功负荷为 $I'_{qI*}$ 与 $I'_{qII*}$ , 此时, 母线电压降低为 $U'_{f*}$ ; 当系统无功负荷又增长为 $I''_{q*}$ 时, 两台发电机则分别带无功负荷为 $I''_{qI*}$ 与 $I''_{qII*}$ , 而母线电压相应地又降低为 $U''_{f*}$ 。也就是说, 系统无功负荷由 $I'_{q*}(=I'_{qI*}+I'_{qII*})$ 变化至 $I''_{q*}(=I''_{qI*}+I''_{qII*})$ 时, 两台发电机端电压变量是相等的, 它等于 $-\Delta U_{f*}$ , 而各台发电机所带无功负荷的相对变化量是不相等的, 即 $\Delta I_{qI*} \neq \Delta I_{qII*}$ , 这里,  $\Delta I_{qI*} = I''_{qI*} - I'_{qI*}$ ;  $\Delta I_{qII*} = I''_{qII*} - I'_{qII*}$ 。各台发电机无功负荷变化量与各台发电机励磁系统调压特性曲线的倾斜度即调差系数 $\delta$ 成反比。

(11-3-4)~(11-3-6)式的关系从图11-3-1上可明显地看出, 当系统无功负荷变动时, 或者说母线电压变动时, 调差系数较小的发电机 $F_{II}$ 将承受较大的无功负荷的变动, 而调差系数较大的发电机 $F_I$ 则承受较小的无功负荷变动。

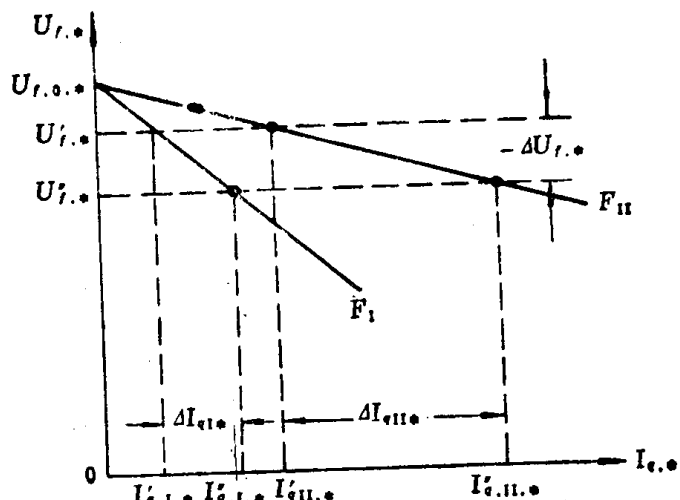
我们要求系统的总无功负荷应按机组容量大小成比例地分配给各台发电机。系统总无功负荷发生变动(增加或减少)时, 各台发电机所带无功负荷相对变动量(增加或减少)也应接近相等。这样就使得系统中并列运行的各台发电机所带的无功负荷得到合理地分配。由公式(11-3-6)可见, 就是要求系统中并列运行的各台发电机应具有相等的调差系数。

从图11-3-1(b)中还可看出, 系统总无功负荷增加后, 母线电压下降了 $\Delta U_{f*}$ , 欲维持母线电压为原给定值, 则必须相应地增加发电机 $F_I$ 和 $F_{II}$ 的励磁电流。即便两台发电机的调差系数是相等时, 也发生这样的情况。

又如图11-3-2所示, 如果两台并列运行的发电机中, 发电机 $F_I$ 具有有差调节特性( $\delta > 0$ ), 发电机 $F_{II}$ 具有无差调节特性( $\delta = 0$ ), 那么, 系统总无功负荷变化时, 母线电压将不发生变化, 母线电压值由具有无差调节特性的发电机 $F_{II}$ 来决定, 发电机 $F_I$ 所带的



(a)



(b)

图 11-3-1 两台具有有差调节特性发电机并列工作时无功功率的分配

(a)解释性电路; (b)调压特性曲线

无功负荷不发生改变, 系统总无功负荷的变化量都由发电机  $F_{II}$  来承担。显然, 这种情况下, 无功负荷的分配也是不合理的。

如果两台发电机都是无差调压特性, 则不能并列运行, 因为系统总无功负荷的任一变动可在两台发电机之间任意分配, 即系统总无功负荷在两台发电机之间不能稳定地分配, 并可能导致一台发电机迟相运行, 另一台发电机进相运行。

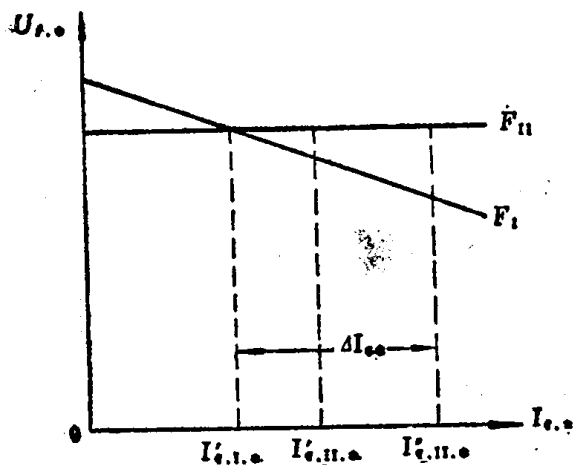


图 11-3-2 发电机  $F_I$  为有差特性、发电机  $F_{II}$  为无差特性时的并联工作

$I'_{q.I.\bullet}, I'_{q.II.\bullet}$ —系统无功负荷变化前, 发电机  $F_I, F_{II}$  所带的无功负荷;  $I''_{q.I.\bullet}, I''_{q.II.\bullet}$ —系统无功负荷变化后, 发电机  $F_I, F_{II}$  所带的无功负荷;  $\Delta I_{q.I.\bullet}$ —系统无功负荷变化量

从以上分析可知, 当系统总无功负荷变化时, 为了在并列运行的各台发电机之间合理地分配无功负荷, 各台发电机的调差系数应相同; 为了既合理又稳定地分配并列运行的各台发电机所带的无功负荷, 各台发电机的调差系数不应为零或接近于零。对于并列在发电机电压母线上的发电机, 通常要求调差系数为  $+(4 \sim 6)\%$ 。

当发电机无自动调节励磁装置作用时, 发电机的调压特性曲线具有略微向下的倾斜度, 此时的调差系数  $\delta = +(1 \sim 2)\%$ , 称为自然调差系数。欲改变发电机调压特性的调差系数, 比如使并列在发电机电压母线上的发电机的调差系数具有  $+(4 \sim 6)\%$  值, 则需通过各台发电机本身的自动调节励磁装置中的调差单元的作用来达到 (详见第十四章第三节)。

## 二、经升压变压器并联工作的各发电机间无功负荷的分配

具有大容量发电机的区域性发电厂通常都是采用发电机变压器组单元接线, 在升压变

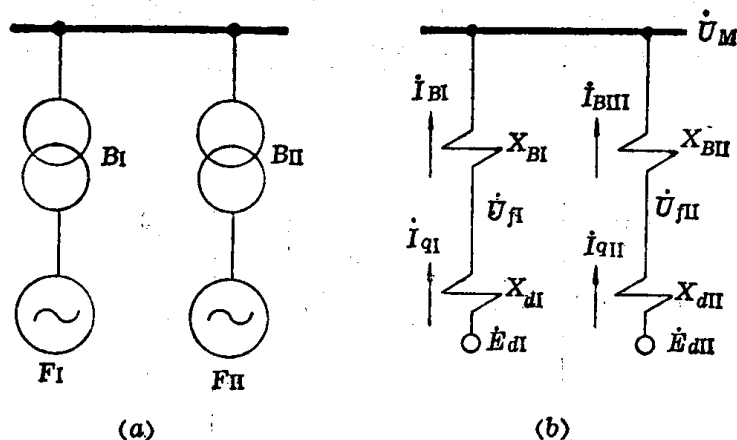


图 11-3-3 发电机经升压变压器在高压侧母线上并列运行  
(a)接线图; (b)等效电路图

压器高压侧母线上并列运行。升压变压器可以是双线圈变压器，或是三线圈变压器，或是自耦变压器。现以图11-3-3为例来讨论，两台发电机 $F_I$ 及 $F_{II}$ 分别经双线圈升压变压器 $B_I$ 及 $B_{II}$ 在高压侧母线上并列运行。发电机电压级无负荷，发电机全部负荷经升压变压器送至高压母线上。为了简化讨论起见，认为两台发电机的调差系数均为零（即把发电机自然调差系数近似当作零），同时忽略发电机及升压变压器的有效电阻。在图11-3-3所示的等效电路中，高压侧母线电压 $U_M$ 、变压器电抗 $X_B$ 、升压变压器中的电流 $I_B$ 均已折算至发电机电压侧。若电压、电流均用相电压、相电流来表示，则发电机电压 $U_f$ 与高压母线电压 $U_M$ 有下述关系：

$$\left. \begin{aligned} U_M &= U_{fI} - I_{qI} X_{BI} = U_{fI} - I_{BI} X_{BI} \\ U_M &= U_{fII} - I_{qII} X_{BII} = U_{fII} - I_{BII} X_{BII} \end{aligned} \right\} \quad (11-3-7)$$

若发电机为空载时，则 $U_M = U_f$ 。若发电机带上负荷 $I_q$ 时，因为发电机电压 $U_f$ 不随负荷电流 $I_q$ 而变化，所以， $U_M = f(I_q)$ 是有差特性的。

从以上分析可知，发电机经升压变压器在高压侧母线上并列运行时，即便发电机是无差调压特性，也能保证各发电机间无功负荷分配的稳定性，但是，系统总无功负荷改变时，高压侧母线电压 $U_M$ 并不能保证恒定。因此，为了保证高压母线电压 $U_M$ 维持在所希望的水平上，即补偿负荷电流 $I_q$ 在变压器电抗 $X_B$ 上的压降（参见图11-3-4），要求发电机具有负的调差系数，通常，使发电机的调差系数 $\delta = -(2 \sim 3)\%$ 。

参见图11-3-4，如果发电机具有自然调差特性（曲线1），利用自动调节励磁装置中调差单元的作用使发电机的调压特性具有上翘的性质，如图中曲线2所示。根据(11-3-7)式，则可求出升压变压器高压侧母线电压 $U_M$ 的调压特性，如图中曲线3所示，它具有正的调差系数。图中，线段bc为调差单元在无功负荷为额定值 $I_{q0}$ 时的补偿电压，线段cd为 $I_{q0}$ 通过电抗 $X_B$ 引起的压降（即 $I_{q0} X_B$ ）。当图11-3-4中的坐标用标么值表示时，线段ab即为发电机的自然调差系数（正值）；线段bc即为调差单元补偿的调差系数（负值）；线段cd即为负荷电流通过升压变压器电抗所造成的调差系数（正值），而发电机的调差系数则由线段ac决定；发电机变压器组的调差系数则由线段ad决定。

同上述, 要求并列运行在高压母线上的各发电机变压器组合理地分配无功负荷, 则它们应有相同的调差系数。所要求的调差系数值也将通过各发电机本身的自动调节励磁装置中的调差单元的调整来达到。

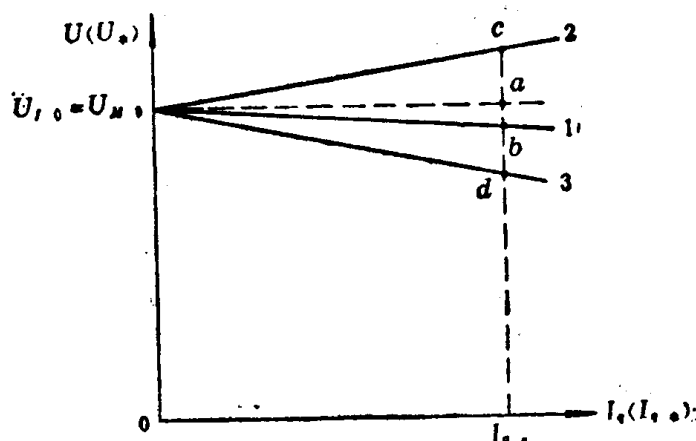


图 11-3-4 采用发电机变压器组接线时发电机的调压特性曲线

1—发电机自然调差特性; 2—经自动调节励磁装置调差单元补偿后的发电机电压调压特性  $U_f = f(I_f)$ ;

3—升压变压器高压侧母线电压的调压特性  $U_M = f(I_f)$ ;

$U_{f0}$ 、 $U_M$ — $I_f = 0$  时机端、高压侧母线电压

还应当指出, 系统总无功负荷发生变化, 不仅引起某一发电厂中各机组间无功负荷分配发生变化, 系统中所有发电厂发出的功率及系统潮流分布都相应地会发生变化, 所以说, 发电机正常运行时的励磁调节及各机组间无功负荷的合理分配实质上是和系统调压问题相关联的。发电机励磁的调节是保证系统电压水平的有效措施之一。在现代电力系统中, 若某发电厂中并列运行的机组台数较多时, 为了维持发电机电压或升压变压器高压侧母线电压为某给定值或按给定的调节规律变化, 可采用励磁成组调节装置, 便于做到远方集中控制, 从而减轻值班人员的操作。

#### 第四节 自动调节励磁对系统动态稳定的影响

现代大型同步发电机 (包括同步调相机) 广泛地采用了自动调节励磁装置, 它对电力系统稳定运行起着优越的作用, 是提高动态稳定性及输电线路的传输能力的最有效的措施。

##### 一、功角特性方程

首先讨论同步发电机与电力系统并列运行的功角特性方程式。图 11-4-1(a) 绘出了一个简单的网络, 同步发电机  $F$  经升压变压器  $B$ 、输电线路  $xl$  与大容量电力系统的变电所  $C$  并列运行。系统的容量相当大, 以致  $C$  处的电压  $\dot{U}$  的相位及大小可认为是不变的。图 11-4-1(b) 是网络的等值电路图, 其中, 未考虑网络中各元件电阻以及并联电导和电纳的影响, 这对定性分析并列运行稳定性问题是允许的。在图 11-4-1(c) 所绘的相量图中明确地表示出, 发电机向系统输送的电流通常是感性的, 它落后于受端变电所  $C$  母线电压  $\dot{U}$

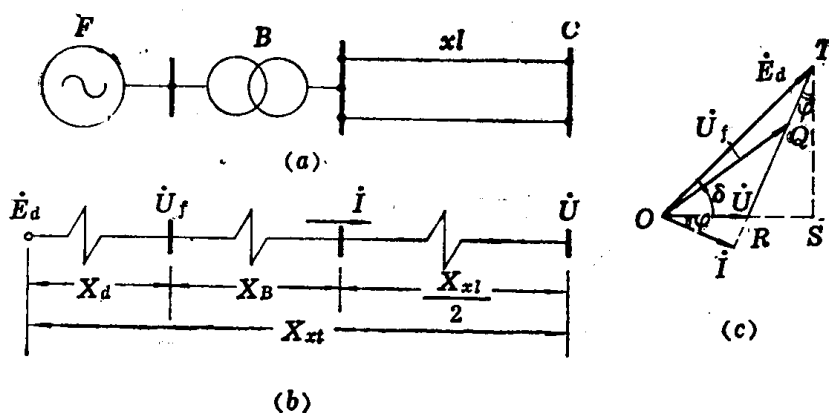


图 11-4-1 电力系统中同步发电机工作图  
(a)网络图; (b)等值电路图; (c)相量图

一个功率因数角  $\varphi$ , 又由于电抗压降  $\dot{I}jX_{xt}$  ( $=\dot{E}_d - \dot{U}$ , 在图中是线段  $RT$ ) 的存在, 发电机电势  $\dot{E}_d$  越前于受端变电所  $C$  母线电压  $\dot{U}$  的角度为  $\delta$ 。

如图11-4-1(c)所示, 在  $\triangle OST$  中,  $ST = OT \sin \delta = RT \cos \varphi$  则  $E_d \sin \delta = IX_{xt} \cos \varphi$ , 于是求得发电机送入系统的电流为:

$$I = \frac{E_d}{X_{xt} \cos \varphi} \sin \delta \quad (11-4-1)$$

又, 发电机送入系统的有功功率  $P$  为:

$$P = UI \cos \varphi \quad (11-4-2)$$

将 (11-4-1) 式代入 (11-4-2) 式中, 得:

$$P = \frac{E_d U}{X_{xt}} \sin \delta \quad (11-4-3)$$

(11-4-3)式就是研究并列运行稳定性问题的基本关系式——功角特性方程。(11-4-3)式是从单相电路导出的, 若式中  $E_d$  和  $U$  皆用相间电势和电压值代入, 则由 (11-4-3) 式求得的  $P$  是三相有功功率。

当发电机电势  $E_d$  及受端变电所  $C$  母线电压  $U$  为恒定时, 传输功率  $P$  的大小仅与角度  $\delta$  有关, 其关系式 (11-4-3) 具有正弦特性, 如图11-4-2所示。当  $\delta = 90^\circ$  时, 传输功率  $P$  有最大值:

$$P_{\max} = \frac{E_d U}{X_{xt}} \quad (11-4-4)$$

## 二、励磁恒定时系统静态稳定问题

下面讨论同步发电机与系统并列运行的静态稳定的概念。静态稳定一般是指发电机励磁恒定 (即未装设自动调节励磁装置) 时, 系统在很小的干扰下, 独立地恢复到它起初的运行状态所具有的能力。如图11-4-2所示, 传输功率在  $P_0$  时, 同步发电机可能运行在两点,  $a$  点或  $b$  点。先讨论  $a$  点 ( $\delta_a < 90^\circ$ ) 的运行情况, 假若  $\delta_a$  获得一个小的增量  $\Delta\delta$ , 那么随着这个角的正弦函数而变化的发电机功率也有一个变量  $\Delta P$ 。从图11-4-2上可看出, 在  $a$  点正的角增量  $\Delta\delta$ , 对应于发电机功率增量  $\Delta P$  也是正的。由于发电机有一个正的增量  $\Delta P$ , 则使发电机与原动机 (汽轮机或水轮机) 间转矩的均衡遭到破坏, 即使发电机电磁转矩超过

原动机的转矩，于是发电机的转速减慢，因此，引起与发电机转子有关的电势相量  $\vec{E}_d$  向角度  $\delta$  减小的方向移动[参见图 11-4-3(a)]。角度  $\delta$  减小的结果，运行状态又恢复到最初状态点  $a$  处。同理，点  $a$  处有一个负的角增量  $\Delta\delta$  时，对应有一个负的功率增量  $\Delta P$ ，也可得到同样的结论。所以，这点的运行状态是稳定的。

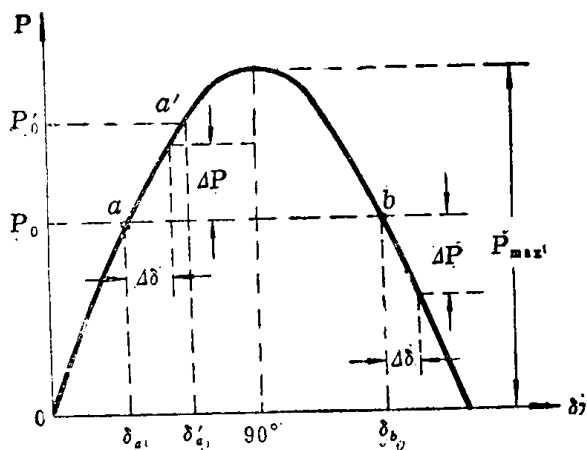


图 11-4-2 静态稳定的确定

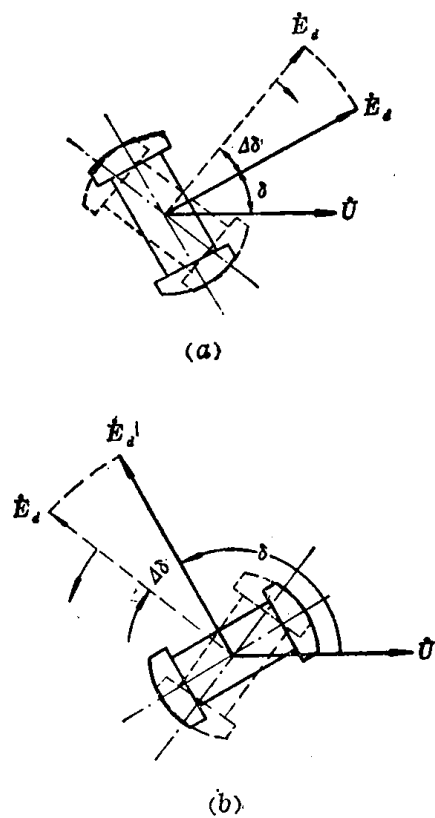


图 11-4-3 发电机电势相量  $E_d$  的变化  
(a)  $\delta < 90^\circ$  时的情况；(b)  $\delta > 90^\circ$  时的情况

在图 11-4-2 中的  $b$  点 ( $\delta_b > 90^\circ$ ) 处，情况将完全不同。这里，正的角增量  $\Delta\delta$  对应地得到了负的发电机功率变量  $\Delta P$ ，发电机的制动转矩小于原动机转矩，引起了具有加速特性的转矩出现，于是，角度  $\delta$  非但不减小，反而增大了。从图 11-4-2 上看到，随着角度  $\delta$  的增大，发电机功率  $P$  继续下降，从而引起了角度  $\delta$  的继续增大。这程序不断地进行着，发电机电势  $\vec{E}_d$  不停地对变电所  $C$  处电压  $\vec{U}$  的位移加大[参见图 11-4-3(b)]，最后，发电机就失去了同步。非同步的运行状况带来了电流和功率急剧地振荡，并可导致发电机与系统解列。所以说  $b$  点的运行状态不是（静态）稳定的。

点  $a$  ( $\delta_a < 90^\circ$ ) 处于功角特性曲线的上升部位，增量  $\Delta\delta$  与增量  $\Delta P$  有相同的符号；点  $b$  ( $\delta_b > 90^\circ$ ) 处于功角特性曲线的下降部位，增量  $\Delta\delta$  与增量  $\Delta P$  有不同的符号，所以，系统静态稳定运行的充分必要条件是：

$$\frac{\Delta P}{\Delta \delta} > 0$$

写成极限形式为

$$\frac{dP}{d\delta} > 0 \quad (11-4-5)$$

以上是在原动机输入功率不变的情况下讨论的。如果发电机仍运行在  $a$  点, 当原动机出力增加为  $P_0'$  时, 发电机就要加速, 于是与转子轴线相关联的定子电势  $\dot{E}_d$  相对于定子轴线而向超前方向移动, 从图11-4-1(c)上看就是  $\dot{E}_d$  更超前于  $\dot{U}_t$  及  $\dot{U}$ 。此时, 功角由  $\delta_0$  增大至  $\delta_0'$ , 发电机出力也相应地由  $P_0$  增加至  $P_0'$ , 与原动机出力相平衡, 从而达到新的平衡点  $a'$  稳定运行。原动机出力减少时, 亦可得出同样的结论。但是, 在  $\delta > 90^\circ$  的  $b$  点, 不论是发电机出力或者是原动机出力发生小骚动都不能保证静态稳定运行。

(11-4-5) 式说明当发电机的励磁为恒定时, 为使发电机与系统稳定地并列运行必须保证  $\delta < 90^\circ$ 。  $\delta = 90^\circ$  处,  $\frac{dP}{d\delta} = 0$ , 是稳定的极限。(11-4-4) 式所示的  $P_{max}$  即称为稳态极限功率。

### 三、自动调节励磁对系统动态稳定的影响

当发电机电势  $E_d$  不变 ( $E_d = \text{const}$ )、 $\delta$  增加时, 发电机端电压  $\dot{U}_t$  的变化如图11-4-4所示。  $\dot{U}_t$  的端点  $Q$  将线段  $RT$  (等于  $j\dot{I}X_{st}$ ) 划分为正比于发电机同步电抗  $X_d$  的线段  $QT$  (等于  $j\dot{I}X_d$ ) 及正比于升压变压器的线路电抗  $X_B + \frac{X_{st}}{2}$  ( $X_{st}$  为一回线的电抗) 的线段  $RQ$  [等于  $j\dot{I}(X_B + \frac{X_{st}}{2})$ ]。当角度  $\delta$  有了增量  $\Delta\delta$  时, 发电机电势  $\dot{E}_d$  将移到某一新的位置, 如图11-4-4中虚线所示, 要获得新运行状态下发电机端电压向量  $\dot{U}_t$ , 可先将  $\dot{E}_d$  与  $\dot{U}$  的末端连线, 再依照  $X_d$ 、 $X_B + \frac{X_{st}}{2}$  的比例划分为  $Q'T'$  与  $RQ'$ , 这里,  $QT:RQ = Q'T':RQ'$ , 线段  $OQ'$  即新运行状态下发电机端电压向量  $\dot{U}_t$ 。从图11-4-4上可见, 当角度  $\delta$  增加时,  $\dot{U}_t$  将随  $\dot{E}_d$  反时针方向旋转, 并且  $\dot{U}_t$  的长度将减小  $\Delta U$ , 即  $|OQ'| < |OQ|$ ,  $\Delta U = |OQ| - |OQ'|$ 。显然, 讨论图11-4-1所示网络中任一点 (在升压变压器高压侧母线上或输电线路任一点) 的电压, 上述论据也是适用的。

现代同步发电机 (尤其是大容量机组) 的励磁系统通常都装设了自动调节励磁装置, 它在发电机端电压  $U_t$  变动时要发生调节作用。根据图11-4-4分析的结论, 当传输功率  $P$  增加及角度  $\delta$  也增加的同时, 引起发电机端电压下降, 于是, 由于自动调节励磁装置的作用, 发电机励磁电流将增加, 因而使发电机电势  $E_d$  的数值增加, 直到端电压  $U_t$  恢复到原给定值为止。这样, 在研究具有自动调节励磁装置作用下的发电机在不同角度  $\delta$  下

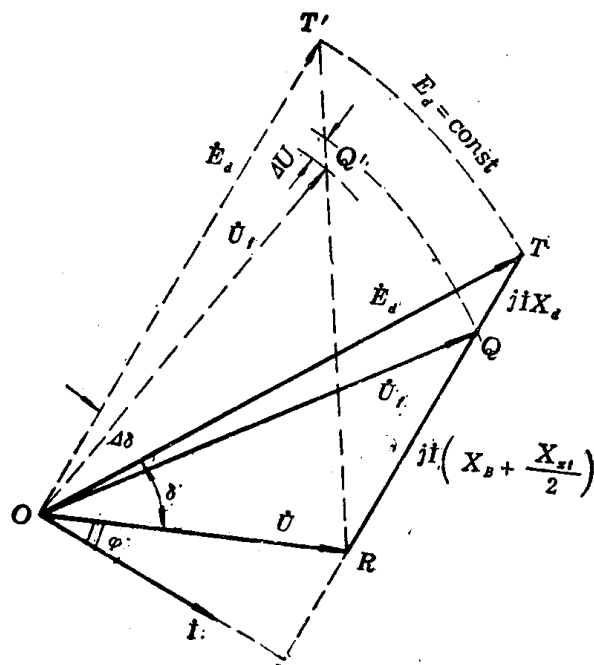


图 11-4-4 当  $\delta$  增加时,  $\dot{U}_t$  的变化 ( $E_d = \text{const}$ )

的稳定运行状态时,必须考虑到电势 $E_d$ 将随着 $\delta$ 的增加而增加。研究具有自动调节励磁装置作用下,系统受微小干扰时能独立恢复到初始运行状态的能力称为系统动态稳定。图11-4-5示出当利用自动调节励磁装置保持发电机端电压 $U_f$ 为恒定值、并在角度 $\delta$ 增大时,发电机电势 $\dot{E}_d$ 变化的向量图。此时,发电机的功角特性方程及曲线不能用(11-4-3)式及图11-4-2来表示,在有自动调节励磁装置作用下,功角特性曲线是利用对应于不同 $E_d$ 值的一组正弦曲线族而作出的,如图11-4-6所示。图中曲线2就是计及 $E_d$ 变化的功角特性曲线,称之为外功率特性曲线,它甚至在 $\delta$ 略大于 $90^\circ$ 的范围内仍旧具有上升(即 $\frac{dp}{d\delta} > 0$ )的性质,这是因为[用(11-4-3)式来分析]当 $\delta$ 略大于 $90^\circ$ 时, $E_d$ 的增加要超过 $\sin\delta$ 的减小。

对照图11-4-5的相量图及图11-4-6的曲线来分析,可以看出:由自动调节励磁装置保持 $U_f = \text{const}$ 的情况下,当 $\delta' = [\hat{U}_f, \hat{U}] = 90^\circ$ 时, $E_d$ 有最大值。这就是说,外功角特性曲线不是在 $\delta = 90^\circ$ 时到达最大值,而是在 $\delta = \delta_c$  (在图11-4-6中约为 $118^\circ$ ),即对应应在 $\delta' = 90^\circ$ 时到达最大值。对应于 $\delta_c$ 时的功率 $P_c$ 称为外极限功率或称为动态稳定极限功率。

实际上,系统不可能在动态稳定极限处运行,它必须考虑当发生出乎意料外的工作状态变化时,有一定的稳定储备,所以,就稳定的观点而言,即便在有自动调节励磁装置作

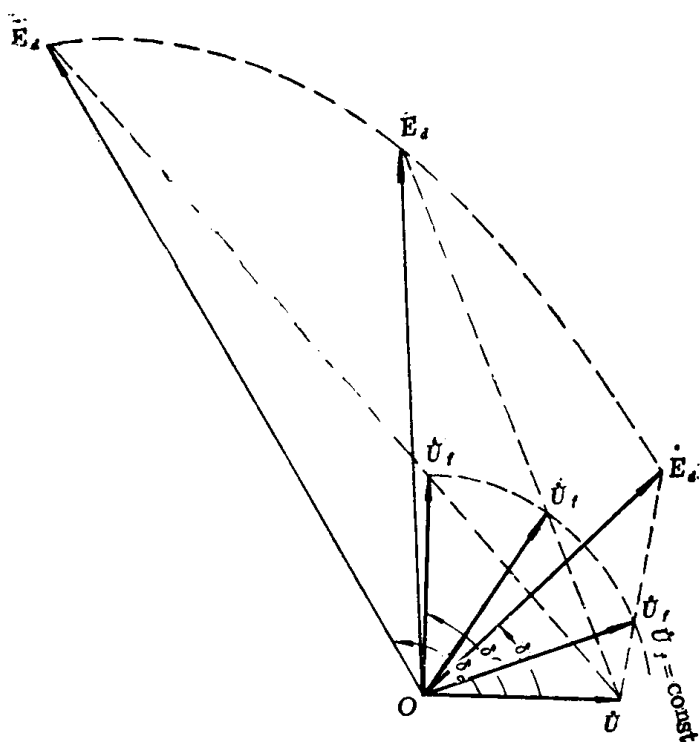


图 11-4-5 在自动调节励磁装置作用下保持  
 $U_f = \text{const}$  时,  $\dot{E}_d$  随  $\delta$  增加而发生变化  
 $\delta = [\hat{E}_d, \hat{U}]; \delta' = [\hat{U}_f, \hat{U}]$

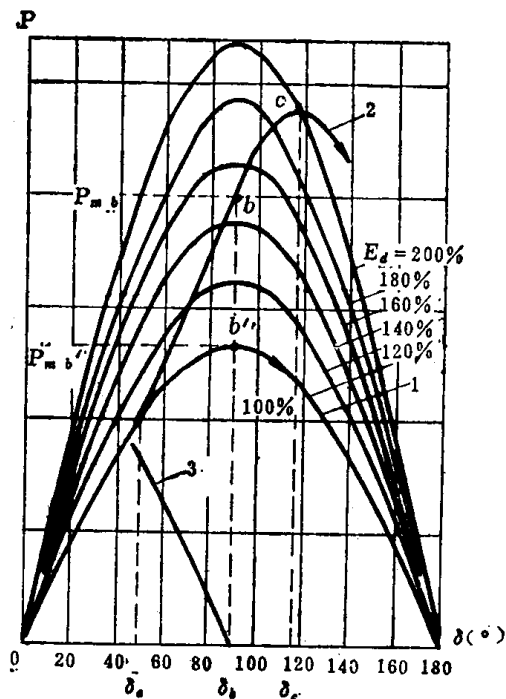


图 11-4-6 功角特性曲线  
曲线 1—内功率特性曲线( $E_d = \text{const}$ );  
曲线 2—外功率特性曲线( $U_f = \text{const}$ );  
曲线 3— $\frac{dp}{d\delta} = f(\delta)$  ( $E_d = \text{const}$ )

用的条件下, 电势 $\dot{E}_a$ 超前 $\dot{U}$ 的角度仍应该是 $90^\circ$ , 而不是 $\delta_0$ 。因为在 $\delta < 90^\circ$ 的范围内运行时, 自动调节励磁装置不良的调整或者完全失灵, 并不直接导致系统失去稳定。也就是说, 即使在 $E_a$ 不变的条件下, 功角特性在 $\delta < 90^\circ$ 的范围内仍旧具有上升( $\frac{dp}{d\delta} > 0$ )的性质。

发电机励磁系统中有了自动调节励磁装置的作用可使系统运行稳定性得以提高, 而这一点可以从图11-4-6上看出: 角度 $\delta$ 在 $\delta_0 \sim \delta_0'$ 之间任一点运行的情况下, 当无自动调节励磁装置作用时的 $\frac{dp}{d\delta}$ 值应由曲线1来决定, 当有自动调节励磁装置作用时的 $\frac{dp}{d\delta}$ 值则应由曲线2来决定, 而曲线2是由一组对应于不同 $E_a$ 值的正弦曲线族来确定的, 后者 $\frac{dp}{d\delta}$ 较大。即是说, 在自动调节励磁装置的作用下, 发电机与系统并列运行有较大的稳定储备。

从图11-4-6上还可以看出, 在有自动调节励磁装置作用下对应于 $\delta_0 = 90^\circ$ 时的功率 $P_{bm}$  (称为内极限功率) 比无自动调节励磁装置作用下对应于 $\delta_0 = 90^\circ$ 时的自然极限功率 $P'_{bm}$ 要大得多。如果有了可靠的、灵敏的、动作迅速的自动调节励磁装置及励磁供电电源设备, 可以使发电机在 $\delta$ 略大于 $90^\circ$ 的人工稳定区 (即在 $\delta_0 \sim \delta_0'$ 的范围内) 稳定运行, 这就极大地提高了发电机向系统的传输功率。

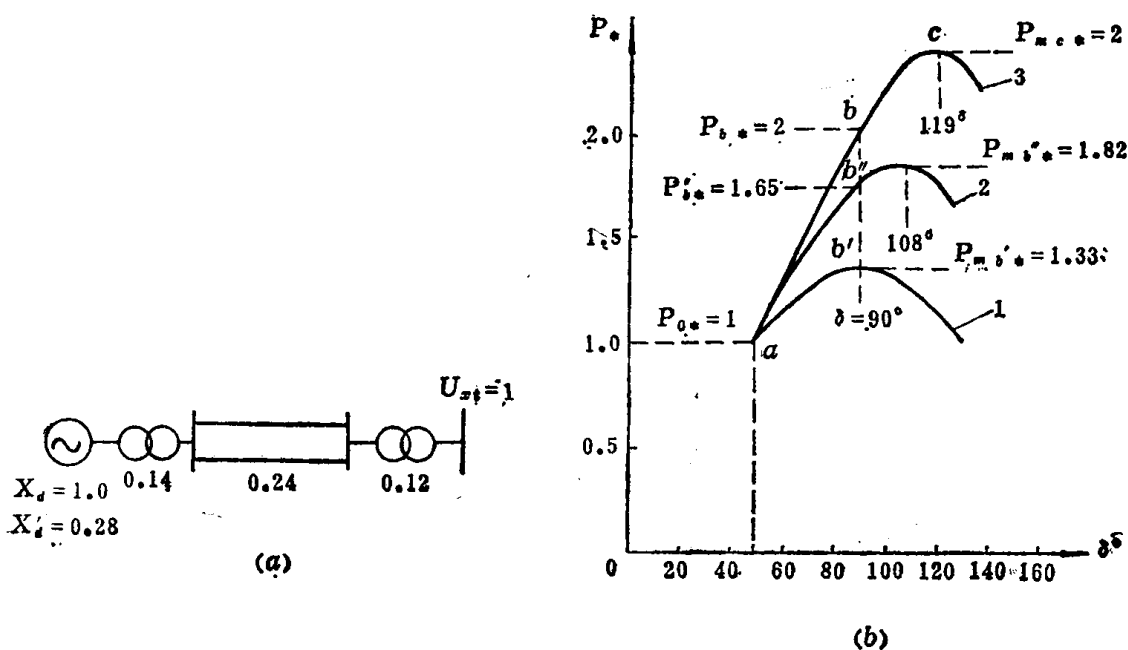


图 11-4-7 自动调节励磁对系统动态稳定的影响

(a) 系统接线图; (b) 功角特性曲线

1—当无自动调节励磁装置作用( $E_a = \text{const}$ )时的功角特性曲线; 2—当使用快速调节励磁装置时保持 $U_r = \text{const}$ 的功角特性曲线; 3—当调节励磁装置具有一定的失灵敏度( $E'_a = \text{const}$ )时的功角特性曲线

在图11-4-7中示出了快速调节励磁对发电机与系统并列运行动态稳定的影响。图11-4-7(b)中曲线的纵坐标用标么值表示。当无自动调节励磁装置作用时( $E_a = \text{const}$ ), 静态稳定极限功率 (自然功率极限值)  $P_{m0}' = 1.33$ 。在具有快速调节励磁装置作用下, 可保

证发电机端电压 $U_t = \text{const}$ , 此时, 动态稳定极限功率(外功率极限值)可达 $P_{m0*} = 2.35$ , 其内功率极限值 $P_{b*} = 2$ , 它仍是静态稳定极限值的1.5倍。如果调节器有较大的失灵度, 不能保持 $U_t = \text{const}$ , 而只能保持 $E'_d = \text{const}$ 时, 其对应的内功率极限值为 $P_{b'*} = 1.65$ , 它仍高于无自动调节励磁作用的 $P_{mb'*} = 1.33$ 。

## 第五节 自动调节励磁对系统暂态稳定的影响

### 一、暂态稳定的概念

电力系统在正常运行时, 受到小干扰的情况下, 若能保证稳定运行, 那么, 在遭受到突然地、急剧地(应当是有限的)大干扰的情况下, 能否使电力系统从原先的稳定状态尽快地过渡到另一新的稳定状态下运行, 或者恢复到原先的稳定状态运行, 这是我们要讨论的暂态稳定性问题。例如, 电力系统正常运行时, 突然断开一条线路, 使系统参数(电抗)发生变化; 系统发生短路故障过程中, 电压急剧下降; 短路元件切除后的自动重新投入; 负载突然地大量变动, 以及系统中某发电机故障被解列等情况, 都是属于对系统的大干扰。电力系统能否在某一新的稳定状态下继续运行, 要视消除非正常运行方式的速度以及故障切除后随之出现的运行情况而定。

下面, 首先说明暂态稳定的基本原理。讨论一个简单的情况, 如图11-4-1所示的网络中, 双回线路突然断开一条线路运行。由于切断了一条线路, 线路电抗由 $X_{s1}/2$ 增加为 $X_{s1}$ , 如果暂不计及发电机电磁暂态过程的影响, 即认为 $X_d$ 未发生变化, 则系统电抗变为 $X'_{st} = X_d + X_B + X_{s1}$ 。这时, 切断一条线路后的功角特性曲线的波幅[参见公式(11-4-4)]相应地减少为 $P'_{\max} = \frac{E_d U}{X'_{st}}$ 。图11-5-1示出了正常运行(曲线1)及切断一条线路(曲线2)情况下的功角特性曲线。它们的波幅分别为 $P_{\max}$ 和 $P'_{\max}$ 。

如果在切断一条线路以前的一瞬间, 运行状态在图11-5-1(a)中曲线1上的a点, 传输

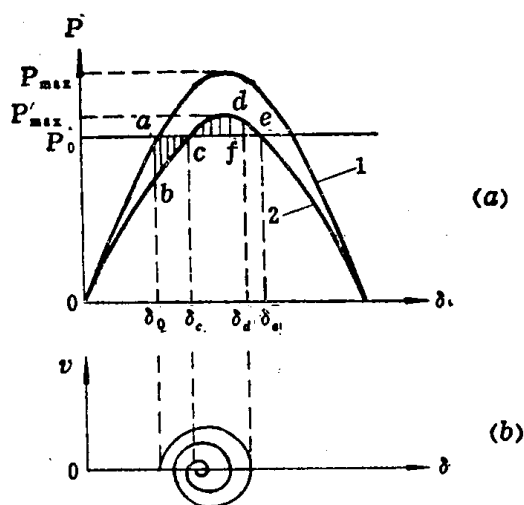


图 11-5-1 切断一条线路后发电机输出功率和相对速度与角度 $\delta$ 的关系  
(a)  $P = f(\delta)$ ; (b)  $v = f(\delta)$

功率是 $P_0$ , 对应的角度是 $\delta_0$ 。切断一条线路后的一瞬间的运行状态应由曲线2来确定, 应当在曲线2上和a点有相同角度 $\delta_0$ 的b点。这是由于转子有惯性存在, 在这瞬间, 电势 $\dot{E}_d$ 对受端电压的角度仍保持为 $\delta_0$ , 还来不及变化。运行状态从a点转变到b点后, 发电机输出功率(电磁功率)突然减小。这一点不难理解, 这是因为系统电抗突然加大为 $X'_{st}$ 的缘故。但是, 由于原动机调速器不可避免地迟钝, 而仍旧保持输出功率为 $P_0$ , 这样, 发电机的电磁转矩就小于原动机转矩, 于是就引起了转子的加速过程。与发电机转子轴线相对应的电势 $\dot{E}_d$ 开始比与恒定同步转速相对应的受端电压 $\dot{U}$ 转得