

③  
11-15

# 影响同步发电机无功-电压特性的因素分析

TM701/4

## Factors of the Effect on Reactive Power-Voltage Characteristics of synchronous Generator

牟道槐  
Mu Daohuai

华智明  
Hua Zhiming

蔡增华  
Cai Zenghua

石立宝  
Shi Libao

(重庆大学电气工程系, 重庆, 400044; 第一作者 56岁, 男, 教授)

**摘要** 指出整定同步发电机的无功-电压( $Q_0-U_0$ )特性是自动调节励磁(AEC)装置最基本的功能之一, 提出自动调节励磁装置的作用可等效为对同步电势在端电压方向的投影( $E_s \cos \delta$ )及同步电抗( $X_s$ )的代换。当视转子电流恒定时, 额定运行点的  $dQ_0/dU_0$  取决于同步电抗  $X_s$ 。

**关键词** 同步发电机 / 无功-电压特性; 自动调节励磁

中国图书资料分类法分类号 TM761.11

励磁调节  
电力系统

**ABSTRACT** Setting reactive power-voltage characteristic ( $Q_0-U_0$ ) of synchronous generator was one of the most basic function of automatic excitation control (AEC). The function of AEC is equal to the change of projecting of e. m. f generated ( $E_s \cos \delta$ ) on end-voltage ( $U_0$ ) in phasor diagram for a synchronous generator and synchronous reactance ( $X_s$ ). Considering the constant rotor current,  $dQ_0/dU_0$  at nominal operating point is dependent on the synchronous reactance ( $X_s$ ).

**KEYWORDS** synchronous generators / reactive power-voltage characteristic; automatic excitation control

### 0 引言

同步发电机是电力系统最基本的无功电源, 它的无功-电压特性影响电力系统的电压水平和运行的稳定性。同时, 发电厂在发出有功的同时输出相应数量的无功也是发电厂重要的技术经济考核指标。因此, 研究同步发电机的无功-电压特性具有十分重要的意义。然而, 究竟有哪一些主要因素在影响同步发电机的无功-电压特性, 如何影响, 仍然是目前需要明确的问题。

自动调节励磁装置的设计与整定调试都是影响其发挥最佳调节效果的关键环节。只有在明确其基本功能, 即明确目标的情况下方能作出正确的设计与调试。因此, 必须分析自动

调节励磁装置在整定同步发电机无功-电压特性中的作用。

当自动调节部分退出工作需视励磁电流恒定时,发电机具有怎样的无功-电压曲线?影响它的主要因素是什么?

本文将针对上述问题作出如下分析。

### 1 自动调节励磁的作用

图1示出同步发电机的励磁系统及发电机与系统的连接关系。

以隐极式汽轮发电机为例,稳态运行向量图示于图2<sup>[1]</sup>。图中P-Q坐标系的原点位于 $\dot{U}_G$ 终端, $\dot{E}_r$ 在[P]轴上投影代表发电机输出有功功率 $P_G$ ,在[Q]轴上投影代表无功功率 $Q_G$ 。

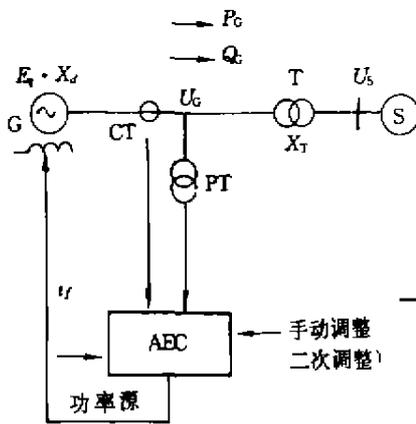


图1 同步发电机的励磁系统

G——发电机,T——升压变压器,S——系统;  
CT——电流互感器,PT——电压互感器;  
 $P_G, Q_G$ ——发电机输出有功功率及无功功率;  
 $U_S$ ——系统电压,  $X_T$ ——变压器电抗

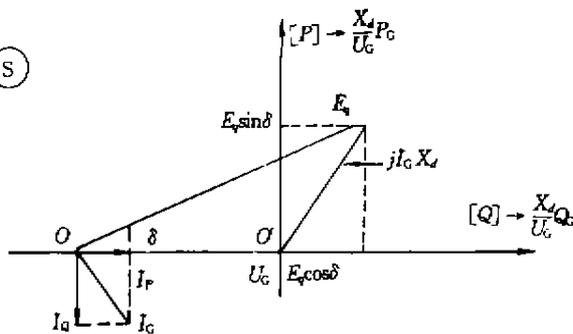


图2 同步发电机向量图

$i_G$ ——发电机电流;  
 $i_Q$ ——无功电流分量;  
 $i_P$ ——有功电流分量;  
 $\delta$ ——功率角

发电机输出有功及无功的标么值表达式

为:

$$P_G = \frac{E_r U_G}{X_d} \sin \delta \quad (1)$$

$$Q_G = \frac{E_r U_G}{X_d} \cos \delta - \frac{U_G^2}{X_d} \quad (2)$$

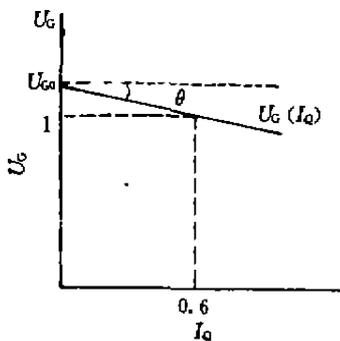


图3 由励磁调节器所整定的 $U_G-I_Q$ 特性

同步发电机的自动调节励磁装置最基本的功能之一是整定发电机的无功-电压特性,使发电机的端电压 $U_G$ 与无功 $I_Q$ 具有如图3的线性关系,图中数据用标么值表示。

表达为:

$$U_0 = U_{00} - K_r I_Q \quad (3)$$

式中  $U_{00}$ ——给定电压,由二次调整给定;

$K_r = \tan\theta$ ——调差系数,一般整定标么值调差系数为 0.08 左右(以发电机额定电压和额定容量为基准时)。

式(3)两端同乘以  $U_0$  移项后可得

$$Q_0 = \frac{U_{00}U_0}{K_r} - \frac{U_0^2}{K_r} = \frac{U_0}{K_r}(U_{00} - U_0) \quad (4)$$

这时发电机的无功-电压特性如图 4 所示。

按  $U_{00} \approx 1.05$  发电机实际运行区间为  $Q_0-U_0$  曲线的下降段(实线部分),比较(2)、(4)两式,可见自动调节励磁装置对同步电势  $E_s$  及同步电抗  $X_s$  实施的等效代换作用:

1) 用  $U_{00}$  代换同步电势在端电压方向上的投影  $E_s \cos\delta$ , 即对由  $U_{00}$  的给定实施对  $E_s \cos\delta$  的给定;

2) 用  $K_r$  代换同步电抗  $X_s$ , 即由对调差系数  $K_r$  的整定改变发电机的等效电抗。

一般同步发电机  $X_s = 0.7 \sim 2$ , 励磁调节器整定  $K_r = 0.08$ , 其作用相当于减小了发电机的同步电抗。

$U_{00}$  由运行人员或上级调节装置操作二次调整部件给定,由(4)式可知,在发电机端电压  $U_0$  恒定情况下,给定  $U_{00}$  即给定了发电机的无功输出  $Q_0$ , 不再受有功  $P_0$  调节的影响。

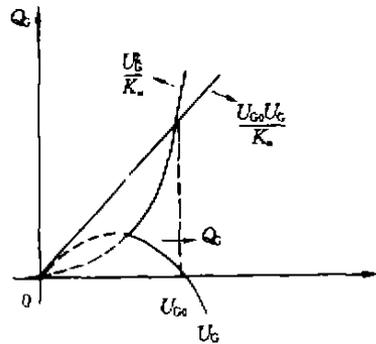


图 4 发电机的无功-电压特性(有 AEC)

## 2 同步电抗的影响

当电网运行状态发生变化或变压器分接头的调整引起发电机端电压变化时,发电机输出无功将发生变化,一般认为端电压  $U_0$  下降将使输出无功  $Q_0$  单调上升(或单调下降)。实际上两者变化的相依关系与励磁调节器的自动部分投入与否有关,当自动不投入时与发电机的同步电抗  $X_s$  有关。

### 2.1 自动部分投入

自动部分投入时,由于对  $E_s \cos\delta$  及  $X_s$  实施了代换,因此,端电压变化对无功输出的影响与  $X_s$  无关,由式(4)可得  $Q_0$  对  $U_0$  的导数为:

$$\frac{dQ_0}{dU_0} = \frac{1}{K_r}(U_{00} - 2U_0) \quad (5)$$

见图3. 假定发电机额定状态下:  $J_0 = 0.6$  (即  $\cos\varphi = 0.8$ ),  $U_c = 1$ . 当励磁调节器整定发电机调差系数  $K_t = 0.08$  时, 其给定电压  $U_{c0} = U_c + K_t J_0 = 1 + 0.08 \times 0.6 \approx 1.05$ , 显然  $U_{c0} < 2U_c$ , 当自动调励投入时, 发电机输出无功随端电压下降单调增加.

## 2.2 自动部分不投入

自动部分不投入时可视转子电流不变, 即  $i_f = \text{const}$ , 因而有  $E_f = \text{const}$ . 假定发电机输出有功  $P_0 = \text{const}$ , 由式(2)得出无功输出对端电压的导数为:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_0}{dU_0} &= \frac{E_f}{X_d} \cos\delta - \frac{E_f U_0}{X_d} \sin\delta \frac{d\delta}{dU_0} - \frac{2U_0}{X_d} \\ &= \frac{E_f}{X_d} \cos\delta - P_0 \frac{d\delta}{dU_0} - \frac{2U_0}{X_d} \end{aligned} \quad (6)$$

由(6)式可见, 有功  $P_0$  对无功  $Q_0$  的影响.

值得注意的是: 由(1)式可以看出,  $\delta$  是  $U_0$  的函数, 因此(6)式中出现第2项并含有因子  $\frac{d\delta}{dU_0}$ , 由(1)式可以得出:

$$\frac{d\delta}{dU_0} = \frac{-1}{\sqrt{1 - \left(\frac{X_d P_0}{E_f U_0}\right)^2}} \cdot \frac{X_d P_0}{E_f U_0^2} = \frac{-1}{\sqrt{\frac{1}{X_d^2} - \left(\frac{P_0}{E_f U_0}\right)^2}} \cdot \frac{P_0}{E_f U_0^2} \quad (7)$$

(6)式反映出  $X_d$  对电机无功-电压特性的影响.

当发电机运行于额定电压点时, 将  $U_0 = 1$  代入(6)式, 得

$$\begin{aligned} \frac{dQ_0}{dU_0} &= \frac{E_f \times 1}{X_d} \cos\delta - P_0 \frac{d\delta}{dU_0} - \frac{2 \times 1}{X_d} \\ &= Q_0 - P_0 \frac{d\delta}{dU_0} - \frac{1}{X_d} \end{aligned} \quad (8)$$

由式(1)、(2)确定  $Q_0-U_0$  曲线向下开口<sup>[2]</sup>, 假定  $Q_0 = 0.6, P_0 = 0.8, U_0 = 1, X_d = 1$ . 由图2算出  $E_f = 1.789$  ( $\delta = 26.57^\circ$ ) 代入(7)式, 得  $\frac{d\delta}{dU_0} = -0.5$ , 然后代入(8)式, 求出  $\frac{dQ_0}{dU_0} = 0.6 + 0.8 \times 0.5 - 1 = 0$ , 表明  $X_d = 1$  时, 额定运行点 ( $Q_0 = 0.6, P_0 = 0.8, U_0 = 1$ ) 正好是  $Q_0-U_0$  特性的顶点.

由(7)式可见,  $X_d$  的上升导致  $\frac{d\delta}{dU_0}$  减小, 这时(8)式中, 第2、3项绝对值均减小, 因此使  $\frac{dQ_0}{dU_0}$  增大, 由此可以得出自动调励不投入时, 同步电抗对同步电机无功-电压特性的影响, 如图5所示.

当发电机运行于额定状态(A点)  $Q_0 = 0.6, P_0 = 0.8, U_0 = 1$ ;

1) 当  $X_d = 1$  时, 该点即为  $Q_0-U_0$  特性线顶点,  $\left. \frac{dQ_0}{dU_0} \right|_A = 0$ ;

2) 当  $X_d > 1$  时, 该点有  $\frac{dQ_G}{dU_G} > 0, Q_G-U_G$

特性线顶点右移,  $\left. \frac{dQ_G}{dU_G} \right|_A > 0;$

3) 当  $X_d < 1$  时, 该点有  $\frac{dQ_G}{dU_G} < 0, Q_G-U_G$

特性线顶点左移,  $\left. \frac{dQ_G}{dU_G} \right|_A < 0.$

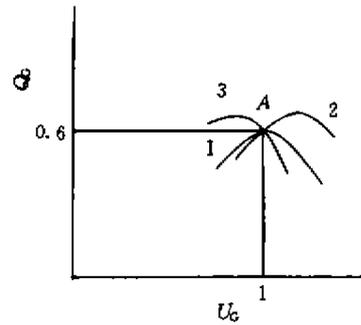


图 5 发电机的无功-电压特性(无 AEC)

1— $X_d = 1$ ; 2— $X_d > 1$ ; 3— $X_d < 1$

1) 整定同步发电机的无功-电压特性是自动调节励磁装置最基本的功能之一;

2) 自动调节励磁装置的作用可等效视为对发电机电势、电抗的代换;

3) 投入自动部分时, 同步发电机的无功输出随电压下降而单调增加;

4) 不投入自动部分时, 同步发电机的  $Q_G-U_G$  特性为一向下开口的曲线, 曲线的顶点位置与同步电抗有关;  $X_d$  增大时, 顶点右移;  $X_d$  减小时, 顶点左移。

### 参 考 文 献

- 1 陈珩. 电力系统稳态分析. 北京: 水利电力出版社, 1995. 217~218
- 2 何仰赞. 电力系统分析: (下). 武汉: 华中理工大学出版社, 1994. 60~66