

117 90 102

异步化汽轮发电机的双通道励磁控制

Dual-Passage Excitation Control of Asynchronized Turbogenerator

梁志翔
Liang Zhixiang

杨顺昌
Yang Shunchang

秦翼鸿
Qin Yihong

徐国禹
Xu Guoyu

(重庆大学电气工程系、重庆、630044)

TM311

摘 要 论述了异步化汽轮发电机励磁系统双通道励磁控制器的原理结构和基本模型,分析了各反馈项的控制作用,并确定了各反馈系数的符号。还提出了两种控制算法,通过仿真检验了其控制效果。

关键词 交流发电机 / 异步化汽轮发电机; 双通道励磁控制

中国图书资料分类法分类号 TM311

ABSTRACT In this paper, the principle structure and basic model of dual-passage excitation controller of asynchronized turbogenerator are presented. The control effect of each feedback term are analyzed. Two improved control schemes are proposed and testified by simulation investigation.

KEYWORDS alternative generator / asynchronized turbogenerator; dual-passage excitation control

0 引 言

近年来,超高压电网因无功过剩引起的持续工频过电压及远距离输电系统稳定问题受到了国内外电力工作者的广泛关注。在解决这一问题的各种有效途径中,在电站安装异步化同步发电机具有良好的技术经济性^[1]。

异步化汽轮发电机的运行特性显著地优于同步汽轮发电机^[2],而双通道励磁控制则是保证其基本运行和稳定性的关键。双通道励磁控制的基本思想是:根据电机稳态运行时,有功功率和无功功率与励磁电流同步轴系分量之间的对应关系^[3],在有功功率调节通道中引入动态过程中与有功功率有关的量即转子位置角、转差、电磁功率的变化量和两轴励磁电流的偏差等反馈量,在无功功率调节通道引入机端电压或机端无功的变化量作反馈量,通过控制励磁电压的同步轴系分量进而控制励磁电流在同步轴系上的投影来实现对电机的有功功率和无功功率(或电压)的分别控制。

文献[2]对双通道励磁控制进行了原则性讨论,但对各反馈项的控制作用等尚无深入的分析,且未给出具体的控制算法。为此,将首先论述双通道励磁控制器的原理结构和基本模

• 收文日期 1994-06-24

国家教委博士点基金资助

型, 然后通过分析双通道调节器中各反馈项的控制作用确定反馈系数的符号, 最后提出两种控制算法, 通过仿真考察其控制效果。

1 控制器的原理结构和基本模型

异步化汽轮发电机励磁控制系统及双通道励磁控制器的结构框图分别如图 1 和图 2 所示。控制系统由异步化汽轮发电机本体、可控硅励磁装置和励磁控制器三部分组成。双通道励磁控制器包括状态量检测、有功和无功两个调节通道的控制量运算及坐标变换三个环节。来自异步化汽轮发电机定子电压、电流互感器、转子位置传感器和转子励磁电流传感器的信号经过数据采集电路进入励磁调节器, 经过状态量计算、控制量计算和坐标变换, 得到实际励磁电压 U_d 和 U_q , 再经放大驱动电路控制可控硅对发电机进行励磁。双通道励磁控制器可用微处理器或模拟电路实现。

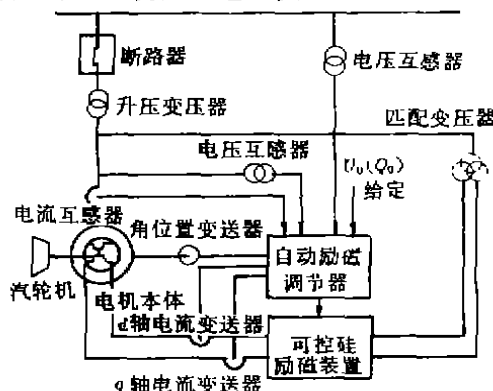


图 1 异步化汽轮发电机励磁控制系统

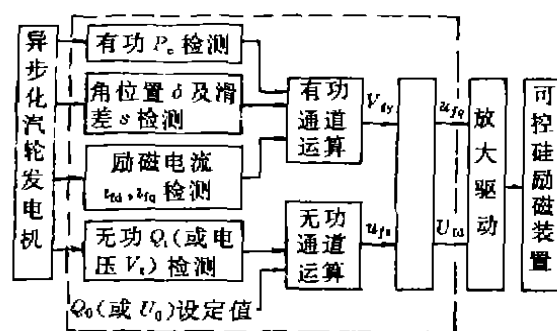


图 2 双通道励磁控制器的结构框图

双通道励磁控制的基本模型为:

$$U_{fd} = U_{fd0} + [K_P \Delta P_e + K_s \Delta s + K_\delta \Delta \delta + K_{if} f(\Delta i_f)] \frac{r_f}{X_{ad}} \quad (1)$$

$$U_{fq} = U_{fq0} + K_i \Delta U_i \frac{r_f}{X_{ad}} \quad \text{或} \quad U_{fq} = U_{fq0} + K_q \Delta Q_e \frac{r_f}{X_{ad}} \quad (2)$$

式中, U_{fd0} 和 U_{fq0} 为跟随项, 与发电机运行的初始状态和当前运行状态有关, 具有跟踪运行点变化的作用; ΔP_e 、 ΔU_i 、 Δs 和 $\Delta \delta$ 分别为发电机有功功率、机端电压、转差和转子位置角的变化量; $K_{if}(f)(\Delta i_f)$ 为转子励磁电流调平项, 其中的 Δi_f 为转子两相绕组励磁电流之差; $\frac{r_f}{X_{ad}}$ 为尺度因子, 采用该因子时, 各反馈项具有空载励磁电压的量纲。以上控制模型可用不同的控制算法实现。

2 各反馈项的控制作用分析

采用小偏差分析可导出双通道励磁控制时异步化汽轮发电机的电磁转矩和机端电压的小偏差变化量与各反馈量之间的关系, 通过分析得出各反馈项的控制作用, 进而确定反馈系

数的符号。

2.1 电磁转矩和机端电压小偏差变化量与各反馈量之间的关系

设异步化汽轮发电机经一外电抗 X_w 与无穷大系统相联,如图 3 所示;同步坐标 Y 轴与无穷大系统母线电压相量重合,与转子 q 轴之间的夹角为 δ ,机端电压相量 U_i 与转子 q 轴之间的夹角为 δ_i ,如图 4 所示。

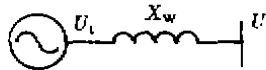


图 3 单机无穷大系统等值图

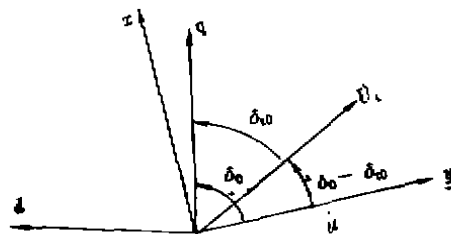


图 4 δ_0 及 δ_i 的含义

忽略定子电阻及定子侧电磁暂态过程,不计转子本体的阻尼效应,则可以导出异步化汽轮发电机电磁功率和机端电压的小偏差变化量为:

$$\Delta P_e = \frac{1}{1 + T_f p} [K_{\tau s} \Delta s + K_{\tau i} \Delta U_{fi}] \quad (3)$$

$$\Delta U_i = \frac{1}{1 + T_f p} [K_{is} \Delta s + K_{i\delta} \Delta U_{fi} + K_{i\delta} \Delta U_{fi}] \quad (4)$$

式中: $T_f = \frac{X_f}{r_f}$, $T_f = \frac{X_f}{r_f}$, $X_f = X_f - \frac{X_{af}^2}{X_E}$, $K_{\tau s} = T_f \frac{U^2}{X_E} + T_f Q_{e0}$, $K_{\tau i} = -\frac{U X_{af}}{r_f X_E}$, $K_{is} = -\frac{U X}{r_f X_E} \left[X_f - \frac{X_{af}^2}{X} \right] \sin(\delta_0 - \delta_{e0})$, $K_{i\delta} = -\frac{X_w X_{af}}{r_f X_E} \sin(\delta_0 - \delta_{e0})$, $K_{i\delta} = \frac{X_w X_{af}}{r_f X_E} \cos(\delta_0 - \delta_{e0})$.

设只考虑自衡问题,认为式(1)和(2)中的 $U_{fi0} = U_{f0}$, $U_{fi0} = U_{f0}$, 保持前一稳态值,则有:

$$\Delta U_{fi} = [K_p \Delta P_e + K_s \Delta s + K_\delta \Delta \delta + K_{\delta f} f(\Delta i_f)] \frac{T_f}{X_{af}} \quad (5)$$

$$\Delta U_{fi} = K_i \Delta U_i \frac{T_f}{X_{af}} \quad (6)$$

将以上两式代入式(3)和式(4),经整理可得双通道控制时发电机有功功率和机端电压的小偏差变化形式为:

$$\Delta P_e = \frac{1}{1 + \alpha_r p} \frac{\alpha_r}{T_f} [K_{\tau s} \Delta s + K_{\tau \delta} \Delta \delta + K_{\tau f} f(\Delta i_f)] \quad (7)$$

$$\Delta U_i = \frac{1}{1 + \alpha_i p} \frac{\alpha_i}{T_f} [K_{is} \Delta s + K_{i\delta} \Delta \delta + K_{i f} f(\Delta i_f)] \quad (8)$$

式中 $\alpha_r = \frac{T_f}{1 + K_p \frac{T_f}{X_E}}$, $K_{\tau s} = K_{\tau s} - K_s \frac{U}{X_E} = T_f Q_{e0} + T_f \frac{U^2}{X_E} - K_s \frac{U}{X_E}$, $K_{\tau \delta} = -K_\delta \frac{U}{X_E}$

$$\alpha_t = \frac{T'_f}{1 - K_{t_s} K_{t_r} \frac{r_f}{X_{sf}}} = \frac{T'_f}{1 - K_t \frac{X_w}{X_x} \cos(\delta_0 - \delta_{t0})},$$

$$K_{t_r}^* = K_{t_r} K_p \frac{r_f}{X_{sf}} = -K_p \frac{X_w}{X_x} \sin(\delta_0 - \delta_{t0})$$

$$K_{t_s}^* = K_{t_s} K_s \frac{r_f}{X_{sf}} + K_{t_s} = -\frac{UX}{r_f X_x} \left[X_f - \frac{X_{sf}^2}{X} \right] \sin(\delta_0 - \delta_{t0}) - K_s \frac{X_w}{X_x} \sin(\delta_0 - \delta_{t0}),$$

$$K_{t_d}^* = K_d K_{t_r} \frac{r_f}{X_{sf}} = -K_d \frac{X_w}{X_x} \sin(\delta_0 - \delta_{t0})$$

$$K_{t_v}^* = -K_{t_v} \frac{U}{X_x}, K_{t_i}^* = -K_{t_v} \frac{X_w}{X_x} \sin(\delta_0 - \delta_{t0})$$

2.2 有功调节通道分析

有功调节通道的控制决定异步化汽轮发电机的机电稳定性,分析式(7)可知:

1) 有功功率(电磁转矩)的变化与机端电压的变化和无功功率调节通道的控制规律无关,其过渡过程的时间常数取决于电机和线路的参数及有功反馈系数 K_p 。发电机稳定运行的条件是时间常数 $\alpha_T > 0$,即 $K_p > -\frac{T'_f}{X_x}$, K_p 取较大的正值可大大缩短有功功率变化的过渡过程;

2) 异步化汽轮发电机具有线性的静态角特性,其斜率取决于转子位置角反馈系数 K_s ,为保证发电机的同步运行稳定性,应取负值,即 $K_s < 0$;

3) 转差反馈有助于提高发电机的异步转矩,增加动态过程的阻尼,转差反馈应提供正阻尼,因而应取 $K_s < 0$;

4) 转子两相绕组中励磁电流的调平是通过引入励磁电流偏差反馈使电磁功率发生变化进而校正转子角位置来实现的。比例系数 K_{t_v} 的符号与电流偏差 Δi_r 的形式有关。通过对电流调平物理过程的分析可知:若取 $\Delta i_r = i_r - i_{rn}$,则电流偏差反馈系数应取负值,即 $K_{t_v} < 0$ 。转子电流的调平应是一缓慢的过程,不对发电机的稳定性和动态品质有明显的影响,因而 K_{t_v} 的值应远小于有功调节通道的其它反馈系数。

由以上分析可知,有功调节通道的 ΔP 和 $\Delta \delta$ 反馈对异步化汽轮发电机的机电稳定性起主要作用,有功通道的设计关键是确定反馈系数 K_p 和 K_s 。

2.3 电压(无功)调节通道分析

无功调节通道的控制决定异步化汽轮发电机的电压稳定性,分析(5)式可知:

1) 机端电压变化的时间常数取决于 α_v ,保证发电机电压稳定的条件是 $\alpha_v > 0$,而 α_v 的值不仅与电压反馈系数 K_v 有关,也与发电机的运行状态和线路参数有关,对于大多数运行工况, $\cos(\delta_0 - \delta_{t0}) > 0$,因而应取 $K_v < 0$, K_v 绝对值较大有利于提高发电机的电压稳定性,缩短电压变化的过渡过程时间;

2) 机端电压的变化受有功功率变化和转子角位置变化的影响,表明如果在(2)式的无功调节通道控制模型中 U_d 采用固定值,当负荷发生变化时,机端电压(或无功)的稳态值将

不能保持给定值,从减小过渡过程中有功调节通道对电压变化影响的角度看,应尽量减少 α ,即取较大的 K_v 值。

3 控制算法

在工程实际中,发电机的有功、无功(电压)运行点常常会发生变化,为了跟踪发电机稳态运行点的变化,式(1)和(2)中的 U_{fd0} 和 U_{fd} 不能取定值,而与发电机运行的初始状态和当前运行状态有关。从自动控制理论的观点看,这类跟踪问题可采用多种控制算法解决。经分析研究,特提出以下两种控制算法。

算法一(增量型)

其形式为:

$$U_{fr} = U_{fr0} + [K_p(P_r - P_{r0}) + K_s(s - s_0) + K_d(\delta - \delta_0) + K_{if}(i_{fr} - i_{fr0})] \frac{T_f}{X_{ef}} \quad (9)$$

$$U_{fr} = U_{fr0} + K_v(U_i - U_r) \frac{T_f}{X_{ef}} \quad (10)$$

式中: U_r 为设定值, P_0, s_0, δ_0 和 U_{r0} 均为前一次的采样值; U_{fr0} 为前一次的计算值; $U_{fr0} = -U_{fd0} \sin \delta + U_{fd0} \cos \delta$, 为当前时刻励磁电压在同步坐标轴上的投影; K_v 为电压反馈比例项的反馈系数。

算法二(位置型)

该算法无功(电压)调节通道的计算与算法一样同,有功功率调节通道采用下面的控制算法:

$$U_{fr} = U_{fr0} + \left[K_p(P_r - P_{r0}) + K_s s + K_d(\delta - \delta_0) + K_{if} \frac{i_{fr} - i_{fr0}}{1 + T_{if} p} \right] \frac{T_f}{X_{ef}} \quad (11)$$

式中, $U_{fr0} = U_{fd0} P_r / P_{r0}$; $U_{fr0}, P_{r0}, \delta_0$ 均为前一稳态时的值; T_{if} 为电流调平惯性环节的时间常数。

上述两个算法的无功调节通道中,采用了与当前时刻运行状态有关的 U_{fr0} 来计算控制量 U_{fr} 。在有功功率调节通道中,算法一和算法二分别采用前一次的控制量计算值 U_{fr0} 和与当前时刻运行状态有关的 U_{fr0} 来计算控制量 U_{fr} ,以跟踪有功功率运行点的变化,为了在工程上保证稳态时两个励磁绕组的励磁电流相等,两种方案均在有功调节通道中采用实际励磁电流(而不是励磁电压)的偏差为反馈量,不同之处在于:算法一采用电流偏差比例环节,而算法二则采用比例惯性环节。

从工程实现上看,算法一只适用于数字控制系统,算法二既适用于模拟控制系统也适用于数字控制系统。当励磁系统采用计算机控制时,两种算法都是可行的,此时的差别在于:算法一采用前后两次采样值之差作为反馈量,要求状态量有较高的检测精度,而算法二取当前值相对于前一稳态值的变化量作为反馈量,对测量精度的要求低于算法一。

4 仿真结果

为考察本文提出的两种双通道励磁控制算法的控制效果,对图 5 所示系统进行了仿真研究。发电机容量为 200 MW,线路电压等级为 330 kV,线路长 150 km。发电机及系统参数与文献[3]相同。

发电机的初始状态为吸收无功额定运行,即有功功率 $P=0.85$ 标么值,无功功率 $Q=-0.527$ 标么值。无功通道采用高压母线侧电压反馈。仿真内容为:

1) 有功调节:将发电机输出的有功功率 P_e 从 0.85 调至 0.7(标么值),保持高压母线侧电压不变;

2) 电压调节:将高压母线侧电压 U_H 由 0.983 调至 1。

仿真结果如图 6,图 7 所示。图中给出了发电机有功功率 P_e 、转差 s 和转子位置角 δ 及高压母线侧电压和励磁电流的变化曲线。图中各量除 δ 外均采用标么值。

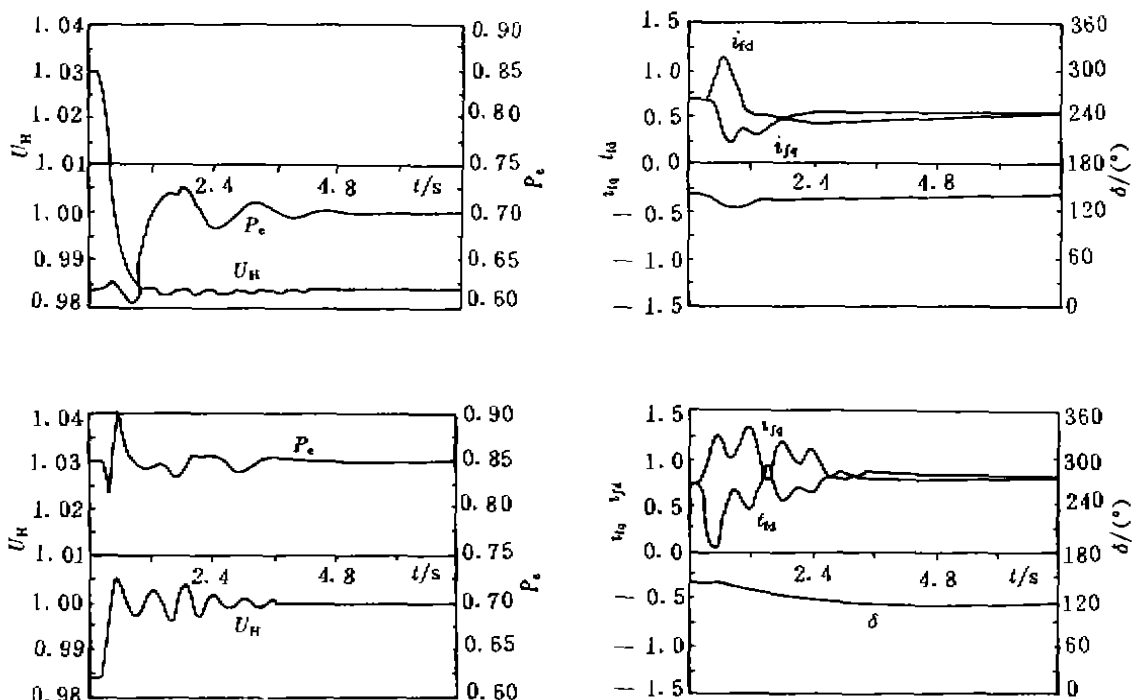


图 6 采用本文控制算法一时的仿真结果

分析图 6,图 7 的曲线可知:本文的两种算法均能满足对异步化汽轮发电机的励磁控制要求,实现有功、无功(电压)独立调节,第二种算法(位置型)的控制效果比第一种算法(增量型)好。

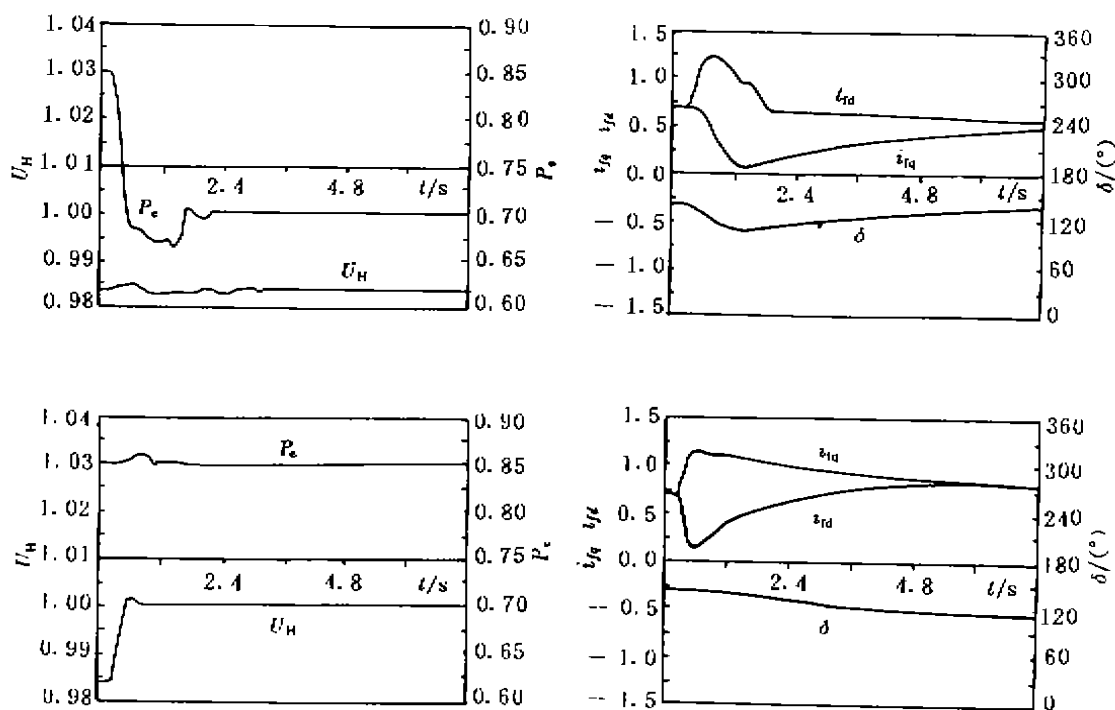


图 7 采用本文控制算法二时的仿真结果

5 结 论

由上述研究可得出以下结论:

- 1) 双通道励磁控制器各反馈系数的取值应满足: $K_i > 0, K_s < 0, K_e < 0, K_r < 0, K_t < 0$;
- 2) 确定有功调节通道的反馈系数 K_i 和 K_s 及无功调节通道的反馈系数 K_e 是双通道励磁控制器设计的关键, 关系到异步化汽轮发电机运行的机电稳定性和电压稳定性;
- 3) 本文提出的两种控制算法均能满足异步化汽轮发电机的励磁控制要求, 其中第二种算法的控制效果最好。

有关异步化汽轮发电机双通道励磁系统的模拟实验研究将另文发表。

参 考 文 献

- 1 Пабунец П. А., Похматов А. П., Шакарин Ю. Г. РЕЖИМ РАБОТЫ, СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИКИ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ. Киев, Изд. АН УССР, 1987. 1~43
- 2 Мамиконянц П. Г., Шакарин Ю. Г. ИДР. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ. Киев, ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ АН УССР, 1989. 1~42
- 3 梁志翔, 杨顺昌, 秦翼鸿, 徐国禹. 异步化发电机有功和无功调节特性的仿真研究. 重庆大学学报, 1994, 17(6), 36~42