

② 异步化汽轮发电机励磁系统的一种控制策略

7-12

The Control Strategy for the Excitation System of Asynchronized Turbogenerators

TM 311

何耀三
He Yaosan

林景栋
Lin Jingdong

唐卓尧
Tang Zhuoyao

童明儒
Tong Mingru

(重庆大学电子信息工程学院, 重庆, 630044)

A 摘要 分析了异步化汽轮发电机的励磁控制原理和运行特性, 提出状态辨识适应式跟随迭代控制策略。从工程实现的可行性出发, 分析并指出构成异步化汽轮发电机双通道自动励磁控制系统应考虑的因素, 给出了异步化汽轮发电机励磁控制系统的原理结构图。

关键词 异步化汽轮发电机; 励磁控制; 状态辨识 控制系统,

中国图书资料分类法分类号 TM761.11

ABSTRACT In this paper, the excitation principle and operating characteristics of asynchronized turbogenerators are analyzed, and adaptive tracing iterative control strategy based on state identification is proposed. In order to apply this control scheme to practice engineering, some primary elements are analyzed and presented for constituting dual-channel automatic excitation control system of asynchronized turbogenerators. Finally, the paper presents the principle structure charts about excitation control system of asynchronized turbogenerators.

KEYWORDS asynchronized turbogenerators; excitation control; state identification

0 引 言

新近出现的异步化汽轮发电机(ASTG)的运行特性与传统同步发电机的运行特性有极大的差异。ASTG的电磁转矩(有功)和电压(无功)能独立调控,因而,其静态稳定没有限制,能大量吸收无功并在此运行方式下保持高水平的动态稳定。此外,ASTG还可实现无功运行方式的快速调控。显然,采用大容量ASTG,对解决超高压大容量电站在线路负荷低于其自然功率时出现无功过剩所引起的持续工频过电压、改善系统中无功功率的结构、提高电力系统的稳定性和可靠性、降低事故备用等问题,展示了一条新的途径^{[1][2]}。

笔者针对转子具有两相正交励磁绕组、按同步方式运行的ASTG,通过对ASTG的励磁控制原理及其自动励磁控制系统(AECS)的分析,提出适应ASTG励磁控制系统的一种控制策略,给出ASTG双通道自动励磁控制的原理结构图。

1 ASTG 的数学模型

ASTG 由交流电机本体、励磁电源和自动励磁控制器组成。与传统同步发电机相比,它们的定子基本相同,电机本体结构的主要差异是 ASTG 的转子具有两相励磁绕组。

ASTG 的电压方程采用同步旋转 X、Y 坐标系描述。从 ASTG 电机本体的实际模型出发,通过坐标变换,可以得到 ASTG 在同步旋转 X、Y 坐标轴系下的电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_{fx} \\ u_{fy} \\ u_{dx} \\ u_{dy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r + pX & X & pX_m & X_{af} & pX_{af} & X_{af} \\ -X & r + pX & -X_{af} & pX_{af} & -X_{af} & pX_{af} \\ pX_{af} & -SX_{af} & r_f + pX_f & -SX_f & pX_{af} & -SX_{af} \\ SX_{af} & pX_{af} & SX_f & r_f + pX_f & SX_{af} & pX_{af} \\ pX_{af} & -SX_{af} & pX_{af} & -SX_{af} & r_D + pX_D & -SX_D \\ SX_{af} & pX_{af} & SX_{af} & pX_{af} & SX_D & r_D + pX_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \\ i_{fx} \\ i_{fy} \\ i_{dx} \\ i_{dy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 r, r_f, r_D 分别为定子绕组、转子励磁绕组、等效阻尼绕组电阻;

X, X_f, X_D 分别为定子绕组、转子励磁绕组、等效阻尼绕组电抗;

X_m 为定转子互感抗, $p = d/dt$ 。

设同步角速度为 ω_1 , 取转子超同步速的转差率 S 为正, 转子角速度 $\omega_r = (1 + S)\omega_1$, 转子运动方程为:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = \omega_{1f} \frac{dS}{dt} = M_r - M_e \quad (2)$$

设角速度的基值为同步角速度, 即 $\omega_0 = 2\pi f_1$, 时间的基值为 $1/\omega_0$, 转动惯量 J 用弧度表示, 转矩、功率均用标么值, 则式(2)可改写为:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T_j} (M_r - M_e) = \frac{1}{T_j} (P_r - P) \quad (3)$$

取标么值, 有转差 $S = d\delta/dt$, 则 ASTG 的转子运动方程可描述为:

$$\begin{bmatrix} \dot{S} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (M_r - M_e) / T_j \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 δ 为转子位置角;

T_j 为转子机电时间常数;

M_r 为汽轮机的转矩;

M_e 为 ASTG 的电磁转矩。

2 ASTG 的励磁控制原理

2.1 ASTG 的一般化电机模型

设 ASTG 的定子电压是幅值为 U_m 的三相对称电压, 转子励磁绕组电压分别为 $U_{\mu}, U_{f\mu}$ 。将它们变换到同步旋转 X、Y 坐标轴系下, 取参考电压相量与 Y 轴重合并定义转子 q 轴与参考电压相量之间的夹角 δ 为转子位置角, 则 ASTG 在同步旋转 X、Y 坐标轴系下的一般化电机模型如图 1 所示。图中, θ 为功率角, γ 为 q 轴与 I_f 的夹角, 转子位置角 $\delta = 90^\circ - \gamma + \theta$ 。

2.2 ASTG 的励磁控制原理

ASTG 的励磁控制原理可基于其稳态运行方式进行分析。为简化分析,忽略定子回路损耗和转子阻尼效应,取图 1 中的 Y 轴为实轴, X 轴为虚轴,则 ASTG 电压方程的相量形式可描述如下:

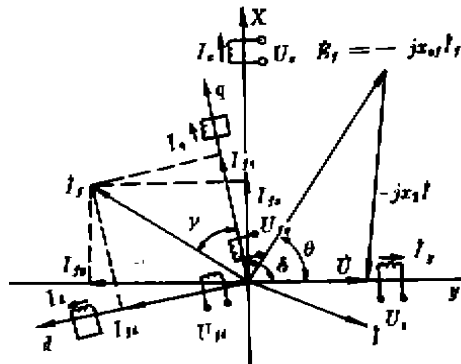


图 1 ASTG 的一般化电机模型

如下:

$$-U = j(X_s I + X_{\sigma} I_f) \quad (5)$$

$$U_f = r_f I_f - jS(X_{\sigma} I + X_f I_f) \quad (6)$$

上两式中: X_s 为定子回路全电抗, S 为转差率。

将式(5)在同步坐标 X, Y 轴上投影,有:

$$-U = -X_s I_x - X_{\sigma} I_{fx} \quad (7)$$

$$0 = X_s I_y + X_{\sigma} I_{fy}$$

由上式可得:

$$I_x = U / X_s - (X_{\sigma} / X_s) I_{fx} \quad (8)$$

$$I_y = - (X_{\sigma} / X_s) I_{fy}$$

按发电机的功率定义,当采用标么值时:

$$M_e = P = R_e [UI^*] = UI_f = - (UX_{\sigma} / X_s) I_{fx} \quad (9)$$

$$Q = I_m [UI^*] = -UI_x = (UX_{\sigma} / X_s) I_{fy} - U^2 / X_s \quad (10)$$

上两式中, P, Q 分别为发电机的有功功率、无功功率。

转子以同步频率旋转时,在 X, Y 轴系中, I_{fx}, I_{fy} 与转子 d, q 轴励磁绕组电流 I_d, I_q 之间存在以下关系:

$$I_{fx} = I_d \cos \delta + I_q \sin \delta \quad (11)$$

$$I_{fy} = I_d \sin \delta - I_q \cos \delta$$

综上推导,从式(9)和式(10)可看出,ASTG 的有功(电磁转矩)与 I_{fx} 相关联,无功(电压)与 I_{fy} 相关联。ASTG 的励磁电流 I_d, I_q 的大小和方向均可分别受控改变,因而使 ASTG 的合成励磁磁势 I_f 的幅值和空间位置的改变可以只由 I_d, I_q 的大小和方向决定而与转子位置角 δ 无关。这一特点表明,ASTG 的转子位置角 δ 与功率角 θ 已是分开的两个独立的状态量。综合式(9),式(10)和式(11)即可明显看出:ASTG 的励磁控制是通过分别对 I_d, I_q 的大小甚至方向的调控,按式(11)描述的坐标变换关系,实现对 I_f 在 X, Y 轴上的投影 I_{fx}, I_{fy} 的独立控制,进而实现对 ASTG 的电压(无功)和电磁转矩(有功)的独立控制。这种励磁控制可称为具有双通道(有功、无功通道)独立控制结构的励磁控制。

3 ASTG 双通道自动励磁控制系统的控制策略

基于 ASTG 励磁控制原理,ASTG 的励磁控制简化原理图如图 2 所示。

ASTG 的双通道 AECS 的电压(无功)调控通道的功能与传统同步发电机的自动励磁控制器无根本性区别,可视为一单输入、单输出控制器,其控制目标量为发电机电压(或无功)给定 U^* (或 Q^*),反馈量主要是 U_s (或 Q) 及其变化状态。与传统同步发电机自动励磁控制器相比,差别仅是其输出 I_{fy} 的控制作用需与电磁转矩(有功)控制器的输出 I_{fx} 一起,经坐标变

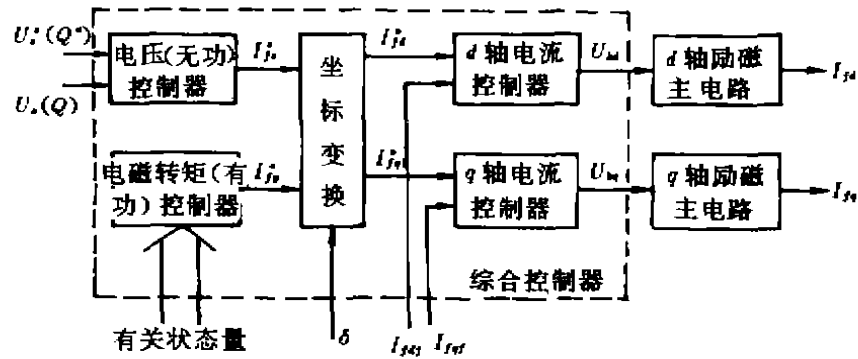


图2 ASTG双通道励磁控制的简化原理框图

换,通过改变 I_{fd} 、 I_{fq} 才能得以实现。电压(无功)控制器的基本控制规律可用下式描述:

$$I_{fd}^* = I_{fd}^{*n-1} + V_v \cdot K_v \Delta U_v$$

或

$$I_{fd}^* = I_{fd}^{*n-1} + V_q K_q \Delta Q_v \quad (12)$$

式中 K_v 、 K_q 为比例系数; V_v 、 V_q 为比例校正因子; $\Delta U_v = U_v^* - U_v$; $\Delta Q_v = Q_v^* - Q_v$ 。

电磁转矩(有功)控制器是异步化汽轮发电机 AECS 中的关键环节,其控制性能的优劣直接影响到 ASTG 的运行特性。

AECS 的电磁转矩(有功)调控通道的功能应是实现有功跟随,转子机械运动稳定以及以均衡转子两励磁绕组电流为目的的转子位置校正的调控。因此,它应是一个多输入、单输出的组合式控制器,其反馈量应包括与实现上述控制功能相关的有关状态变量;有功 P 、转子位置角 δ 、转差率 S 和两励磁绕组电流的差值 $\Delta I = I_{fd} - I_{fq}$ 。由这些输入状态量形成的电磁转矩(有功)控制器的输出,可用基本形式描述如下:

$$I_{fd}^* = I_{fd}^{*n} + I_{fd}^{*s} + I_{fd}^{*e} + I_{fd}^{*\Delta I} \quad (13)$$

ASTG 对其双通道 AECS 总的要求是:在 ASTG 各种可能的有功、无功运行方式下,均能实施有效的、独立调控电磁转矩(有功)和电压(无功)的控制。影响这一调控作用的因素,不仅涉及到电磁转矩(有功)控制器和电压(无功)控制器的设计,也涉及到 $S \neq 0$ 时坐标变换的实时性和非线性问题、 I_{fd}^* 与 I_{fq}^* 的交叉耦合问题以及励磁回路较大的电磁时间常数问题。此外,还存在着 ASTG 随负载电流、负载功率因数不同而变且影响较大的电枢反作用,不同状态时 ASTG 自身出现的阻尼作用以及暂态过程中电机参数及输电线参数的突变等一系列因素。因此,电磁转矩(有功)控制器的设计,其控制策略及控制规律的确定不仅重要而且不是一个单一的问题,必须综合考虑 AECS 的总体合成控制效果,即是说,应将 AECS 的各控制器及坐标变换等环节视为一多输入、多输出的综合控制器(如图 2 所示)。考虑此类系统的特点及工程实现的可行性,对 ASTG 的 AECS,本文提出的控制策略是:状态辨识适应式跟随迭代控制。AECS 的综合控制器的总体合成控制目标是:维持 ASTG 的电压(或无功)在给定水平的同时,使 ASTG 的比整步功率 $P_{Amp} = \Delta P / \Delta \theta$ (或比整步转矩 $M_{Amp} = \Delta M_e / \Delta \theta$) 与功率角 θ 值的大小无关,且具有基本上恒定的、足够大的正值。由此,即可确保 ASTG 具有不存在最小励磁电流限制;在深度吸收无功功率方式下,对静态稳定没有限制并在此运行方式下保持高水平的动态稳定以及能实现对无功(电压)调控的快速动作等特点。

显然,ASTG 的 P_{Amp} (或 M_{Amp}) 与传统同步发电机的比整步功率 P_{mp} (或比整步转矩 M_{mp}) 完全不同。两者的基本情况,可用图 3 表示。由图可见: P_r 相同且保持不变,传统同步发电机的 P_{mp} 随 θ 而变, $\theta = 90^\circ$ 时, $P_{mp} = 0$, $\theta > 90^\circ$ 时, $P_{mp} < 0$ 。而 ASTG 的 P_{Amp} 在不同的 θ 值时

则有保持相同正值的特性。显见, 足够大的 $P_{ASTG}(M_{ASTG})$ 正值, 可彻底解决 ASTG 的静态稳定问题和提高 ASTG 的动态稳定水平。

前已述及, 与 AECS 的电磁转矩(有功)控制器相关的主要状态量是 P 、 δ 、 s 和 ΔI , 因而它包含四个调控项, 如式(13)所示。现分别分析如下。

有功调控项 $I_{P\delta}^*$ 的主要作用是: 维持有功(转矩)平衡。在正常操作汽轮机的 $P_r(M_r)$, 改变 ASTG 的有功运行方式时, 使 ASTG 具有良好的跟随性能, 在运行中出现来自汽轮机或 ASTG 输出的有功扰动时, 使 ASTG 具有良好的抗扰性能。本项所需辨识的主要状态量为 ASTG 输出的有功功率 P 和状态量 δ , 以便确定 $I_{P\delta}^*$ 的调控强度和调控方向。此外, 还应考虑 P 的变化率即 $\Delta P/\Delta t$ 的大小。从工程实现的可行性考虑, 将 $\Delta P/\Delta t$ 分为超线性、线性、次线性三种。

引入 $\Delta P/\Delta t$ 对本项调控强度的校正, 具有超前校正特性, 有利于动态性能的提高。

转子位置角调控项 I_{δ}^* 的作用是: 在稳态运行时, 限制转差范围, 保证转子以同步转速旋转; 在校正转子位置的机电过程中, 保证转子机械运动的稳定性; 确保 ASTG 在吸收无功方式下运动时, 无静态稳定极限的限制并使 ASTG 保持有高的动态稳定水平。状态量 δ 的变化, 确切表征了转子运动状态, 因此, 本项的调控方向, 可直接由 $\Delta\delta$ 决定。确定 I_{δ}^* 调控强度的原则与 $I_{P\delta}^*$ 项相同。

转差调控项 I_s^* 的作用与 $I_{P\delta}^*$ 项具有相同的属性。它们的差异是: 转子摆动期, 即动能非平衡期, $s=0$ 时, δ 值存在最大偏移量, 即 $\Sigma\Delta\delta$ 为正或负的最大值。引入 I_s^* 项, 提供 Δs 的调控作用, 有利于抑制转子转速的不均匀度, 改善动态特性, 提高稳定储备。

式(13)的前述三项, 是电磁转矩(有功)控制器的关键调控项, 直接影响到 ASTG 的运行特性, 在分析其控制规律, 确定其调控方向后, 基于图 3 所示特性, 按传统同步发电机额定负载运行并选定一较小的 θ_n 值时所具有的 $P_m(M_m)$ 值, 作为 ASTG 初调时的 $P_{ASTG}(M_{ASTG})$ 值, 以任一 δ 值时均保持有此值为目标即可确定出关键调控项的合成调控强度。

电流偏差调控项 $I_{\Delta I}^*$ 的作用仅是均衡转子两相励磁绕组电流, 保证转子绕组发热均衡, 可见其控制目标量为确定值 $\Delta I = 0$ 。均流调控的这一目标是通过改变 ASTG 的电磁转矩, 进而改变转子位置角才能实现, 故均流调控又可称为转子位置角校正。值得注意的是, 由于 $\Delta I > 0$ 和 $\Delta I < 0$ 所需调控方向相反, 因而必然存在着均流调控方向与前述关键调控项的调控方向相同和相反两种情况。无疑, 当两者相反时, 均流调控项的作用, 对关键调控项而言便是起削弱作用的一种扰动。为了确保关键调控项应具有足够的调控强度而抑制这种扰动, 则意味着均流调控作用的消失。解决这一问题的原则应是以关键调控项为主导, 确保稳定为前提, 减弱均流调控项的强度, 有条件地分时突出均流调控作用, 使绕组均流、转子位置校正缓慢、平稳地进行。

综合上述分析, AECS 的电磁转矩(有功)控制器的设计原则是: 基于状态辨识控制策略, 以跟随迭代控制规律来实现对 ASTG 不同运行方式时的适应式控制。由此, 其合成控制

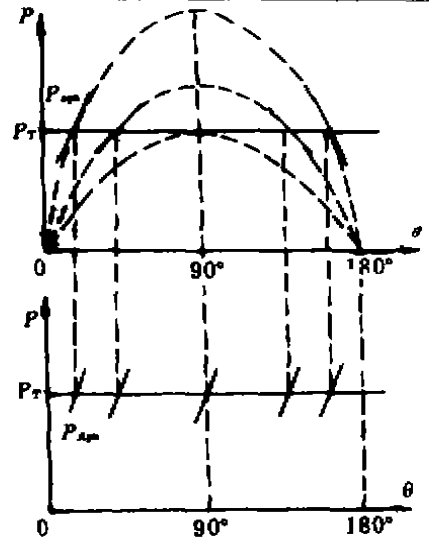


图 3 传统同步发电机和 ASTG 在不同 δ 值时的 P_m 和 P_{ASTG}

规律可描述如下:

$$I_{d,n}^* = I_{d,n-1}^* + V_p K_p \Delta p + V_s K_s \Delta s + V_i K_i \Delta i + (V_u/T_i) \Sigma \Delta I \quad (14)$$

式中 K_p, K_s, K_i, K_T 为比例系数;

T_i 为积分时间常数;

V_p, V_s, V_i, V_T 为比例校正因子;

V_u 为积分校正因子;

$I_{d,n-1}^*$ 为迭代值;

$I_{d,n}^*$ 为即时值。

状态量 $p, \delta, s, \Delta I$ 及 ASTG 运行状态的各相关参数的超线性、线性及次线性变化, 可通过高分辨率的快速检测, 直接进行状态辨识, 经判断、运算, 进而获得各校正因子。式(14)中的积分时间常数 T_i 应远大于隐含在迭代值中的关键调控项的迭代时间常数, 以抑制 ΔI 调控项的过度扰动作用。

4 ASTG 双通道自动励磁控制的原理结构

综上所述, ASTG 双通道自动励磁控制系统的基本结构应包括构成电压(无功)和电磁转矩(有功)调控通道的两个独立的控制器, 坐标变换, 两个励磁电流控制器以及状态量检测变换, 参数运算, 状态辨识、补偿校正等相关环节。由此可建立 ASTG 双通道自动励磁控制的原理结构框图如图 4 所示。图中 U_d 、 U_q 为控制励磁电流 I_d, I_q 的控制信号。

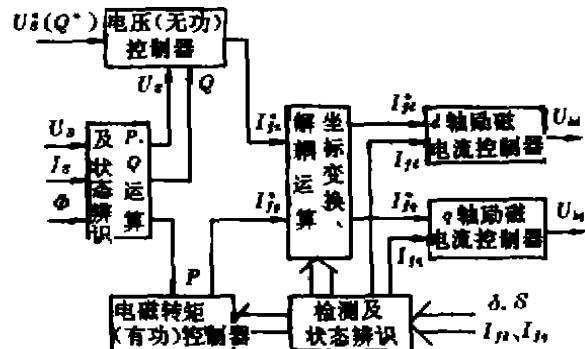


图 4 ASTG 双通道自动励磁控制的原理结构框图

5 结束语

本文在分析 ASTG 励磁控制原理的基础上, 考虑到 AECS 的特点、多种影响因素及工程实现的可行性, 提出 ASTG-ACES 的控制策略, 经基于此策略研制的数字式双通道励磁控制装置在 ASTG 模拟机组上进行的试验研究证实效果良好, 有关研究成果将陆续发表。ASTG 特有的运行特性已引起普遍关注, 随着电力电子技术、计算机控制技术的发展和这种新型电机在设计、制造及应用中的理论和实际问题的研究解决, 将使它在电力工业中得到广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 Пабунец И. А., Кохматов А. П. Шапаряног, РЕФИМЫ, СТАИЧЕСКИЕ И ПИНАМНЧЕСКНЕ ФАРАКТЕРИСТИКИ АСНФОРНИЗИР ОВАИНЫФ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ Киев, НЗг. А. Н. УССР, 1987
- 2 杨顺昌. 国外对异步化同步发电机的探讨. 国外大电机, 1991, (4), 1~6
- 3 杨顺昌. 电机矩阵分析. 重庆: 重庆大学出版社, 1988
- 4 杨顺昌. 异步化汽轮发电机电磁设计特点, 中国电机工程学报, 1992, (5), 8~14