

励控系统稳态误差与稳定性 同综放单元关系的仿真研究

毛韶华¹, 郭世明²

(1. 西昌学院, 四川 西昌 615000; 2. 西南交通大学, 四川 成都 610013)

【摘要】文章通过建立同步发电机励磁控制系统的数学模型, 假设同步发电机、交流励磁机、测量比较为励磁控制系统中不变单元环节, 利用传递函数变化和劳斯稳定判据阐述了综合放大单元放大系数与励磁控制系统稳态误差和稳定性的关系, 得到通过改变综合放大单元放大系数同时提高稳定性与减小稳态误差的矛盾性。然后提出通过把励磁电压微分后反馈输入到综合放大单元输入端来解决问题, 并运用 MATLAB6.5 仿真比较两种不同励磁控制系统的效果。

【关键词】励磁控制; 稳态误差; 稳定性; 仿真

【中图分类号】TM761 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1673-1891(2006)01-0082-04

1 励磁控制系统数学模型建立

励磁控制系统(如图1)通常包括同步发电机、测量比较、综合放大和励磁机四个主要组成单元。图中: ΔU 表示电压偏差, U_{Li} 表示励磁机的控制电压, U_L 表示励磁电压, U_z 表示基准电压, U_f 表示机端电压。为方便分析, 先通过每个单元的数学模型构造其传递函数。

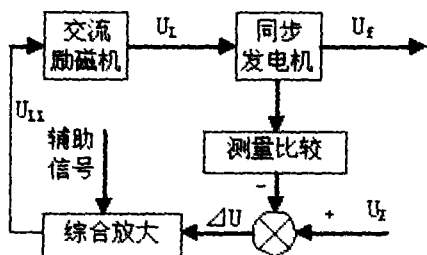


图1 励磁控制系统框图

1.1 同步发电机单元

发电机在带负载运行时, 真实的数学模型是非常复杂的, 为了分析方便, 选择发电机空载运行(励磁回路等效电路(如图2)为分析目标。由一阶暂态电路特性可得到公式(1)。考虑励磁回路不饱和, 则空载电势线性变化, 即 $L_i X_{ad} = U_f$ (X_{ad} 为空载特性曲

线斜率), 那么公式(1)就可以简化为公式(2), 在考虑励磁回路时间常数为 $T_{do} = L_i / R_L$ 的基础上对公式(2)两边进行拉氏变换, 便可以得到同步发电机的传递函数如公式(3)。

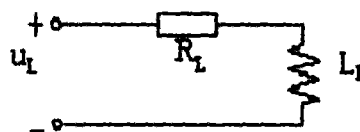


图2 空载时励磁回路的等效电路

$$L_i \frac{di_L}{dt} + R_L i_L = u_L(t) \quad (1)$$

$$\frac{L_i}{R_L} \frac{du_f}{dt} + u_f = \frac{X_{ad}}{R_L} u_L(t) \quad (2)$$

$$G_f(s) = \frac{K_f}{1 + T_{do}s} \quad (3)$$

公式(1)中: R_L 和 L_i 分别为励磁绕组的电阻和电感; 公式(3)中, K_f 为发电机机端电压与励磁电压的比值(通常取 X_{ad} 与 R_L 的比值)。

1.2 交流励磁机单元

交流励磁机是励磁系统的重要工作环节(图1

收稿日期: 2006-01-04

作者简介: 毛韶华(1974-), 男, 主要从事电力系统及其自动化和工程项目管理方面的研究。

中的交流励磁机包含整流环节), 其负载是同步发电机的励磁绕组。为方便分析, 假设 W_{LL} 为励磁机励磁绕组的匝数, Φ_{LL} 为匝链励磁机励磁绕组的磁通, 同步发电机的励磁绕组为恒定电阻 R_{LL} , 并且励磁绕组的漏磁系数为 O_{LL} 则可以得到公式 (4) 和 (5)。根据励磁绕组磁通交链特性知道, 漏磁通 Φ_{LL} 、穿过空气斜匝链定子绕组的磁通 Φ_{LLd} (近似为空载电势 E_L 值)、d 轴电枢反应磁通 Φ_{ad} 满足公式 (6) 的关系。结合励磁机特性解公式 (4)、(5) 和 (6), 就得到公式 (7)。对公式 (7) 进行拉氏变换便得到励磁机的传递函数 $G_L(s)$ 的表达式如公式 (8)。

$$W_{LL} \frac{d\Phi_{LL}}{dt} + R_{LL} i_{LL} = u_{LL}(t) \quad (4)$$

$$E_L = (1 + C_L) U_L \quad (5)$$

$$\Phi_{LL} = \Phi_{LLd} + \Phi_{LLe} - \Phi_{ad} \quad (6)$$

$$\frac{aW_{LL}}{k} \frac{du_L}{dt} + \frac{R_{LL}}{X_{ad}} u_L + \frac{R_{LL}C_L}{X_{ad}} u_L = u_{LL}(t) \quad (7)$$

$$G_L(s) = \frac{1}{K_L + C_L K_L + T_L s} \quad (8)$$

公式 (5) 中, C_L 为发电机带负载运行时的电流变化系数; 公式 (7) 中, k 为同频率、定子每相有效匝数有关的系数, a 为修正系数, 一般情况取 $a = 1 + (1 + C_L) \cdot O_{LL} / (1 - O_{LL})$; 公式 (8) 中, K_L 为空载时输入电压与输出电压的比, 一般取 $K_L = R_{LL} / X_{ad}$, T_L 为时间常数, 通常取 $T_L = W_{LL} (1 + (1 + C_L) / (1 - C_L) \cdot O_{LL}) / K$ 。

1.3 测量比较单元

励磁系统的测量比较环节是由滤波器、蒸馏滤波等环组成, 可以描述为一阶滞后环节。所以输出量可以用公式 (9) 表示。

$$\Delta U(s) = U_z(s) - K_I U_f(s) / (1 + T_I s) \quad (9)$$

公式 (9) 中, K_I 为电压比例系数; T_I 为测量环节不大于 0.05 秒的时间常数。

1.4 综合放大单元

励磁系统的放大环节通常也描述为一阶滞后环节。所以, 考虑放大环节时间常数为 T_2 , 放大系数为 K_2 , 则其传递函数可以描述为公式 (10)。但是必须注意的是励磁控制系统放大环节有上、下限值。

$$G_2(s) = K_2 / (1 + T_2 s) \quad (10)$$

1.5 励磁控制系统传递函数框图

根据励磁系统的数学模型可以构建励磁控制系统传递函数框图 (如图 3):

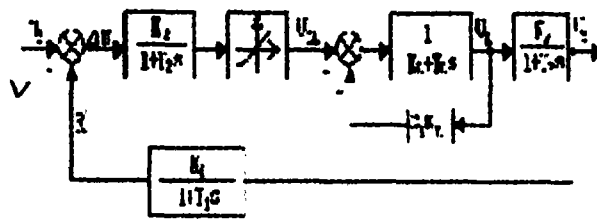


图 3 励磁控制系统传递函数框图

由图 3 可以得到, 励磁控制系统的前向通道传递函数 $G(s)$ 如公式 (11), 反馈通道传递函数如公式 (12), 系统开环传递函数为公式 (13), 闭环传递函数如公式 (14)。

$$G(s) = \frac{K_2 K_I}{(1 + T_2 s)(K_L + C_L K_L + T_L s)(1 + T_I s)} \quad (11)$$

$$H(s) = \frac{K_I}{1 + T_I s} \quad (12)$$

$$W_0(s) = G(s)H(s) \quad (13)$$

$$W(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (14)$$

2 励磁控制系统的稳态误差与稳定性

2.1 励磁控制系统的稳态误差

对于图 3 来讲, U_f 是输出量, U_z 是输入量, 输出量的期望值为此 U_z / K_I , 所以稳态误差为 $\Delta u(\infty) = U_z / K_I - U_f(\infty)$ 。假设给定值 $U_z = A$, 则得到公式 (15), 将公式 (15) 同闭环传递函数联立解, 便得到稳态误差的表达式, 公式 (16), 稳态误差与输出电压期望值的百分比可以通过公式 (16) 转化计算。

$$\Delta U(s) = \frac{U_f(s)}{G(s)} = \left[\frac{1}{K_I} - \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \right] \frac{A}{s} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Delta u(\infty) &= \lim_{s \rightarrow 0} \Delta u(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta u(\infty) \\ &= \frac{A}{K_I} - \frac{K_2 K_I A}{(K_L + C_L K_L) + K_I K_2 K_I} \\ &= \frac{A}{K_I} \frac{1}{1 + K_2} \end{aligned} \quad (16)$$

公式 (16) 中的 K_2 是系统的开环放大系数。很明显, 励磁调节系统必然存在误差, 要提高调节精度, 就必须增大 K_2 值, 实际上是提 K_2 值。而且, 如 K_2 足够大, 稳态误差可以趋近为 0。

2.2 励磁控制系统的稳定性

励磁系统的稳定性可以采用劳斯稳定判据或频率稳定判据来判断。这里由于闭环控制系统的传递函数 $W(s)$ 中的特征方程 $B(s)$ 存在为 0 和为负的项，所以选用劳斯稳定判据来判断励磁控制系统的稳定性。

2.2.1 劳斯阵列判断原理

首先，假设励磁控制系统的特征方程 $B(s) = 0$ 的基本形式为： $a_0s^n + a_1s^{n-1} + a_2s^{n-2} + \dots + a_{n-1}s + a_n = 0$ ，然后再假设各项系数均为正数，那么可以建立如下的劳斯阵列。

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l}
 s^n \quad a_0 \quad a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad \dots \\
 s^{n-1} \quad a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad \dots \\
 s^{n-2} \quad b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4 \quad \dots \\
 s^{n-3} \quad c_1 \quad c_2 \quad c_3 \quad c_4 \quad \dots \\
 \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\
 s^2 \quad d_1 \quad d_2 \\
 s^1 \quad e_1 \\
 s^0 \quad f_1
 \end{array} \right\} (n+1 \text{行})
 \end{array}$$

阵列中， $b_1 = a_2 - a_0a_3/a_1$ ， $b_2 = a_3 - a_0a_4/a_1$ ， $b_3 = a_4 - a_0a_5/a_1$ ， \dots ， b_i 的计算一直进行到 b 值为 0 止； $c_1 = a_3 - a_1b_2/b_1$ ， $c_2 = a_4 - a_1b_3/b_1$ ， $c_3 = a_5 - a_1b_4/b_1$ ， \dots ，一直计算到 s^0 行止。对于励磁系统来说，稳定的充分必要条件是上述劳斯阵列的第一列各元素均大于 0，即 $a_0 > 0, a_1 > 0, b_1 > 0, c_1 > 0, \dots, e_1 > 0, f_1 > 0$ 。

2.2.2 应用劳斯判据判断励磁控制系统的稳定性

通常情况下：对于一台既定的发电机而言，发电机机端电压与励磁电压的比值 (K_f) 和时间常数 (T_f) 均可假定为不变的常数；交流励磁机的空载时输入电压与输出电压的比 (K_L)、时间常数 (T_L) 和发电机带负载运行时的电流变化系数 (C_L) 也可假定为常数；测量比较单元的放大系数 (T_1) 与时间常数 (K_1) 也假设基本不变，因此对励磁调节精度影响不大。影响励磁调节幅度的主要是放大环节的工作性能，但 T_2 主要由电路参数决定，不可改变，所以主要考虑 K_2 的值对励磁调节效果的影响。为此，假设 $K_f = 1$ 、 $T_f = 8.0$ 秒、 $K_L = 1$ 、 $C_L = 0.5$ 、 $T_L = 0.65$ 秒、 $K_1 = 0.25$ 、 $T_1 = 0.05$ 秒、 $T_2 = 0.02$ 秒不变，改变 K_2 的值来分析放大环节对励磁调节的影响。

由公式 (11)、(12)、(13) 和 (14) 可以得到，励磁控制系统的闭环传递函数的特征方程为： $B(S) =$

$(1 + T_1S) (1 + T_2S) (K_L + C_LK_L + T_L S) (1 + T_{fs}) + K_1K_2K_f = 0$ 。所以，在上述假设的基础上，设 $T_2 = 0.02s$ ，则有： $S^4 + 70.36S^3 + 1025.19S^2 + 375.96S + 288.46 + 384.62K_2 = 0$ 。所以，励磁控制系统的劳斯阵列如下：

$$\left\{ \begin{array}{l}
 s^4 \quad 1 \quad 1025.19 \quad 288.46+384.62K_2 \\
 s^3 \quad 70.36 \quad 375.96 \\
 s^2 \quad 1019.85 \quad 288.46+384.62K_2 \\
 s^1 \quad 356.06-26.54K_2 \\
 s^0 \quad 288.46+384.62K_2
 \end{array} \right.$$

根据劳斯稳定判定规则，要保持励磁控制系统稳定，阵列中各系数应大于 0，由于 K_2 通常大于 0，所以只需要验证 $356.06 - 26.54K_2 > 0$ 即可。所以要求放大环节的放大系数满足条件： $K_2 < 13.4$ ，否则系统就将会不稳定。

2.3 稳态误差与稳定性的关系

通过上面对励磁控制系统稳态误差和稳定性的判断，明显出：励磁控制系统稳态误差和稳定性与励磁控制系统综合放大单元的放大系数关系非常密切，而且，对综合放大单元的放大系数来说，要同时减小励磁控制系统的稳态误差和保持励磁控制系统的稳定性是相互矛盾的。为此，建议将励磁电压微分处理后反馈到综合放大单元的输入端，其实质就是把励磁电压速率反馈回去。当磁场电流跃增时，微分信号为正，形成软反馈，测量比较单元就会产生瞬时负信号去削弱磁场电流。

3 仿真及其结果

在上述假设参数的基础上，令 $K_f = 1.5$ ， $T_f = 2$ 秒。运用 MATLAB/Simulink6.5 对图 3 和图 4 建立仿真框图 (如图 4)：图中虚线框表示电压的微分反馈环节)。仿真结果 (如图 5)。

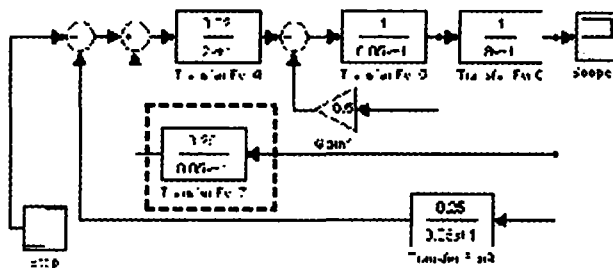
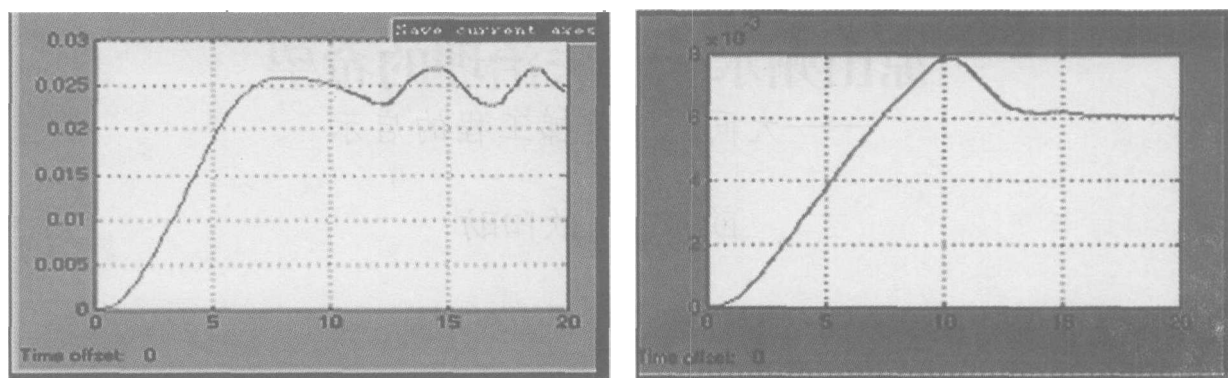


图 4 励磁控制系统仿真模型



(a) 无反馈环节的仿真结果

(b) 有反馈环节的仿真结果

图 5 励磁控制系统仿真结果图

4 结论

通过图 5 的两条曲线可以看到: 将励磁电压微分处理后反馈到综合放大单元的输入端, 使综合放大单元能够感应出电压的变化速度, 从改善了励磁

系统的调节能力, 能够在一定的范围兼顾到稳态误差和稳定性两方面的因素, 而且励磁系统的调节能力也相对平稳, 所以, 将励磁电压微分处理后反馈到综合放大单元的输入端来改善励磁控制系统调节的稳定性并减小误差是可行的。

参考文献:

- [1] 杨冠城主编. 电力系统自动装置原理[M]. 北京市: 水利电力出版社, 1995.
- [2] 许克明, 田怀智编. 电力系统自动装置[M]. 重庆市: 重庆大学出版社, 1996.
- [3] 许正亚主编. 电力系统自动装置[M]. 北京市: 水利电力出版社, 1993.
- [4] 孙雅明主编. 电力系统自动控制与装置[M]. 北京市: 水利电力出版社, 1990.
- [5] 沈本荫主编. 现代交流传动及其控制系统[M]. 北京市: 中国铁道出版社, 1997.
- [6] 华北电力学院编. 电力系统自动化原理与技术[M]. 北京市: 电力工业出版社, 1981.
- [7] 杨自厚主编. 自动控制原理[M]. 北京市: 冶金工业出版社, 1994.
- [8] 张小勇, 谷俊杰. 基于不同性能指标的励磁控制系统的分析与比较[EB/OL].
- [9] 丁尔谋. 发电厂励磁调节[M]. 北京市: 中国电力出版社, 1998.

Study on the Relationship about Steady—state Error, Stability and Amplification Cell On Exciter Control System Through Emulating

MAO Shao - hua, GUO Shi - ming

(Xichang College, Xichang, Sichuan 615013; South - west Jiao Tong University, Chengdu Sichuan 610013)

Abstract: The paper expound sthe relationship between synthesis amplification cell and steady—state error, stability about exciter control system by founding the mathemanical model in the synchro generator exciter control system, and supposing synchro generator, AC exciter, measure comoare are invariability cells though the Change of transfer function and Lous' stabil ycriterla. The result shows that it is impossible to improve stability and to minish steady - state error through altering the coefficient of amplification. Then the paper puts forward feeding back differential excitation voltage to input of amplification cell to discover the problem and compares the differerlt effect about the two different exciter control systems by using MATLAB to emulate.

Key words: Steady—state error; Stability; Emulate