

完全性线性化同的步发电机励磁控制器*

高 龙 陈 霖

(清华大学自动化系, 北京)

摘 要

本文根据文献[1]所提的理论设计出新型励磁控制器, 使系统在足够大的范围内按线性规律运动, 并且明显改善了系统的静、动稳定极限和鲁棒性。

一、引 言

同步发电机励磁控制系统在大扰动下的数学模型是非线性的, 传统的一次展开近似的局部线性化方法^[2]设计结果难以令人满意。用参考文献[1]的方法设计出的完全线性化最优励磁控制器可克服传统设计方法的局限性。仿真实验表明这种新型励磁控制器具有很好的性质, 值得进一步开发。

二、主 要 结 果

隐极同步发电机一无穷大母线输电系统的数学模型 据文献[2]知励磁控制下的状态方程为

$$\begin{pmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\omega} \\ \dot{E}_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{H} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-x_{d\Sigma}}{T_{d0}x'_{d\Sigma}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \\ \omega \\ E_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{-\omega_0 V_s}{Hx_{d\Sigma}} E_q \sin\delta \\ \frac{x_{d\Sigma} - x'_{d\Sigma}}{x'_{d\Sigma}} \omega \sin\delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{kx_{ad}x_{d\Sigma}}{R_f T_{d0}x'_{d\Sigma}} \end{pmatrix} u + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{\omega_0}{H} \\ 0 \end{pmatrix} P_m \quad (1a)$$

$$\begin{bmatrix} \omega \\ \vdots \\ i_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & x_{ad}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \\ E_q \end{bmatrix} \quad (1b)$$

*中国科学院科学基金资助的项目。

本文于1986年10月15日收到, 1988年5月19日收到修改稿。

式中符号参看文献[2]第八章。

受控对象非线性特性完全线性化 (CL) 补偿器

对 (1a) 式展开、取导、消元后得

$$\ddot{\delta} + \frac{D}{H} \dot{\delta} = \frac{\omega_0 V_s}{HT_{d0} x'_{d\Sigma}} E_q \sin \delta - k \frac{\omega_0 V_s x_{ad}}{HT_{d0} R_f x'_{d\Sigma}} u \sin \delta - \frac{\omega_0 V_s}{H x_{d\Sigma}} E_q \dot{\delta} \cos \delta - \frac{\omega_0 V_s (x_d - x'_{d\Sigma})}{H x_{d\Sigma} x'_{d\Sigma}} \dot{\delta} \sin^2 \delta \quad (2)$$

考虑到 $\dot{\delta}(t) = \omega(t)$, 上式可记作

$$\ddot{\delta} + \frac{D}{H} \dot{\delta} = f(E_q, \delta, \omega, u, t)$$

根据文献[1]定理 3.1 知, 对于能控的非线性对象, 设 $U \in R$ 是以原点为内点的集合, 如果对于任意的 $v(\cdot) \in U$, 方程

$$f(E_q, \delta, \omega, u, t) = v(t) \quad (3)$$

在区域 $x \in R^3$ 内存在有界解

$$u = -W(z_1, z_2, \dots, z_m, v), \quad [z_1, z_2, \dots, z_m]^T \in x \quad (4)$$

则非线性受控对象 (1) 在 CL 补偿律 (4) 的作用下, 可在整个工作范围内按线性规律运动 (在本例具体情况下表现为两个积分器和一个惯性环节串接)。因为状态的非线性反馈并不改变系统的能控性, 所以补偿后的 CL 线性化系统的能控性不变。实际上同步发电机工作范围总是在 $\delta = 0^+ \sim 180^\circ$ 之间, 所以在此区间内对象 (1) 是能控的。

由 (2)、(3) 可导出对象 (1) 的 CL 补偿律的具体内容:

$$u(t) = m_1 E_q(t) + m_2 E_q(t) \omega(t) \operatorname{ctg} \delta(t) + m_3 \omega(t) \sin \delta(t) + m_4 v(t) \csc \delta(t),$$

$$\text{其中, } m_1 = \frac{R_f}{k x_{ad}}, m_2 = \frac{-R_f T_{d0} x'_{d\Sigma}}{k x_{ad} x_{d\Sigma}}, m_3 = \frac{R_f T_{d0} (x_{d\Sigma} - x'_{d\Sigma})}{k x_{ad} x_{d\Sigma}}, m_4 = \frac{-H R_f T_{d0} x'_{d\Sigma}}{k \omega_0 V_s x_{ad}} \quad (5)$$

将 CL 补偿律 (5) 作用到对象 (1) 上去, 即可得到对于新控制 $v(t)$ 来讲呈大范围线性运动的等值受控对象,

$$\ddot{\delta}(t) + \frac{D}{H} \dot{\delta}(t) = v(t) \quad (6)$$

它的框图示于图 1。

鲁棒最优反馈控制器 因为 CL 补偿器 (5) 在 δ 等于 0° 及 180° 附近是无界的, 只能近似实现, 所以第二层的反馈控制器应该有好的鲁棒性, 文献[3]给出一种 LQ 鲁棒最优控制器设计方法, 所得的反馈控制律为

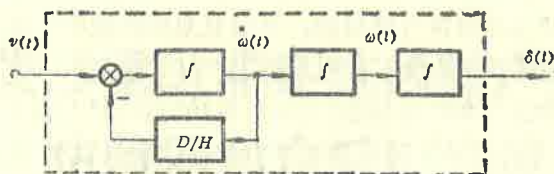


图 1 等值线性受控对象

$$v^*(t) = -K_0^*[x(t) - y_r] = -[k_1 k_2 k_3][\delta(t) \omega(t) \dot{\omega}(t)]^T + [k_1 k_2 k_3][\delta, \omega, \dot{\omega}]^T$$

式中 $y_r = [\delta, \omega, \dot{\omega}]^T$ 为常值参考输入 (7a)

由 (1) 式用可测到的 $P_e(t)$ 消去 $\dot{\omega}$, 得到实用结果

$$v^*(t) = - \left[k_1, \left(k_2 - k_3 \frac{D}{H} \right), \frac{-\omega_0}{H} k_3 \right] [\delta, \omega, P_e]^T + \left[k_1 \delta + k_2 \omega + k_3 \left(\dot{\omega} + \frac{\omega_0}{H} P_m \right) \right] \quad (7b)$$

$$\left(\text{以下定义 } k^* \triangleq \left[k_1, \left(k_2 - k_3 \frac{D}{H} \right), \frac{-\omega_0}{H} k_3 \right] \right)$$

三、仿 真 研 究

为了解决微小 δ 下 (5) 中的 $u(\cdot)$ 过大的问题, 我们给补偿器增加限幅约束: 在 $|\delta|$ 及 $|\delta - 180^\circ| \leq 5^\circ$ 区内, 取 $\text{ctg} \delta = \text{ctg} 5^\circ = 11.43 = \text{const}$, 及 $\text{csc} \delta = \text{csc} 5^\circ = 11.47 = \text{const}$.

所研究的单机无穷大母线输电系统见图 2.

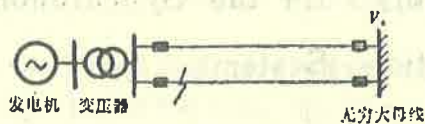


图 2 单机无穷大母线输电系统

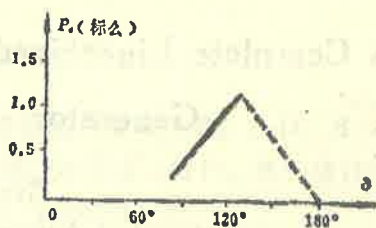


图 3 静态功角特性

发电机参数为: $x_d = 2.543$, $x_d' = 0.318$, $T_{d0} = 10$, $H = 8.0$, $D = 5.0$; 变压器参数为: $x_T = 0.1$; 输电线双回路总阻抗为 $x_L = 0.73$; $v_s = 1.0$; 发电机运行工作点: $\delta = 70^\circ$, $P_e = 0.5$ (详[2]之 P.174).

设计的 LQ 最优反馈增益阵为: $K^* = (21, 5.0, 29)$ (8)

数字机仿真实验结果:

(1) 在图2高压母线侧发生单回线三相对地短路故障, 持续0.15秒后油开关切除故障回路而呈单回路送电, 在0.6秒时重合闸成功, 又恢复双回路送电, 此过程中 $\delta_{\max} = 153^\circ$, 可在4秒之内进入稳态, 说明系统有充足的阻尼能力和好的动态响应。

(2) 测得系统的静态功角特性如图3所示, 在 40° 至 140° 之间呈直线关系, 这是全局线性化补偿系统的独有特点。进一步研究表明本系统的静稳极限^[2]可明显提高, 利于加强发电能力。

(3) 单参数稳定域的仿真研究结果表明最敏感参数为 X_L , 在一定初始扰动下的稳定域为 $0.0 \sim 5.1$, 即在线路电抗由短路状态到增大为标称值的7倍范围内, 系统均稳定。

四、结 束 语

1. 根据文献[1]的理论可以方便地设计出发电机励磁系统的新型控制器, 它是由非线性网络构成的, 可以克服传统方法的局限性。

2. 对于带限幅特性的 CL 补偿器, 鲁棒最优反馈控制律仍具有足够充裕的参数稳定域。

3. 仿真研究表明本文所提出的新型励磁控制器可以有力地提高输电系统的静稳极限, 同时动态响应亦有所改善。

4. 多机系统下的仿真及单机无穷大母线系统的动模实验研究最近均已完成, 另拟撰文发表。

参 考 文 献

- [1] 韩京清, 线性系统的结构与反馈系统计算, 全国控制理论及其应用学术交流会(厦门)论文集, 科学出版社, 北京, (1981), 43—55.
- [2] 卢强等, 输电系统最优控制, 科学出版社, 北京, (1984).
- [3] C. Verde, and P. M. Frank, A Design Procedure for Robust Linear Suboptimal Regulators with Preassigned Trajectory Sensitivity, 21th IEEE Conference on Decision and Control, 886—890.

A Complete Lineabized Controller for the Synchronous Generator Excitation Systems

Gao Long, Chen Lin

(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing)

Abstract

Referring to the theory proposed in [1], a new excitation controller design is discussed in this paper, which makes the system response linear in the large. Meanwhile the static stability limit and the robustness can be increased evidently, and the dynamic stability limit is improved as well.