

# 同步发电机的完全线性化励磁控制器

高 龙 马海武 陈 霖 范玉顺

(清华大学自动化系)

## 摘 要

本文提出一种新型非线性励磁控制器,设计方法适于工程应用。数字仿真及动模实验均证实它在提高输电系统稳定性方面具有突出的优点。

**关键词**——非线性励磁控制器,完全线性化,鲁棒性。

## 一、引 言

现有的同步发电机励磁控制器都是用局部线性化方法(泰勒级数一次近似)设计的,虽然在工作点附近的工作是好的,但在故障情况的大扰动下系统的稳定性则严重恶化。下面介绍一种非线性的励磁控制器,它所用的数学工具远较微分几何方法简单,易于掌握。

## 二、输出补偿完全线性化新型励磁控制器的原理及设计

**引理。** 非线性系统经非线性静态反馈所得的闭环系统能控性不变。

**定理。** 对于一类能控的单输入单输出非线性系统,其运动方程消去中间变量后如可写成如下高阶微分方程形式:

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = f(y^{(n-1)}, y^{(n-2)}, \dots, \dot{y}, y, u^{(m)}, u^{(m-1)}, \dots, u, t), \quad (1)$$

且对于任意函数  $v(t)$ , 若非线性方程

$$f(y^{(n-1)}, y^{(n-2)}, \dots, \dot{y}, y, u^{(m)}, u^{(m-1)}, \dots, u, t) = v(t) \quad (2)$$

在某一域内均有有界解

$$u^{(m)}(t) = g(y^{(n-1)}, y^{(n-2)}, \dots, \dot{y}, y, u^{(m-1)}, \dots, \dot{u}, u, v, t), \quad (3)$$

则当系统(1)在其平衡点的局部线性近似系统具有最小相位零点时,对系统(1)施加形如(3)式的非线性动态反馈补偿后,就可化为完全线性化的(Complete Linearized, 简记CL)新受控对象(据上述引理知其为能控的)

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = v(t), \quad (4)$$

并且线性化反馈补偿器(3)在平衡点附近的一个适当的域内渐近稳定。式(4)中,  $v(t)$  为新的控制输入,称(3)式为对象(1)的CL补偿律。

**推论1<sup>[1]</sup>**. 在式(1)中,若  $m = 0$ , 并且方程(2)满足有界解(3)的条件,那么(3)式为一静态反馈 CL 补偿律.

**推论 2.** 上述定理所得的完全线性化的新对象的适用范围,一般远大于局部线性近似的结果,因此可以用成熟的线性控制理论设计其反馈控制器.考虑到(3)式为非线性的这一事实,最后的闭环控制器一般是由非线性的 CL 补偿器及线性的(有时亦可是非线性的)反馈控制器两部分构成.

### 1. 汽轮发电机的输出 CL 补偿器.

力争用可测到的输出量来实现 CL 补偿器(很幸运在同步发电机的情况下实现了).由文献[2]知单机无穷大母线励磁系统的数学模型为

$$\dot{\delta}(t) = \omega(t), \quad (5)$$

$$\dot{\omega}(t) = -D \cdot \omega(t)/H + \omega_0 \cdot (P_m - P_c(t))/H, \quad (6)$$

$$\dot{E}'_q(t) = (E_f(t) - E_q(t))/T_{d0}, \quad (7)$$

$$E_q(t) = x_{d\Sigma} \cdot E'_q(t)/x'_{d\Sigma} - (x_d - x'_d) \cdot V_s \cdot \cos \delta(t)/x'_{d\Sigma}, \quad (8)$$

$$E_f(t) = K_c \cdot u_f(t), K_c = 1 \quad (9)$$

$$P_c(t) = E_q(t) \cdot V_s \cdot \sin \delta(t)/x_{d\Sigma}, \quad (10)$$

式中  $k_c$  为由  $u_f$  到可控硅功放输出  $E_f$  间的增益,其余系统的参数的意义见附录.合并(5)~(10)式再考虑<sup>[2]</sup>  $I_q(t) = V_s \cdot \sin \delta(t)/x_{q\Sigma}$ ,  $E_q(t) = x_{ad} \cdot I_f(t)$ ,  $V_s \cdot E_q(t) \cdot \cos \delta(t)/x_{d\Sigma} = Q(t) + V_s^2/x_{d\Sigma}$ , 及  $E_q(t) \cdot I_q(t) = V_s \cdot E_q(t) \cdot \sin \delta(t)/x_{d\Sigma} = P_c(t)$ , 可得到所求的 CL 补偿律为

$$u_f(t) = I_q^{-1}(t)[v_f(t) - T'_{d0} \cdot (Q(t) + V_s^2/x_{d\Sigma}) \cdot \omega(t)]k_c^{-1} - T_{d0} \cdot (x_d - x'_d) \cdot \omega(t) \cdot I_q(t)k_c^{-1}. \quad (11)$$

因在  $\delta(t) = N\pi, N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  上  $I_q^{-1}(t)$  无界,故称 CL.

将(11)式非线性反馈作用加到对象(5)~(10)式上,便得到完全线性化的新受控对象:

$$\dot{\delta}(t) = \omega(t), \quad (12)$$

$$\dot{\omega}(t) = -D \cdot \omega(t)/H + \omega_0 \cdot (P_m - P_c(t))/H, \quad (13)$$

$$\dot{P}_c(t) = -P_c(t)/T'_{d0} + v_f(t)/T'_{d0}. \quad (14)$$

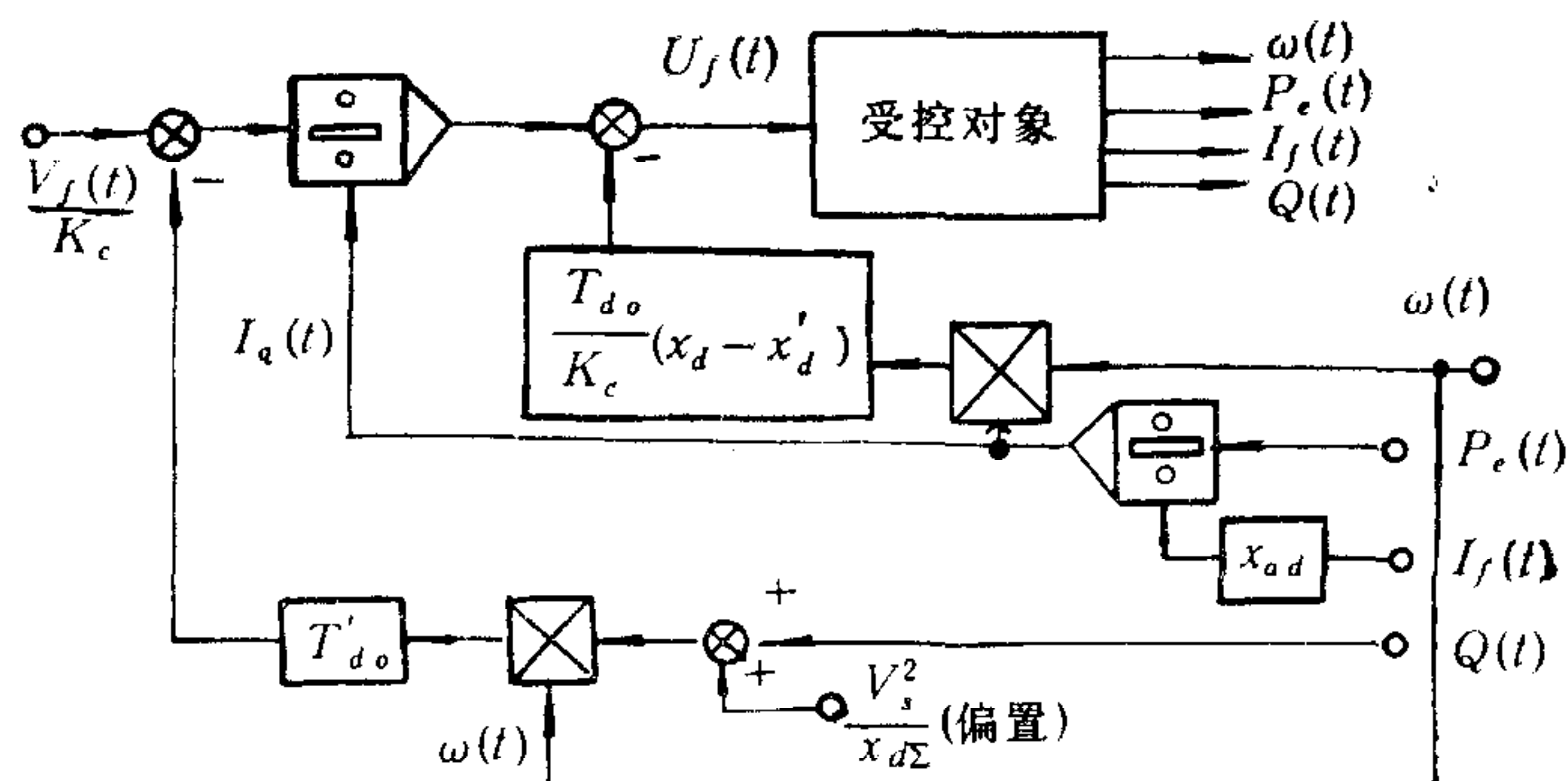


图 1

CL 补偿器是利用可量测的输出信息  $Q(t), \omega(t), P_e(t)$  以及  $I_f(t)$  经过模拟乘法集成电路构成, 其中  $I_q(t)$  是通过  $I_f(t)$  及  $P_e(t)$ , 按  $I_q(t) = P_e(t)/(x_{ad} \cdot I_f(t))$  关系式形成的. CL 补偿器的原理框图示于图 1.

## 2. 鲁棒最优输出反馈励磁控制器.

为了保持机端电压恒定, 改造功角特性  $P_e = f(\delta)$  以提高静稳极限, 同时考虑不同运行方式下线路参数大范围变化及补偿误差的存在下系统稳定性及阻尼力的保持, 必须设置反馈控制器. 这里机端电压  $v_i(t)$  的负反馈是满足第一项要求的关键, 但  $v_i(t)$  信息是对象(12)–(14)式的状态的非线性函数<sup>[2]</sup>, 所以不能简单地照搬线性理论成果. 先对(12)–(16)式设计一个全状态反馈的鲁棒 LQ 最优控制器, 使符合动态响应及参数稳定域的要求, 所得反馈增益阵为  $k^* = [k_\delta^*, k_\omega^*, k_{P_e}^*]$ , 再引入  $v_i(t)$  反馈代替测不到的  $\delta(t)$  信号, 在性能指标为

$$J = \int_0^\infty [q_v \cdot |\Delta v_i(t)| + q_\omega \cdot |\Delta \omega(t)| + q_{P_e} \cdot |\Delta P_e(t)| + q_\delta \cdot |\Delta \delta(t)|] dt \quad (15)$$

的条件下, 参照  $k^*$  的数值, 用 POWELL 优化程序解出使  $J$  为最小的输出信息  $[v_i(t), \omega(t), P_e(t)]^T$  反馈控制律, 再经数字仿真选出较理想的反馈增益阵. 例如, 当  $[q_v, q_\omega, q_{P_e}, q_\delta]^T = [8.5, 30.0, 100.0, 30.0]^T$  时, 有

$$k_0^* = [k_v^*, k_\omega^*, k_{P_e}^*] = [47.0, -6.93, 28.6], \quad (16)$$

同时尚应考虑到物理约束及实现的可能性. 这样一来, 图 1 中的  $v_f(t)$  信号应由下式给出:

$$v_f(t) = v_{f0} - k_v^* \cdot v_i(t) - k_\omega^* \cdot \omega(t) - k_{P_e}^* \cdot P_e(t). \quad (17)$$

因稳定运行下  $P_e$  及  $\omega$  均为常数, 为了在  $P_m$  及  $\omega_0$  偏移下防止控制放大器的饱和, 这两个信号均应经过隔直网络.

## 三、数字仿真研究

### 1. 单机无穷大母线等值输电系统的仿真.

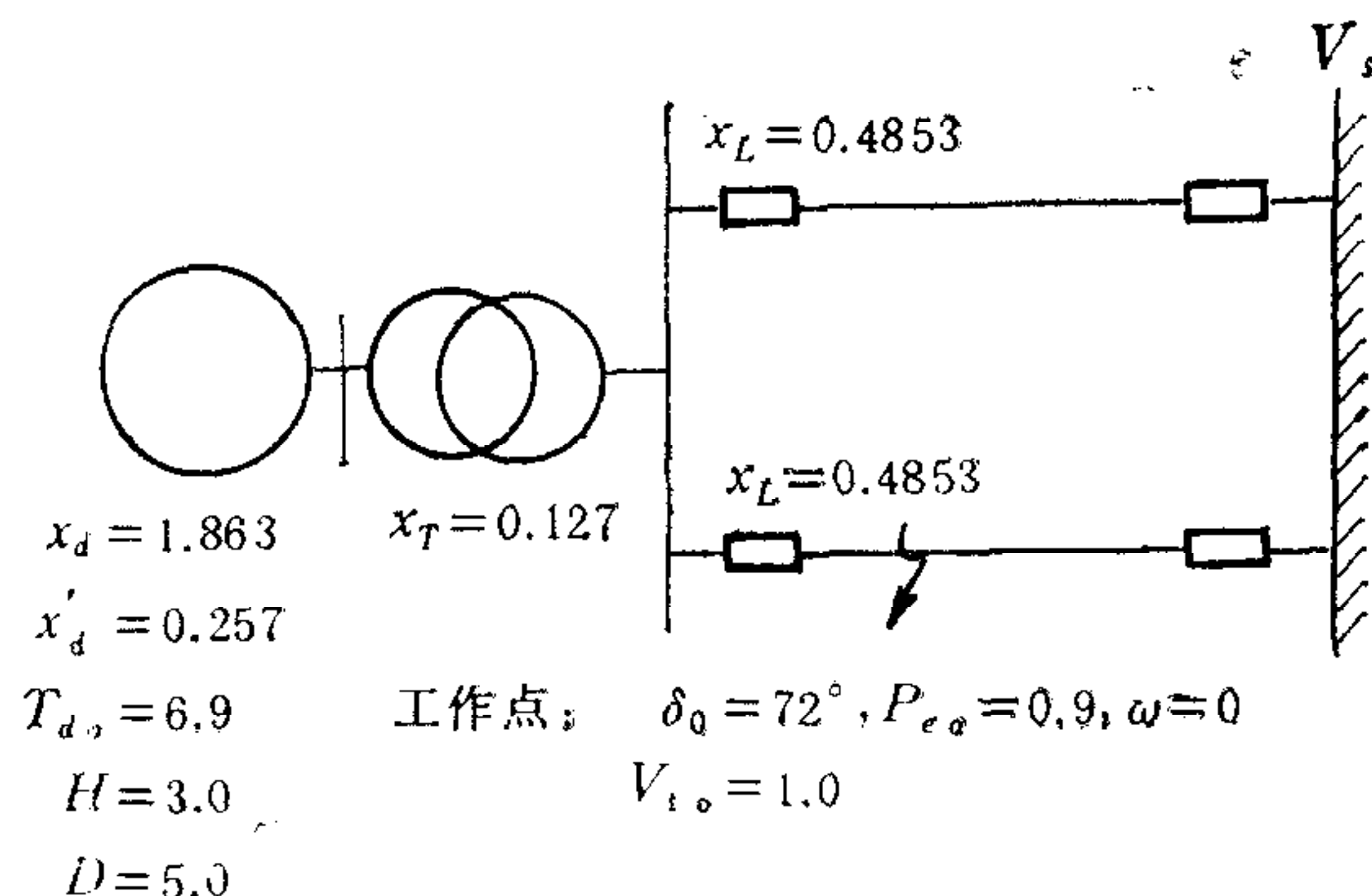


图 2

系统及参数示于图2。励磁电压限幅值为  $|E_f| \leq 1.8E_{f\text{额定值}}$ 。

a) 单回线中点发生三相短路, 0.15 秒切除故障回路, 1.3 秒重合闸成功。CL 新型控制器阻尼效果明显,  $v_i$  波动小, 而直接励磁的比例控制器及带励磁机的 PSS 方案则阻尼不足(数据从略)。

b) 几种励磁方案的暂态及静态稳定极限比较(表 1):

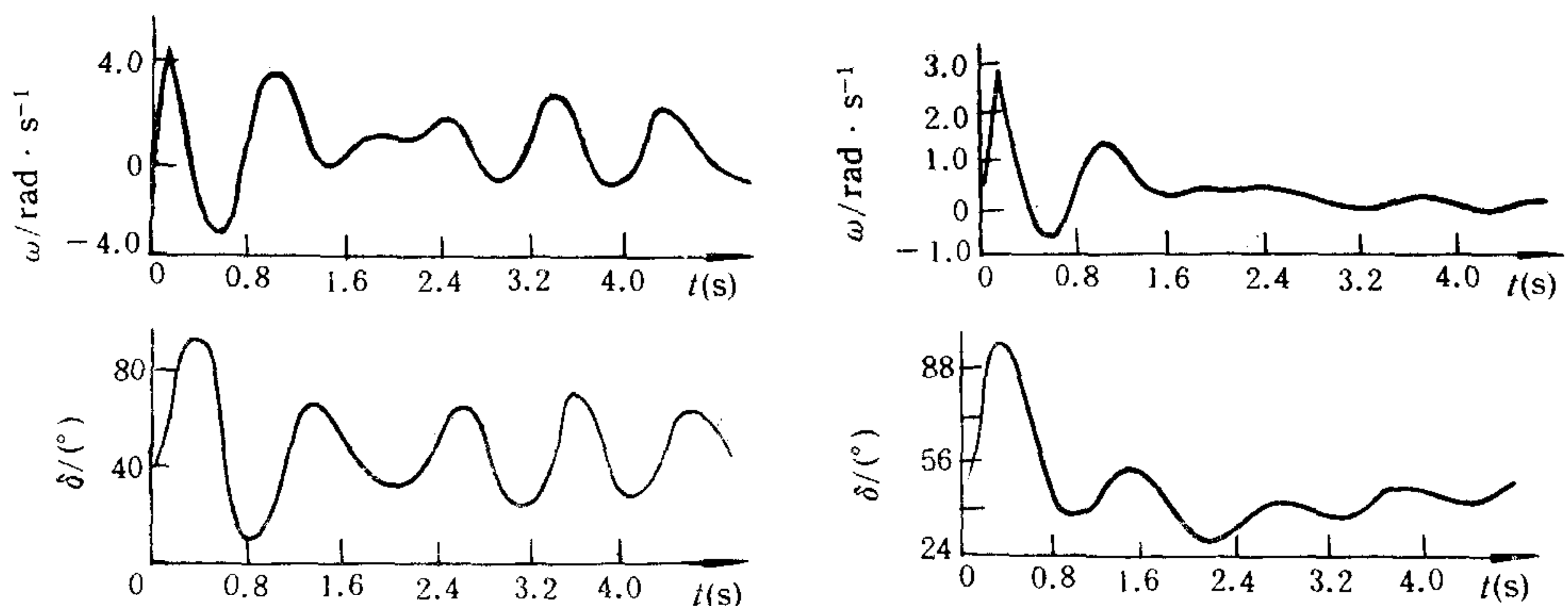
表 1

No.	励磁控制器方案	暂稳极限 (发端暂时故障)		静稳极限	
		$\delta_{\max}$	$P_{e\max}$	$\delta_{\max}$	$P_{e\max}$
1	CL 最优输出反馈 $k_{\delta}^* = [47, -6.93, 28.6]$	67.8°	0.871	139.5°	1.80
2	CL 全状态反馈(不可实现) $k^* = [-19.3, -6.93, 47.6]$	67.4°	0.875	142.3°	1.41
3	局部线性化 LQ 最优 $k = [94.3, -3.38, 28.6]$	67.2°	0.847	121.9°	1.60
4	PSS (带励磁机 $T_e = 0.55$ 秒)	66.8°	0.780	107.2°	1.77
5	比例控制器 $k_v = 40.0$	68.7°	0.830	90.6°	1.30

c) 表 1 所列各方案线路参数  $x_l$  的稳定域对比如表 2 所示:

表 2

No.	1	2	3	4	5
$x_l$ 的稳定域标称 值: 0.4853	0—1.7	0—4.5	0—1.6	0—1.6	0—1.0



(a) 比例控制器

(b) CL 控制器

图 3

条件: 输入功率  $P_m$  扰动为  $\Delta P_m = +0.1$  的条件下系统的临界稳定参数  $x_l$  的上下限, No.1 为可实现系统中稳定域最宽的。

## 2. 多机等值系统的仿真.

仿真在 DPS-8 中型数字机上进行, 其结果表明 CL 方案在性能上仍居其它方案之上, 基本趋势与单机仿真一致. 图 3 给出某线路中部三相故障(0.0 秒短路, 0.15 秒切除故障线路, 1.3 秒重合闸成功)两种励磁方案的对比, 说明了 CL 方案的优越性能和强阻尼能力.

## 四、动态模拟实验

系统图同图 2. 实验是在清华大学电机工程系动态模拟实验室 3<sup>#</sup> 机组上进行的, CL 补偿器中的乘法器采用北京半导体器件研究所生产的四象限模拟乘法集成电路 BG 1459/1595 产品,  $P_c(t)$  及  $Q(t)$  的测量用安徽无为县无线电厂的霍尔功率变送器. 实验主要结果如下(均为 SCR 直接供电方式):

### 1. 静稳极限

1) 双回路送电时的  $P_{max}$ : 常规方案为 14kW, CL 方案为 17.2kW, 局部线性化 LQ 方案为 16kW.

2) 单回路送电时的  $P_{max}$ : 常规方案为 11kW, CL 方案为 15kW.

### 2. 动稳极限

(在全长 6% 处三相短路故障下) 常规方案为 9.0kW, CL 方案为 9.5kW.

### 3. 动态抗干扰能力(见图 4)

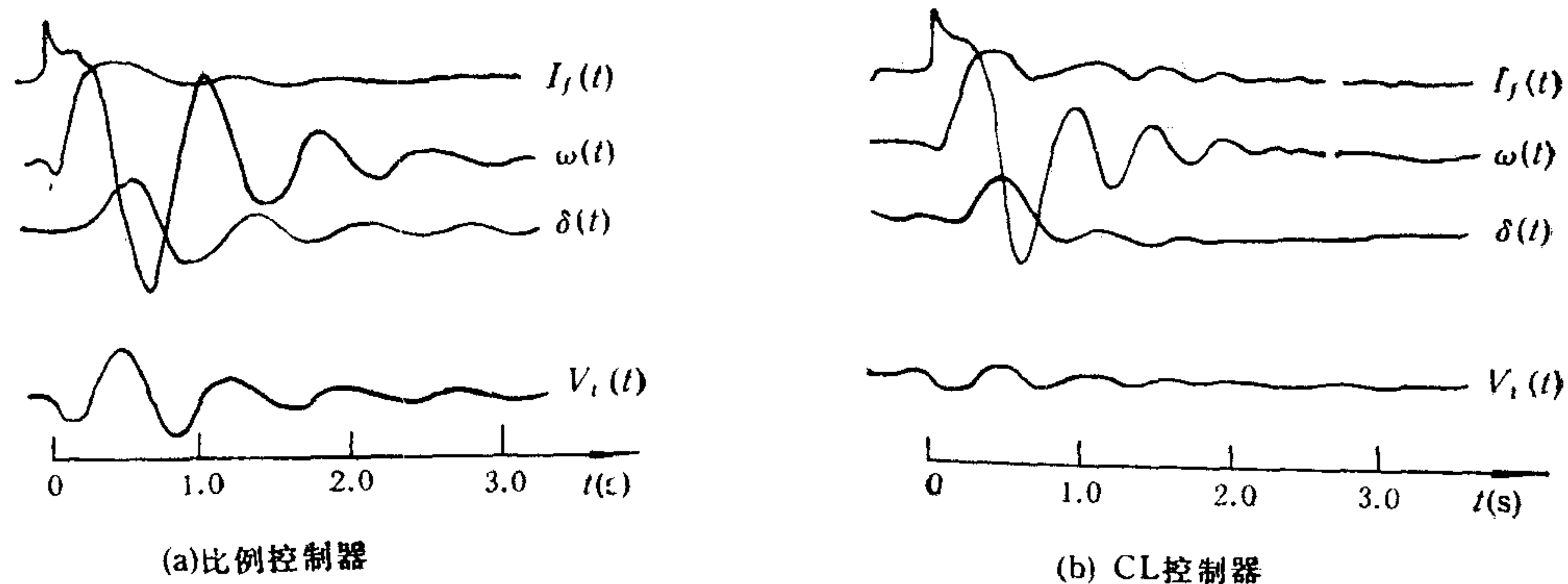


图 4

1) 距机端 6% 处单回线三相短路故障, 0.25 秒排除故障维持双回路送电.

a) 电压波动量: CL 方案为常规方案的 33—40%.

b) 功角摆幅: CL 方案为常规方案的 54—86%.

c) 振荡平息速度(阻尼力): CL 方案快.

2) 距机端 6% 处单回线上单相接地故障, 0.25 秒切除故障回路至 0.85 秒重合闸(故障未除), 至 1.05 秒再切去故障回路, 呈单回路送电状态.

a) 电压波动量: CL 方案极微, 常规方案明显。

b) 鲁棒性: CL 方案阻尼力强, 振荡平息快; 而常规方案出现持续振荡现象(失稳)。

上述实验结果说明 CL 方案在动静态性能、响应速度及阻尼能力上均优于常规的比例(或 PI) 控制器。同时它还有突出的鲁棒性和稳压性能, 并且有很高的静稳极限功率。

## 五、结 束 语

1) 输电系统运行工况实属大范围的, 用传统的局部线性化设计方法所得的励磁控制器的局限性是无法避免的。本文据文献[1]的理论设计的 CL 励磁控制器是非线性的, 具有一系列优越的性能, 对提高稳定性作用突出, 对电能生产和传输作用明显。

2) 励磁控制器必须考虑鲁棒性的要求, 本设计在这方面取得了比较理想的效果。

3) 本设计所用的信号均可直接测量, 便于工程实现。

4) 本设计可提高出力 5% 左右, 对窝电的弱网上的发电机出力的提高有积极的作用, 经济效益是可观的。

5) 本文的定理适用于一般非线性系统设计。

**附录.** 单机无穷大母线励磁系统参数的意义:

$x_d$ ——发电机  $d$  轴同步电抗;  $x'_d$ ——发电机  $d$  轴暂态电抗;  $x_L$ ——等值线路阻抗;  $x_T$ ——变压器阻抗,  $x_{d\Sigma} = x_d + x_T + x_L$ ,  $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_T + x_L$ ;  $V_r$ ——电网母线电压;  $\omega_0$ ——发电机同步旋转时的角速度;  $P_M$ ——汽轮机(常值)机械功率;  $H$ ——发电机转子部分的转动惯量;  $D$ ——发电机阻尼系数;  $T_{d0}$ ——发电机定子开路时的励磁绕组时间常数;  $T'_{d0}$ ——有电枢反应时的励磁绕组时间常数。

## 参 考 文 献

- [1] 韩京清, 线性系统的结构与反馈系统计算, 厦门会议论文集, 科学出版社, 1981.  
[2] 卢强、王仲鸿、韩英铎, 输电系统最优控制, 科学出版社, 1984.

## A KIND OF FEEDBACK COMPLETE LINEARIZATION CONTROLLER FOR SYNCHRONOUS GENERATORS

GAO LONG, MA HAIWU, CHEN LIN, FAN YUSHUN  
(Tsinghua University)

### ABSTRACT

A new kind of nonlinear excitation controller is proposed in this paper. The method is very useful for engineering applications. Digital simulation and experiment results show that this controller can be unique in terms of stability properties.

**Key words** —— Nonlinear excitation controller; complete linearization; robustness.