

# 多机电力系统变结构励磁控制器的设计研究

杨大志, 杜正春, 方万良

(西安交通大学电力工程系, 陕西 西安 710049)

摘要: 基于多机电力系统的非线性模型, 利用状态反馈精确线性化方法和变结构控制理论, 提出了一种新的电力系统变结构励磁控制器设计方法。在设计中取消了参考机, 并实现了多机系统的分散控制。3机系统的仿真结果表明, 提出的变结构励磁控制器可以有效地改善系统在大干扰下的暂态稳定性。

关键词: 变结构控制; 精确线性化; 电力系统稳定性; 励磁系统

中图分类号: TM761; TM31 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)16-0008-04

## 0 引言

发电机励磁控制是电力系统暂态稳定控制的重要手段。对于随时可能遭受各种干扰的电力系统来说, 找出合适的励磁控制规律对于提高电力系统暂态稳定性至关重要。

目前, 使用得比较多的励磁控制方式有: PID 调节、电力系统稳定器(PSS)、线性最优控制(LOEC)及非线性最优控制等。所有这些控制都存在一些不足之处。PID、PSS、LOEC 存在一个共同的问题, 那就是励磁控制器设计所依据的是电力系统在某一特定状态下的线性化模型, 因此其控制效果只能在一个很小的区域内发挥作用, 仅对提高系统的静态稳定性有效。由于忽略了电力系统的非线性特性, 所以对大干扰下系统暂态稳定性的控制效果不是很好。

事实上, 多机电力系统是一个多维的强非线性动态系统, 并含有大量的未建模部分, 例如模型参数的摄动、不确定的外来干扰等的影响。因此, 有必要设计电力系统的鲁棒非线性控制器。近几十年来, 微分几何理论以及非线性控制方法取得了长足的进展, 并在电力系统中得以应用<sup>[1, 2]</sup>。变结构控制理论在这几年也得到很大的发展<sup>[3]</sup>, 并已应用于电力系统稳定器(PSS)、柔性交流输电系统(FACTS)以及励磁控制等电力系统的控制器设计中等。变结构控制理论作为一种非线性系统的控制方法, 它的突出优点是其滑动模态具有完全自适应性, 即对于实际系统中的一些不确定参数(变化参数以及外部的干扰等)具有很强的鲁棒性, 可以解决复杂系统的镇定问题。

本文将微分几何理论与变结构控制相结合, 在对多机电力系统进行状态反馈精确线性化的基础上, 利用变结构控制理论, 设计了变结构励磁控制

器。暂态稳定控制的目标是各台发电机趋于额定同步转速, 取消了以往大家设计多机系统所需要的参考机。在变结构励磁控制设计中, 采用了指数控制律, 提高了控制的响应速度。各发电机变结构励磁控制仅需要局部量, 实现了多机系统的分散控制。

在计算机上对安德森<sup>[4]</sup>3机系统进行了大干扰下的仿真, 其结果表明了变结构励磁控制规律对提高电力系统暂态稳定性是非常有效的, 并且该控制具有响应速度快、强鲁棒性等特点。

## 1 状态反馈精确线性化

考虑一个仿射非线性系统<sup>[2]</sup>:

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{j=1}^m g_j(x) u_j \quad (1)$$

$$y_i = h_i(x) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中:  $x \in R^n, u \in R^m, y \in R^m, f, g, h$  是  $R^n$  上的  $R$  向量场。

输出  $y_i$  对时间微分, 用  $y_i^{[k]}$  表示  $\frac{d^k y_i}{dt^k}$ 。定义  $r_i$  为一个最小的正整数, 使得至少有一个输入出现在  $y_i^{[r_i]}$  中, 即

$$y_i^{[r_i]} = L_{f_i}^{r_i}(h_i) + \sum_{j=1}^m L_{g_j}(L_{f_i}^{r_i-1}h_i) u_j \quad (3)$$

式中至少有一个  $L_{g_j}(L_{f_i}^{r_i-1}h_i) \neq 0, \forall x$ , 称  $r_i$  为输出  $y_i$  的相关阶数。定义  $m$  维向量  $A(x)$  和  $m$  阶方阵  $B(x)$  分别为

$$A^T(x) = [L_{f_1}^{r_1}(h_1) \quad \dots \quad L_{f_m}^{r_m}(h_m)] \quad (4)$$

$$B(x) = \begin{bmatrix} L_{g_1}(L_{f_1}^{r_1-1}h_1) & \dots & L_{g_m}(L_{f_1}^{r_1-1}h_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ L_{g_1}(L_{f_m}^{r_m-1}h_m) & \dots & L_{g_m}(L_{f_m}^{r_m-1}h_m) \end{bmatrix} \quad (5)$$

那么式(3)可写为

$$\begin{bmatrix} y_1^{[r_1]} \\ \dots \\ y_m^{[r_m]} \end{bmatrix} = A(x) + B(x) u \quad (6)$$

如果  $B(x)$  为奇异时,系统不可控。当  $B(x)$  为非奇异时,状态反馈控制规律则为

$$u = -B(x)^{-1}A(x) + B(x)^{-1}v \quad (7)$$

产生闭环解耦的线性系统

$$\begin{bmatrix} y_1^{[r_1]} \\ \dots \\ y_m^{[r_m]} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \dots \\ v_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

定义

$$z_{ik} = y_i^{[k-1]}, \quad k=1, \dots, r_i, \quad i=1, \dots, m \quad (9)$$

这时线性化的系统可表示成能控标准型

$$\dot{z}_{ik} = \begin{cases} z_{ik+1}, & k=1, \dots, r_i-1 \\ v_i, & k=r_i \end{cases} \quad (10)$$

## 2 变结构控制理论

考虑式(1)定义的系统,变结构不连续控制  $u$  满足<sup>[3]</sup>

$$u_i(x) = \begin{cases} u_i^+(x), & \text{当 } S_i(x) > 0 \\ u_i^-(x), & \text{当 } S_i(x) < 0 \end{cases} \quad i=1, \dots, m \quad (11)$$

式中:  $S_i(x) = 0$  是滑动平面。

按照前述理论,定义

$$S_i = \sum_{k=1}^{r_i-1} c_{ik} z_{ik} + z_{ir_i} = 0 \quad (12)$$

这时系统的理想滑动动态为

$$\dot{z}_{ik} = \begin{cases} z_{ik+1}, & k=1, \dots, r_i-2 \\ -\sum_{j=1}^{r_i-1} c_{ij} z_{ij}, & k=r_i-1 \end{cases} \quad (13)$$

变结构系统通常要求一个稳定的理想滑动动态,很显然,通过选取合适的参数  $c_{i1}, \dots, c_{ir_i-1}$ ,可使  $z_{i1}, \dots, z_{ir_i}$  向着零渐进稳定运动,即当滑动发生时,原始输出  $y_i$  及其前  $(r_i-1)$  阶导数渐近趋向于零。

当滑动的存在性稳定解决后,下面的任务是进行控制器设计,也即解决滑动模式的能达性问题,使状态能从初始态到达滑动流形,并沿其滑动。滑动模式能达的充分条件可表示为

$$S_i \dot{S}_i < 0 \quad (14)$$

选取吸引方程

$$\dot{S}_i = -\dot{S}_i \operatorname{sgn} S_i - k_i S_i, \quad \dot{S}_i \neq 0, \quad k_i > 0 \quad (15)$$

式(15)满足式(14),并且在状态到达前具有较

好的动态品质。

## 3 多机电力系统变结构励磁控制器设计

由  $m$  台发电机组成的互联电力系统,第  $i$  台发电机的动态方程可描述为<sup>[5]</sup>

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= \omega_i - \omega_0 \\ T_{Ji} \dot{\omega}_i &= \omega_0 (P_{mi} - P_{ei}) - D_i (\omega_i - \omega_0) \end{aligned} \quad (16)$$

$$T_{\Delta 0i} \dot{E}_{qi} = -E_{qi} - (X_{di} - X_{di}') I_{di} + V_{fi}$$

其中,电磁功率的表达式为

$$P_{ei} = E_{qi} I_{qi} + (X_{qi} - X_{di}') I_{di} I_{qi} \quad (17)$$

式中:  $\delta_i$  为第  $i$  台发电机的功角(弧度);  $\omega_i$  为第  $i$  台发电机的电气角速度(rad/s);  $\omega_0$  为同步角速度(rad/s);  $E_{qi}$  为第  $i$  台发电机的暂态电势(p.u.);  $P_{mi}$  为第  $i$  台发电机的机械功率(p.u.);  $P_{ei}$  为第  $i$  台发电机的电磁功率(p.u.);  $I_{di}$  和  $I_{qi}$  分别为第  $i$  台发电机的定子电流(p.u.);  $T_{Ji}$  为第  $i$  台发电机的惯量时间常数(s);  $T_{\Delta 0i}$  为第  $i$  台发电机励磁绕组的时间常数(s);  $D_i$  为第  $i$  台发电机的阻尼系数(p.u.);  $X_{di}$  和  $X_{di}'$  分别为第  $i$  台发电机 d 轴同步电抗和暂态电抗(p.u.);  $X_{qi}$  为第  $i$  台发电机 q 轴同步电抗(p.u.);  $V_{fi}$  为第  $i$  台发电机的励磁电压(p.u.)。

定义输出方程为:

$$y_i = \delta_i - \delta_i(0), \quad i=1, \dots, m \quad (18)$$

式中:  $\delta_i(0)$  为系统正常运行时发电机  $i$  的功角。电力系统暂态稳定控制就是选择  $V_{fi}$ , 使得当  $t \rightarrow \infty$  时,  $y_i \rightarrow 0$ , 即各发电机趋于同步运行。

根据精确线性化中的知识,对式(18)求导,并利用式(16),得

$$\begin{aligned} y_i^{[1]} &= \dot{\delta}_i - \dot{\delta}_i(0) \\ y_i^{[2]} &= \ddot{\delta}_i = \frac{0}{T_{Ji}} (P_{mi} - P_{ei}) - \frac{D_i}{T_{Ji}} (\omega_i - \omega_0) \end{aligned} \quad (19)$$

$$y_i^{[3]} = \ddot{\omega}_i = \frac{0}{T_{Ji}} \dot{P}_{mi} - \frac{0}{T_{Ji}} \dot{P}_{ei} - \frac{D_i}{T_{Ji}} \dot{\omega}_i$$

对式(17)两边微分有

$$\dot{P}_{ei} = \dot{E}_{qi} I_{qi} + E_{qi} \dot{I}_{qi} + (X_{qi} - X_{di}') (\dot{I}_{di} I_{qi} + I_{di} \dot{I}_{qi}) \quad (20)$$

将式(16)和式(20)代入式(19),得

$$y_i^{[3]} = \ddot{\delta}_i = \dot{\delta}_i(x) - \dot{\delta}_i(x) V_{fi} \quad (21)$$

其中:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i(x) &= \frac{0}{T_{Ji}} \dot{P}_{mi} - \frac{D_i}{T_{Ji}} [\omega_0 (P_{mi} - P_{ei}) - D_i (\omega_i - \omega_0)] + \\ &\quad - \frac{0}{T_{Ji}} \frac{1}{T_{\Delta 0i}} [E_{qi} + (X_{di} - X_{di}') I_{di}] I_{qi} - \frac{0}{T_{Ji}} \cdot \end{aligned}$$

$$[ E_{qi} \dot{I}_{qi} - (X_{qi} - X_{di}) (\dot{I}_{di} I_{qi} + I_{di} \dot{I}_{qi}) ] \quad (22)$$

$$i(x) = \frac{0}{T_{Ji} T_{doi}} I_{qi}$$

显然  $y_i^{[3]}$  中显含了控制量  $V_{fi}$ , 即  $r_i = 3$ 。这时根据式(12)选取如下滑动面

$$S_i = c_{i1}(\dot{i} - \dot{i}(0)) + c_{i2}(\dot{i} - 0) + \dot{i}, \quad i = 1, \dots, m \quad (23)$$

由式(15)和对式(23)左右两侧进行求导, 可求得

$$\dot{S}_i = c_{i1}(\ddot{i} - \ddot{i}(0)) + c_{i2}(\ddot{i} + \ddot{i}) = -i \operatorname{sgn} S_i - k_i S_i \quad (24)$$

进而根据式(16)和式(21)代入(24), 进行一些相应的移相, 可以得到

$$V_{fi} = \frac{1}{i(x)} [ i \operatorname{sgn} S_i + k_i S_i + \dot{i}(x) + c_{i1}(\dot{i} - 0) + c_{i2} \frac{0}{T_{Ji}} (P_{mi} - P_{ei}) - c_{i2} \frac{D_i}{T_{Ji}} (\dot{i} - 0) ] \quad (25)$$

通过选取适当的参数  $c_{i1}$  和  $c_{i2}$ , 就可以实现对电力系统的稳定控制。在参数选择时有很大的选取空间, 存在多组控制参数, 只需满足切换面设计的要求即可。变结构控制的优点就体现在其鲁棒性高上, 对参数的不灵敏性上。

### 4 仿真结果及分析

考虑安德森 3 机 9 节点系统<sup>[4]</sup>。系统结构如图 1 所示, 发电机参数如表 1 所示。在不考虑发电机的凸极效应, 即认为  $X_q = X_d$  时, 系统的正常运行状态如表 2 所示。在仿真研究中, 各负荷用等值阻抗模拟, 并假设各发电机的机械功率在暂态过程中保持不变, 即  $P_{mi} = P_{mi}(0)$ 。

表 1 发电机参数

发电机	$X_d/p.u.$	$X_q/p.u.$	$R_d/p.u.$	$T_{Ji}/s$	$T_{doi}/s$	$D/p.u.$
1	0.1460	0.0608	0.000	47.28	8.96	1.00
2	0.8958	0.1198	0.000	12.80	6.00	1.00
3	1.3125	0.1813	0.000	6.02	5.89	1.00

表 2 系统的初始运行状态

发电机	$P_{m(0)}/p.u.$	$E_{q(0)}/p.u.$	$\delta(0)/\text{rad}$	$\omega(0)/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
1	0.71641	1.05664	0.039647	376.99
2	1.63000	1.05020	0.344382	376.99
3	0.85000	1.01697	0.229798	376.99

假设系统在正常运行情况下, 支路 7-8 接近节点 8 处突然发生三相接地短路故障(0.0 s 时刻), 0.1 s 时切除故障支路 7-8, 0.60 s 时重合闸成功。根

据本文提出的励磁电压控制规律, 研究和分析电力系统的暂态稳定性。其中, 故障点的选择与控制器的控制效果关系不大。通过实验仿真可以看出: 对于不同故障点, 文中所设计的控制器都能达到提高电力系统暂态稳定性, 增强系统鲁棒性的效果。

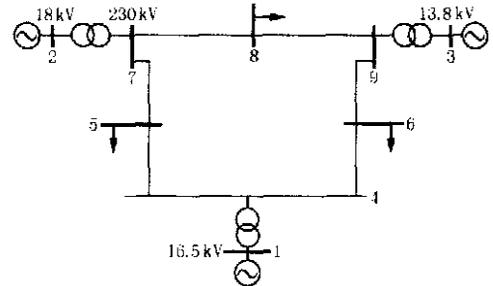
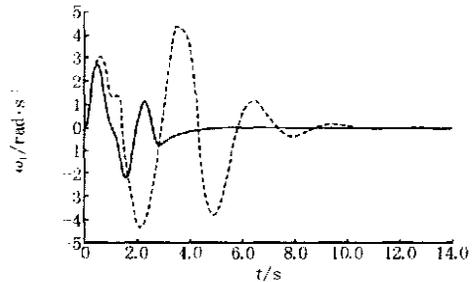
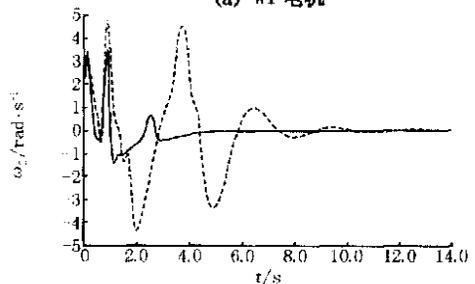


图 1 3 机 9 节点系统图

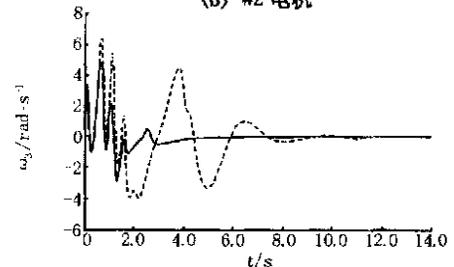
Fig. 1 Diagram of three-generator and nine-bus system



(a) #1 电机



(b) #2 电机



(c) #3 电机

注: 图中虚线是最优励磁控制的, 实线是变结构励磁控制的。

图 2 角速度随时间的变化规律

Fig. 2 Angular speeds versus time

当各发电机励磁电压按式(25)变化时, 选取控制参数  $c_{i1} = 10, c_{i2} = 10, k_i = 10, \dot{i} = 30 (1 \leq i \leq 3)$ 。控制参数选取时有很大的选择空间, 只需满足切换

面存在的要求即可。本文对控制参数未作深入详尽研究,可能存在控制效果更佳的一组控制参数。各状态变量和控制量随时间的变化规律如图 2~5 所示。其中励磁电压峰值限制在空载额定值的 5 倍。并将本文设计的控制效果与参考文献[2]中用微分几何方法设计的最优励磁控制进行了比较。其比较的图象如图 2 所示。

从图 2~4 中可以看出,该系统对于三相接地短路故障的大干扰,当励磁电压按文中设计的控制规律进行控制时,可以获得随着时间的推移系统将逐渐过渡到大干扰前稳定运行点的控制目标,即实现了对系统的暂态稳定控制。与常规的非线性最优励磁控制相比,控制响应速度得到了相当的提高,暂态过程中的振荡也有大幅减弱。从文中控制器的设计过程可以看出,控制器的设计与初始条件无关。具体不同的初始条件通过相应的数值仿真,可以看出文中所设计的控制器都有提高系统鲁棒性、加快控制速度的控制效果。

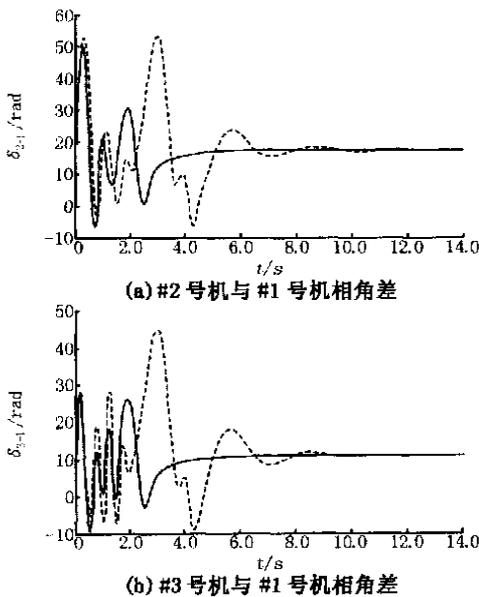


图 3 功角随时间的变化规律

Fig. 3 Rotor angles versus time

系统的各状态变量在较短的时间(大约 4~5 s)内即非常接近预定的控制目标,从而表明该控制具有较快的响应速度。

## 5 结论

本文在对多机电力系统数学模型进行精确线性化的基础上设计了一种新颖的变结构励磁控制器。暂态稳定控制的目标是各台发电机趋于额定同步转

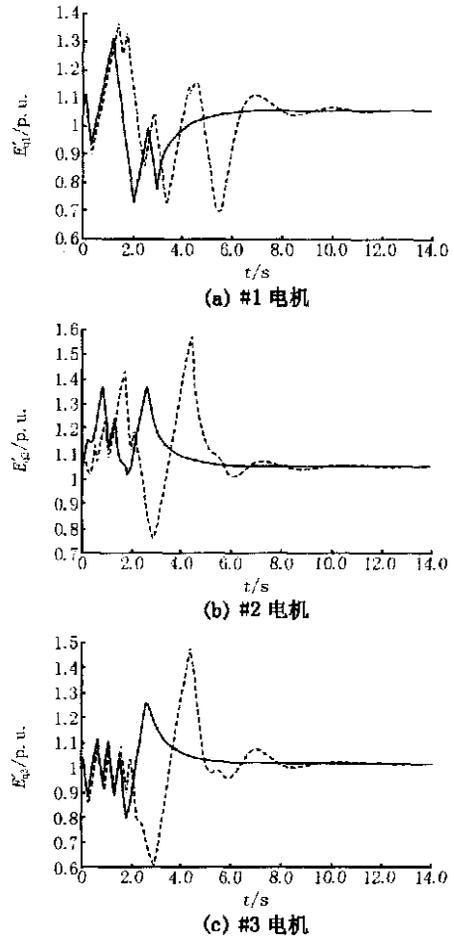


图 4 暂态电势随时间的变化规律

Fig. 4 Transient voltage versus time

速,取消了以往大家设计多机系统所需要的参考机。各发电机变结构励磁控制仅需要局部量,实现了多机系统的分散控制。在变结构励磁控制设计中,采用了指数趋近律,提高了控制的响应速度。3机系统的仿真结果表明,该变结构励磁控制器对提高系统在干扰下的暂态稳定性有非常明显的作

## 参考文献:

- [1] 程代展(CHENG Dai-zhan). 非线性系统的几何理论(Nonlinear Systems Geometry Theory) [M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press), 1988.
- [2] 卢强,孙元章(LU Qiang, SUN Yuan-zhang). 电力系统非线性控制(Power Systems Nonlinear Control) [M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press), 1993.
- [3] 高为炳(GAO Wei-bing). 变结构控制理论基础(Basis of Variable-structure Control Theory) [M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press), 1990.

(下转第 24 页 continued on page 24)

侧的零序电流产生,并且在空载合闸时  $Y_0$  侧的零序电流和 侧的环流方向相同,在正常运行和区外单相接地故障时,  $Y_0$  侧的零序电流和 侧的环流方向相反,大小相等。

2) 采用零序补偿法时( - 11  $Y_0$ ),在空载合闸时差流中的  $Y_0$  侧的零序电流被放大了两倍以上,在变压器正常运行和区外单相接地故障时,差流不受零序电流的影响。

零序电流补偿法( - 11  $Y_0$ )和消零序电流法( $Y_0$  - 11),在识别变压器涌流的能力上相当,在合闸角零度,三相剩磁 0.8,0.4, - 0.4 时各次谐波含量均小于 10%,按相制动的变压器保护将要发生误动作。

#### 参考文献:

[1] 王维俭(WANG Wei-jian). 电气主设备继电保护原理与

应用(The Principle and Application of Protection for Main Electrical Equipment) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press),1996.

[2] Gcar B, Dolinar D. Integrated Digital Power Transformer Protection[J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib,1994, 141(4).

[3] 陈增田(CHEN Zeng-tian). 电力变压器保护(第二版)(Power Transformer Protection, Second Edition) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press), 1998.

收稿日期: 2003-11-28; 修回日期: 2004-03-24

作者简介:

邓祥力(1973-),男,硕士,工程师,从事超高压保护的开  
发; E-mail: xiangli989@hotmail.com

刘世明(1972-),男,博士后,从事超高压保护的开  
发与研究。

### Comparison of two current compensation methods in transformer protection

DENG Xiang-li, LIU Shi-ming

(Yantai Dongfang Electronics Information Industry Co., Ltd, Yantai 264000, China)

**Abstract:** This paper analyzes the two current compensation methods of  $Y$  and  $Y$ . Through theoretical and logical reasoning, the algorithmic equations of the two current compensations for current transformer used by transformer protection are obtained. With a large number of simulation data from the transformer model with EMTP, the possibility of realizing the dependent harmonic blocking technique for transformer protection using by the two current compensation methods is analyzed. The results from the theoretical analysis and simulation prove the similarity of the two methods in the distinguishing fault and inrush current.

**Key words:** transformer protection; current compensation; inrush current distinguishing; dependent harmonic blocking technique; ground fault

(上接第 11 页 continued from page 11)

[4] Anderson P M, Fouad A A. 电力系统的控制与稳定(Power System Control and Stability) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing:Hydraulic and Electric Power Press),1979.

[5] 王锡凡,方万良,杜正春(WANG Xi-fan, FANG Warr-liang, DU Zheng-chun). 现代电力系统分析(Modern Power Systems Analysis) [M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press),2003.

收稿日期: 2003-12-03; 修回日期: 2004-01-07

作者简介:

杨大志(1978-),男,硕士研究生,从事电力系统稳定控制方面的研究工作; E-mail: cai9good@sina.com

杜正春(1963-),男,博士,副教授,主要从事电力系统运行与控制方面的研究工作;

方万良(1958-),男,博士,副教授,主要从事电力系统运行与控制方面的研究工作。

### Design and study of variable-structure excitation controller for multi-machine power systems

YANG Da-zhi, DU Zheng-chun, FANG Wan-liang

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Based on multi-machine nonlinear models, using state-feedback accurate linearization method and variable-structure control theory, this paper develops a new variable-structure excitation controller for multi-machine power system. In this design, the referenced machine is cancelled, and the multi-machine disperse control is realized. The simulation result of three-machine system shows that this variable-structure excitation control can effectively improve power system transient stability under big disturbance.

**Key words:** variable-structure control; accurate linearization; power system stability; excitation system