

# 含静止同步串联补偿器的单机系统非线性综合控制器设计

王 奔, 钱碧甫, 徐万良, 侯荣均

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 本文考虑含静止同步串联补偿器(SSSC)的单机无穷大系统、汽门、励磁各变量间的相互作用建立了4阶多变量3输入3输出非线性模型, 在此模型基础上, 运用动态逆系统方法完成解耦和线性化, 构造出3个单输入单输出的伪线性系统, 并采用变结构控制理论分别设计控制器. 根据MATLAB仿真结果验证了该控制方法对发电机功角, 机端电压和传输功率这3个控制指标有很好的控制效果.

**关键词:** 静止同步串联补偿器; 逆系统; 变结构控制; 系统稳定; 最优控制

**中图分类号:** TM76      **文献标识码:** A

## Design of nonlinear integrated controller for single-machine-infinite-bus system with static-synchronous-series-compensator

WANG Ben, QIAN Bi-fu, XU Wang-liang, HOU Rong-jun

(School of Electrical Engineering, South West Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

**Abstract:** For the interactions between the single-machine-infinite-bus system with static-synchronous-series-compensator, the excitation and the steam valve control, we develop a 4th order nonlinear model with three inputs and three outputs. This model is decoupled and linearized by using the dynamic inverse system theory to obtain three SISO pseudo linear systems; with them we design three SISO controllers by using the variable structure control theory. Simulation results on MATLAB show the feasibility and effectiveness of this control strategy in stabilizing the power-angle, the generator terminal voltage and the transmission power.

**Key words:** static-synchronous-series-compensator; inverse system; variable structure control; system stability; optimal control

### 1 引言(Introduction)

随着我国电网输送容量的不断增大、输电距离的不断增长, 为了减少损耗增加远距离高压输电系统的传输容量, 改善输电系统运行的稳定性, 在输电线路中采用的串联电容补偿是一项既经济又有效的措施. 当线路中加入串联补偿之后, 在线路等效电抗减小、电气距离缩短的同时, 也给电力系统安全稳定运行带来了新的问题. 而传统的串联电容器如TSC(thyristor switched capacitor), TCSC(thristor controlled series compensator)是通过投切电容来减少输电线路感抗, 从而提高输电线路的有功传输能力, 产生的大量谐波, 且容易引发线路LC振荡及次同步振荡, 导致系统不平衡. 而随着智能电网的普及和柔性交流输电技术的发展, 静止同步串联补偿器(static-synchronous-series-compensator, SSSC)越来越受到人们的重视, SSSC对提高电网的稳定性有重要作用, 同常规补偿装置相比SSSC能在同一电容性和电感性范围内, 与线路电流大小无关地产生可

控的补偿电压; 可对线路进行有功和无功补偿; 而且对次同步振荡及其他振荡现象具有一定的抗干扰能力<sup>[1]</sup>; 以及能快速或几乎瞬时地响应控制指令; SSSC必将成为未来提高线路的输送容量、优化网络潮流、解决电力全性及可靠性问题的重要手段<sup>[2-3]</sup>. 但文献[4-6]并未对励磁或汽门调节系统进行建模, 而且没有考虑到机端电压的稳定和SSSC对传输功率的灵活调节作用, 鉴于此本文联立含SSSC的单机无穷大系统、励磁、汽门控制系统的微分动力学模型, 研究其多指标控制器的控制方法, 由于线性化过程的特殊性, 应用了动态逆系统<sup>[7]</sup>解耦和变结构控制策略<sup>[8]</sup>, 最后通过MATLAB仿真验证本控制策略的有效性和高效性.

### 2 系统建模(Mathematical model of system)

SSSC是一个串联连接的同步电压源, 它通过注入一个滞后或超前于输电线路电流相角的电压来对输电线路的阻抗进行补偿, 从而达到调节线路传输功率的目的. 模型如图1所示.

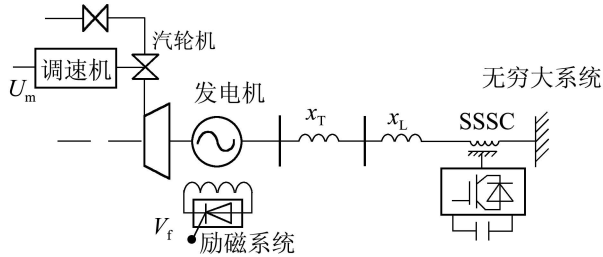


图1 单机无穷大系统模型

Fig. 1 The model of single machine infinite bus system

本文假定SSSC在器件级上已经具备了理想的控制, 建立含SSSC的单机系统以及励磁、汽门的数学模型, 发电机为隐极机, 可得到系统模型为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} \left( P_m - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) - \frac{Eq'V_s \sin \delta}{x'_d + x_T + x_L + x_c} \right), \\ \dot{Eq}' = -\frac{Eq'}{T'_d} + \frac{x_d - x'_d}{T_{d0}(x'_d + x_T + x_L + x_c)} V_s \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}} U_f, \\ \dot{P}_m = -\frac{P_m}{T_{H\Sigma}} + \frac{P_{m0}}{T_{H\Sigma}} + \frac{C_H}{T_{H\Sigma}} U_m, \end{cases} \quad (1)$$

$P_m$  为高压缸输出的机械功率;  $T_{H\Sigma} = T_H + T_{HO}$ ,  $T_H$  是高压缸的时间常数,  $T_{HO}$  是高压油动机的时间常数;  $C_H$  为高压缸功率分配系数;  $P_{m0}$  是稳压时总的机械功率;  $U_m$  为高压缸调节汽门开度控制器(主调节汽门控制器)发出的电控制信号;  $\delta$  为发电机转子运行角;  $\omega$  为转速;  $H$  为机械转动惯量;  $D$  为阻尼系数;  $Eq'$  为 q 轴暂态电势;  $x_d, x'_d, x_T, x_L$  分别为发电机 d 轴同步电抗、d 轴暂态电抗、变压器等效电抗和线路等效电抗;  $x_c$  为 SSSC 输出的等效阻抗;  $U_f$  为励磁控制输入量;  $T_{d0}, T'_d$  分别为定子绕组开路, 闭路时励磁绕组的时间常数;  $V_s$  为系统电压; 由于  $x_c$  在 SSSC 允许的范围内可任意调节, 故选择控制输入量为

$$u_1 = \frac{1}{x'_d + x_T + x_L + x_c}, u_2 = U_f, u_3 = U_m.$$

所以最终的系统模型为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0, \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} \left( P_m - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) - Eq'V_s u_1 \sin \delta \right), \\ \dot{Eq}' = -\frac{(u_1 + a)Eq'}{u_1 T_{d0}} + \frac{1}{T_{d0}} a V_s u_1 \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}} u_2, \\ \dot{P}_m = -\frac{P_m}{T_{H\Sigma}} + \frac{P_{m0}}{T_{H\Sigma}} + \frac{C_H}{T_{H\Sigma}} u_3, \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中:  $a = x_d - x'_d$ , 输出量分别为:  $y_1 = P_e, P_e$  为电磁功率,  $y_2 = V_t, y_3 = \delta$ , 其中:

$$V_t = [(x'_d V_s u_1 \sin \delta)^2 + (Eq'(1 - u_1 x'_d) + V_s x'_d u_1 \cos \delta)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

由此可见, 此系统为四阶的非线性, 强耦合3输入3输出系统.

### 3 逆系统方法(Method of inverse system)

#### 3.1 系统可逆条件(Condition of the inverse system)

根据逆系统理论<sup>[7]</sup>, 考虑多输入多输出系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m), \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m), \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m). \\ \begin{cases} y_1 = h_1(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m), \\ y_2 = h_2(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m), \\ \vdots \\ y_m = h_m(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m). \end{cases} \end{cases}$$

此系统相当于一个由输入映射到输出的算子, 其运行状态取决于初始值和控制输入( $u_1, \dots, u_m$ ), 根据一定规则构造出来的逆系统其输出是原系统的输入, 而且新系统的输入输出能满足一对一的映射关系, 即在求解非线性映射的过程中, 如果对时间求导的结果  $y_i^{(\alpha_i)}$  中显含选定的控制输入  $u_i$ , 且同时满足条件:

1) 系统可控充要条件: 在平衡点附近

$$\det \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1^{(\alpha_1)}}{\partial u_1} & \frac{\partial y_1^{(\alpha_1)}}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial y_1^{(\alpha_1)}}{\partial u_m} \\ \frac{\partial y_2^{(\alpha_2)}}{\partial u_1} & \frac{\partial y_2^{(\alpha_2)}}{\partial u_1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial y_m^{(\alpha_m)}}{\partial u_1} & \dots & \dots & \frac{\partial y_m^{(\alpha_m)}}{\partial u_m} \end{bmatrix} \neq 0.$$

2) 如果系统存在向量相对阶  $\alpha$ , 且  $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_q = n$ , 也就是系统相对阶等于原系统的阶数时, 则系统完全可逆; 当  $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_q < n$ , 则原系统可逆, 但不是完全可逆, 控制系统存在隐动态是不能完全解耦的, 还要进行隐动态的稳定性判断或另外设计附加控制器.

3) 比较系统相对阶和本性阶. 相对阶等于本性阶则系统完全可逆, 若相对阶小于本性阶则系统要添加动态补偿环节. 输入输出解耦控制分为静态解耦和动态解耦两种, 两者的区别在于解耦控制器中是否包含动态补偿环节, 若系统相对阶等于系统本性阶则系统可解耦, 如文献[9-10]的逆系统仅采用状态反馈构造, 称为静态逆, 相应的解耦称为静态解耦; 而系统相对阶小于系统本性阶, 即  $y_k^{(\alpha_k)}$  中含有某个原输入的微分项, 则须附加动态补偿环节, 故称为

动态逆, 相应的解耦称为动态解耦.

### 3.2 单机系统求逆(Inverse system of single machine system)

对式(2)构造逆系统, 方法如下: 首先, 对输出 $Y$ 分别求导, 直至其 $n$ 阶导数中显含控制输入 $U$ . 讨论 $y_1$ ,  $y_1 = Eq'V_s u_1 \sin \delta$ , 已经显含 $u_1$ 故不用求导. 讨论 $y_2$ :

$$\begin{cases} y_2 = [(x'_d V_s u_1 \sin \delta)^2 + (Eq'(1 - u_1 x'_d) + V_s x'_d u_1 \cos \delta)^2]^{\frac{1}{2}}, \\ \dot{y}_2 = \frac{1}{2\sqrt{V_t}} \left\{ \frac{d[(x'_d V_s u_1 \sin \delta)^2]}{dt} + 2[Eq' - \right. \end{cases} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} & \dot{Eq}' u_1 x'_d - Eq' \dot{u}_1 x'_d + V_s x'_d \dot{u}_1 \cos \delta - \\ & V_s x'_d u_1 \dot{\delta} \sin \delta \} = f_2(\delta, \omega, Eq', u_1, \dot{u}_1, u_2), \end{aligned}$$

式(4)中 $\dot{Eq}'$ 可由式(2)知结果已显含了 $u_2$ ; 讨论 $y_3$ :

$$\begin{cases} y_3 = \delta, \\ \dot{y}_3 = \dot{\delta}, \\ \ddot{y}_3 = \dot{\omega}, \\ \ddot{y}_3 = \frac{\omega_0}{H} (\dot{P}_m - \frac{D\dot{\omega}}{\omega_0} - \dot{Eq}' V_s \sin(\delta u_1) - \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & Eq' V_s \sin(\delta \dot{u}_1) - Eq' V_s \dot{\delta} \cos(\delta u_1)) = \\ & f_3(\delta, \omega, Eq', P_m, u_1, \dot{u}_1, u_2, u_3). \end{aligned}$$

同样由式(2)知式(5)中唯有 $\dot{P}_m$ 项式显含了控制输入 $u_3$ .

而由于 $\dot{y}_2, \ddot{y}_3$ 中存在 $\dot{u}_1$ 项须采用 $y_1$ 的导数来替换, 本系统中对 $y_1$ 求得其一阶导, 得

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= \dot{Eq}' V_s u_1 \sin \delta + Eq' V_s \dot{u}_1 \sin \delta + \\ & Eq' V_s u_1 \dot{\delta} \cos \delta = f_1(\delta, \omega, Eq' u_1, \dot{u}_1). \end{aligned} \quad (6)$$

可证明条件(1)是满足的, 而且系统输出导数的本性阶为(1, 1, 3), 相对阶为(0, 1, 3)系统需要进行动态解耦即添加了 $\dot{y}_1$ 环节, 则系统可逆. 因初值已知, 根据式(4)–(6)之间的代数关系可得3个逆系统分别为:

$$u_1 = k_1(\delta, \omega, Eq', \dot{y}_2, \dot{y}_1), \quad (7)$$

$$u_2 = k_2(\delta, \omega, Eq', \dot{y}_2, \dot{y}_1, u_1), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} u_3 &= \frac{T_{H\Sigma}}{C_H} \left( \frac{H\ddot{y}_3}{\omega_0} + \frac{D\dot{\omega}}{\omega_0} + \right. \\ & \left. \dot{Eq}' V_s u_1 \sin \delta + Eq' V_s \dot{u}_1 \sin \delta + \right. \\ & \left. Eq' V_s u_1 \dot{\delta} \cos \delta + \frac{P_m}{T_{H\Sigma}} - \frac{P_{m0}}{T_{H\Sigma}} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

定义伪线性系统的3个输入为:  $v_1 = \dot{y}_1, v_2 = \dot{y}_2, v_3 = \ddot{y}_3$ . 构造出3个伪线性系统为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = v_1, \\ y_1 = P_e, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_2 = v_2, \\ y_2 = V_t, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \ddot{z}_3 = v_3, \\ y_3 = \delta. \end{cases} \quad (12)$$

### 3.3 变结构控制器设计(Design of variable structure controller)

由此对伪线性系统采用变结构控制的指数趋近率<sup>[11]</sup>设计方法, 控制器设计目标为 $\lambda(x) \rightarrow \lambda^*(x)$ , 根据输入输出系统的控制设计方法, 对单输入单输出线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3, \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n, \\ \dot{x}_n = v, \\ y = \lambda - \lambda^*. \end{cases} \quad (13)$$

变结构控制设计具有一般性, 取切换面

$$s = c_1 y + c_2 \dot{y} + c_3 \ddot{y} + \dots + c_{n-1} y^{(n-2)} + y^{(n-1)}. \quad (14)$$

对 $s$ 求导可得到

$$\dot{s} = c_1 \dot{y} + c_2 \ddot{y} + c_3 \ddot{\ddot{y}}_3 + \dots + c_{n-1} y^{(n-1)} + y^n, \quad (15)$$

其中 $c_1, c_2, \dots, c_{n-1}$ 根据极点配置选取, 采用指数趋近率 $\dot{s} = -\varepsilon \text{sgn } s - ks$ 的设计方法: 将式(14)–(15)代入, 所以伪线性系统的变结构控制率为

$$v = -\varepsilon \text{sgn } s - ks - (c_1 \dot{y} + c_2 \ddot{y} + c_3 \ddot{\ddot{y}}_3 + \dots + c_{n-1} y^{(n-1)}), \quad (16)$$

式中:  $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数,  $\varepsilon$ 和 $k$ 为变结构参数, 为使系统能达到理想的控制效果, 适当增大 $k, c$ 可使系统运行点快速趋向滑模面, 而适当减小参数 $\varepsilon$ 可减小运动在稳定点的抖振<sup>[12]</sup>.

最后由逆系统(7)–(9)可分别求得原系统的最终控制率 $u_1, u_2, u_3$ . 如图2为总体控制框图.

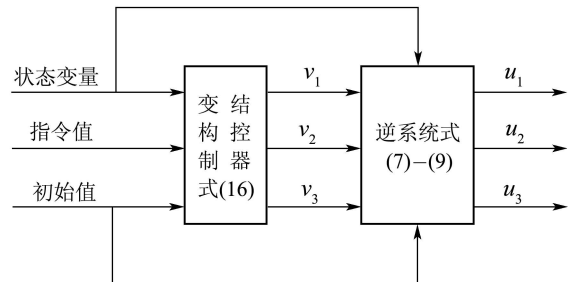


图2 控制原理图

Fig. 2 Schematic diagram of control system

### 4 仿真实验((Simulation test)

为验证本控制策略对发电机功角、机端电压、传输功率3个控制指标解耦控制的有效性. 根据式(2)用MATLAB的m函数进行仿真, 仿真参数如下:  $x_d =$

1.302,  $x'_d = 0.287$ ,  $x_q = 0.287$ ,  $x_T = 0.1$ ,  $x_L = 0.51$ ,  $T_{d0} = 5$  s,  $V_s = 1$ ,  $D = 5$ ,  $H = 8$ ,  $C_H = 1$ ,  $T_{H\Sigma} = 0.35$ ; 初始运行状态  $\delta = 60^\circ$ ,  $P_{m0} = 0.8$ ,  $\omega_0 = 314$  rad/s,  $P_{m0} = 0.8$ ,  $x_{SSC} = -0.3$ ,  $V_t = 0.558$ ; 变结构控制器参数:  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.2$ ,  $\varepsilon_3 = 0.1$ ,  $k_1 = k_2 = k_3 = 50$ ,  $c_1 = 30$ ,  $c_2 = 11$ .

首先, 单机系统运行至5s时, 图3为改变传输功率的指令值时的仿真图, 虚线为参考文献[12]设计的最优控制的控制效果, 仿真根据式子

$$P = \frac{V_s V_t}{X_L} \sin \delta. \quad (17)$$

如图3所示, 维持机端电压(b)和功角(a)的稳定不变, 改变功率从初始指令值突变为0.4, 旨在能够通过SSSC增加线路阻抗, 使得线路阻抗阻碍功率传输, 减少原动机的功率传输, 阻尼系统因此而引起的振荡. 这种方法是本章SSSC在电力系统中最主要的应用. 在传输功率(c)改变的同时, 因为本文采用了解耦和变结构的控制方法, 机端电压(b)和功角(a)迅速稳定, 且比相同情况下的最优控制方法(图中虚线所示)响应时间更快, 对系统干扰更小.

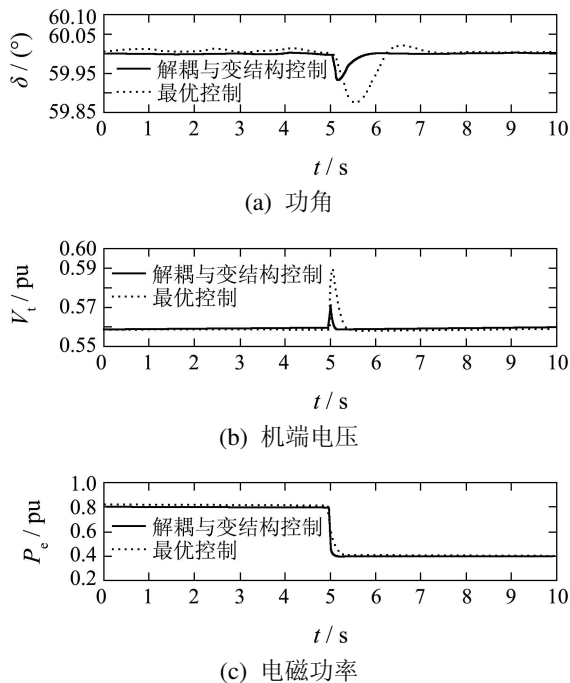


图3 传输功率指令值阶跃  
Fig. 3 Simulation of power step

同时为了检验本章控制策略的灵活性还做了以下仿真: 图4为改变发电机运行点至70°的仿真图. 图中(a)为发电机功角阶跃, 因为电磁功率和极端电压和它的复杂耦合关系, 系统运行将发生偏差甚至会因扰动而系统崩溃,  $\sin \delta$ 项将增大, 为此, 通过SSSC输出无功电压来拉大整个线路的 $X_L$ 值使线路阻抗增大, 约束功率传输. 有图可见, 机端电压(b)和传输功率(c)经过一个振荡后迅速恢复到初始值.

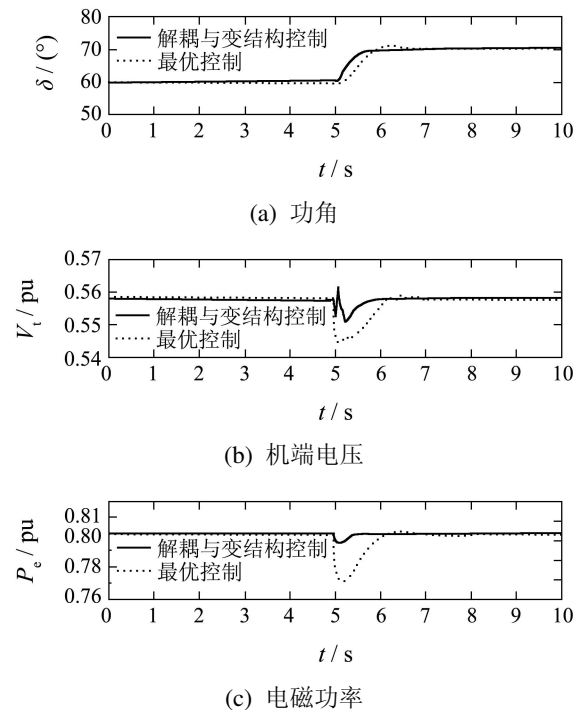
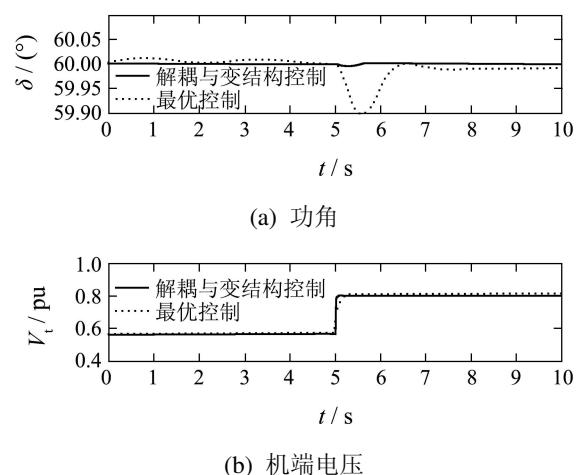


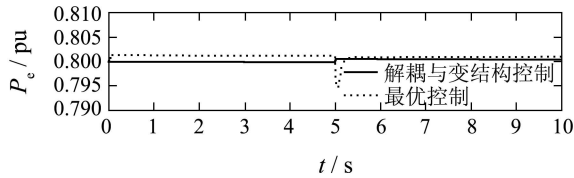
图4 发电机运行点阶跃  
Fig. 4 Simulation of operation point step

而图5为改变机端电压指令值为0.8, 即增加 $V_t$ , 为保持系统的其他两个输出的稳定, SSSC通过控制器增大输电线路阻抗 $X_L$ , SSSC输出无功. 由图可见, 在机端电压(b)在指令改变后快速地改变到指令值, 同时在本控制策略的设计下, 功角(a)和功率(c)几乎没有大的振荡. 由图5中虚线所示为最优控制, 因为最优是线性的综合方法, 性能要比变结构略弱, 稳定性略差.

综上所述, 由于对系统解耦和采用了非线性控制策略, 系统在干扰作用下仍能稳定运行且成功跟踪指令, 而且本文设计的变结构控制策略在稳态效果和动态响应能力都要比最优控制优越, 而且具有很好的稳定性和灵敏性.



(b) 机端电压



(c) 电磁功率

图5 机端电压阶跃

Fig. 5 Simulation of terminal voltage step

## 5 结论(Conclusions)

本文建立了含SSSC的单机系统四阶多变量3输入3输出非线性模型。在此模型基础上,运用动态逆系统方法完成解耦和线性化,构造出3个单输入单输出的伪线性系统,并采用变结构控制理论分别设计控制器。根据仿真结果表明了该解耦和控制方法对发电机功角、机端电压和传输功率这三个控制指标有很好的控制效果,且有很强的指令跟踪效果,能有效提高电力系统的暂态稳定性。

## 参考文献(References):

- [1] BONGIORNO M, SVENSSON J, NGQUIST L. Single-phase VSC based SSSC for subsynchronous resonance damping[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(3): 1544 – 1552.
- [2] 周孝信. 电力系统串联补偿[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [3] GYUGYI L, SCHAUDER C D, SEN K K. Static Synchronous series compensator: a solid-state approach to the series compensation of transmission lines[J]. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 1997, 12(1): 406 – 417.
- [4] 赵洋, 肖湘宁. 基于微分几何方法的静止同步串联补偿器非线性控制[J]. 电工技术学报, 2008, 23(4): 132 – 136.  
(ZHAO Yang, XIAO Xiangning. Study of nonlinear control of SSSC based on differential geometry approach[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(4): 132 – 136.)
- [5] 王超, 舒乃秋, 吕小康. 基于非线性控制理论的SSSC控制器的研究[J]. 中国电力, 2004, 37(4): 36 – 38.  
(WANG Chao, SHU Naiqin, LU Xiaojing. Study on SSSC controller based on nonlinear control theory[J]. *Electric Power*, 2004, 37(4): 36 – 38.)
- [6] 郑旭. 基于反馈线性化的TCSC非线性PID控制[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(9): 86 – 88.  
(ZHENG Xu. Nonlinear PID controller for TCSC based on feedback linearization[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2006, 26(9): 86 – 88.)
- [7] 戴先中. 多变量非线性系统的神经逆控制方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [8] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [9] 黄崇鑫, 王奔, 邹超, 等. 并联有源电力滤波器新型控制策略仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 27(5): 52 – 55.  
(HUANG Chongxin, WANG Ben, ZOU Chao, et al. Simulation research on shunt active power filter with a novel control method[J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(5): 52 – 55.)
- [10] 邓家泽, 王奔, 黄崇鑫, 等. 基于晶闸管STATCOM的无功补偿控制[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 48 – 51.  
(DENG Jiaye, WANG Ben, HUANG Chongxin, et al. Reactive power compensation control based on thyristor based STATCOM[J]. *Power System Technology*, 2009, 33(1): 48 – 51.)
- [11] WANG B, BELMANS R. Nonlinear and variable structure excitation controller for power system stability[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2006, 14(4): 339 – 347.
- [12] 卢强. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

## 作者简介:

王奔 (1960—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统非线性及变结构控制;

钱碧甫 (1982—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统非线性控制、柔性交流输电控制, E-mail: qianbifu@163.com;

徐万良 (1986—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量分析与控制;

侯荣均 (1986—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为现代电力电子技术在电力系统中的应用。