

基于扩张状态观测器的SVC非线性变结构控制

康忠健¹, 孟繁玉²

(1. 中国石油大学(华东)电气工程系, 山东 东营 257061; 2. 山东理工大学电气工程系, 山东 淄博 255049)

摘要: 针对电力系统的强非线性和不确定性, 将自抗扰控制技术引入变结构控制器的设计, 设计了能同时改善电力系统功角稳定和装设点电压动态特性的静止无功补偿(SVC)控制器, 所得的控制规律与系统运行点和网络结构完全无关。仿真结果表明所提出的非线性变结构SVC控制器能有效地改善系统的动态稳定性。

关键词: 静止无功补偿器; 变结构控制; 扩张状态观测器

Nonlinear variable structure SVC control based on extended-states-observer

KANG Zhong-jian¹, MENG Fan-yu²

(1. Department of Electrical Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: As for the strong nonlinear and uncertain characteristic of the power system, based on the Extended-States-Observer and the variable structure control a nonlinear robust variable structure controller for Static Var Compensator(SVC), which can improve power angle stability of power system and local voltage characteristics of SVC, is proposed in the paper. The controller is robust to the change of network parameters and working point of system. The simulation suggests that the nonlinear robust variable structure controller can improve dynamic stability of power system effectively.

Key words: static VAR compensator; variable structure control; extended-states-observer

中图分类号: TM76; TP277 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)22-0010-04

0 引言

静止无功补偿器(SVC)是灵活交流输电系统中的一个重要组成部分, 其结构简单并易于实现, 因此被广泛应用于电力系统中。与传统的开关电抗器或并联电容器比较, 它能连续而迅速地控制无功功率, 即以快速的响应, 通过发出或吸收无功功率来控制它所连接的电力系统的节点电压。所以SVC可以改善电力系统的静态、暂态稳定, 降低瞬时过电压, 抑制电力系统的功率振荡, 阻尼电力系统的次同步谐振, 从而提高电力系统的运行性能。

SVC在电力系统中作用的发挥不仅取决于装设SVC的地点及容量, 而且还取决于其采用的控制方式。电力系统是一个强非线性的不确定系统, 基于反馈线性化理论^[1,2]而设计的非线性SVC控制器对系统工作点的变化具有良好的鲁棒性。但对模型摄动强烈的受控对象并不适用。

本文将自抗扰控制技术^[3-5]的思想引入变结构控制器的设计, 设计出一种基于扩张状态观测器的

非线性变结构控制器, 并将其用于SVC控制器的设计, 提高了SVC控制器的自抗扰能力, 使SVC在快速控制安装点电压的同时, 有效地改善了系统的阻尼特性。

1 基于扩张状态观测器的非线性变结构控制器

1.1 基于扩张状态观测器的动态反馈线性化

对于受未知外扰作用的不确定非线性系统

$$\dot{x}^{(n)} = f_0(x, \dots, x^{(n-1)}, t) + f_\omega(x, \dots, x^{(n-1)}, w(t), t) + b \cdot u(t) \quad (1)$$

式中: $f_0(x, \dots, x^{(n-1)}, t)$ 为系统已知数学函数,

$f_\omega(x, \dots, x^{(n-1)}, w(t), t)$ 为系统未知函数, $u(t)$ 为控制量,

$x(t), \dots, x^{(n-1)}(t)$ 是系统(1)的状态变量。令 $x_1 = x(t)$, $x_2 = \dot{x}(t), \dots, x_n = x^{(n-1)}(t)$, 则系统(1)可以重写为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f_0(x_1, x_2, \dots, x_n) + f_\omega(x_1, x_2, \dots, x_n, w(t)) + b \cdot u(t) \end{cases} \quad (2)$$

对系统 (2) 可构造如下形式的扩张状态观测器^[6]:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - l_1 \cdot (z_1 - x(t)) \\ \dot{z}_2 = z_3 - l_2 \cdot (z_1 - x(t)) \\ \vdots \\ \dot{z}_n = z_{n+1} - l_n \cdot (z_1 - x(t)) + b \cdot u(t) + f_0(x, z_2, \dots, z_n, t) \\ \dot{z}_{n+1} = -l_{n+1} \cdot (z_1 - x(t)) \end{cases} \quad (3)$$

令
$$a(t) = f_0(x, \dots, x^{(n-1)}, t) + f_\omega(x, \dots, x^{(n-1)}, t) - f_0(x, z_2, \dots, z_n, t) \quad (4)$$

使扩张状态观测器 (3) 的各状态变量 $z_1(t), \dots, z_n(t)$ 分别跟踪系统 (2) 的各状态变量 $x(t), \dots, x^{(n-1)}(t)$ 和 $a(t)$ 。

参照文献[6], 采用动态补偿极点配置法配置参数 l_1, l_2, \dots, l_{n+1} , 使扩张状态观测器 (3) 的各状态变量将分别跟踪系统 (1) 的各状态变量和 $a(t)$, 即使当系统的不确定因素 $f_\omega(x, \dots, x^{(n-1)}, w(t), t)$ 变化时, z_{n+1} 也能实时估计出 $a(t)$ 的值, 即

$$z_{n+1}(t) = a(t) \quad (5)$$

1.2 基于扩张状态观测器的非线性变结构控制器设计

令:

$$u(t) = \frac{1}{b} \cdot (u_0(t) - z_{n+1}(t) - f_0(x, z_2, \dots, z_n, t)) \quad (6)$$

将式 (6)、式 (7) 带入式 (2), 可得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n = u_0(t) \end{cases} \quad (7)$$

考虑到ESO的跟踪误差与控制器的限幅特性, 选用鲁棒性较强的变结构控制理论来设计反馈线性化后的伪线性系统。

对系统 (7) 定义状态向量、给定运动状态向量、偏差向量分别为 $X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$ 、 $X_d = [x_d, \dot{x}_d, \dots, x_d^{(n-1)}]^T$ 和 $e = x - x_d = [e_1, e_2, \dots, e_n]^T$, 则对系统 (7) 可设计给定运动的变结构控制器^[7], 当采用趋近律控制时, 变结构控制为

$$u_0 = -\frac{1}{b} [\text{esgn}(S) + kS + C^T A_c E] - [\text{esgn}(C^T E) + \sum_{i=1}^n (kc_i + c_{i-1})x_i - \sum_{i=1}^n (kc_i + c_{i-1})x_d^{(i-1)}] \quad (8)$$

其中: $S = C^T E = e_n + c_{n-1}e_{n-1} + \dots + c_2e_2 + c_1e_1$ 。式

(3)、式 (6) 与式 (8) 一起构成非线性变结构控制器的控制规律 $u(t)$ 。

2 基于扩张状态观测器的 SVC 非线性变结构控制器

2.1 数学模型

具有 SVC 的单机无穷大系统等值电路图如图 1 所示。假设发电机采用经典二阶模型, E' 恒定。

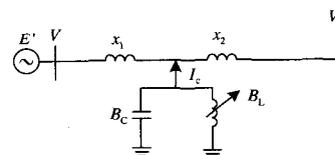


图 1 具有 SVC 的单机无穷大系统等值电路图

Fig.1 Equivalent circuit diagram of one-machine infinite-bus system with SVC

其数学模型为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \Delta\omega \cdot \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{1}{H} \cdot (P_m - P_e) - \frac{D}{H} \cdot \Delta\omega \\ \dot{B}_L = \frac{1}{T_C} (-B_L + B_{L0} + u_B) \end{cases} \quad (9)$$

式中: δ 为发电机转子摇摆角; $\Delta\omega$ 为发电机转子角速度增量; ω_0 为系统同步角速度; D 为发电机阻尼系数; H 为发电机组转子的惯性时间常数; P_m 为发电机机械功率; P_e 为发电机输出的电磁功率; u_B 为 SVC 控制的输入; T_C 为 SVC 及调节系统的惯性时间常数; B_L 为 SVC 中可调电感等效电纳值; B_{L0} 为 SVC 中可调电感初始电纳值; 式中 P_e 为:

$$P_e = \frac{E' V_c \sin \delta}{x_1 + x_2 + x_1 x_2 (B_L - B_C)} \quad (10)$$

其中: E' 为发电机暂态电势, V_C 为无穷大母线电

压; x_1 和 x_2 为线路电抗; B_C 为 SVC 中固定电容与线路电容的合成等值电容。

2.2 基于扩张状态观测器的 SVC 非线性变结构控制器的设计

假设 $\Delta\omega$ 可以通过直接或间接方法获得。令 $z = \Delta\omega$, 则式 (9) 可表示为:

$$\ddot{z} = \frac{1}{H} \left(\dot{P}_m - \dot{P}_e \right) - \frac{D}{H} \dot{z} \quad (11)$$

将式 (10) 代入式 (11), 令

$X_\Sigma = x_1 + x_2 + x_1 x_2 (B_L - B_C)$ 有:

$$\ddot{z} = \frac{\dot{P}_m}{H} - \frac{D}{H} \dot{z} - \frac{E V_C \cos \delta}{H X_\Sigma} z - \frac{E V_C x_1 x_2 \sin \delta}{H X_\Sigma^2 T_B} (-B_L + B_{L0}) - \frac{E V_C x_1 x_2 \sin \delta}{H X_\Sigma^2 T_B} u_B \quad (12)$$

令 $b_0 = \frac{E V_C x_1 x_2 \sin \delta_0}{H X_\Sigma^2 T_B} = \frac{P_{e0}}{H X_\Sigma^2 T_B}$, 其中 δ_0, P_{e0} 分别为故障前 δ 和 P_e 的值, 则式 (12) 变为:

$$\ddot{z} = \frac{\dot{P}_m}{H} - \frac{D}{H} \dot{z} - \frac{P_{e0}}{H} \text{ctg}(\delta_0) z - \frac{P_{e0}}{H} (\text{ctg}(\delta) - \text{ctg}(\delta_0)) z - \frac{P_{e0}}{H X_\Sigma^2 T_B} (-B_L + B_{L0}) - \frac{P_e - P_{e0}}{H X_\Sigma^2 T_B} u_B - b_0 u_B \quad (13)$$

$f_0(z) = \frac{\dot{P}_m}{H} - \frac{D}{H} \dot{z} - \frac{P_{e0}}{H} \text{ctg}(\delta_0) z$ 是式 (13) 表示的非线性不确定系统的已知参数部分, 运用本文所提出的非线性变结构控制器设计方法对该系统进行设计, 可得 SVC 控制规律为:

$$u_B = \frac{1}{b_0} (u_0(t) - z_3) \quad (14)$$

扩张状态观测器为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - 37(z_1 - z) \\ \dot{z}_2 = z_3 - 468(z_1 - z) - \frac{\dot{P}_m}{H} + \frac{D}{H} z_2 + \frac{P_{e0}}{H} \text{ctg}(\delta_0) z_1 - b_0 \cdot u_B \\ \dot{z}_3 = 1953(z_1 - z) \end{cases} \quad (15)$$

忽略 ESO 的跟踪误差时, 系统的扩张状态为:

$$a(t) = -\frac{P_{e0}}{H} (\text{ctg}(\delta) - \text{ctg}(\delta_0)) z -$$

$$\frac{P_{e0}}{H X_\Sigma^2 T_B} (-B_L + B_{L0}) - \frac{P_e - P_{e0}}{H X_\Sigma^2 T_B} u_B$$

z_3 为 $a(t)$ 的实时估计值, 可以动态补偿包含系

统未知因素的作用, 使控制器对系统运行点和网络结构的变化具有良好的适应性和鲁棒性。

以上是以改善系统功角特性为目标的 SVC 的非线性自抗扰变结构控制规律, 为了保证装设点电压的动态特性, 可采用串级控制^[8], 令式 (15) 中 z 为:

$$z = \Delta V_{tc} + k_v \cdot \Delta V_{tc} \quad (16)$$

式中: $\Delta V_{tc} = V_{tc0} - V_{tc}$, V_{tc}, V_{tc0} 分别是 SVC 装设点的电压及其设定值, k_v 是装设点电压偏差的加权系数, 取 $k_v=0.01$ 则可同时改善系统功角特性和保证装设点电压的动态特性这两种特性。

3 数值仿真分析

仿真系统如图 1 所示, 发电机及网络参数为: $X_d=0.1, X'_d=0.031, X_q=0.1437, H=42, T_{d0}=10.2, V_t=1.0, x_1=x_2=0.08525, X_T=0.034, B_C=0.87, B_{Lmax}=3.6$ 。仿真条件为: 系统于 $t=0.1$ s 在 F 点发生三相短路故障, $t=0.15$ s 故障消除。图 2 仿真条件的初始功角 $\delta_0=73^\circ$, 图 3 仿真条件的初始功角 $\delta_0=81^\circ$, 其中图 2 和图 3 中的仿真曲线 1、2、3 分别为两种仿真条件下常规 SVC 控制、基于反馈线性化的变结构 SVC 控制及基于扩张状态观测器的非线性变结构 SVC 控制下的暂态响应曲线。

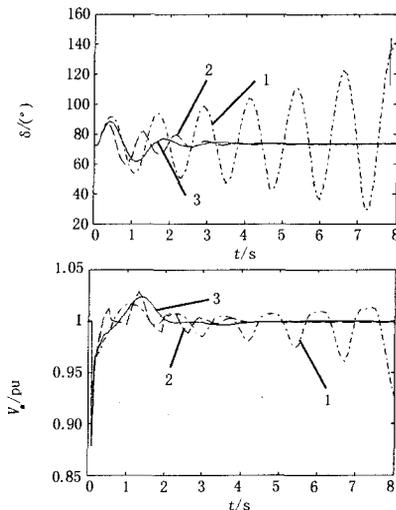


图 2 三相短路故障下系统暂态响应 ($\delta_0 = 73^\circ$)

Fig.2 The transient response under three phases short ($\delta_0 = 73^\circ$)

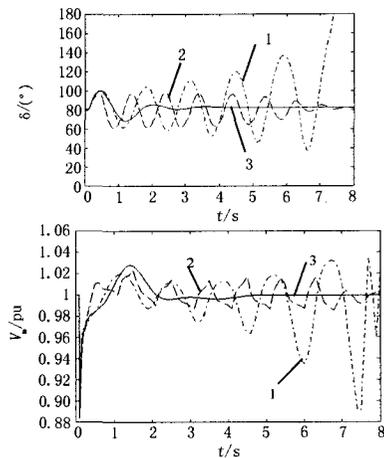


图3 三相短路故障下系统暂态响应 ($\delta_0 = 81^\circ$)

Fig.3 The transient response under three phases short ($\delta_0 = 81^\circ$)

由图 2、图 3 仿真结果对比可以看出,在不同运行点下系统发生大扰动时,与常规控制器和反馈线性化变结构器控制比较,非线性自抗扰变结构控制器对系统暂态稳定性能的改善更加显著,对系统运行点和网络结构的变化具有更好的适应性和鲁棒性。

4 结语

本文利用扩张状态观测器和变结构理论,在已有 SVC 模型的基础上,设计出一种基于扩张状态观测器的变结构 SVC 控制器,避免了基于反馈线性化的非线性 SVC 控制由于数学模型的误差而影响控制器性能的缺点。仿真结果表明本文所设计的 SVC 控制器能有效地改善电力系统的稳定性,对系统运行点和网络结构的变化具有更好的适应性和鲁棒性,在工业应用上具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 于占勋, 陈学允. 用于静止无功补偿器的变结构控制器的设计[J]. 电网技术, 1997, 21(10): 50-61.
YU Zhan-xun, CHEN Xue-yun. The Design of Variable Structure for Static Var Compensator[J]. Power System Technology, 1997, 21(10): 50-61.
- [2] 马幼捷, 周雪松. 静止无功补偿器非线性控制对系统角度稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12):

84-88

MA You-jie, ZHOU Xue-song. Study on Nonlinear SVC Control for Improving Power System Stability[J]. Proceedings of CSEE, 2003, 23(12): 84-88.

- [3] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策, 1995, 10(1): 85-88.
HAN Jing-qing. An Extended State Observer for a Class of Uncertain Plant[J]. Control and Decision-making, 1995, 10(1): 85-88.
- [4] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
HAN Jing-qing. Auto-disturbance-rejection Controller and Its Application[J]. Control and Decision-making, 1998, 13(1): 19-23.
- [5] 黄一, 张文革. 自抗扰控制器的发展[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 485-492.
HUANG Yi, ZHANG Wen-ge. Development of Active Disturbance Rejection Controller[J]. Control Theory and Applications, 2002, 19(4): 485-492.
- [6] 康忠健, 陈学允. 非线性扩张状态观测器的一种设计方法[J]. 电机与控制学报, 2001, 5(3): 199-203.
KANG Zhong-jian, CHEN Xun-yun. A Design Method of Nonlinear Extension State Observer[J]. Electric Machines and Control, 2001, 5(30): 199-203.
- [7] 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.
GAO Wei-bing. The Theory and Design Method of Variable Structure Control[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [8] 康忠健, 陈学允. 用于静止无功补偿器的非线性状态 PI 控制器[J]. 中国电力, 2001, 34(2): 35-37.
KANG Zhong-jian, CHEN Xun-yun. The Nonlinear State PI Control for Static Var Compensator[J]. Electric Power, 2001, 34(2): 35-37.

收稿日期: 2007-03-12;

修回日期: 2007-09-16

作者简介:

康忠健(1971-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定分析及非线性控制、电力系统故障检测与诊断、微机自动控制; E-mail: kangzjzh@163.com

孟繁玉(1981-), 女, 硕士, 助教, 主要研究方向为电力系统稳定分析及非线性控制、微机自动控制。