

SVC 的模糊变结构控制对电力系统稳定性的影响

刘瑞叶, 刘宝柱

(哈尔滨工业大学电气系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 在非线形变结构控制理论与模糊控制理论的基础上, 将二者结合起来进行 SVC 模糊变结构控制器 (FVSC) 的设计。该控制器引入经可调整模糊控制规则推理得出的附加控制信号来改善系统的阻尼特性, 同时结合自动电压调节器改善电压特性的。针对输电线上装设 SVC 的单机—无穷大系统进行的仿真计算表明: SVC 的模糊变结构控制方式与变结构控制、常规控制方式相比, 在能够明显地改善电力系统的稳定性的同时, 可以抑制暂态响应中的电压波动, 并且能够适应系统运行工作点的变化。

关键词: 静止无功补偿器 (SVC); 模糊变结构控制; 电力系统稳定性

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)06-0013-03

1 引言

静止无功补偿器 (SVC) 由于其在动态电压支持与无功补偿方面的突出特性, 在电力系统中自投入运行以来已得到了广泛的应用。除此之外, SVC 可以抑制系统振荡, 通过向系统提供同步阻尼而提高系统的小干扰稳定性, 大干扰下可以提高系统的暂态稳定性, 同时, SVC 也能够提高系统的输送功率极限^[1,2]。

在电力网络规模日益扩大、结构日趋复杂的今天, 其安全性与稳定性问题也愈加突出。同时, 现代电力电子技术的迅速发展为 SVC 的控制手段提供了更加广阔的选择空间。考虑如何利用 SVC 来改善电力系统的稳定性具有重要意义。

近几年来, 针对于非线性系统的模糊变结构控制 (fuzzy variable structure control, FVSC) 技术发展很快。非线性变结构控制解决了一大类非线性控制的鲁棒性和稳定性的问题, 但是当控制系统趋于稳态时, 会出现高频抖动。模糊控制特别适用于一类对象定义不完善或者不能用精确的数学模型来描述的复杂被控系统。将模糊控制引入非线性变结构控制中, 可以解决变结构控制趋于稳态时的高频抖动问题, 从而使控制器具有很高的鲁棒性及良好的控制效果, 有效地提高系统的稳定性^[4,5]。

本文在已有 SVC 数学模型的基础上, 利用 FVSC 技术对 SVC 的控制器进行重新设计, 使该控制器具有较强的鲁棒性, 且能够减小系统趋于稳态时的高频抖动。因此, 可以借助 FVSC 控制下的 SVC 在提高系统的稳定性的同时改善系统的动态品质。

2 系统数学模型

图 1 给出了单机—无穷大系统的等值电路图。可调节的 SVC (固定电容器 FC 及晶闸管控制的电抗器 TCR 型) 装设在输电线路的中间。此处假定:

- 1) 发电机采用经典二阶模型, E' 恒定;
- 2) 发电机输入机械功率 P_m 恒定;
- 3) SVC 采用一阶惯性环节。线性化的 SVC 控制系统图如图 2 所示。

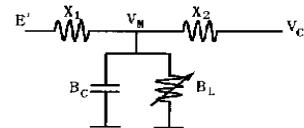


图 1 等值电路图

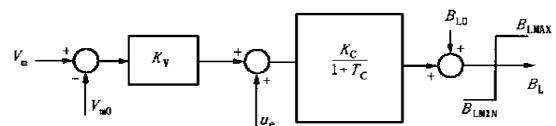


图 2 SVC 模糊变结构控制系统图

Abstract: This paper presented a new design of GIS system which combined the analysis and application function of DMS and relay protection application function. The system used some similar systems' merits for reference. It made use of some advanced cyber - technique and combined some comparatively mature software. The system had some traits, such as, opened sustaining software plate, friendly man - machine interface and resultful security and reliability.

Keywords: GIS; DMS; database

单机—无穷大系统的非线性状态方程为：

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} &= \dots 0 \\ \frac{d}{dt} &= \frac{0}{H} (P_M - P_e) - \frac{D}{H} (\dots 0) \\ \frac{dB_L}{dt} &= \frac{1}{T_C} (\dots B_L + B_{L0}) + \frac{K_C u}{T_C} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $P_e = \frac{E V_C \sin(\dots)}{x_1 + x_2 + x_1 x_2 (B_L - B_C)}$ (2)

这里,SVC 控制器的输入量 u 采用附加控制信号 u_e 来改善系统的阻尼特性,并引入电压偏差信号进一步改善电压特性。此时,输入的控制量 u 为：

$$u = K_V (V_m - V_{m0}) + u_e \quad (3)$$

为发电机转子角度; $\omega = 314\text{rad/s}$ 为发电机转子同步角速度; x_d 为发电机暂态电抗 x_d 与二分之一输电线路电抗、变压器的电抗之和; x_2 为装设点到无穷大母线之间的线路电抗; V_C 为无穷大母线电压; H 为发电机的惯性时间常数; D 为阻尼系数, B_{L0} 为正常运行时的电抗器的电纳值; B_L 为并联电抗器的电纳值; B_C 为并联电容器与输电线路的电纳之和; K_C 和 T_C 为放大倍数与时间常数; K_V 为放大倍数, u 为控制输入量。 V_m 为 SVC 装设点电压, V_{m0} 为 SVC 装设点正常运行时的电压值。

只考虑附加信号的作用,将式(1)写成仿射非线性系统的形式,即

$$\dot{X} = f(X) + g(X) u \quad (4)$$

其中：

$$\begin{aligned} X &= [\dots, B_L]^T \\ f(X) &= \begin{bmatrix} \dots 0 \\ \frac{0}{H} (P_M - P_e) - \frac{D}{H} (\dots 0) \\ \frac{1}{T_C} (\dots B_L + B_{L0}) \end{bmatrix} \\ g(X) &= \begin{bmatrix} 0, 0, \frac{K_C}{T_C} \end{bmatrix}^T \\ u &= u_e \end{aligned}$$

3 SVC 模糊变结构控制器的设计

对附加控制信号,采用模糊变结构控制方式来设计,对式(4)运用直接线性化理论,可求得如下坐标变换：

$$\begin{cases} z_1 = \dots 0 = \\ z_2 = \dots 0 = \\ z_3 = \dots \end{cases} \quad (5)$$

在以上变换下,式(4)变为：

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = (X) + (X) u \end{cases} \quad (6)$$

其中：

$$\begin{aligned} (X) &= -\frac{D}{H} \dots - \frac{0}{H x_1 + x_2 + x_1 x_2 (B_L - B_C)} \frac{E V_C \cos}{T_C H [x_1 + x_2 + x_1 x_2 (B_L - B_C)]^2} + \\ &\quad \frac{0}{T_C H [x_1 + x_2 + x_1 x_2 (B_L - B_C)]^2} \frac{E V_C x_1 x_2 (-B_L + B_{L0}) \sin}{T_C H [x_1 + x_2 + x_1 x_2 (B_L - B_C)]^2} \\ (X) &= \frac{0}{T_C H [x_1 + x_2 + x_1 x_2 (B_L - B_C)]^2} \frac{E V_C x_1 x_2 \sin}{T_C H [x_1 + x_2 + x_1 x_2 (B_L - B_C)]^2} \end{aligned}$$

式(6)为一相变量形式的线性系统,因此可以采用线性的切换函数来设计变结构控制器。取切换函数

$$s(z) = c_1 z_1 + c_2 z_2 + z_3 \quad (7)$$

对此切换函数取导数,得到切换函数的变化率

$$\dot{s} = c_1 \dot{z}_1 + c_2 \dot{z}_2 + \dot{z}_3 \quad (8)$$

此处 $c_1 = \dots$ 和 $c_2 = -(\dots)$, 其中 \dots 与 \dots 为滑动模态运动方程的极点,也是发电机转子运动方程的期望极点,因此,可以从理论上保证控制器的鲁棒性。将切换函数 s 及其导数 \dot{s} 分别在各自的论域上非均匀模糊化,得到各自的模糊量 S 和 \dot{S} , 作为模糊变结构控制器的输入,采用一种带可调整因子的控制规则得到输出模糊控制量 U 。取调整因子为

$$= \frac{abs(S)}{[abs(S) + abs(\dot{S})]}$$

控制规则为

$$U = -[S + (1 - \dots)\dot{S}] \quad (9)$$

这种控制方式,当系统远离平衡点时, S 较大得到的控制量较大,可以使系统迅速趋于稳定;当系统趋于稳态时 S 较小,控制量 U 主要由 \dot{S} 决定,可以解决变结构控制趋于稳态时的抖动问题。

式(9)经过变换得到：

$$\dot{S} = -aS - bU$$

其中 $a = \frac{1}{1 - \dots}$ $b = \frac{1}{1 - \dots}$

两边同乘以 S 得 $S\dot{S} = -S(aS + bU)$

可见为使系统到达滑动模态的充要条件 $S\dot{S} < 0$ 成立,就要选择合适的参数 a, b 及控制量 U , 保证当 $S > 0$ 时, $(aS + bU) > 0$, 或当 $S < 0$ 时, $(aS + bU) < 0$, 即可满足滑动模态到达的充要条件成立,从而保证系统的稳定性。将得到的 U 经过非均匀去模糊化后得到 u_e , 即可作为实际的控制量进行控制了。由式(9)可以看出,所设计的 SVC 控制器与系统的工作点及网络参数无关,因此,对系统工作点的变化

及网络参数的变化具有完全的鲁棒性。

4 计算机数字仿真

发电机及网络参数如下:

$$x_d = 0.034, x_d' = 0.17, x_{l1} = 0.008, x_{l2} = 0.008, x_t = 0.01,$$

$$D = 10.0, H = 63.5, T_C = 0.1, V_{r0} = 1.05, V_C = 1.0, B_C = 4.0,$$

$$B_{L0} = 0.38, B_{Lmax} = 3.0, B_{Lmin} = 0$$

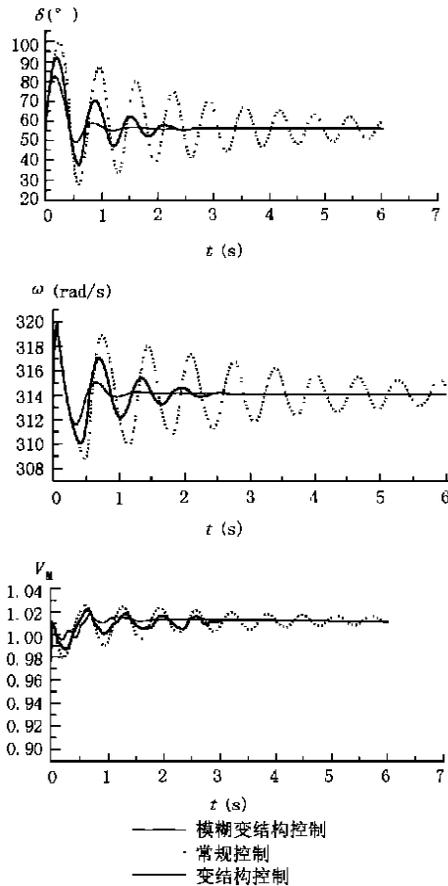


图3 系统暂态响应($\delta_0 = 56^\circ$)

5 结论

本文利用模糊变结构控制理论,在已有 SVC 模型的基础上,设计出了新型 SVC 控制器。模糊变结构控制综合了变结构控制与模糊控制二者的优点,使所设计的控制器具有较强的鲁棒性,根据系统的运行状态,利用模糊推理得出的控制量可以显著地削弱系统趋于稳态时的抖动,减小状态轨迹的振荡。针对单机—无穷大系统仿真表明:模糊变结构控制

图3、图4仿真条件为:0s时发电机端发生三相短路故障,0.04s后恢复正常(初始功角分别为 56° 和 60°)。分别对 SVC 的常规控制,变结构控制及 FVSC 控制进行了仿真。从图3与图4的对比中可以看出,在单纯采用 SVC 作为控制对象的情况下,在系统发生大扰动时,FVSC 控制下的 SVC 较常规控制、变结构控制下的 SVC 对系统稳定性的改善更加显著。采用了模糊变结构控制的 SVC,大大提高了电力系统的稳定性,具有很好的阻尼作用。同时,对系统的电压波动也具有良好的改善。

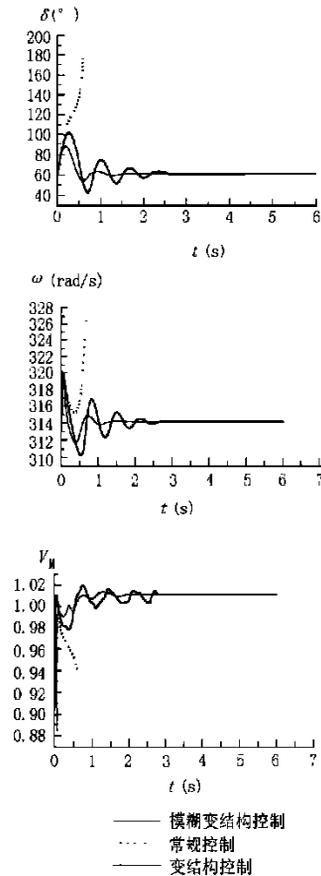


图4 暂态响应曲线($\delta_0 = 60^\circ$)

下的 SVC 对电力系统的稳定性有很大的提高的同时,明显改善了系统暂态响应过程中的电压波动。

参考文献:

- [1] Hammad A E. Analysis of power system stability enhancement by static var compensators. IEEE Trans, 1986, PWR&S1(4): 222 ~ 227.
- [2] 阎彩萍,孙元章,卢强.用精确线性化理论设计的 SVC 非线性控制器.清华大学学报. 1993, 33(1): 18 ~ 23.

(下转第 19 页)

的选择时,应选择 1A 的电流互感器,假设建一座 110kV 变电站需要的电流电缆长度为 4000m 时,4 × 4 的控制电缆单价为:8550 元/km,4 × 2.5 的控制电缆单价为:5922 元/km。可省 1.05 万元。今年唐山共建造 8 座 110kV 变电站,可以省 8.4 万元。

而且,更为重要的是长远利益能满足 10% 误差要求。

参考文献:

[1] 卓乐友. 电力工程电气设计手册. 北京:中国电力出版

社,1996. 8.

[2] 华中工学院. 发电厂电气部分. 北京:电力工业出版社,1982,12.

[3] 丁毓山. 变电所设计. 辽宁科学技术出版社,1993,10.

收稿日期: 2000-11-02

作者简介: 李树鑫(1965 -),男,本科,变电设计工程师,从事变电工程设计工作; 董悦坤(1969 -),女,本科,变电设计工程师,从事变电工程设计工作。

Selection and checking computations on CT near the power source

LI Shu-xin, DONG Yue-kun

(Tangshan Power Supply Design Institute, Tangshan 063000, China)

Keywords: CT; accurate limitation ratio; 10% error

(上接第 15 页)

[3] 于占勋. 电力系统非线性变结构控制. 哈尔滨工业大学博士论文. 1996.

[4] 刘瑞叶. 汽轮发电机组模糊变结构控制的研究. 哈尔滨工业大学博士论文. 1999.

[5] 马勇,计晓鸣,李辉. 给予模糊逻辑系统的变结构控制.

电气自动化,2000,(1):4~6.

收稿日期: 2000-12-14; 改回日期:2001-01-05

作者简介: 刘瑞叶(1963 -),女,副教授,从事电力系统稳定分析与控制的研究; 刘宝柱(1974 -),男,硕士研究生,从事电力系统稳定分析与控制的研究。

The impact of fuzzy variable structure control of SVC on the power system stability

LIU Rui-ye, LIU Bao-zhu

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A fuzzy variable structure controller (FVSC) of SVC is designed on the base of the combination of the nonlinear variable structure control theory and fuzzy control theory. An auxiliary control signal derived from fuzzy control theory is introduced to improve the damping characteristic of the system oscillations and improve the voltage characteristic by combining with AVR. Transient simulations of one machine infinite bus system are performed to highlight the effectiveness of the FVSC controller of SVC compared with variable structure controller and conventional controller.

Keywords: static var compensation (SVC); fuzzy variable structure control; power system stability