

## SVC 与发电机附加励磁模糊变结构综合控制的研究

刘瑞叶, 刘宝柱

(哈尔滨工业大学, 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 和发电机附加励磁模糊变结构综合控制器的设计。该控制器能同时考虑发电机功角稳定和 SVC 安装点处电压控制两个目标, 可以根据当地状态变量的变化得出相关的控制量, 便于控制策略的实现。仿真计算表明: SVC 和附加励磁的模糊变结构综合控制与常规控制相比, 能够明显地改善电力系统的功角稳定性, 同时可以抑制暂态响应中的电压波动。

**关键词:** 静止无功补偿器; 附加励磁控制; 模糊变结构控制

**中图分类号:** TM772

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-4897(2002)06-0013-04

## 1 引言

在实际的电力系统中, 发电机附加励磁控制是提高电力系统的稳定性和抑制低频振荡的重要手段。安装在系统中的重要枢纽点或负荷节点的静止无功补偿器(SVC)主要用来从电网中吸收或向电网中输送可连续调节的无功功率, 以维持安装点的电压恒定<sup>[1-3]</sup>。对此类关键节点提供快速的动态电压支撑是解决电力系统安全稳定问题的重要手段之一。

本文在已有发电机附加励磁模糊变结构控制研究成果<sup>[1]</sup>的基础上, 对 SVC 和发电机附加励磁进行综合控制的研究。将模糊控制理论和非线性变结构控制理论结合起来, 设计了一种 SVC 与附加励磁模糊变结构综合控制器, 使其能够同时实现发电机功角控制和 SVC 安装点处电压控制两个目标。

## 2 模糊变结构综合控制器的设计

## 2.1 系统数学模型

以  $n$  机系统为例, 系统的数学模型如下<sup>[1]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \delta_i = \omega_i - \omega_0 \\ \frac{d}{dt} \omega_i = \frac{P_{mi}}{T_{ji}} - \frac{D_i}{T_{ji}} (\omega_i - \omega_0) - \frac{P_{ei}}{T_{ji}} \\ \frac{dE_{qi}}{dt} = -\frac{(E_{qi} - E_{q0i})}{T_{\sigma i}} + \frac{k_i(v_{refi} - v_{ti})}{T_{\sigma i}} + \frac{k_i}{T_{\sigma i}} u_{fi} \end{cases} \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

式中  $\delta_i$ 、 $\omega_i$  分别为第  $i$  台发电机的功角和角速度;

$\omega_0$  为同步角速度, 314rad/s;  $D_i$  为阻尼系数;  $T_{ji}$ 、 $T_{\sigma i}$  为时间常数(s);  $P_{mi}$  为输入机械功率;  $E_{q0i}$  为第  $i$  台

发电机的空载电势;  $k_i$ 、 $k_{fi}$  为第  $i$  台发电机的电压调节器及附加励磁控制器的放大倍数;  $v_{refi}$  为第  $i$  台发电机的机端电压参考值;  $u_{fi}$  为第  $i$  台机附加励磁控制输入。

第  $i$  台发电机的有功功率  $P_{ei}$  表达式为

$$P_{ei} = E_{qi}^2 G_{ii} + E_{qi} \sum_j E_{qj} Y_{ij} \sin(\delta_{ij} - \delta_i) \quad (2)$$

式中  $G_{ii}$  为节点  $i$  的自导纳;  $Y_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  的互导纳;  $\delta_{ij}$  为节点  $i$  与节点  $j$  的互阻抗的余角。

SVC 采用实用一阶惯性模型, 如图 1 所示:

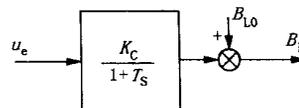


图1 实用 SVC 模型

$$\dot{B}_L = \frac{1}{T_C} (-B_L + B_{L0}) + \frac{K_C}{T_C} u_e \quad (3)$$

式中  $B_L$  为并联电抗器的电纳值;  $B_{L0}$  为正常运行时电抗器的电纳值;  $T_C$  为时间常数;  $K_C$  为放大倍数;  $u_e$  为控制量。

综合(1)式和(3)式, 可得到含有 SVC 的多机系统的状态方程式:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \delta_i = \omega_i - \omega_0 \\ \frac{d}{dt} \omega_i = \frac{P_{mi}}{T_{ji}} - \frac{D_i}{T_{ji}} (\omega_i - \omega_0) - \frac{P_{ei}}{T_{ji}} \\ \frac{dE_{qi}}{dt} = -\frac{(E_{qi} - E_{q0i})}{T_{\sigma i}} + \frac{k_i(v_{refi} - v_{ti})}{T_{\sigma i}} + \frac{k_i}{T_{\sigma i}} u_{fi} \\ \frac{dB_L}{dt} = \frac{1}{T_C} (-B_L + B_{L0}) + \frac{K_C}{T_C} u_e \end{cases} \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

将(4)式写成标准的仿射非线性系统的形式为:

$$\dot{X} = f(X) + \sum_{i=1}^n g_i(X) u_{fi} + h(X) u_e \quad (5)$$

其中  $u_e$  为标量,  $X, f(X), g_i(X), h(X)$  均为  $(3n+1)$  维列向量, 即

$$X = [x_1 \dots x_n, x_{n+1} \dots x_{2n}, E_{q1} \dots E_{qn}, B_L]^T$$

$$g_1(X) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \frac{k_1}{T_{d01}} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \text{倒数第 } n+1 \text{ 行} \quad \dots \quad g_n(X) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \frac{k_n}{T_{d0n}} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$h(X) = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ \frac{K_C}{T_C} \end{bmatrix} \quad f(X) = \begin{bmatrix} 1 - 0 \\ \dots \\ i - 0 \\ -\frac{0}{T_{j1}} (P_{m1} - P_{e1}) - \frac{D_1}{T_{j1}} (1 - 0) \\ \dots \\ -\frac{0}{T_{jn}} (P_{mn} - P_{en}) - \frac{D_n}{T_{jn}} (1 - 0) \\ -\frac{(E_{q1} - E_{d1})}{T_{d01}} + \frac{k_1 (v_{ref1} - v_{d1})}{T_{d01}} \\ \dots \\ -\frac{(E_{qn} - E_{dqn})}{T_{d0n}} + \frac{k_n (v_{refn} - v_{dn})}{T_{d0n}} \\ \frac{1}{T_C} (-B_L + B_{L0}) \end{bmatrix}$$

其余变量前已声明, 此处从略。

### 2.2 模糊变结构综合控制器的设计方法

为了使所设计的控制器能同时考虑发电机功角稳定和 SVC 安装点处电压控制两个目标, 就要使发电机附加励磁控制和 SVC 控制解耦。这样设计出的控制器能够根据当地的状态变量的变化得出相应的控制量, 便于控制策略的实现。

从(5)式可以看出, 这是一个多输入多输出系统的控制问题。输入量为发电机附加励磁的输入  $u_{fi}$  和 SVC 的控制输入  $u_e$ , 输出函数可以写成如下形式:

$$y_1 = \begin{bmatrix} 1 - 10 \\ \dots \\ n - n0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \dots \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$y_2 = V_m - V_{m0} = V_m \quad (7)$$

针对上式的输出函数, 可以设计具体的模糊变结构控制器。为了使所设计的 SVC 控制器能实现利用当地信号进行控制, 对于输出函数  $y_2 = V_m$ , 由

$$V_m = \frac{I_L}{B_L} \text{ 可得}$$

$$V_m = \frac{I_L}{B_L} - V_{m0} \quad (8)$$

式中  $I_L$  为 SVC 的可调电感支路的电流。

对上式两边求导, 可得

$$\dot{V}_m = \frac{\dot{I}_L}{B_L} - \frac{I_L}{B_L^2} \dot{B}_L \quad (9)$$

将(3)式代入上式可以得到

$$\dot{V}_m = \frac{\dot{I}_L}{B_L} - \frac{I_L}{B_L^2 T_C} (-B_L + B_{L0} + K_C u_e) = (X) + (X) u_e \quad (10)$$

其中  $(X) = \frac{\dot{I}_L}{B_L} - \frac{I_L}{B_L^2 T_C} (-B_L + B_{L0})$

$$(X) = -\frac{I_L K_C}{B_L^2 T_C}$$

由此可见

$$(X) < 0 \quad (11)$$

针对 SVC 的控制输入  $u_e$ , 可以设计具体的模糊变结构控制器, 方法如下:

首先把电压变化量其导数  $V_m$  及  $\dot{V}_m$  在论域  $[-7, 7]$  上进行非均匀离散变换, 形成控制器的输入量  $E$  和  $\dot{E}$ 。对  $V_m$  及  $\dot{V}_m$  在较小时进行“细分”, 而在它们取值较大时, 对它们进行“粗分”, 同时省去中间的确定隶属函数环节(因为这种划分方法本身就是一种确定隶属关系的过程), 由此得到离散量, 作为模糊变结构控制器的输入。

然后来设计带有自调整因子的模糊变结构控制器的控制规律, 以适应实际系统的各种不同情况, 使所设计的控制器具有很强的自调整性。在全论域范围内带有自调整因子的控制规则可以表示为式(12)的形式:

$$\begin{cases} U_e = E + (1 - ) \dot{E} \\ = \frac{1}{7} (1.0 - 0.4) |E| + 0.6 \end{cases} \quad (12)$$

因为, 当  $V_m$  比较大时, 表明系统远离电压平衡状态, 系统需要加大控制量, 使系统尽快到达电压的稳态值, 所以, 此时电压变化量的权重  $E$  取得比较大; 而当  $E$  比较小时, 表明系统接近电压的稳定状态, 为了使系统电压尽快到达稳定状态, 尽量减小超调, 因此, 此时电压变化量的权重  $E$  取得比较小, 控制量中  $E$  对时间的导数的权重  $\dot{E}$  取得比较大。按照这样的方法设计出的控制器可以使 SVC 处的电压快速恢复到稳定状态, 减小抖振的频率和幅度。

最后, 把得到的  $U_e$  取整得到离散控制量  $u_e$ , 然后分别进行从模糊量  $u_e$  到精确量  $u_e$  的转换,

采用非等距离法。对该模糊变结构 SVC 控制器还需要综合考虑对控制量的限幅,然后就可以对实际系统进行控制了。由公式(12)所示的模糊变结构 SVC 控制器,与系统的工作点及网络参数无关,因此,对系统工作点的改变及网络参数的变化具有很强的鲁棒性。

此处发电机附加励磁模糊变结构控制器的设计采用文[1]的设计方法。虽然有 SVC 的存在,这里所涉及的附加励磁模糊变结构控制器并没有实质性的不同。只是附加励磁模糊变结构控制器是以发电机功角稳定为目的的,SVC 的可变容抗在进行解算时作为中间节点被削去。方法如下:

首先将式(5)利用直接大范围线性化理论变换成线性系统。然后针对此线性系统取线性的切换函数  $s_i$  并对其求导,得到其导数  $\dot{s}_i$ 。控制器的输入信号为切换函数及其导数的模糊量  $s_i$  和  $\dot{s}_i$ ,控制规律如下:

$$\begin{cases} \dot{U}_i = \frac{1}{7} (1.0 - 0.5) |s_i| + 0.5 \\ U_i = \dot{s}_i + (1 - \dot{s}_i) \dot{s}_i \end{cases} \quad (13)$$

最后将得到的控制量  $U_i$  清晰化后,经限幅后即可进行控制。按照这样的方法设计的控制器的输出量与系统的工作点及网络参数无关,附加控制只与由本台发电机的状态量构成的切换函数有关,因此对系统的工作点的变化及网络参数的变化具有完全的鲁棒性。

### 2.3 控制规律的选择

此处我们不考虑多机系统中各台发电机的协调控制,只是按照各台发电机各自的切换函数及其它参数的变化情况,对其进行控制。当 SVC 安装在互连的电力系统中以安装点的电压为控制对象时,电压及其变化量可以就地测量,即可实现当地信号控制。

当系统中发生扰动时,SVC 控制器的量测、控制和触发环节的惯性较小,一般在 1s 以内,因此快速的响应特性可以最大限度地维持 SVC 安装点的电压;与此同时,各台发电机的附加励磁控制器以本台发电机的功角稳定为目标,可以最大限度地改善电力系统的稳定性,同时可使发电机端电压具有良好的动态特性。

## 3 计算机仿真

仿真系统采用电科院六机系统,其结构参数见文[1]。其中 1 号机为平衡机,6 号机为调相机。

SVC 安装在 9 号母线上,在 2、3、4、5 机组附加励磁上采用常规控制和模糊变结构控制方案。仿真条件为:系统 0s 时在 10 号母线发生三相短路故障,0.15s 后恢复正常。仿真结果如图 2、图 3 所示。

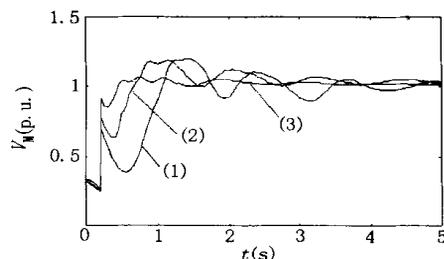


图 2 三相短路时 9 号母线电压的动态响应

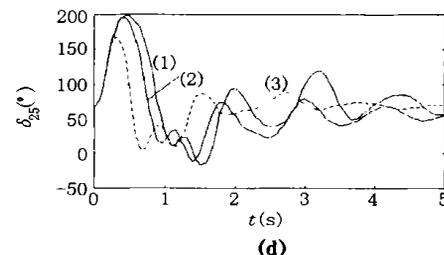
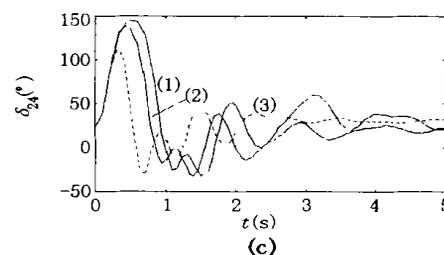
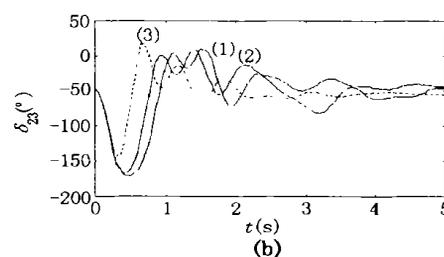
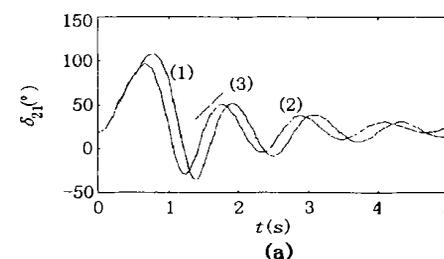


图 3 三相短路时系统的暂态响应曲线

图 2 表示被控 9 号母线的电压变化曲线:(1)表示无 SVC 时附加励磁常规控制;(2)表示发电机附加励磁和 SVC 均采用常规控制;(3)表示发电机附加励磁和 SVC 采用模糊变结构控制。图 3 给出了 1、3、4、5 号机组相对于 2 号机组的功角偏差的响应

曲线。

由图 2 和图 3 可见,在模糊变结构控制下的系统的阻尼特性和 SVC 所在处的电压特性都优于常规控制下的系统响应特性。SVC 所在处的电压维持得较好;同时在附加励磁模糊变结构控制器的作用下,系统的稳定性有了明显的改善。

#### 4 结论

本文利用模糊变结构控制方法设计出了 SVC 和发电机附加励磁的综合控制器。该控制器能够同时考虑 SVC 安装点电压控制和发电机功角稳定两个目标,而且实现了 SVC 控制和附加励磁控制的解耦,使所设计的控制器均可利用当地信号实施控制策略。仿真计算表明:SVC 和发电机附加励磁模糊变结构综合控制器能够改善系统暂态过程中的阻尼特性,同时可以最大限度地维持 SVC 安装点的电压

恒定。

#### 参考文献:

- [1] 刘瑞叶,于浩,陈学允.汽轮发电机组的模糊变结构附加励磁控制[J].哈尔滨工业大学学报,2000,32(4):130-132.
- [2] 卢强,孙元章.电力系统非线性控制(第二版)[M].科学出版社,1995:155-215.
- [3] Hingorani N G. Flexible AC Transmission[J]. IEEE Spectrum, 1993,4:40-45.
- [4] 李士勇.模糊控制神经控制和智能控制论[M].哈尔滨工业大学出版社,1996:226-232.

收稿日期: 2001-07-11; 改回日期: 2002-04-03

作者简介: 刘瑞叶(1963-),女,博士,副教授,主要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。

### Fuzzy Variable Structure Coordinated Control of SVC and Additional Excitation

LIU Ruir-ye, LIU Bao-zhu

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A coordinated controller of SVC and additional excitation is designed in this paper based on the theory of fuzzy control and the theory of nonlinear variable structure control. It can consider both the stability of generator angle and the voltage control at the location of SVC. Control objective is easily carried out with the local measurements. Analysis and simulations show the effectiveness of the coordinated controller compared with conventional controller in generator angle control and voltage control.

**Keywords:** static var compensator; additional excitation control; fuzzy variable structure control

(上接第 12 页) 大于  $S^{cr}$  时,系统是不稳定的;当节点实际功率等于  $S^{cr}$  时,则系统是处于临界稳定状态。本文通过实例验证了该结论的正确性,并为快速在线判断电压稳定性提供了很好的方法。

#### 参考文献:

- [1] 刘永强.电压静态稳定性及失稳机理研究[D].华南理工大学博士学位论文第五章,1999.
- [2] 李欣然,贺仁睦,等.负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据[J].中国电机工程学报,1999,19(4).
- [3] 蔡大用.静态潮流的多解性和快速算法[J].电力系统自动化,2000,24(10).

- [4] 王漪.节点电压稳定  $Z-V$  空间解析[D].哈尔滨工业大学博士学位论文第二章,1999.
- [5] Khoi Vu. Use of Local Measurements to Estimate Voltage stability Margin [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999,14(3).
- [6] 付英,李兴源.基于静态等值的在线实时电压稳定性分析[J].电力系统自动化,1997,21(17).

收稿日期: 2001-09-26

作者简介: 李宝国(1966-),男,硕士,讲师,研究方向为电力系统稳定分析与控制; 鲁宝春(1964-),男,博士后,教授,研究方向为电力系统稳定分析与控制; 巴金祥(1966-),男,硕士,讲师,研究方向为电力系统稳定与微机保护。

### Load type components influence on steady-state voltage stability

LI Bao-guo, LU Bao-chun, YAN Tian, BA Jin-xiang

(Information Science & Engineering Dept. of Liaoning Institute of Technology, Jinzhou 121001, China)

**Abstract:** This paper reviews steady-state voltage stability based on  $U-I$  characteristics first. A new method is preferred for steady-state voltage stability criterion after studying influence of load type components. This method is more practical and simple than the former. This paper is also presents a method of calculating load limit. It is suitable for online real-time voltage stability analysis.

**Keywords:** voltage stability;  $U-I$  characteristics; load type components