

静止无功补偿器变论域模糊 PI 控制研究

闫 君, 王明东, 李忠文

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为改善静止无功补偿器(SVC)常规 PI 电压调节器的调节效果,增强其动态响应性能和无功补偿能力,提出了一种基于变论域模糊 PI 控制的 SVC 电压控制方法。在常规 PI 控制和模糊理论相结合的基础上,利用模糊伸缩因子优化变论域技术进一步改进。该文对常规 PI、模糊 PI、变论域模糊 PI 三种控制方法在 SVC 中的应用进行了比较研究。仿真结果表明,与常规 PI、模糊 PI 控制 SVC 相比,基于变论域模糊 PI 控制的 SVC 能更快速、灵活地调节电压,具有更好的动态响应性能和良好的无功补偿能力,能够有效地提高电力系统的稳定性。

关键词: 静止无功补偿器; 变论域; 模糊 PI 控制; 电压调节器

DOI: 10.12067/ATEEE2012010

文章编号: 1003-3076(2021)09-0064-07

中图分类号: TM722

1 引言

随着直流输电技术的发展,高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)的应用也越来越广泛^[1,2]。直流输电系统中的换流站需要交流电网提供充足的无功功率以保证电网的安全稳定运行^[3-5]。同时,电力系统规模越来越大,系统受到外界干扰的可能性也随之增大,各种类型的干扰会导致系统电压变化,需要无功支持以维持系统电压的稳定性。常用的无功补偿装置有:同步调相机(Synchronous Condenser, SC)、静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)和静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)。其中, SVC 作为一种大容量电力电子器件,目前已经被广泛用于为电力系统提供无功支持和提高动态电压的稳定性^[6,7]。

SVC 的动态性能和补偿能力与采用的控制方式有很大关系。常规 PI 控制方式应用范围很广,控制器结构简单且需要调整的参数不多,在 SVC 工程应用中起着重要作用,但常规 PI 控制无法同时满足快速性和稳定性的要求^[8,9]。为突破常规 PI 控制在 SVC 控制系统中的不足,将常规 PI 控制与现代控制方法相结合成为 SVC 控制的研究热点^[10,11]。文献

[12]设计了一种基于模糊-PI 控制的 SVC 电压调节器,通过智能调节器实现模糊控制或 PI 控制工作状态的切换,综合两种控制方法的优点,从而提高 SVC 系统响应速度;文献[13]设计了一种非线性神经元 PID 控制器,有效地提高了 SVC 系统的适应能力和补偿精度。本文将变论域理论、模糊理论与 PI 控制相结合,设计了一种基于变论域模糊 PI 控制的 SVC 电压调节器。仿真结果表明,与常规 PI、模糊 PI 控制方法相比,基于变论域模糊 PI 控制电压调节器的 SVC 能更加快速地从系统吸收或发出无功功率,具有更好的鲁棒性和维持电压稳定能力。

2 SVC 基本结构及其控制系统

2.1 SVC 基本结构

SVC 作为一种常用的无功补偿装置,能根据晶闸管控制的电抗器(TCR)和晶闸管投切的电容器(TSC)吸收或发出无功功率,来连续快速地进行无功调节和维持系统电压稳定。图 1 为常用的 TCR+TSC 型 SVC 结构,主要由一组 TCR 和三组 TSC 构成。图 1 中的降压变压器是为了降低 SVC 造价(电压等级越低、造价越低),而滤波器是用来吸收 SVC 装置造成的谐波电流。TCR+TSC 型 SVC 具有运行可靠、价格便宜、响应速度快等优点,在电网中应用广泛。

收稿日期: 2020-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(61803343)

作者简介: 闫 君(1995-),男,河南籍,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定运行与控制;

王明东(1971-),男,河南籍,教授,博士,研究方向为电力系统分析与控制、智能电网技术。

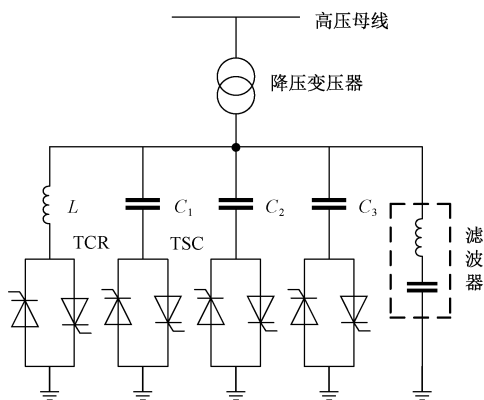


图 1 SVC 结构

Fig.1 Structure of SVC

图 1 中,TSC 支路向系统发出的无功功率为:

$$Q_c = \frac{U^2}{X_c} = \omega C U^2 \quad (1)$$

式中, U 为降压变压器二次电压有效值; X_c 为 TSC 支路中电容器的等值电抗; ω 为角频率; C 为电容器的电容值。

TCR 支路从系统吸收的无功功率为:

$$Q_L = \frac{U^2}{X_L} = \frac{2 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi}\sin(2\alpha)}{\omega L} U^2 \quad (2)$$

式中, X_L 为 TCR 支路中电抗器的等值电抗; α 为晶闸管的触发延迟角; L 为电抗器的电感值。

由式(1)和式(2)可知,SVC 向系统发出的无功功率为:

$$Q_{SVC} = \left[\omega C - \frac{2 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi}\sin(2\alpha)}{\omega L} \right] U^2 \quad (3)$$

由式(3)可得 SVC 系统的等值电纳为:

$$B_{SVC} = \omega C - \frac{2 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi}\sin(2\alpha)}{\omega L} \quad (4)$$

2.2 SVC 控制系统

TCR+TSC 型 SVC 控制系统如图 2 所示,主要包含电压测量模块、电压调节器、触发脉冲模块、同步单元和辅助控制模块等。SVC 系统控制方式为:电压调节器将测量得到的一次侧电压 U_{mes} 和参考电压 U_{ref} 比较得出误差信号 err ,然后将误差信号 err 经过控制器的变换后得到电纳信号 B_{SVC} ;电纳信号 B_{SVC} 再经过离散单元得出 TCR 触发延迟角 α 和 n_TSC 信号;TCR 触发延迟角 α 、 n_TSC 信号和二次测量电压经过同步单元、触发脉冲发生器作用产生控制晶闸管导通的脉冲信号,从而实现对 TCR 和 TSC 支路

通断状态的控制。当测量到一次侧电压偏高时,TCR 支路导通,从系统吸收无功功率,系统电压降低,同时,需 TSC 导通来确保电压稳定性;当测量到一次侧电压偏低时,TSC 支路导通,向系统发出无功功率,系统电压升高,但 TSC 发出的无功功率多余的量都在 SVC 中,需 TCR 吸收多余的无功功率,维持无功平衡。因此,TCR 和 TSC 需要协调控制。

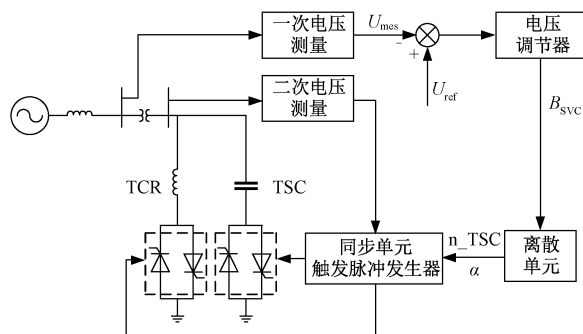


图 2 SVC 控制系统图

Fig.2 Control system diagram of SVC

3 SVC 变论域模糊 PI 控制器设计

3.1 模糊 PI 控制器

常规 PI 控制器结构简单且需要调整的参数少,但由于 SVC 系统是一个复杂的非线性系统,采用常规 PI 的控制效果并不理想。基于模糊逻辑的 PI 控制不依赖被控对象的精确数学模型,鲁棒性好、响应速度快,控制效果优于常规 PI 控制。

模糊 PI 控制器由 PI 控制器和模糊控制器组成。模糊控制器输入量为误差信号 e 和误差信号变化率 e_c ,输出量为 PI 控制器比例环节、积分环节的修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 。论域的变换公式为:

$$\begin{cases} E = K_e \left(e - \frac{e_{\max} - e_{\min}}{2} \right) \\ K_e = \frac{2}{e_{\max} - e_{\min}} \\ E_c = K_{ec} \left(e_c - \frac{e_{c\max} - e_{c\min}}{2} \right) \\ K_{ec} = \frac{2}{e_{c\max} - e_{c\min}} \\ \Delta K_m = L_{Km} \left(\Delta k_m - \frac{\Delta k_{\max} - \Delta k_{\min}}{2} \right) \\ L_{Km} = \frac{2}{\Delta k_{\max} - \Delta k_{\min}} \end{cases} \quad (5)$$

式中, E 、 E_c 分别为输入量 e 、 e_c 的变换值; ΔK_m 为 Δk_m 的变换值; $[e_{\min}, e_{\max}]$ 、 $[e_{c\min}, e_{c\max}]$ 、 $[\Delta k_{\min},$

$\Delta k_{\max m}] (m=P, I)$ 为系统实际运行的动态范围; L_{Km} 为比例因子; K_e 、 K_{ec} 为量化因子。

根据 Mamdani 型模糊推理法则, 采取常用的加权平均解法进行解模糊化, 其计算公式为:

$$\Delta K_m = \frac{C_i \sum_i \mu_{Ci}(\Delta K_{im})}{\sum_i \mu_{Ci}(\Delta K_{im})} \quad (6)$$

式中, $\Delta K_m (m=P, I)$ 为模糊环节输出量; C_i 为 ΔK_{im} 对应的模糊集合; $\mu_{Ci}(x)$ 为模糊集合 C_i 的隶属函数。

将解模糊得到的推理值作为模糊环节的输出量, 传递给 PI 控制器。此时, PI 控制器的实际控制参数为 $K_p = K_{p0} + \Delta K_p$ 、 $K_I = K_{I0} + \Delta K_I$ 。其中, K_{p0} 、 K_{I0} 为 PI 控制器自身的控制参数。系统实际输出为:

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{i=1}^k e(i) \quad (7)$$

式中, $u(k)$ 为输出值; $e(k)$ 、 $e(i)$ 为误差值; K_p 、 K_I 分别为比例增益、积分增益。

选择对称三角形隶属函数, 结合学者专家研究成果可得 ΔK_p 、 ΔK_I 模糊规则表。其中, e 和 e_c 的论域为 $[-1, 1]$, ΔK_p 的论域为 $[-1, 1]$ 。以 ΔK_p 为例, ΔK_p 模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 ΔK_p 模糊控制规则
Tab.1 Fuzzy control rules of ΔK_p

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	GB	GB	MB	MB	PB	ZE	ZE
NM	GB	GB	MB	PB	PB	ZE	PS
NS	MB	MB	MB	PB	ZE	PS	PS
ZO	MB	MB	PB	ZE	PS	MS	MS
PS	PB	PB	ZE	PS	PS	MS	MS
PM	PB	ZE	PS	MS	MS	MS	GS
PB	ZE	ZE	MS	MS	MS	GS	GS

3.2 变论域模糊 PI 控制器

常规的模糊 PI 控制器的论域范围是固定的, 输入信号改变时会影响控制效果和控制精度。为了解决此问题, 本文采用变论域模糊 PI 控制器, 论域范围会随着输入误差的变化而改变, 可以使从模糊量到隶属函数的映射更加准确。SVC 变论域模糊 PI 控制器结构如图 3 所示。

图 3 所示的模糊控制器选择双输入双输出二维结构, 通过输入伸缩因子 α_1 和 α_2 、输出伸缩因子 β_p

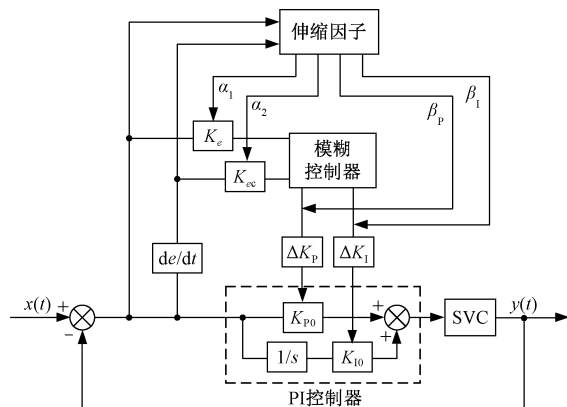


图 3 SVC 变论域模糊 PI 控制器结构图

Fig.3 Diagram of SVC variable universe fuzzy PI controller

和 β_p 分别控制模糊控制器的输入和输出信号, 达到既能提高控制精度又能加快响应速度的效果。

设输入误差信号 e 的初始论域为 $[-E, E]$, 通过调整伸缩因子 α 实现变论域后, 新的论域为 $[-\alpha_1 E, \alpha_1 E]$ [14], 论域的变化情况如图 4 所示。

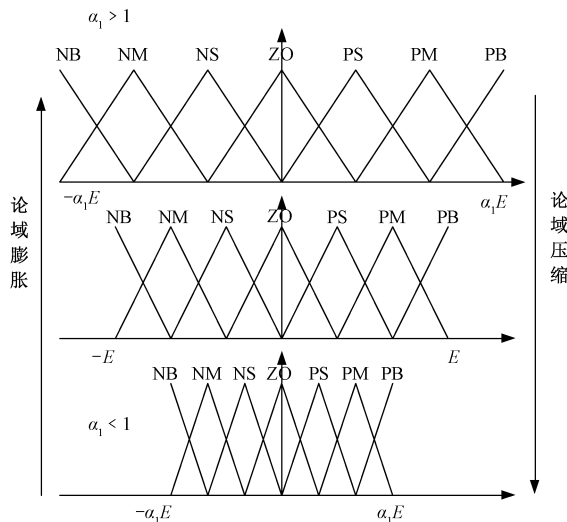


图 4 论域变化示意图

Fig.4 Sketch map of domain change

本文选用基于模糊规则设计的输入输出伸缩因子。当输入误差大时, 增大伸缩因子, 其基本论域会扩大, 从而保证系统稳定运行; 当输入误差小时, 减小伸缩因子, 使其基本论域缩小, 定义在论域上的模糊划分也会压缩, 使输入误差的可用规则增多, 增加其控制精度 [15]。将 α_1 和 α_2 划分为 4 个等级, 用 ZE (零附近)、MS (小)、MB (中)、GB (大) 表示。输入伸缩因子 α_1 、 α_2 调整规则如表 2 所示。

表 2 输入伸缩因子调整规则

Tab.2 Adjustment rules of input signal

e/e_c	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
α_1/α_2	GB	MB	MS	ZE	MS	MB	GB

利用输入误差 e 和误差变化率 e_c 决定输出伸缩因子 β 的取值。当 e 和 e_c 很大且两者符号相同,此时系统与设定值之间差距很大,系统正以很快的速度偏离设定值,此时控制量 β_p 应取较大阻止系统偏离设定值^[16]。模糊规则如下:

“如果 e 是 NB 且 e_c 是 NB,则 β_p 为 MB”或“如果 e 是 PB 且 e_c 是 PB,则 β_p 为 MB”。

将输出伸缩因子 β_p 或 β_i 划分为 7 个等级,用 GS(很小)、MS(较小)、S(小)、ZE(零附近)、B(大)、MB(较大)、GB(很大)表示。类比推理得出输出伸缩因子 β_p 、 β_i 调整规则如表 3 和表 4 所示。

表 3 输出伸缩因子 β_p 调整规则

Tab.3 Adjustment rules of output signal β_p

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	MB	MB	B	ZE	B	MB	MB
NM	MB	B	ZE	S	ZE	B	MB
NS	B	ZE	S	MS	S	ZE	B
ZO	ZE	S	MS	MS	MS	S	ZE
PS	B	ZE	S	MS	S	ZE	B
PM	MB	B	ZE	S	ZE	B	MB
PB	MB	MB	B	ZE	B	MB	MB

表 4 输出伸缩因子 β_i 调整规则

Tab.4 Adjustment rules of output signal β_i

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	GB	GB	MB	MB	B	ZE	ZE
NM	GB	GB	MB	B	B	ZE	S
NS	MB	MB	MB	B	ZE	S	S
ZO	MB	B	B	ZE	S	MS	MS
PS	B	B	ZE	S	S	MS	MS
PM	ZE	ZE	S	MS	MS	MS	GS
PB	ZE	S	S	MS	MS	GS	GS

4 仿真研究

4.1 SVC 仿真模型及参数

为验证模糊 PI 控制以及变论域模糊 PI 控制的可行性和控制效果,本文搭建 SVC 详细模型,对常规 PI、模糊 PI、变论域模糊 PI 控制三种方法在 SVC 中的应用进行了对比仿真。图 5 为仿真模型示意

图,仿真模型由短路容量为 6 000 MV·A 的三相可编程电压源和有功功率为 200 MW 的 RLC 支路串联组成,RLC 支路的容性无功功率和感性无功功率为零。负荷侧和 300 MVar 的 SVC 设备通过一台变比为 735/16、容量为 333 MV·A 的耦合变压器并联, SVC 设备包括 1 个 109 MVar 的 TCR 和 3 个 94 MVar 的 TSC。

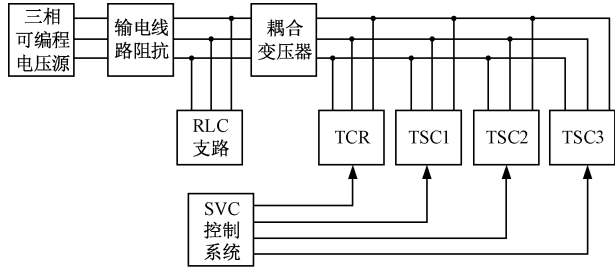


图 5 仿真模型示意图

Fig.5 Sketch map of simulation model

变论域模糊 PI 控制的 SVC 电压调节器结构如图 6 所示。电纳信号 B_{SVC} 和 U_{mes} 的乘积得反馈电流,再乘以增益 X_s 得出电压反馈信号。设置 SVC 参考电压为 1.0 pu,PI 电压调节器的参数分别为 $K_p = 0.5$, $K_i = 800$ 。

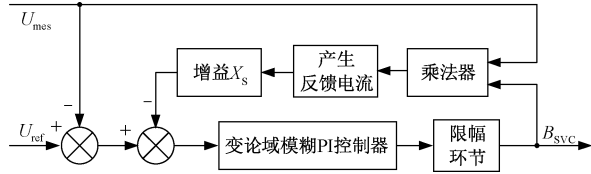


图 6 电压调节器结构图

Fig.6 Diagram of voltage regulator

4.2 仿真结果及分析

三种控制策略的控制效果对比曲线如图 7 所示。 $t=0$ s 时,由图 7 可知,TCR 的触发延迟角约为 96° ,TSC1 导通,此时 TCR 从系统吸收无功功率等于 TSC1 向系统发出的无功功率,SVC 不向系统发出或吸收无功功率,电压幅值维持在 1.0 pu。

$t=0.1$ s 时,系统电源电压幅值由 1.0 pu 快速升高至 1.023 pu。由图 7 和图 8(a)可知,TCR 触发延迟角从 96° 逐渐降低为 92° ,流过 TCR 电流略微增大,而 TSC1 中仍有电流流过,说明 TCR 先动作,此时 TCR 从系统吸收的无功功率增多,SVC 吸收的无功功率增多;TSC1 关断,同时 TCR 触发延迟角从 92° 快速升高至 145° ,流过 TCR 电流快速减小,TCR 从系统吸收的无功功率减少,由于 TSC1 向系统发出的无功功率减少量多于 TCR 从系统吸收的无功

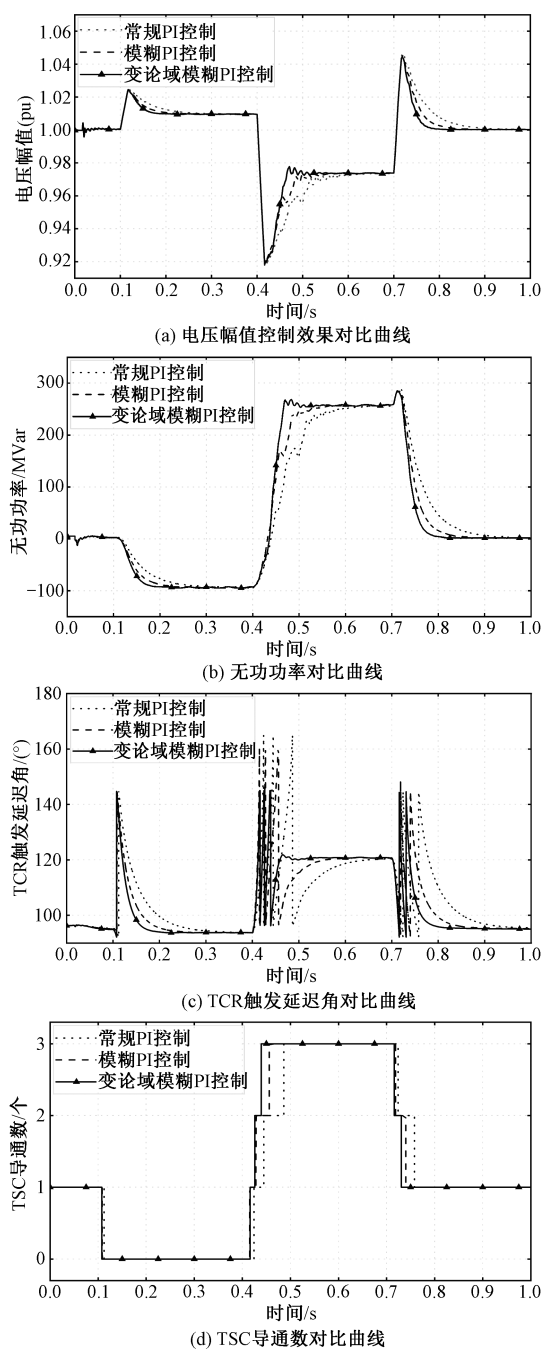


图7 控制效果对比曲线

Fig.7 Comparison curve of control effect

功率减少量, SVC 吸收的无功功率增多; TCR 触发延迟角从 145° 逐渐降低到 93° , 流过 TCR 电流逐渐增大, TCR 从系统吸收的无功功率增多, SVC 吸收的无功功率值增大为 100 MVar , 电压幅值从 1.023 pu 降低至 1.01 pu 。

$t=0.4 \text{ s}$ 时, 系统电源电压幅值从 1.01 pu 降低至 0.918 pu 。由图 7 和图 8(b) 可知, TCR 触发延迟角从 93° 逐渐升高为 165° , 流过 TCR 电流逐渐减小, 而 TSC1 中没有电流流过, 说明 TCR 先动作, 此时

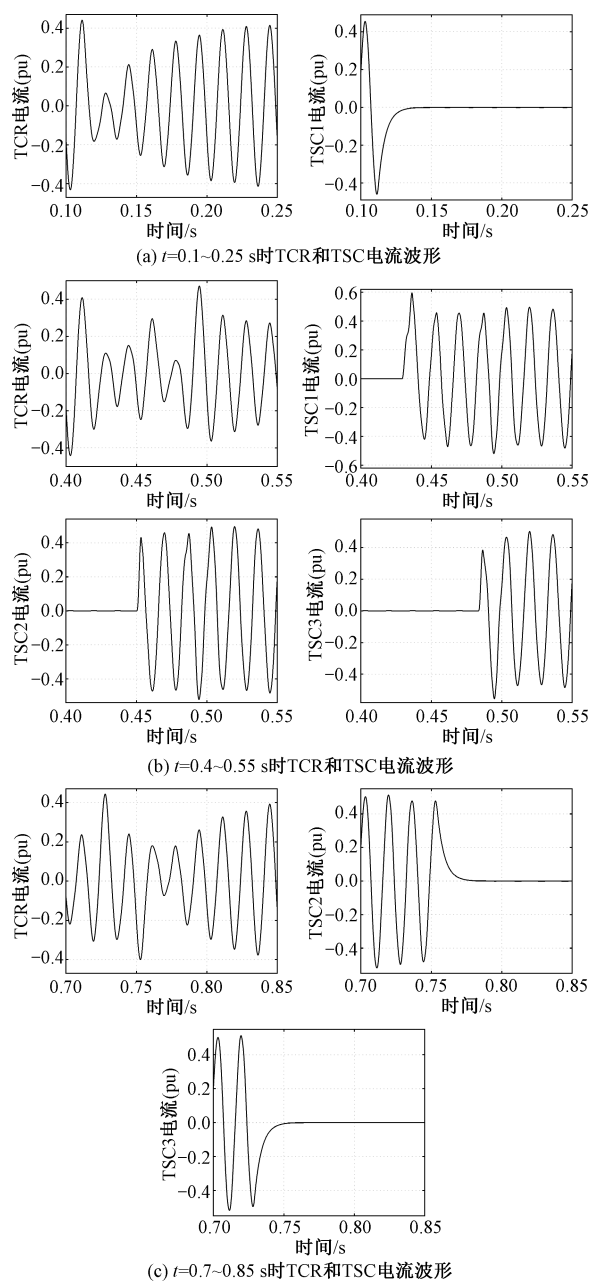


图8 不同时刻 TCR 和 TSC 电流波形

Fig.8 Diagram of TCR and TSC current waveforms at different times

TCR 从系统吸收的无功功率减少, SVC 吸收的无功功率减少; TSC1 导通, 同时 TCR 触发延迟角从 165° 快速降低到 98° , 流过 TCR 电流快速增大, TCR 从系统吸收的无功功率增多, 由于 TSC1 向系统发出的无功功率多于 TCR 从系统吸收的无功功率, SVC 发出的无功功率增多; TCR 触发延迟角从 98° 逐渐升高到 165° , 流过 TCR 电流逐渐减小, TCR 从系统吸收的无功功率减少, SVC 发出的无功功率增多; TSC2 导通, 同时 TCR 触发延迟角从 165° 快速降低

到 98° , 流过 TCR 电流快速增大, TCR 从系统吸收的无功功率增多, 由于 TSC2 向系统发出的无功功率多于 TCR 从系统吸收的无功功率, SVC 发出的无功功率增多; TCR 触发延迟角从 98° 逐渐升高到 165° , 流过 TCR 电流逐渐减小, TCR 从系统吸收的无功功率减少, SVC 发出的无功功率增多; TSC3 导通, 同时 TCR 触发延迟角从 165° 快速降低到 98° , 流过 TCR 电流快速增大, TCR 从系统吸收的无功功率增多, 由于 TSC3 向系统发出的无功功率多于 TCR 从系统吸收的无功功率, SVC 发出的无功功率增多; TCR 触发延迟角从 98° 逐渐升高至 120° , 流过 TCR 电流逐渐减小, TCR 从系统吸收无功功率减少, SVC 发出的无功功率值增大为 260 MVar, 将电压幅值从 0.918 pu 升高至 0.975 pu。

$t=0.7$ s 时, 系统电源电压幅值从 0.975 pu 快速升高至 1.045 pu。由图 7 和图 8(c) 可知, TCR 触发延迟角从 120° 逐渐降低为 93° , 流过 TCR 电流逐渐增大, 而 TSC3 中仍有电流流过, 说明 TCR 先动作, 此时 TCR 从系统吸收的无功功率增多, SVC 发出的无功功率减少; TSC3 关断, 同时 TCR 触发延迟角从 93° 快速升高到 145° , 流过 TCR 电流快速减小, TCR 从系统吸收无功功率减少, 由于 TSC3 向系统发出的无功功率减少量多于 TCR 从系统吸收的无功功率减少量, SVC 发出的无功功率减小; TCR 触发延迟角从 145° 逐渐降低到 93° , 流过 TCR 电流逐渐增大, TCR 从系统吸收的无功功率增多, SVC 发出的无功功率减少; TSC2 关断, 同时 TCR 触发延迟角从 93° 快速升高到 145° , 流过 TCR 电流快速减小, TCR 从系统吸收的无功功率减少, 由于 TSC2 向系统发出的无功功率减少量多于 TCR 从系统吸收的无功功率减少量, SVC 发出的无功功率减少; TCR 触发延迟角从 145° 逐渐降低到 96° , 流过 TCR 电流逐渐增大, TCR 从系统吸收的无功功率增多, SVC 发出的无功功率值减小为 0, 电压幅值从 1.045 pu 降低至 1.0 pu。

由图 7 波形可知, TCR+TSC 型 SVC 是以 TCR 作为相控细调, 补偿感性无功功率; TSC 作为分级粗调, 补偿容性无功功率; 两者协调控制, 才能实现连续平滑地提供无功补偿, 维持系统电压稳定。当系统电压变化时, 采用变论域模糊 PI 控制的电压调节器具有更快速调节 TCR 触发延迟角的大小、快速地改变 TSC 导通数目、快速调节 SVC 向系统发出或吸收更多的无功功率, 快速维持系统电压的稳定性的

能力, 具有更好的动态响应性能和无功补偿能力。

5 结论

本文在 PI 控制和模糊控制的基础上, 采用变论域得到模糊伸缩因子, 设计了变论域模糊 PI 控制器。对常规 PI 控制器、一般模糊 PI 控制器和变论域模糊 PI 控制器在 SVC 控制系统的应用效果进行了仿真对比研究。研究表明, 应用变论域模糊 PI 控制的 SVC 系统, 具有更好的快速响应能力和鲁棒性, 能减小超调量使系统表现出良好的动态稳定性, 其控制效果比常规 PI 控制和模糊 PI 控制好, 可更好地发挥 SVC 维持系统电压的稳定和提供无功支持的作用。

参考文献 (References):

- [1] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等 (Wen Jialiang, Wu Rui, Peng Chang, et al.). 直流电网在中国的应用前景分析 (Analysis of DC grid prospects in China) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2012, 32 (13): 7-12, 185.
- [2] 王玲, 文俊, 崔康生, 等 (Wang Ling, Wen Jun, Cui Kangsheng, et al.). 多馈入直流输电系统换相失败研究综述 (Research survey of commutation failure in MDC transmission systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (8): 56-65.
- [3] 王庆, 沙江波, 杨鹏程, 等 (Wang Qing, Sha Jiangbo, Yang Pengcheng, et al.). 同步调相机对 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的影响研究 (Study of impact of SC on ability to defend commutation failure of LCC-HVDC) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (5): 29-36.
- [4] 付敏, 赫英明, 印钊阳 (Fu Min, He Yingming, Yin ZhaoYang). 弱送端 HVDC 系统中无功补偿装置的性能分析 (Performance analysis of reactive power compensation device at weak sending end in HVDC system) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSSA), 2019, 31 (6): 129-136.
- [5] Su Qingyu, Quan Wanzhen, Cai Guowei, et al. An improved adaptive backstepping approach on static var compensator controller of nonlinear power systems [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2018, 32 (5): 700-712.
- [6] 付伟, 刘天琪, 李兴源, 等 (Fu Wei, Liu Tianqi, Li Xingyuan, et al.). 静止无功补偿器运行特性分析和控

- 制方法综述 (Analysis of operating characteristic and survey of control methods used in static var compensator) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2014, 42 (22): 147-154.
- [7] Jena Ramakanta, Swain Sarat Chandra, Dash Ritesh. Power flow simulation & voltage control in a SPV IEEE-5 bus system based on SVC [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 39 (P5): 1934-1940.
- [8] Quan Jiexiong, Wen Caiquan. Analysis of a SVC device filter capacitor bank circuit breaker explosion [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 546 (2): 022007.
- [9] 周晓华, 刘胜永, 王荔芳, 等 (Zhou Xiaohua, Liu Shengyong, Wang Lifang, et al.). 静止无功补偿器的模糊神经元 PID 电压控制 (Fuzzy neuron PID voltage control for SVC) [J]. 电力电容器与无功补偿 (Power Capacitor & Reactive Power Compensation), 2016, 37 (5): 37-40, 46.
- [10] Keshta H E, Ali A A, Saied E M, et al. Application of static var compensator (SVC) with PI controller for grid integration of wind farm using harmony search [J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2016, 17 (5): 555-566.
- [11] 周金环, 车延博, 舒展, 等 (Zhou Jinhuan, Che Yanbo, Shu Zhan, et al.). 基于混沌变异粒子群算法的 PSS 与 SVC 阻尼控制器协调优化设计 (Coordinated optimization design between PSS and damping controller of SVC based on CMPSO algorithm) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (5): 58-64.
- [12] 戴元海, 彭建春, 董凯 (Dai Yuanhai, Peng Jianchun, Dong Kai). 基于模糊-PI 控制的 SVC 电压控制器的设计与实现 (Design and realization of voltage controller for SVC based on fuzzy-PI control theory) [J]. 测控技术 (Measurement & Control Technology), 2009, 28 (9): 45-48.
- [13] 杨晓峰, 吴敬兵 (Yang Xiaofeng, Wu Jingbing). 一种改进的非线性神经元 PID 控制方法在高压 SVC 中的应用 (Improved non-linear neuron PID control method for application of high-voltage SVC) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2013, 32 (2): 107-110, 120.
- [14] 张杰, 撤奥洋, 于立涛, 等 (Zhang Jie, Han Aoyang, Yu Litao, et al.). 聚合变频空调参与微网调频的变论域模糊 PI 控制策略 (Variable universe fuzzy PI control strategy of polymer frequency conversion air conditioning participating in micro network frequency modulation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (9): 20-27.
- [15] 曹明, 陈新楚 (Cao Ming, Chen Xinchu). 变论域模糊控制器的设计 (Design of variable universe fuzzy controller) [J]. 机电技术 (Mechanical & Electrical Technology), 2012, 35 (4): 2-4.
- [16] 朱岩, 郭军平 (Zhu Yan, Guo Junping). 变论域自适应模糊 PID 方法的研究与仿真 (The study and simulation of fuzzy PID based on mutative field) [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版) (Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)), 2005, (5): 11-13, 32.

Research on variable universe fuzzy PI control of static var compensators

YAN Jun, WANG Ming-dong, LI Zhong-wen

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to improve the regulation effect of the static var compensator (SVC) conventional PI voltage regulator and enhance its dynamic response performance and reactive power compensation capability, a SVC voltage control method based on variable universe fuzzy PI control is proposed. Based on the combination of conventional PI control and fuzzy theory, the technology of using fuzzy expansion factor to optimize variable universe is further improved. This paper compares the application of three control methods of conventional PI, fuzzy PI and variable universe fuzzy PI respectively in SVC. Compared with conventional PI and fuzzy PI control SVC, the simulation results show that the SVC based on variable universe fuzzy PI control can adjust voltage more quickly and flexibly, and it has better dynamic response performance and good reactive power compensation capability. Its compensation capability can effectively improve the stability of the power system.

Key words: static var compensator; variable universe; fuzzy PI control; voltage regulator