

## 静止无功补偿器运行特性分析和控制方法综述

付伟, 刘天琪, 李兴源, 赵睿

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 为分析加装在静止无功补偿器(SVC)中的附加控制器的控制机理并得到实际工程中可以采用的现代控制方法, 介绍静止无功补偿器的运行特性以及附加控制器对系统稳定性影响的原理。在对9种控制理论在静止无功补偿器中的应用原理和现状进行了详细阐述基础上, 比较不同控制方法应用于不同控制目标时控制效果的差异。最终, 从工程应用可行性和发展前景两方面考虑, 提出了几种将来需要重点研究的能够应用于静止无功补偿器中的现代控制方法。

**关键词:** 静止无功补偿器; 运行特性; 电力系统; 附加控制; 工程应用

### Analysis of operating characteristic and survey of control methods used in static var compensator

FU Wei, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan, ZHAO Rui

(School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** For analyzing the impact mechanism about the power systems of additional controllers added in static var compensator (SVC) and obtaining the modern control methods that can be used from the perspective of the engineering application, the operational characteristics of static var compensator (SVC) and the impact mechanism about the power systems of additional controllers added in SVC are introduced. The operational characteristics of static var compensator (SVC) and the impact mechanism about the power systems of additional controllers added in SVC are introduced. On the basis of researching the theory and application status of nine control methods used in the SVC, the comparisons of control effects between the control methods used in SVC for different control targets are completed. Eventually, from the angle of engineering application and development prospect, several feasible advanced SVC control methods are raised.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.51037003).

**Key words:** static var compensator; operational characteristics; power system; additional control; engineering applications

中图分类号: TM531 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)22-0147-08

## 0 引言

静止无功补偿装置(Static Var Compensator, SVC)是现代电力系统的重要元件之一, 它通过从电网吸收或向电网输送可连续调节的无功功率, 可以实现对装设点电压的控制; 同时在调节过程中输出阻抗不断变化, 还可以改善系统的功角稳定<sup>[1]</sup>。20世纪70年代以来, 以晶闸管控制的电抗器(TCR)、晶闸管投切的电容器(TSC)以及二者的混合装置(TCR+TSC)等主要形式组成的静止无功补偿器(SVC)得到快速发展, 近年来, 随着大功率可控硅器件制造技术的日趋完善, SVC在电力系统中的应

用越来越广泛, 同时随着电力工业的飞速发展, 电力系统的容量不断增加, 电网结构日益复杂和庞大, SVC系统稳定性问题更加突出<sup>[2-3]</sup>。因此, 研究SVC的附加控制方法以便改善电力系统的稳定性及动态品质已成为当今电力系统中的一项重要研究课题。

本文首先介绍SVC元件的运行特性以及SVC对电力系统稳定性影响的机理, 然后将应用于SVC中的附加控制方法分为传统控制和现代控制, 传统控制介绍最常见的PID控制(Proportion-Integration-Differentiation), 为了方便对比, 将属于非线性控制范畴的变形PI(Proportion-Integration)控制与传统PID控制放在一起陈述, 现代控制方法包括<sup>[4]</sup>: 非线性控制(非线性鲁棒控制、变结构控制、非线性自适应控制、微分几何控制、逆系统方法、李雅普诺夫直接控制方法等)、最优变目标策略控制、智能

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51037003); 国家电网公司大电网重大专项资助项目课题(SGCC-MPLG001-027-2012)

控制（模糊控制、遗传算法）以及 SVC 时滞系统的反步（backstepping）控制。

静止无功补偿器具有无功补偿,改善功角稳定、电压稳定和抑制低频振荡、次同步振荡等多种控制功能<sup>[5]</sup>, 必然会造成不同的控制方法应用于不同的功能时控制效果的差异,实际应用中 SVC 的最大效益仍未充分发挥,究其原因在于 SVC 的控制系统及控制方式仍有待改进和完善。通过对各种控制方法应用于不同控制目的时控制效果差异的对比,从工程应用的角度给出具有可行性的控制方法的建议。

### 1 SVC 元件运行特性及对电力系统稳定性影响机理

#### 1.1 SVC 非线性特性

以图 1 所示单机无穷大系统为例,介绍 SVC 的运行特性以及加装 SVC 的控制机理。SVC 的工作原理以及发电机和线路参数如图 2 所示。

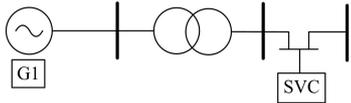


图 1 加装 SVC 的单机无穷大系统

Fig. 1 A single machine infinite-bus system with static VAR compensator

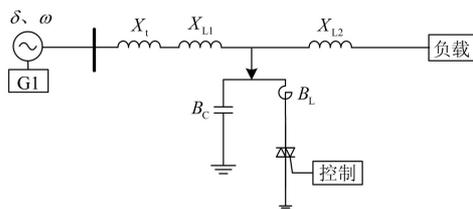


图 2 SVC 的工作原理示意图

Fig. 2 Working principle graph of static VAR compensator

以保证发电机功角稳定以及 SVC 所在线路电压稳定为控制目的,建立单机无穷大系统中发电机与 SVC 的协调控制模型。

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{H}(\omega - \omega_0) + \frac{\omega_0}{H}P_m - \frac{\omega_0 E'_q V_s \sin \delta}{HX'_{d\Sigma}} + w_1 \\ B_L = -\frac{1}{T_s}(B_L - B_{L0} - K_s u_s + w_2) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} h_1(x) = \Delta\delta = \delta - \delta_0 \\ h_2(x) = V_m - V_{m0} = \Delta V \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\delta_0$ 、 $\omega_0$  分别是发电机功角、转速稳态运行点;  $B_L$  为 SVC 电感值,其初值为  $B_{L0}$ ;  $B_C$  为 SVC 电

容值;  $T_s$  为 SVC 时间常数;  $K_s$  为 SVC 调节系统的放大倍数;  $u_s$  为待设计的 SVC 控制量; 系统阻抗  $X'_{d\Sigma} = X_1 + X_2 + X_1 X_2 (B_L - B_C)$ , 其中  $X_1 = X'_d + X_t + X_{L1}$ ,  $X_2 = X_{L2}$ ,  $X_d$ 、 $X'_d$  分别为发电机 d 轴同步电抗和暂态电抗,  $X_t$ 、 $X_{L1}$  分别为变压器电抗和输电线路电抗,  $X_{L2}$  为 SVC 与系统间电抗值;  $w_1$  和  $w_2$  模拟系统受到的扰动。

式 (1) 和式 (2) 组成了装有 SVC 的单机无穷大系统数学模型,式 (2) 根据控制目的的不同而变化,可以看出含 SVC 的电力系统呈现非线性特性。 $u_s$  为需要设计的 SVC 附加控制,加装位置如图 3 所示。

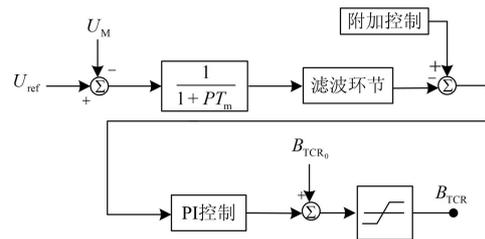


图 3 含附加控制的 SVC 控制器结构图

Fig. 3 Controller structure of SVC with additional controller

#### 1.2 SVC 控制原理及其控制目的

SVC 的基本功能是从电力网吸收或向电网输送可连续调节的无功功率,以维持装设点的电压恒定,并有利于电网的无功功率平衡,SVC 主控制一般采用传统 PI 控制,目的是维持 SVC 所在线路的电压稳定,附加控制由于控制目的不同及使用的控制方法不同而呈现多样性,控制系统通过改变等效电抗值的大小,进而控制晶闸管的触发角,调节其输出的无功功率,因此可以将 SVC 等效为可控电抗器,SVC 装置输出的无功功率与系统电压的平方成正比,因此在电力系统电压下降时,SVC 装置输出的无功功率会以与系统电压下降平方的比例下降。文献[2]评述了 SVC 改善电压稳定的作用,认为 SVC 在其可调范围内,对系统的电压稳定是有利的。

SVC 在电力系统中至少有如下几个作用:

- 调相调压;
- 提高系统的暂态和动态稳定性;
- 抑制系统的功率振荡和冲击负荷引起的电压闪变;
- 抑制动态过电压。

静止无功补偿器(SVC)相较于 FACTS 元件中的其他装置主要有如下优点<sup>[6]</sup>:

- 1) 响应速度快

调节器的响应已在相毫秒以内,使用前馈控制技术的调节器响应速度甚至达到微毫秒左右

2) 优异的动态的和连续的无功调节功能

此外, SVC 损耗低,运行维护方便,相对于同容量的调相机有全面的技术和经济优势。

## 2 各类控制方法在 SVC 中的应用

加装 SVC 的电力系统的附加控制多为传统的线性控制理论设计,在工程上用根轨迹法、频率响应法和状态空间法进行分析和设计。应用以上传统方法设计的控制器在扰动发生时刻系统运行工作点没有发生变化时具有较好的控制效果,但是,由式

(1) 和式 (2) 对 SVC 特性分析可知, SVC 系统具有强非线性特性,在运行过程中还受到不确定性的影响。因此,在大系统中,尤其是大扰动情形,传统方法无法保证其控制作用时刻以整个系统性能最优为目标,甚至恶化系统性能,无法满足工程需求<sup>[7]</sup>。近年来,国内外学者对这一问题开展了广泛的研究,许多现代控制方法逐渐发展起来,主要有非线性鲁棒控制、非线性变结构控制、非线性自适应控制、反馈线性化方法、最优变目标控制、智能控制以及针对 SVC 系统时滞性的反演 (backstepping) 控制。本章首先介绍目前工程中普遍应用的传统 PI 控制,然后再介绍 8 种现代控制方法作为附加控制在 SVC 中的应用情况。

### 2.1 PID 控制

#### 2.1.1 基本原理及应用现状

PID 控制称为比例-积分-微分控制,是 SVC 中最常用的校正方法。常规 PID 控制系统原理框图如图 4 所示。

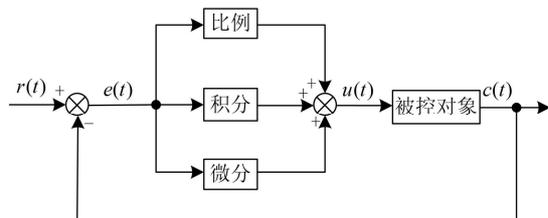


图 4 PID 控制器框图

Fig. 4 Controller structure of PID controller

不加微分环节的 PI 控制是目前应用在静止无功补偿器中最常用的传统控制方式。

文献[8]设计了能增加电力系统动态稳定性的静止无功补偿器的 PI 阻尼控制器,使用极点配置法定位 PI 控制器的增益值;文献[9]针对抑制次同步振荡设计了 SVC 的 PI 附加控制器,为了抑制各种转矩扭转模式引发的振荡,设计了一种根据发电机转速

的变化实时调整 SVC 输出功率的 PI 控制器。

#### 2.1.2 工程应用优劣分析

工程中应用于 SVC 的 PID 控制器参数一般为现场调节,常用的调节方法有齐格勒-尼柯尔斯调节法则、频率响应法及计算最佳化法,利用这些方法可以对 PID 控制器进行精确细致的现场调解。此外,一些自动调节方法也已经研究了出来,因此某些 PID 控制器具有在线自动调节能力。PID 控制器的变形,如 I-PD 控制和多自由度 PID 控制,已在工程中得到应用。

PID 控制的价值在于对大多数控制系统的广泛适用性,虽然在多数情况下不能实现最佳控制,但是控制器简单易懂,需要确定的调节参数较少,易于 SVC 的工程实现,且具有一定的鲁棒性,因此在工程中得到了广泛的应用,在 SVC 的工程应用中仍然占据主导地位。

传统 PID 应用于 SVC 这个非线性复杂系统上,无法同时保证快速性与稳定性,无法满足对 SVC 的输出阻抗的精确控制,要想适应未来电网的发展要求,必须要与现代控制方法相结合。

### 2.2 改进(变形)PI 控制

#### 2.2.1 基本原理及应用现状

改进 PI 控制属于现代控制理论中的非线性控制,其中模糊 PI 控制应用最为广泛。模糊 PI 控制器结构如图 5 所示。软件开关 S 在智能协调器的控制下,可以根据不同情况自动切换到模糊控制器工作状态或 PI 控制器工作状态<sup>[10]</sup>。文献[11]根据上述原理提出一种多目标统一控制器。在大偏差范围内的采用模糊控制,以获得更好的瞬态性能;在小偏差范围内的采用 PI 控制,以获得更好的稳态性能。文献[12]结合 PI 控制和一种新型自适应逆推方法设计 SVC 附加控制器。文献[13-15]基于模糊算法,遗传算法等算法设计非线性 PI 附加控制器,加转到 SVC 中取得良好控制效果。

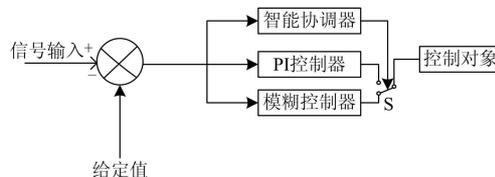


图 5 模糊-PI 附加控制器的结构图

Fig. 5 Controller structure of fuzzy-PI controller

#### 2.2.2 工程应用优劣分析

相较于传统 PI 控制,改进 PI 控制是克服了在 SVC 这个非线性复杂系统中对精确数学模型的依赖性,适应性及鲁棒性较差的缺陷,模糊 PI 控制器

更是具有实用性强易于工程实现的优越性，但是相较于传统控制的简单成本小的优点，改进 PI 控制由于控制结构较复杂而未投入工程实践。

### 2.3 非线性鲁棒控制

鲁棒控制的实质就是设计一个满足指标且留有一定域度的闭环系统稳定控制器<sup>[16]</sup>。包括  $H_\infty$  控制、 $L_2$  增益控制、 $\mu$  分析控制。

#### 2.3.1 基本原理及应用现状

非线性  $H_\infty$  控制理论是在  $H_\infty$  空间通过某些反应性能指标的无穷范数优化而获得具有鲁棒性能控制器的一种控制理论，其优越性体现在处理多变量系统的性能设计和鲁棒稳定性方面<sup>[17]</sup>。 $L_2$  增益实质是保证对不确定性干扰的鲁棒性<sup>[18]</sup>。 $\mu$ （结构奇异值）方法的基本思想是把实际控制问题归结为求结构奇异值  $\mu$  的问题，从而进行控制系统的设计<sup>[19]</sup>。缺陷是  $\min_K \|F_l(G, K)\|_\mu$  算法的完善问题以及坏条件数系统的  $\mu$  分析方法<sup>[20]</sup>。

文献[21]中采用了 SVC 与发电机励磁非线性  $H_\infty$  理论协调控制的方法，设计出协调控制策略，能够有效抑制系统振荡，提高系统的暂态稳定性。

文献[22]中提出了一种  $L_2$  增益意义下的干扰抑制法，得到实现干扰抑制的控制律。结合电力系统的强非线性和不确定性，提出了一种新的 SVC 与发电机励磁的鲁棒非线性协调控制律。

#### 2.3.2 工程应用优劣分析

应用在 SVC 中的非线性鲁棒控制的一般性问题仍未解决。 $H_\infty$  范数考虑了最大扰动的情形，鲁棒性较保守，依赖于设计者的经验选取权函，需依参数不同及所选加权不同而重新设计控制器<sup>[23]</sup>；非线性  $H_\infty$  控制鲁棒性保守。但是鲁棒控制具有较强的鲁棒性，对于外界干扰、参数偏差、模型不确定性以及抑制系统噪声有良好的稳定性，且控制率基于输入输出、频域描述，工程上易于实现，具有工程应用可行性。

### 2.4 非线性变结构控制

#### 2.4.1 基本原理及应用

变结构控制是根据被调量的偏差及其导数，迫使处于任何初始条件下的系统状态按一定的趋近率到达并保留在预先设计好的超平面上，并在该平面上逐渐趋于稳定<sup>[24]</sup>。控制规律具有非唯一性，为工程设计者提供了更多的选择<sup>[25]</sup>。

文献[26]引入自抗扰控制技术，实现了 SVC 与发电机励磁的非线性变结构协调控制，设计了能同时改善电力系统功角稳定和电压动态特性的变结构协调附加控制器。文献[27]运用非线性系统理论以

及变结构控制理论，推导协调控制率，设计 SVC 与 HVDC 非线性协调滑模变结构控制器。

#### 2.4.2 工程应用优劣分析

尽管变结构控制存在高频抖振以及切换面到达困难的局限性，但是滑模变结构具有对干扰和摄动的不变性，能有效地解决 SVC 的鲁棒性问题，并可保证系统的全局渐近稳定性，保证了该方法在 SVC 中具有工程应用的可行性。

### 2.5 非线性自适应控制

#### 2.5.1 基本原理及应用现状

自适应控制 (Adaptive Control, AC) 是将系统辨识和控制结合在一起的次最优控制理论<sup>[28]</sup>，它能随系统工况的变化在线辨识控制对象的参数或结构的动态变化，不断修正与调整控制器参数或结构，使之能自动跟踪对象变化以达到最佳控制<sup>[29]</sup>。

文献[30]对 SVC 提出了自适应反步法方法，完整保留了系统的非线性特性并且提高了系统的响应速度，而且突破了经典的确定性等价性原理。

#### 2.5.2 工程应用优劣分析

自适应控制开始阶段不一定能保证稳定，实现精确跟踪输入需要一定时间，无法处理非线性结构变化系统，不具备工程应用的可行性，预测将来研究的重点是模糊、神经网络、鲁棒等非线性自适应控制。

### 2.6 微分几何方法和逆系统方法控制

#### 2.6.1 基本原理与应用现状

微分几何方法通过合适的局部微分同胚变换，找到非线性反馈，在非线性反馈的作用下，将非线性系统映射为线性系统，再利用线性控制方法设计控制器<sup>[31]</sup>。

文献[32-33]将逆系统方法应用于电力系统，建立非仿射非线性模型，设计出了 SVC 的非线性附加控制器。

#### 2.6.2 工程应用优劣分析

许多现代控制方法需将 SVC 这个非线性系统线性化，这两种方法作为其他控制方法的基础，主要应用于对实际系统的线性化<sup>[34]</sup>。逆系统方法较精确线性化方法原理简单，更易于工程人员接受。但是这两种方法对数学模型的精确性要求很高，限制了它在工程上的应用<sup>[35]</sup>。

### 2.7 最优变目标策略控制

#### 2.7.1 基本原理和应用现状

最优变目标控制 (Optimal Variable Aim Control, OVAC) 首先驱动系统到达由暂态能量函数估计的具有最大稳定域的人工中间平衡点，然后驱动系统达到故障后的稳定平衡点<sup>[36]</sup>。该方法能有效改善

系统首摆动的暂态稳定性,增加后续摆的动态稳定性,其关键在于人工中间平衡点的选取<sup>[37]</sup>。

文献[38]在建立交直流混合系统中 HVDC 与 SVC 的综合控制模型基础上,推导出基于最优变目标的控制理论的 HVDC 与 SVC 非线性综合控制策略。

### 2.7.2 工程应用优劣分析

最优变目标策略控制能够解决加装 SVC 的系统可能存在多个稳定平衡点的问题,并且调节系统回到其动力学稳定平衡状态,实现对该系统的分层分区时的控制,便于在线实现,具有工程应用的可行性。

## 2.8 SVC 时滞系统的 backstepping 控制

### 2.8.1 基本原理及应用现状

Backstepping 算法是在不确定性非线性系统的基础上将系统分解为若干“子系统”,然后依照顺序在每个子系统中将 Lyapunov 函数的选取与控制器的设计结合,一直“后退”到整个系统从而得到真正的控制律<sup>[39]</sup>。

文献[40]引用参数估计思想,结合  $L_2$  增益设计方法与 Backstepping 方法,通过递归地构造整个系统的能量存储函数获得闭环反馈控制律,使系统对干扰输入具有  $L_2$  性能,增强系统鲁棒性。

### 2.8.2 工程应用优劣分析

backstepping 方法能保持系统非线性特性不丢失<sup>[41]</sup>,设计过程简明。工程中,应用于解决 SVC 时滞问题。

## 2.9 智能控制

### 2.9.1 原理以及在 SVC 中的应用现状

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 不存在求导和函数连续性的限定,直接对结构对象进行操作,能自动获取和指导搜索空间,自适应地调整搜索方向<sup>[42]</sup>。

模糊控制 (Fuzzy Control, FC) 以相关专家的知识或现场人员的控制经验为出发点,直接采用语言型控制规则,无需建立被控对象的精确数学模型<sup>[43]</sup>。

文献[44]提出遗传算法结合禁忌搜索弥补其缺点,进而基于结合算法提出 PSS 和 SVC 的协调措施。文献[45]将模糊理论、协同进化算法和免疫算法相结合求解 SVC 元件的协调控制问题,多个控制器之间保持很好的阻尼振荡特性。文献[46]提出新型神经网络 PID 控制结构,维持系统电压稳定性。

### 2.9.2 工程应用优劣分析

智能控制的优点是结合人工智能理论,具有自学习能力,适合处理非线性、不确定性问题,提高了 SVC 的自适应能力和鲁棒性。

目前,智能技术本身仍有大量基础问题需要解决,仍处在研究阶段,模糊 PI 控制、模糊变结构控

制等协调控制方法才具有工程应用的可行性。

## 3 控制方法的相互比较及方法选用建议

### 3.1 传统控制和现代控制应用在 SVC 中的控制效果对比

相比传统控制,现代控制方法具有更好的自适应性、容错性、并行性,多功能性。经过理论研究和仿真对比,部分学者分析表明,应用现代控制方法可以实现对 SVC 的输出阻抗的精确无差调节。但是大部分方法无法应用到工程实践中,这是因为现代控制方法设计的控制器,其良好的控制效果主要是用高反馈增益、大参数设置换来的,这在实际应用中,会造成高成本,不符合经济运行的准则,因此现阶段 PI 控制仍是 SVC 工程应用的主流控制方法。

### 3.2 现代控制方法的控制目的及工程应用可行性分析

前文已经对每一种现代控制方法的优缺点进行了详细的介绍,表1更加直观地对比了应用于 SVC 的各种附加控制方法的控制目的及工程应用可行性。

表 1 控制方法特性对比

Table 1 Feature comparison of control methods

附加控制方法		应用于 SVC 的控制目的	工程应用可行性
经典控制	传统 PID 控制	适用于线性、单输入-单输出系统,控制目的较广泛	控制目的广泛,控制简单易懂,易于操作人员操作,工程中广泛应用
	变形 PI 控制	无功补偿,维持电压稳定	模糊 PI 控制器实用性强,具有工程应用可行性
现代控制方法	非线性 $H_\infty$ 控制	抑制系统振荡,提高系统阻尼	工程上主要用于抑制系统振荡。鲁棒性高,具有工程应用可行性
	变结构控制	改善功角稳定和电压稳定	滑动模态具有完全鲁棒性,控制规律容易实现,工程上既可以应用于交流系统,也可应用于交直流协调控制
	非线性自适应控制	提高系统稳定性以及响应速度	适用于扰动特性变化范围很大,同时又要求经常保持高性能指标的系统,暂时不具备工程应用可行性
	微分几何法和逆系统法	提高电力系统稳定性,维持电压稳定	自身局限性较大,不具备工程应用可行性
	最优变目标策略控制	主要用于 SVC 与 HVDC 或者励磁系统的协调控制,提高系统阻尼,改善电压稳定	实现系统的时分分层分区控制,具有工程应用可行性,主要应用于直流输电及交直流混合输电
	Backstepping 控制	解决时滞问题	与其他方法结合,获得其他控制目的的同时解决系统时滞问题,具有工程应用可行性
	智能控制	抑制振荡,提高系统暂态稳定性	亟待向综合化、集成化发展,与 PI 控制结合可应用于工程实践中

控制方法能否设计成控制器应用于实际工程中,不仅要考虑这种方法本身的鲁棒性、抗扰性和智能化等良好的性能,还要满足经济性以及简单易操作的特点。因此,智能控制、非线性自适应以及微分几何化等控制规律复杂不利于现场工作人员操作和调节的控制方法现阶段不具备工程应用的可行性。由表 1 可以看出,非线性  $H_\infty$  控制的鲁棒性较高,变结构控制的滑动模态上具有完全抗扰性,最优变目标策略控制自适应性强,可实现时分分层分区控制,且控制规律相较于表中其他现代控制方法简单,控制器易操作,作为附加控制器加装在 SVC 中具有更好的发展前景和工程应用可行性。

而对于具体的系统,就要灵活地选取各类控制方法,不同的控制方法适用于不同的控制目的,详情参见表 1。需要补充的是,在实际工程中,当考虑 SVC 的时滞性时,就需要加入 Backstepping 算法;当精确模型难以获得时,建议使用模糊 PI 控制。

#### 4 结论

对于加装 SVC 的系统,必须根据控制目的需求灵活的选择控制方法来设计附加控制器,3.2 节依据 9 种控制方法的对比提出了具有工程应用可行性的控制方法的建议,但是这些控制方法仍具有局限性。

改进 PI 控制结构较复杂,控制规律较为复杂;最优变目标策略控制发展时间较短,尚不具备工程应用的经验;鲁棒控制器阶次较高,算法复杂;变结构控制存在高频抖振,现阶段各种方法均不能达到完全消除抖振的目的。只有解决了这些理论问题,才能真正实现工程应用。因此现代控制方法作为附加控制应用在 SVC 中的发展前景是在解决本身理论局限性的同时,针对不同的控制目的,相互之间实现协调控制。

#### 参考文献

[1] 左强. 国家标准《静止无功补偿装置(SVC)》简介和释义[N]. 中国标准导报, 2008-08-23(3).

[2] 李立, 鲁宗相, 邱阿瑞. FACTS 对电力系统静态安全性影响评价指标体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 33-38.  
LI Li, LU Zong-xiang, QIU A-ru. Research on the index system to evaluate power system steady state security with FACTS[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 33-38.

[3] 姚伟, 文劲宇, 程时杰, 等. 考虑时滞影响的 SVC 广域附加阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 239-246.  
YAO Wei, WEN Jin-yu, CHENG Shi-jie, et al. Design of wide-area supplementary damping controller of SVC

considering time delays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 239-246.

[4] 李兴源, 赵睿, 刘天琪, 等. 传统高压直流输电系统稳定性分析和控制综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 288-300.  
LI Xing-yuan, ZHAO Rui, LIU Tian-qi, et al. Research of conventional high voltage direct current transmission system stability analysis and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 288-300.

[5] 赵渊, 周家启. 静止无功补偿器和移相器的最优配置及其对发输电系统可靠性的影响[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 55-60.  
ZHAO Yuan, ZHOU Jia-qi. Optimal location of static var compensators and phase shifters and their impact on the generation and transmission system reliability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(1): 55-60.

[6] 丁理杰, 杜新伟, 周惟婧. SVC 与 STATCOM 在大容量输电通道上的应用比较[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 77-81, 87.  
DING Li-jie, DU Xin-wei, ZHOU Wei-jing. Comparison of application of SVC and STATCOM to large capacity transmission path of power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 77-81, 87.

[7] 杜继伟, 王胜刚. 静止无功补偿器对电力系统性能改善的综述[J]. 继电器, 2007, 35(22): 82-85.  
DU Ji-wei, WANG Sheng-gang. An overview on performance of power system improved by static var compensator (SVC)[J]. Relay, 2007, 35(22): 82-85.

[8] ELLITHY K, SAID S. Tuning of SVC proportional-integral damping controller to enhance power systems dynamic stability[C] // North American Power Symposium (NAPS), 2011: 1-6.

[9] HSU Yuan-yih, WU Chi-jui. Design of PID Static VAR controllers for the damping of subsynchronous oscillations[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1988, 3(2): 210-216.

[10] 郑连清, 池俊锋, 陆治国. 基于模糊-PI 控制的 SVC 电压控制器的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 117-122, 127.  
ZHENG Lian-qing, CHI Jun-feng, LU Zhi-guo. Three-step fuzzy adaptive PI controller for VSC-HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 117-122, 127.

[11] 方璐, 罗安, 徐先勇, 等. 静止无功补偿器多目标统一控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 106-110.  
FANG Lu, LUO An, XU Xian-yong, et al. Unified controller of multiple objects for static var compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19):

- 106-110.
- [12] 付俊, 赵军, 乔治·迪米罗夫斯基. 静态无功补偿器鲁棒控制的一种新自适应逆推方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 7-12.  
FU Jun, ZHAO Jun, DIMIROVSK G M. Robust control of SVC: a new adaptive back stepping method[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 7-12.
- [13] 刘瑞叶, 刘宝柱. SVC 的模糊变结构控制对电力系统稳定性的影响[J]. 继电器, 2001, 29(6): 13-19.  
LIU Rui-ye, LIU Bao-zhu. The impact of fuzzy variable structure control of SVC on the power system stability[J]. Relay, 2001, 29(6): 13-19.
- [14] 刘瑞叶, 刘宝柱. SVC 与发电机附加励磁模糊变结构综合控制的研究[J]. 继电器, 2002, 30(6): 13-16.  
LIU Rui-ye, LIU Bao-zhu. Fuzzy variable structure coordinated control of SVC and additional excitation[J]. Relay, 2002, 30(6): 13-16.
- [15] 戴元海, 彭建春, 董凯. 基于模糊-PI 控制的 SVC 电压控制器的设计与实现[J]. 测控技术, 2009, 28(9): 45-48.  
DAI Yuan-hai, PENG Jian-chun, DONG Kai. Design and realization of voltage controller for SVC based on fuzzy-PI control theory[J]. Measurement and Control Technology, 2009, 28(9): 45-48.
- [16] PAL B, CHAUDHURI B. Robust control in power system[M]. Springer: Power Electronics and Power Systems, 2005.
- [17] 丁思奇, 曼苏乐, 胡志勇, 等. 基于鲁棒控制的静止同步补偿器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 98-103.  
DING Si-qi, MANSOOR, HU Zhi-yong, et al. Study of STATCOM based on robust controller[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 98-103.
- [18] VANDER S A. L2-gain and passivity techniques in nonlinear control[M]. London: Springer-Verlag London Limited, 2000.
- [19] 吴敏, 桂卫华. 现代鲁棒控制[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1998.
- [20] TARANTO G N, SHIAU J K, CHOW J H, et al. Robust decentralized design for multiple FACTS damping controllers[J]. IEEE Proceedings generation Transmission and Distribution, 1997, 144(1): 61-67.
- [21] 张靠社, 杨宝杰, 滕夏晨. SVC 与发电机励磁鲁棒非线性协调控制[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(2): 10-16.  
ZHANG Kao-she, YANG Bao-jie, TENG Xia-chen. Robust nonlinear coordinated control for SVC and generator excitation[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(2): 10-16.
- [22] 兰海, 李殿璞. SVC 与发电机励磁鲁棒非线性协调控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(2): 20-25.  
LAN Hai, LI Dian-pu. Robust nonlinear coordinated control for SVC and generator excitation[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25(2): 20-25.
- [23] 蔡超豪, 赵敏, 郝福忠. 计及时滞影响的电力系统稳定器的控制[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 19-23.  
CAI Chao-hao, ZHAO Min, HAO Fu-zhong. Control of PSS in consideration of time-delay[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 19-23.
- [24] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [25] 高为炳, 吴东南. 关于非线性控制系统的线性化问题[J]. 中国科学 A 辑, 1987, 30(7): 740-747.  
GAO Wei-bing, WU Dong-nan. Questions about the linearization of the nonlinear control system[J]. Science China (A), 1987, 30(7): 740-747.
- [26] 康忠健, 勾松波, 孟繁玉, 等. SVC 与发电机励磁的非线性变结构协调控制[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 30-36.  
KANG Zhong-jian, GOU Song-bo, MENG Fan-yu, et al. Nonlinear variable structure controller of static var compensator cooperating with excitation system of generation[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 30-36.
- [27] 温苾芳, 王奔, 从振, 等. SVC 与 HVDC 非线性协调滑模变结构控制[J]. 电气开关, 2010, 48(4): 41-44.  
WEN Mi-fang, WANG Ben, CONG Zhen, et al. Research on the variable structure control of the nonlinear coordinated sliding mode of SVC and HVDC[J]. Journal of Electrical Switch, 2010, 48(4): 41-44.
- [28] 叶其革, 王晨皓, 吴捷. 自适应控制及其在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(11): 49-53.  
YE Qi-ge, WANG Chen-hao, WU Jie. Adaptive control applied to power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(11): 49-53.
- [29] DASH P K, SHARAF A M, HILL E F. An adaptive stabilizer for thyristor controlled static VAR compensators for power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(2): 403-410.
- [30] 彭建春, 黄纯, 王耀南. 静态无功补偿器的智能自适应 PID 控制器设计[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 1990, 26(10): 50-55.  
PENG Jian-chun, HUANG Chun, WANG Yao-nan. Intelligent adaptive PID controller design for static var compensator[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 1990, 26(10): 51-55.
- [31] 吴忠强, 庄述燕, 马宝明, 等. 基于逆系统方法的并网逆变器自适应模糊滑模控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 1-7.  
WU Zhong-qiang, ZHUANG Shu-yan, MA Bao-ming, et al. Research on adaptive fuzzy sliding mode control for

- grid-connected inverter based on inverse system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 1-7.
- [32] 庄述燕. 基于逆系统方法的带 SMSE 的静态无功补偿器的 RBF 滑模控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 91-95.  
ZHUANG Shu-yan. RBF sliding mode control of STATCOM with SMSE based on inverse system method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 91-95.
- [33] 葛友, 李春文. 基于非仿射非线性模型的静止无功补偿控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2001, 电力大系统灾变防护和经济运行重大课题专栏: 9-11.  
GE You, LI Chun-wen. SVC control design based on non-affine nonlinear model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, Natural Disasters Column in Power Systems: 9-11.
- [34] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [35] ZENG Guang, LU Peng, SU Yan-min, et al. Research on adaptive inverse control strategy for static var compensator[C] // Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IEEE 6th International, 2009, 3: 2394-2397.
- [36] LI X Y, SSRIG Y H, LIU X C, et al. Nonlinear optimal-variable-aim strategy for improving multimachine power system transient stability[J]. IEE, 1996, 143(3): 249-252.
- [37] LI X Y, DUAN H F, CHUNG T S. Nonlinear optimal-variable-aim excitation control strategy for voltage stability improvement[C] // Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-97, Hong Kong, November, 1997.
- [38] 杨波, 刘天琪, 李兴源, 等. 基于最优变目标策略的励磁系统与 SVC 协调控制[J]. 继电器, 2006, 34(17): 29-33.  
YANG Bo, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan, et al. Coordination control between generator excitation and SVC based on optimal variable aim strategy[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 34(17): 29-33.
- [39] 杨培宏, 刘文颖, 魏毅立, 等. 基于自适应逆推变结构方法的非线性励磁控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 125-129, 144.  
YANG Pei-hong, LIU Wen-ying, WEI Yi-li, et al. Nonlinear excitation control based on adaptive backstepping and variable structure method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 125-129, 144.
- [40] 陈娇英, 李啸骢, 李文涛, 等. 基于自适应 Backstepping 的 SVC 鲁棒性能控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 40-44, 69.  
CHEN Jiao-ying, LI Xiao-cong, LI Wen-tao, et al. Robust performance control design for SVC based on self-adapting backstepping[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 40-44, 69.
- [41] 杨培宏, 魏毅立, 刘文颖. 基于反演变结构方法的电力系统自适应阻尼控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 96-100.  
YANG Pei-hong, WEI Yi-li, LIU Wen-ying. Backstepping control design of SVC with time-delay[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 96-100.
- [42] AGHAZADE A, KAZEMI A, ALAMUTI M M. Coordination among facts POD and PSS controllers for damping of power system oscillations in large power systems using genetic algorithm[C] // The 45th International Universities Power Engineering Conference, Wales, 2010.
- [43] TAN Xiao-bo, ZHANG Nai-yao, TONG Lu-yuan, et al. Fuzzy control of thyristor-controlled series compensator in power system transient[J]. Fuzzy Sets and System, 2000, 110(3): 429-436.
- [44] 杨晓东, 房大中, 刘长胜, 等. 阻尼联络线低频振荡的 SVC 自适应模糊控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 55-63.  
YANG Xiao-dong, FANG Da-zhong, LIU Chang-sheng, et al. An adaptive SVC fuzzy controller for damping tie-link low frequency oscillation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 55-63.
- [45] 刘青, 李丽英, 王增平. 基于模糊混合进化算法的多个 FACTS 元件协调控制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 18-21.  
LIU Qing, LI Li-ying, WANG Zeng-ping. Power converse in multi infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 18-21.
- [46] 马兆兴, 万秋兰, 李洪美, 等. 基于神经网络的 SVC 电压稳定性控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 67-71.  
MA Zhao-xing, WAN Qiu-lan, LI Hong-mei, et al. A voltage stability control method of SVC based on neural network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 67-71.

收稿日期: 2014-03-03; 修回日期: 2014-04-30

作者简介:

付伟(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: fuwei19911120@163.com

刘天琪(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制;

李兴源(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。