



东北电力大学-  
满足预设输出跟踪性能的多机电力系统自适应模糊  
动态面滑模控制方法

## 用户与研究成果简介：

东北电力大学祝国强老师的科研团队提出了一种满足预设输出跟踪性能的多机电力系统自适应模糊动态面滑模控制方法。该方法将动态面方法与滑模变结构方法相结合，提高了所有误差面的鲁棒性和收敛速度；通过引入误差性能转换函数来实现预设的跟踪性能，这意味着可以预先设定任意期望的跟踪性能；在模糊逻辑系统中使用了权值向量范数的估计，大大减少了需要估计的参数数量，提升了控制器实用性；研究利用上海远宽的 StarSim 电力电子小步长实时仿真器进行实验，通过实验结果验证了所提出的自适应模糊动态面滑模控制方法的有效性，并把成果总结发表于《ISA Transactions》：

Guoqiang Zhu, Linlin Nie, Zhe Lv. Adaptive Fuzzy Dynamic Surface Sliding Mode Control of Large-Scale Power Systems with Prescribe Output Tracking Performance[J]. ISA Transactions, 2019. (SCI 收录, DOI 号 10.1016/j.isatra.2019.08.063, IF=5.201)

## 课题研究背景

### 含 SVC 多机电力系统协调控制问题的研究意义与现状

近几十年来，跨地区、跨国界输电已成为电网发展的趋势，其有多维、强耦合、高度非线性的特点将越发明显。因此，电力系统在运行过程中更容易遇到不稳定因素，如内部不确定性、外部干扰等，给电力系统的稳定控制增加了难度。为了保证电力系统安全稳定运行，需要提出更有效的控制策略，设计性能优异的控制器。对于具有不确定性的非线性电力系统，结合实际控制需要，多机系统励磁控制器的设计应满足如下需求。控制器的跟踪性能满足实际控制精度需要，即跟踪误差在预设条件内；具有较好的鲁棒性，以应对系统实际运行中受到的持续小干扰或突发故障；控制器设计简明，利于实时控制。目前常见的励磁控制方法都不能较好的满足全部控制需求。反馈线性化方法不考虑其非线性特征；自适应 PID 的参数调整依赖经验，且鲁棒性较差；反演控制方法因其固有的微分爆炸问题，控制律复杂。SVC 设备可以有效地控制电压，提高电力系统的暂态稳定性。因此，各种控制技术被应用于开发 SVC 控制器。但是，一般的发电机励磁控制器和 SVC 控制器是相互独立设计的，没有考虑它们之间的联系和相互作用。不协调的控制策略可能会产生负面影响。

## 研究重要内容和创新点

### 含 SVC 的多机电力系统模型的建立及控制目标

基于含 SVC 的大型电力系统模型具有强耦合性和高非线性的特点。励磁电力系统简化模型可表示为:

$$\begin{aligned}\dot{\delta}_i &= \omega_i, \\ \dot{\omega}_i &= -\frac{D_i}{2H_i}\omega_i - \frac{\omega_{i0}}{2H_i}\Delta P_{ei} + \Delta_{i1}, \\ \Delta \dot{P}_{ei} &= -\Delta P_{ei} + \frac{1}{T_{d0i}}u_i + h_i(\delta, \omega) + \Delta_{i2}, \\ \dot{B}_{Li} &= \frac{1}{T_{Ci}}(-B_{Li} + B_{Ci} + u_{Bi}).\end{aligned}\quad (1)$$

对系统模型进行规范化转换, 使  $x_{i1} = \delta_i - \delta_{i0}, x_{i2} = \omega_i - \omega_{i0}, x_{i3} = P_{ei} - P_{mi0}, x_{i4} = V_{mi} - V_{refi}$ , 其中  $V_{mi}$  为接入点电压,  $V_{refi}$  为参考电压, 则公式(1)可以表示为如下两个子系统:

$$\begin{aligned}\dot{x}_{i1} &= x_{i2}, \\ \dot{x}_{i2} &= -g_{i2}x_{i3} + f_2(\bar{x}_{i2}) + \Delta_{i1}, \\ \dot{x}_{i3} &= g_{i3}u_i + f_3(\bar{x}_{i3}) + h_i(\delta, \omega) + \Delta_{i2}, \\ y_{i1} &= x_{i1},\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_{i4} &= g_{i4}u_{Bi} + f_4(\bar{x}_{i4}), \\ y_{i2} &= x_{i4}.\end{aligned}\quad (3)$$

其中  $\bar{x}_{ij} = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}]^T \in R^j, j=1, \dots, 4$ , 为状态向量;  $y_{i1}$  和  $y_{i2}$  为含 SVC 设备的多机电力系统的输出;

$$g_{i2} = \frac{\omega_{i0}}{2H_i}, \quad g_{i3} = \frac{1}{T_{d0i}}, \quad g_{i4} = \frac{X_{li}X_{2i}}{T_{Ci}X'_{d\Sigma i}}, \quad f_{i2}(\bar{x}_{i2}) = -\frac{D_i}{2H_i}x_{i2}, \quad u_{Bi} = -x_{i4}u'_{Bi}, \quad f_{i3}(\bar{x}_{i3}) = -\frac{x_{i3}}{T_{d0i}},$$

$$f_{i4}(\bar{x}_{i4}) = -\frac{\sin x_{i1}X_{1i}X_{2i}}{(x_{i4} + V_{refi})(X'_{d\Sigma i})^2}x_{i2}E'_{qi} + \frac{X_{2i}^2x_{i3} + X_{1i}X_{2i}\cos \delta_i}{T_{d0i}V_{mi}(X'_{d\Sigma i})^2}u_i - \frac{X_{1i}X_{2i}(x_{i4} + V_{refi})}{X'_{d\Sigma i}}\frac{X_{2i}^2E'_{qi} + X_{1i}X_{2i}\cos x_{i1}}{(x_{i4} + V_{refi})(X'_{d\Sigma i})^2} \\ \frac{(-B_{Li} + B_{Ci})}{T_{Ci}}(-\frac{X_{d\Sigma i}}{T_{d0i}X'_{d\Sigma i}}E'_{qi} + \frac{X_{di} - X'_{di}}{T_{d0i}X'_{d\Sigma i}}\cos x_{i1})$$

其中:  $\delta_i$  是第  $i$  台发电机的功率角(rad);

$\omega_i$  是第  $i$  台发电机的转子相对转速(rad/s);  $\omega_{i0} = 2\pi f_0$  是同步电机的转速(rad/s);  $\Delta P_{ei} = P_{ei} - P_{mi0}$ ,

其中  $P_{mi}$  是机械功率,  $P_{ei}$  是电功率;  $D_i$  是单位阻尼常数;  $H_i$  是惯性常数(s);  $E'_{qi}$  是第  $i$  台发电机的瞬变电动势;  $T_{d0i}$  是直轴瞬变短路时间常数(s);  $Q_{ei}$  是无功功率;  $h_i(\delta, \omega)$  是多机互联的耦合项;

$u_i$  是励磁设备的控制电压;  $B_{Li}$  是 SVC 设备的可调节等效电纳;  $B_{Ci}$  是可调节等效电纳的初值;  $B_{ij}$  是消除所有物理母线后, 节点内部电纳矩阵中第  $i$  行和第  $j$  列的元素;  $\Delta_{i1}$  是转子转矩的有界干扰;  $\Delta_{i2}$  是定子的电磁暂态干扰;  $T_{doi}$  是直轴瞬变短路时间常数(s);  $T_{ci}$  是调节系统和 SVC 的时间常数(s);  $u_{Bi}$  是 SVC 设备的输入;  $X_{2i}$  是传输线路电抗;  $X_{di}$  是发电机直轴电抗;  $X'_{di}$  是发电机直轴瞬变电抗;  $X_{Ti}$  是变压器电抗。

控制目标是设计一个自适应动态面滑模励磁控制器, 使得 SVC 的接入点电压  $V_{mi}$  跟踪参考电压  $V_{refi}$ , 发电机的功角  $\delta_i$  跟踪目标功角  $\delta_{i0}$ 。

### 多机电力系统自适应模糊动态面滑模控制器设计

传统的电力系统控制方法中一般将电力系统模型简化为单机无穷大系统, 对于装配了 SVC 设备及多机互联耦合影响的情况研究很少, 东北电力大学祝国强团队提出的自适应模糊动态面滑模控制 (Adaptive Dynamic Surface Sliding Mode Control, ADSSMC) 方法综合考虑了多机互联耦合的电网实际情况, 设计自适应模糊动态面滑模控制器。控制策略示意图如图 1 所示。

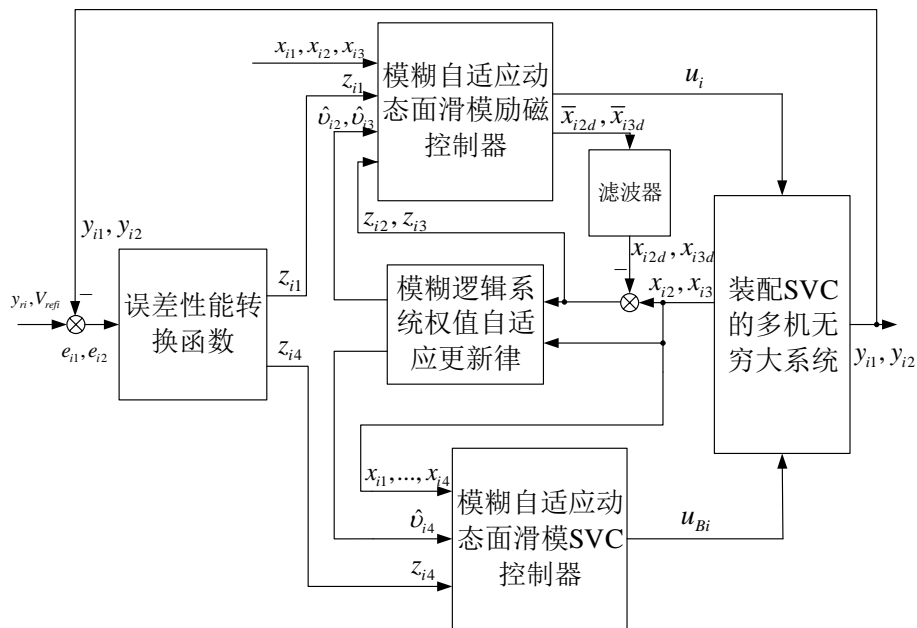


图 1 ADSSMC 控制方案结构

动态面的选取为:  $z_{i1} = \Phi_{i1}^{-1}(e_{i1}(t)/\varpi_{i1}(t))$ ,  $z_{i2} = x_{i2} - x_{i2d}$ ,  $S_i = a_{i1}z_{i1} + a_{i2}z_{i2} + z_{i3}$ , ( $z_{i3} = x_{i3} - x_{i3d}$ ),  $z_{i4} = \Phi_{i2}^{-1}(e_{i2}(t)/\varpi_{i2}(t))$ 。其中  $\varpi_{i1}(t)$ 、 $\varpi_{i2}(t)$  为误差性能转换函数,  $S_i$  为定义的滑模面,  $e_{i1}(t)$ 、 $e_{i2}(t)$  为跟踪误差。

最终励磁控制器和最终无功补偿控制器设计为：

$$u_i = -(k_{i3}S_i + \frac{1}{2}S_i\hat{v}_{i3}\Psi_{i3}^T(\xi_{i3})\Psi_{i3}(\xi_{i3}) + \frac{1}{2}S_i + \eta\text{sign}(S_i))$$

$$u_{Bi} = \frac{1}{\Theta_{i2}} \left[ -k_{i4}z_{i4} - \frac{1}{2}z_{i4}\hat{v}_{i4}\Psi_{i4}^T(\xi_{i4})\Psi_{i4}(\xi_{i4}) - \frac{1}{2}z_{i4} - \hat{\theta}_{g_{i4}}\Theta_{i2}(\dot{V}_{refi} + e_{i1}(t)\frac{\dot{\omega}_{i1}(t)}{\omega_{i1}(t)}) \right]$$

完整的 ADSSMC 控制器推导公式及稳定性分析详见东北电力大学祝国强科研团队发表的文章。

## 基于实时仿真器的算法验证

### 多机电力系统自适应模糊动态面滑模控制方法的仿真实验

研究已经完成了仿真实验验证。实验验证了所提出的方法能否有效地改善含 SVC 的双机励磁系统的跟踪性能和暂态稳定，采用传统的自适应 backstepping 控制方法（Traditional adaptive backstepping control, TABSC）、纯自适应动态面法（Adaptive dynamic surface control, ADSC）以及自适应滑模控制（Adaptive sliding mode control, ASMC）作为对照，模拟了在操作点不同的两种情况下进行控制效果对比，并假设三相短路故障发上在两个发电机 **G#1**和**G#2** 之间的一条传输线路上。一般来说，输电线路三相电压短路故障这种实验一般较难在实物系统上实现；纯软件仿真又有无法接入真实控制器的缺点，较难反应出真实控制器中的延迟和有限精度。实时仿真器可以同真实控制器连接，又不会有故障实验危险的问题，是多机电力系统控制方案验证的理想测试设备。

远宽能源（www.modeling-tech.com）提供的 StarSim 实时仿真器，基于电力电子器件的细节模型，利用最新的 FPGA 技术，可以实现 1 微秒步长、任意拓扑、任意工况的电力电子系统实时仿真，被广泛应用于牵引供电系统故障诊断、控制策略验证、可再生能源并网、电机驱动等的实时仿真中；东北电力大学的科研团队就采用了 StarSim 电力电子实时仿真器来进行所提出的机电力系统励磁与 SVC 自适应模糊动态面滑模控制方法的试验验证。

图 2 是 HIL+RCP 测试平台示意图，其包括实时仿真系统 HIL 和快速控制原型 RCP，其中电力电子系统是利用 StarSim FPGA Solver 按 1 微秒的步长实时仿真；控制算法运行在 RCP 控制器上，电力系统模型运行在 HIL 实时仿真器上，两者通过真实的物理 IO 互连。

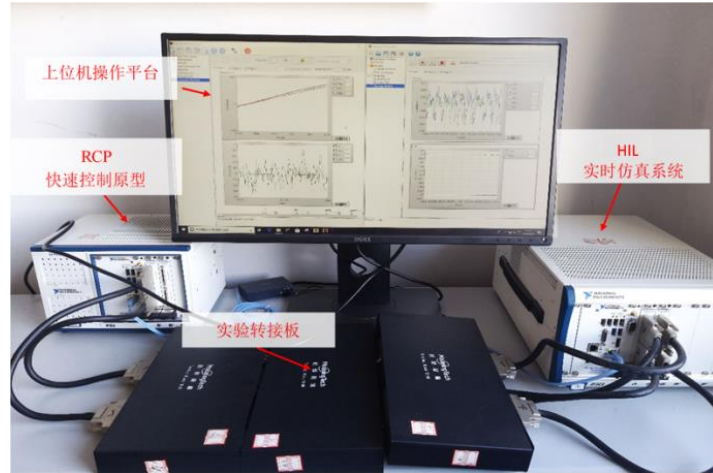


图 2 HIL+RCP 测试平台示意图

下图为在小步长实时仿真实验平台上两种工况下的跟踪误差信号的实验波形。

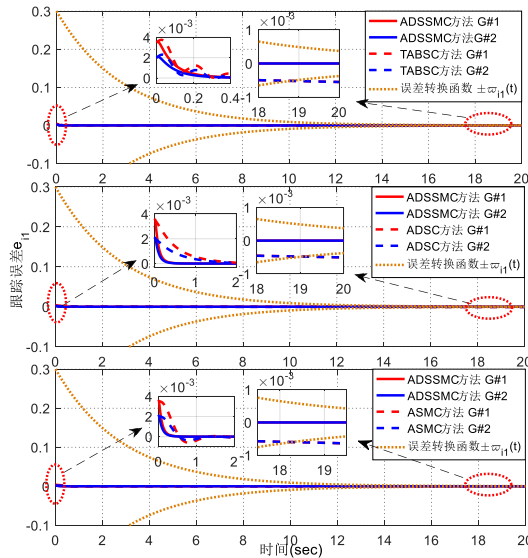


图 3 两发电机功角误差曲线图

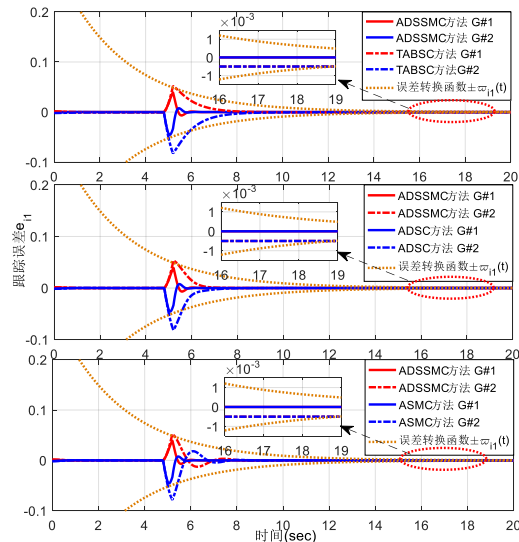


图 4 突发短路故障下两台发电机功角误差曲线

由图 3 和图 4 可以看出，所提出的 ADSSMC 方法的跟踪误差始终保持在其预设的误差曲线以内。可以看出，与其他三种控制方案相比，所提出的 ADSSMC 控制方法具有最小的稳态跟踪误差 ( $t > 900ms$ )、最快的调节时间以及更好的鲁棒性，验证了 ADSSMC 方法在多机电力系统励磁与 SVC 协调控制上的有效性。