



东北电力大学-
基于复合学习和干扰观测器的多机电力系统自适应
模糊动态面控制方法

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基于复合学习和干扰观测器的多机电力系统自适应模糊动态面控制方法。该方法利用模糊逻辑系统和扰动观测器进行复合扰动估计，有效地消除了多机电力系统的不确定性和外部干扰；使用复合学习算法改进模糊逻辑系统，使其能够逼近系统真实的不确定性，提高系统的鲁棒性；并将滤波补偿信号引入动态面控制中，消除了动态面方法由于使用滤波器而引起的滤波误差，提高了系统的控制精度。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基于复合估计的自适应模糊动态面控制方法的有效性，并把成果总结发表于《IEEE ACCESS》。

Guoqiang Zhu, Linlin Nie, Miaolei Zhou. Adaptive Fuzzy Dynamic Surface Control for Multi-Machine Power System Based on Composite Learning Method and Disturbance Observer [J]. IEEE Access, 2020. (SCI 收录, DOI 号 10.1109/ACCESS.2020.3022293, IF=3.745)

课题研究背景

多机电力系统控制问题的研究意义与现状

随着电网规模的扩大，现代电力系统逐渐形成了强耦合的动态非线性系统。但是，由于电力系统复杂的非线性特性或三相电压短路故障等事故，电力系统更容易发生振荡，安全稳定地运行变得更加困难。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；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。在以前的工作中，对于系统的不确定性和外部干扰，在鲁棒性设计中广泛采用神经网络或模糊逻辑系统。然而，这些研究通常只关注系统的渐进跟踪稳定性，而忽略了神经网络或模糊逻辑系统作为逼近器的工作原理和真实性，东北电力大学祝国强老师的科研团队针对大型电力系统不确定性和外部干扰提出一种基于复合学习和干扰观测器的多机电力系统自适应模糊动态面控制方法，解决了传统方法中存在的上述问题。

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

考虑电网的实际情况，建立具有强耦合性和高非线性特点的含 SVC 的多机电力系统模型。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;

$$g_{i2} = \frac{\omega_{i0}}{2H_i}, \quad g_{i3} = \frac{1}{T'_{d0i}}, \quad g_{i4} = \frac{X_{li}X_{2i}}{T_{Ci}X'_{d\sigma i}}, \quad f_{i2}(\bar{x}_{i2}) = -\frac{D_i}{2H_i}x_{i2}, \quad u_{Bi} = -x_{i4}u'_{Bi}, \quad f_{i3}(\bar{x}_{i3}) = -\frac{x_{i3}}{T'_{d0i}},$$

$$\begin{aligned}f_{i4}(\bar{x}_{i4}) &= -\frac{\sin x_{i1}X_{li}X_{2i}}{(x_{i4} + V_{refi})(X'_{d\sigma i})^2}x_{i2}E'_{qi} + \frac{X_{2i}^2x_{i3} + X_{li}X_{2i}\cos \delta_i}{T_{d0i}V_{mi}(X'_{d\sigma i})^2}u_i - \frac{X_{li}X_{2i}(x_{i4} + V_{refi})}{X'_{d\sigma i}}\frac{X_{2i}^2E'_{qi} + X_{li}X_{2i}\cos x_{i1}}{(x_{i4} + V_{refi})(X'_{d\sigma i})^2} \\ &\quad - \frac{(-B_L + B_{Ci})}{T_{Ci}}\left(-\frac{X_{d\sigma i}}{T_{d0i}X'_{d\sigma i}}E'_{qi} + \frac{X_{di} - X'_{di}}{T_{d0i}X'_{d\sigma i}}\cos x_{i1}\right)\end{aligned}$$

其中: δ_i 是第 i 台发电机的功率角(rad); ω_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

功率; $h_t(\delta, \omega)$ 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; Δ_{i1} 是转子转矩的有界干扰; Δ_{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 δ_i 跟踪目标功角 δ_{i0} 。

多机电力系统复合估计自适应模糊动态面控制器设计

传统电力系统控制方法中一般用基于系统跟踪误差的神经网络逼近系统的外部干扰或不确定性, 而这种方法不能保证得到的外部干扰模型或不确定性的真实性和准确性。对此, 东北电力大学祝国强团队提出的基于复合学习和干扰观测器的多机电力系统自适应模糊动态面控制方法, 设计自适应模糊动态面控制器。控制策略示意图如图 1 所示。

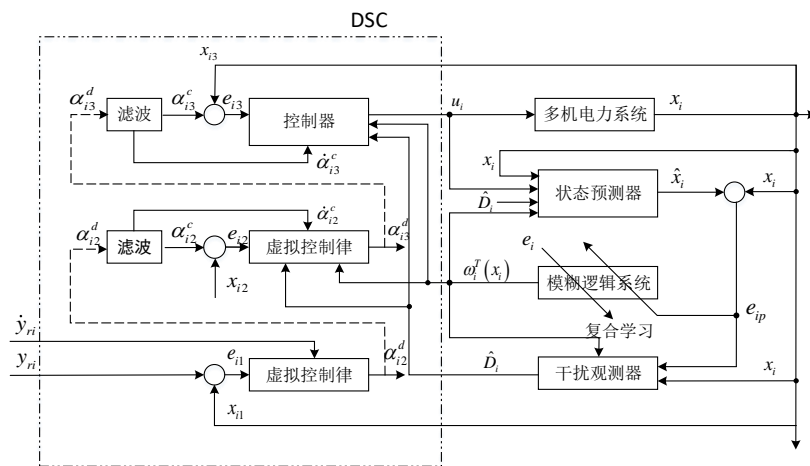


图 1 基于复合学习和干扰观测器的多机电力系

自适应模糊动态面控制方案结构

动态面的选取为: $e_{i1} = x_{i1} - y_{ri}$, $e_{i2} = x_{i2} - \alpha_{i2}^c$, $e_{i3} = x_{i3} - \alpha_{i3}^c$, $e_{i4} = x_{i4} - V_{refi}$ 。干扰观测器设计

为 $\hat{D}_i = \xi_i + K_i p_i(\bar{x}_i)$, $\dot{\xi}_i = -K_i \xi_i - K_i [f_i(\bar{x}_i) + g_i x_{i+1} + K_i p(\bar{x}_i)]$ 。

最终励磁控制器和最终无功补偿控制器设计为:

$$u_i = \frac{1}{g_{i3N}} (-k_{i3} e_{i3} + g_{i2N} e_{i2} + \dot{\alpha}_{i3}^c - L_{fi3}^{-1} \hat{\omega}_{i3}^T \psi_{i3}(\bar{x}_{i3}) - \hat{D}_{i3})$$
$$u_{Bi} = \frac{1}{g_{i4N}} (-k_{i4} e_{i4} - L_{fi4}^{-1} \hat{\omega}_{i4}^T \psi_{i4}(\bar{x}_{i4}) + \dot{V}_{refi} - \hat{D}_{i4})$$

完整的基于复合学习和干扰观测器的多机电力系统自适应模糊动态面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。

多机电力系统自适应模糊动态面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，将基于跟踪误差的一般自适应神经网络控制方法作为对照，进行了两组实验：1. 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的实验；2. 在系统稳定运行时切换运行点的实验。一般来说，输电线路三相电压短路故障和切换运行点这类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。

基于实时仿真器的算法验证

任意拓扑小步长实时仿真对于电力系统控制方法验证的重要性

电力电子系统通常含有高速动作的开关元件，其实时仿真有一定挑战，通常有两种方法来实现电力电子系统的实时仿真，一种是基于 PWM 占空比测量的平均值大步长方法，一种是基于细节模型的小步长实时仿真。

对于多机电力系统励磁与 SVC 自适应控制来说，它需要检测到瞬时电路反应，而不是经过大步长平均的信号，因此基于 PWM 占空比的平均值大步长方法不适用于此研究。同时实时仿真器要能够仿真各种故障工况，或者说任意的拓扑组合；一些只能仿真正常工况的实时仿真器也

不适用。

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。

下图是 RTS+RCP 测试平台示意图，其包括实时仿真系统 RTS 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 RTS 实时仿真器上，两者通过真实的物理 IO 互连。

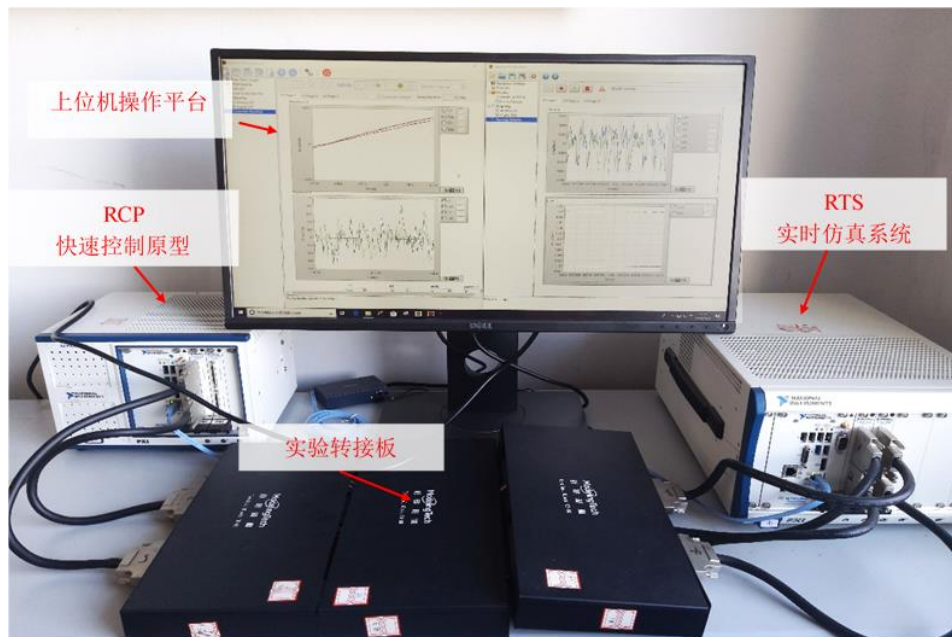


图 2 RTS+RCP 测试平台示意图

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。

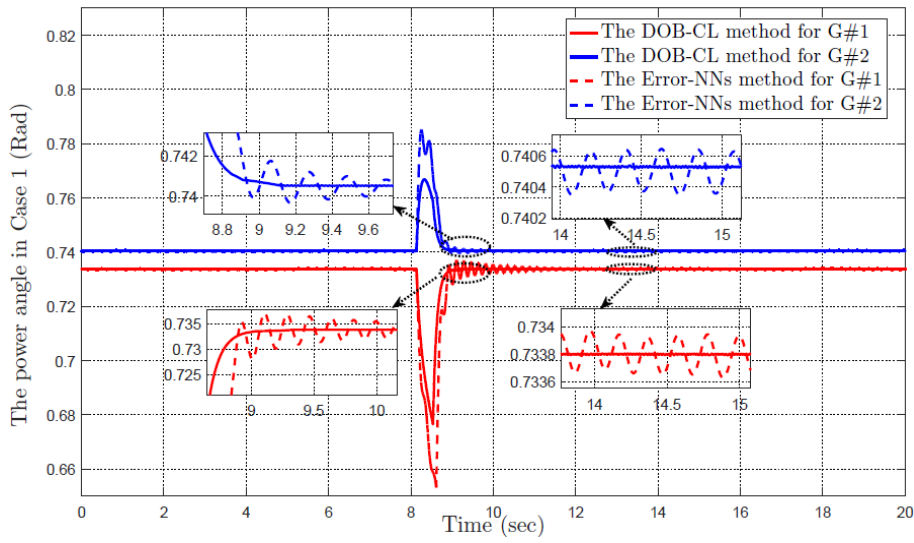


图 3 突发短路故障下发电机功角跟踪曲线图

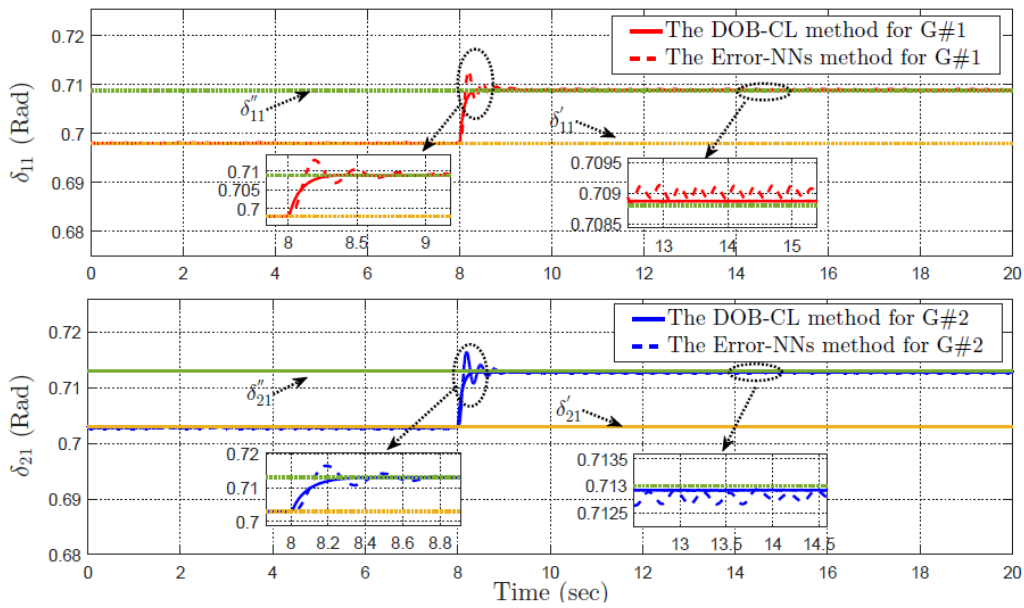


图 4 切换运行点的发电机功角跟踪曲线图

由图 3 和图 4 可以看出，与基于跟踪误差的一般神经网络自适应控制方法相对比，所提出的基于复合学习和干扰观测器的多机电力系统自适应模糊动态面控制方法调节时间更短、鲁棒性更强、跟踪精度更高。验证了这种控制方法在多机电力系统鲁棒控制上的有效性。