

模糊自抗扰附加阻尼控制抑制光火打捆经串补送出的次同步振荡

高本锋, 姚磊

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要:针对光伏、火电打捆经串补送出系统,提出一种基于模糊自抗扰的附加阻尼控制器,来抑制交流串补可能引发的次同步振荡。首先对打捆系统的振荡模式进行辨识,然后通过巴特沃斯带通滤波器将各振荡模式对应的转速分量分解到不同的通道,在每个通道中设计相应的自抗扰阻尼控制器。考虑到光伏出力具有波动性、间歇性等特点,运行状态比较复杂,采用模糊控制对自抗扰关键参数进行自整定改进。基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件,以加入光伏并网的 IEEE 次同步振荡第一标准模型作为仿真算例进行验证。结果表明,所设计的模糊自抗扰附加阻尼控制器在系统受到扰动时,能够有效抑制火电机组的次同步振荡,具有较强的鲁棒性,且抑制效果优于传统的 PID 控制。

关键词:光火打捆系统;次同步振荡;串联补偿;自抗扰控制;模糊控制

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.07.016

0 引言

太阳能、风能等新能源具有分布广泛、可再生、无污染等优点,近年来得到了大力发展。随着新能源容量的增加,将其与传统火电打捆经高压直流或交流送出是一种经济可行的输电方式^[1-2]。交流输电系统中,通常采用串补电容来提高输电线路的传输能力。但当串补系统受到扰动时,发电机和电网之间的相互作用可能会引发火电机组的次同步振荡 SSO (Sub-Synchronous Oscillation),威胁电力系统的安全稳定运行^[3]。

目前,国内外对于风火打捆系统的 SSO 问题研究较多,现有文献通常选择利用风机的解耦控制特性,通过在其变频器上附加阻尼控制环节来抑制 SSO^[4-6]。对于光伏、火电打捆送出系统的 SSO 问题,现有研究关注较少。光伏逆变器与风机的变频器结构相似,也可以实现有功、无功的独立控制,因此在光伏逆变器中附加阻尼控制器来抑制串补引起的 SSO 是一种可行的方案。虽然光伏发电具有间歇性,但这种方法可以作为抑制 SSO 的一种备选方案,进一步提高电力系统的稳定性。

文献[7-8]通过光伏并网附加控制抑制 SSO 时,采用了传统 PID 控制器。但光伏电站的运行状态复杂多变,受自然环境影响较大,要求控制器参数具有良好的适应性。传统 PID 控制系统中,“超调”和“快速性”之间始终难以协调,且对系统模型的精确

度依赖性较高。文献[9-11]采用粒子群优化算法、遗传算法、神经网络算法等现代工程中的方法来优化 PID 控制器的参数,上述方法虽然对 SSO 有良好的抑制效果,但对系统模型的准确性和参数精确度依赖性较大,导致其控制功能有一定的局限性,且均未考虑有光伏接入的情况。

自抗扰控制 ADRC (Active Disturbance Rejection Control) 具有较强的鲁棒性和较高的控制精度,是解决非线性系统的有效途径^[12]。文献[13]采用基于自抗扰的多目标非线性控制方法,通过附加本地控制抑制传统火电机组的低频振荡。文献[14]设计了基于自抗扰的微网运行控制器。文献[15]提出了基于自抗扰的光伏并网逆变器电流跟踪控制,提高了系统的鲁棒性。将自抗扰应用到光伏系统中进行阻尼控制,通过对目标参考值安排合适的过渡过程,可以降低控制的超调量;采用扩张状态观测器 ESO (Extended State Observer) 对系统扰动进行反馈补偿,可以增强对参数摄动的适应性;采用非线性反馈函数,能够实现误差最优的组合形式,弥补了线性控制方法的缺点。

考虑到光伏出力具有波动性、间歇性和运行状态多变等特点,本文将模糊控制与自抗扰控制技术相结合,对自抗扰控制器中非线性状态误差反馈参数进行自整定改进,弥补自抗扰参数无法在线调节的缺陷,提出一种基于模糊自抗扰的多通道附加阻尼控制器来抑制交流串补引起的 SSO,并将其抑制效果与传统 PID 控制器进行对比。参考 IEEE 次同步振荡第一标准模型,在 PSCAD/EMTDC 中搭建光伏与火电打捆经串补送出的交流系统,通过时域仿真验证故障情况下该控制器的有效性。

收稿日期:2017-07-06;修回日期:2018-04-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507064);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018MS087)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51507064) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2018MS087)

1 系统结构

光伏电站并网的拓扑结构如图 1 所示。火电机组轴系采用六质量块结构,光伏电站发出的直流电通过逆变器转换为交流电,经升压变压器并入交流电网。其中, R_L 、 X_L 和 X_C 分别为交流线路电阻、电抗和串补电容。

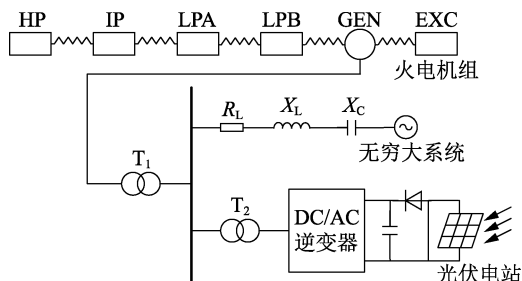


图 1 光伏、火电打捆外送交流系统结构图

Fig.1 Structure of photovoltaic-thermal-bundled power transmission system

光伏电站的并网逆变器采用三相两电平电压源换流器(VSC),其拓扑结构如图 2 所示。图中, U_{dc} 和 C_{dc} 分别为直流电压和滤波电容; u_{ak} 、 u_{bk} 和 u_{ck} 为 VSC 的输出电压; i_{ag} 、 i_{bg} 和 i_{cg} 为 VSC 的输出电流; L_f 为滤波电感。

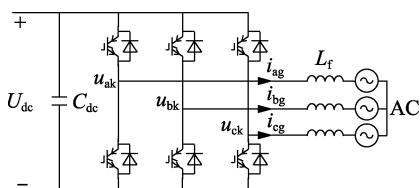


图 2 VSC 拓扑结构

Fig.2 Topology of VSC

VSC 采用脉宽调制(PWM)技术,其控制方式采用 dq 坐标系下的双闭环解耦控制策略。外环控制以直流电压为输入,经 PI 控制环节生成内环控制的电流参考值;内环以电流为输入,以外环控制生成的电流参考值为基准,经过 PI 控制环节得到控制器的电压指令值。逆变器的控制框图如图 3 所示。图中, U_{dc} 和 U_{dref} 分别为直流电压的实际值和指令值; i_{dgref} 、 i_{qgref} 和 i_{dg} 、 i_{qg} 分别为电流 d 、 q 轴的指令值和实际值。

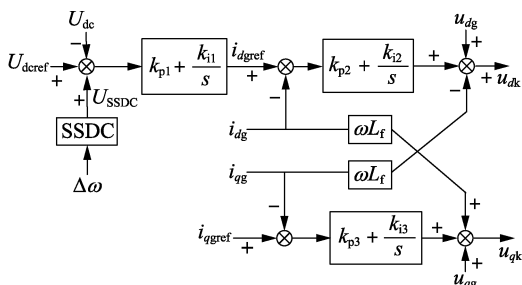


图 3 三相逆变器控制框图

Fig.3 Control diagram of three-phase inverter

并网光伏电站抑制火电 SSO 时,通常取火电机组转速偏差为输入信号,经过附加阻尼控制器生成控制信号 U_{SSDC} ,并将其叠加到外环电压控制上,使光伏逆变器能产生阻尼转矩,从而抑制 SSO。

2 自抗扰控制器基本原理

2.1 自抗扰基本思想与结构

自抗扰控制技术是一种非线性鲁棒控制技术,延续了 PID 控制“基于误差消除误差”的思想,不依赖被控对象的精确数学模型。其核心技术为将系统的内外扰动和不确定因素扩张为系统的状态变量,以此建立相应的扩张状态观测器,通过估计扰动产生的作用量,对系统的控制器进行反馈补偿。因此,对于非线性不确定系统的控制问题,自抗扰控制具有很强的优越性,目前已经广泛应用于电力电子、电机控制等领域^[16]。

传统 PID 控制存在误差提取不合理、积分反馈可能劣化系统动态特性、加权和策略难以达到最优等缺点。而自抗扰控制通过非线性跟踪微分器 TD (Tracking Differentiator)、扩张状态观测器、非线性误差反馈 NLSEF (Nonlinear State Error Feedback) 和扰动估计补偿四部分对 PID 控制的缺陷进行合理改进,来获得更优的控制效果。以二阶自抗扰控制器为例,其具体结构如图 4 所示。

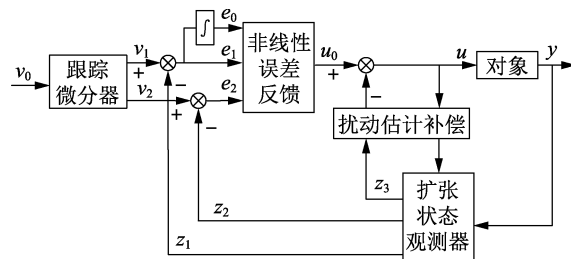


图 4 自抗扰控制基本结构图

Fig.4 Basic structure of ADRC

各部分的主要作用如下。

(1) 跟踪微分器:对被控对象的给定参考值 v_0 安排过渡过程,当输入信号发生变化时,过渡过程能保证输出在短时间内无超调地跟踪输入信号。

(2) 扩张状态观测器:以系统输出 y 和输入量 u 来实时跟踪估计系统的状态和总扰动。

(3) 非线性误差反馈:利用状态误差信息进行误差反馈控制,求取反馈控制量 u_0 。

(4) 扰动估计补偿:对扰动给予动态补偿,并形成最终的控制量 u 。

2.2 扩张状态观测器性能分析

自抗扰控制中,扩张状态观测器是非常关键的一部分,能否准确估计各状态变量并对系统扰动进行补偿,对整个控制品质至关重要^[12]。下面以二阶非线性系统为例,对其扩张状态观测器进行性能分

析。二阶系统状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \omega + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, x_1 和 x_2 为系统的状态变量; ω 为系统的未知扰动; u 为系统的控制变量; b 为反馈系数; y 为系统的输出量。扩张状态观测器的基本形式如下:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 a_1 e + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 a_2 e \end{cases} \quad (2)$$

其中, z_1 为 y 的观测值; z_2 为 z_1 的微分信号; z_3 为对系统模型误差和外界扰动构成总扰动的估计值; β_1 、 β_2 和 β_3 为增益系数; a_1 和 a_2 为误差系数。由式(1)和式(2)可以得到各状态的估计值为:

$$\begin{cases} z_1(s) = x_1(s) - \frac{s}{s^3 + \beta_1 s^2 + a_1 \beta_2 s + a_2 \beta_3} \omega(s) \\ z_2(s) = x_2(s) - \frac{s^2 + \beta_1 s}{s^3 + \beta_1 s^2 + a_1 \beta_2 s + a_2 \beta_3} \omega(s) \\ z_3(s) = \frac{a_2 \beta_3}{s^3 + \beta_1 s^2 + a_1 \beta_2 s + a_2 \beta_3} \omega(s) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,该观测器在扰动 ω 下是渐近收敛的。本文采用带宽概念设计扩张状态观测器参数^[17],取 $M(s) = s^3 + \beta_1 s^2 + a_1 \beta_2 s + a_2 \beta_3$,令 $M(s)$ 为理想的特征多项式 $(s + m_0)^3$,则 $\beta_1 = 3m_0$, $a_1 \beta_2 = 3m_0^2$, $a_2 \beta_3 = m_0^3$,其中 m_0 为观测器的带宽。为使观测器能有效观测次同步频率下的系统总扰动,应在观测器稳定的前提下尽量增大 m_0 ,本文取 $\beta_1 = 1000$ 。

3 模糊自抗扰附加阻尼控制器设计

3.1 SSO 抑制机理

根据复转矩系数法,发电机的电气阻尼系数 D_e 和机械阻尼系数 D_m 可以表示为:

$$\begin{cases} D_e = \text{Re}(\Delta T_e / \Delta \omega) \\ D_m = \text{Re}(\Delta T_m / \Delta \omega) \end{cases} \quad (4)$$

其中, ΔT_e 和 ΔT_m 分别为发电机的电磁转矩和机械转矩增量; $\Delta \omega$ 为角速度增量。抑制发电机的 SSO,需要满足 $D_e + D_m > 0$ 。由于 D_m 恒大于 0,所以只需使发电机转速偏差 $\Delta \omega$ 和电磁转矩偏差 ΔT_e 的相位差位于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间,即可达到抑制 SSO 的目的。

转矩分量如图 5 所示,图中 $\Delta \delta$ 为发电机的功角增量, ΔT_D 和 ΔT_S 分别为阻尼转矩分量和同步转矩分量,当 $\Delta \omega$ 和 ΔT_e 的相位差在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间时,阻尼转矩 ΔT_D 为正。

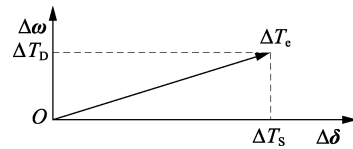


图 5 转矩分量图

Fig.5 Diagram of torque components

3.2 基于自抗扰的次同步振荡阻尼控制器整体设计

为实现次同步振荡阻尼控制器对火电机组 SSO 的有效抑制,采用矩阵束算法^[18]对经串补送出的光伏打捆系统进行振荡模式辨识,辨识结果如表 1 所示,表中振荡幅值为标么值。

表 1 振荡模式辨识结果

Table 1 Results of oscillation modes

模式	振荡频率/Hz	振荡幅值	阻尼比/%
1	15.713	9.64×10^{-4}	2.81×10^{-3}
2	20.217	4.09×10^{-4}	2.807×10^{-6}
3	25.548	2.81×10^{-3}	-8.984×10^{-4}
4	32.287	3.158×10^{-2}	-4.076×10^{-2}
5	47.447	6.41×10^{-4}	-9.615×10^{-4}

由辨识结果可知,该系统共存在 5 个次同步频段下的振荡模式,频率分别为 15.713 Hz、20.217 Hz、25.548 Hz、32.287 Hz 和 47.447 Hz。其中模式 1 和模式 2 的阻尼比为正,可以自行衰减,但其数值较小,振荡衰减缓慢;模式 3、模式 4 和模式 5 的阻尼比为负,振荡会逐渐发散。

根据辨识结果,利用巴特沃斯带通滤波器将 5 个振荡模式下的转速分量分解到不同的通道,在每个通道中,对各转速分量进行自抗扰控制。采用多通道控制能够对引起 SSO 的各模式分量进行单独控制,更具有针对性,抑制效果更好。基于自抗扰的附加阻尼控制器结构如图 6 所示。

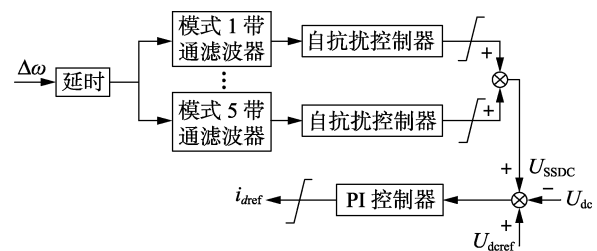


图 6 基于自抗扰的附加阻尼控制器

Fig.6 Diagram of additional damping controller based on ADRC

通过测量环节采集发电机的转速偏差信号 $\Delta \omega$,考虑到光伏电站与火电机组存在一定的电气距离,故设置一定的传输延时;采用带通滤波器对 $\Delta \omega$ 进行分解,得到各振荡模式下的转速分量;经过自抗扰控制器将其叠加到光伏并网控制器的外环电压上,使得配置了 SSDC 的光伏逆变器能产生阻尼转矩,从而抑制火电机组 SSO。

3.3 自抗扰控制器设计

由2.1节可知自抗扰控制器主要由4个部分组成,下面将结合打捆系统对自抗扰控制器各部分的数学模型给出具体设计。

选择 U_{SSDC} 作为最终的输出控制量,设计 $\Delta\omega$ 的自抗扰控制器,从而达到 $\Delta\omega$ 能够快速跟踪给定参考值 $\Delta\omega_{ord}$ 的目标。

(1) 跟踪微分器:对 $\Delta\omega$ 安排过渡过程,其实现方式如式(5)所示。

$$\begin{cases} e = v_1 - \Delta\omega_{ord} \\ f_h = f_{han}(e, v_2, r_0, h) \\ v_1 = v_1 + hv_2 \\ v_2 = v_2 + hf_h \end{cases} \quad (5)$$

其中, v_1 为 $\Delta\omega_{ord}$ 的跟踪信号; v_2 为 v_1 的微分信号; r_0 为速度因子,本文取 $r_0 = 1\ 000$; h 为仿真步长,本文取 $h = 0.001$; f_{han} 为二阶系统的最速控制综合函数,基于该函数的跟踪微分器在保证无超调、无颤振的情况下,能够快速地跟踪输入信号^[19]。 $f_{han}(x_1, x_2, r, h)$ 的算法公式如下:

$$\begin{cases} d = rh \\ d_0 = hd \\ y = x_1 + hx_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|} \\ a = \begin{cases} x_2 + \frac{a_0 - d}{2} \text{sign}(y) & |y| > d_0 \\ x_2 + \frac{y}{h} & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ f_{han} = \begin{cases} -r \cdot \text{sign}(a) & |a| > d \\ -r \frac{a}{d} & |a| \leq d \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

(2) 扩张状态观测器:2.2节已对扩张状态观测器的基本模型及性能进行分析,下面将给出其在光伏打捆系统中的具体形式。对 $\Delta\omega$ 、系统的各个状态变量和总扰动进行状态估计,建立以 $\Delta\omega$ 为控制对象的扩张状态观测器如式(7)所示。

$$\begin{cases} e = z_1 - \Delta\omega \\ f_e = \text{fal}(e, \alpha_1, \delta) \\ f_{e1} = \text{fal}(e, \alpha_2, \delta) \\ z_1 = z_1 + h(z_2 - \beta_1 e) \\ z_2 = z_2 + h(z_3 - \beta_2 f_e + b_0 U_{SSDC}) \\ z_3 = z_3 + h(-\beta_3 f_{e1}) \end{cases} \quad (7)$$

其中, β_1 、 β_2 和 β_3 为增益系数; z_1 为 $\Delta\omega$ 的观测值; z_2 为 z_1 的微分信号; z_3 为对系统模型误差和外界扰动构成总扰动的估计值; b_0 为系统控制量 U_{SSDC} 的增益; α 为幂参数; δ 为线性段区间的长度。本文取 $\delta = h$, $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.25$, $b_0 = 3$ 。 β_1 、 β_2 和 β_3 的取值在

2.2节中已进行说明。 $\text{fal}(e, \alpha, \delta)$ 为原点附近具有线性段的连续幂次函数,防止出现高频颤振现象,其实现方式如式(8)所示。

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{1-\alpha}} & |e| \leq \delta \\ |e|^\alpha \cdot \text{sign}(e) & |e| > \delta \end{cases} \quad (8)$$

(3) 非线性误差反馈:根据状态误差信息确定反馈控制量 u_0 ,其实现方式如式(9)所示。

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_2 - z_2 \\ e_0 = \int e_1 dt \\ u_0 = \beta_{10} \cdot \text{fal}(e_0, \alpha_3, \delta) + \beta_{20} \cdot \text{fal}(e_1, \alpha_4, \delta) + \beta_{30} \cdot \text{fal}(e_2, \alpha_5, \delta) \end{cases} \quad (9)$$

其中, e_1 、 e_2 和 e_0 分别为误差及其微分和积分信号; β_{10} 、 β_{20} 和 β_{30} 分别为误差、微分和积分增益; α_3 、 α_4 、 α_5 为幂参数,其数值分别取为 0.5、1.5、2。

(4) 扰动估计补偿:对扰动安排补偿过程,结合非线性误差反馈形成最终的控制量,如式(10)所示。

$$U_{SSDC} = u_0 - \frac{z_3}{b_0} \quad (10)$$

其中, b_0 为补偿因子。

3.4 基于模糊控制的自抗扰参数整定

与PID控制器相比,传统自抗扰控制器性能优越、鲁棒性强,但考虑到光伏具有波动性大、参数变化明显的特点,对于不同的控制状态,需要手动调节非线性状态误差反馈的参数 $\{\beta_{10}, \beta_{20}, \beta_{30}\}$,不利于参数的临时更改和实际操作。因此本文引入模糊控制器,利用模糊控制规则,以 e_1 、 e_2 作为输入,对自抗扰参数进行在线修改,使其自动逼近最优的 $\{\beta_{10}, \beta_{20}, \beta_{30}\}$,来满足不同状态下的 e_1 、 e_2 对自抗扰控制器参数的要求^[20-21]。

在模糊控制器中,将模糊变量设定为 e_1 、 e_2 、 $\Delta\beta_{10}$ 、 $\Delta\beta_{20}$ 和 $\Delta\beta_{30}$,在其论域上分别定义5个语言子集为{“负大(NB)”、“负小(NS)”、“零(ZO)”、“正小(PS)”、“正大(PB)”}。选择输入量 e_1 和 e_2 的隶属度函数为高斯型,选择输出量 $\Delta\beta_{10}$ 、 $\Delta\beta_{20}$ 和 $\Delta\beta_{30}$ 的隶属度函数为三角形,取 e_1 和 e_2 的基本论域分别为 $[-3, 3]$ 和 $[-30, 30]$,取 $\Delta\beta_{10}$ 、 $\Delta\beta_{20}$ 和 $\Delta\beta_{30}$ 的基本论域分别为 $[-0.3, 0.3]$ 、 $[-0.1, 0.1]$ 和 $[-0.01, 0.01]$ 。模糊推理采用 Mamdani 型,去模糊化处理算法为平均加权法^[22]。

针对参数 $\{\Delta\beta_{10}, \Delta\beta_{20}, \Delta\beta_{30}\}$ 建立如表2所示的模糊规则表。

根据各参数模糊规则和各模糊子集的隶属度赋值表,应用模糊合成设计出模糊矩阵表,去模糊化后,将查出的修正参数代入式(11)。

表 2 参数 $\{\Delta\beta_{10}, \Delta\beta_{20}, \Delta\beta_{30}\}$ 模糊规则表Table 2 Fuzzy rules of $\{\Delta\beta_{10}, \Delta\beta_{20}, \Delta\beta_{30}\}$

e_1	e_2				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB/PB/PS	NS/PS/NS	NS/PS/NB	NS/PS/NB	ZO/ZO/PS
NS	NB/PS/PS	NS/PS/NS	NS/PS/NB	ZO/ZO/NS	PS/NS/ZO
ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/NS	ZO/ZO/NS	PS/NS/NS	PS/NS/ZO
PS	NS/PS/PB	ZO/ZO/ZO	PS/NS/ZO	PB/NS/PB	PB/NS/PB
PB	ZO/ZO/PB	PS/NS/PS	PS/NS/PS	PS/NS/PS	PB/NB/PB

$$\begin{cases} \beta_{10} = \beta'_{10} + \Delta\beta_{10} \\ \beta_{20} = \beta'_{20} + \Delta\beta_{20} \\ \beta_{30} = \beta'_{30} + \Delta\beta_{30} \end{cases} \quad (11)$$

其中, β'_{10} , β'_{20} 和 β'_{30} 为非线性状态反馈初始值。由式 (11) 可得出整定后的参数 $\{\beta_{10}, \beta_{20}, \beta_{30}\}$, 最后结合自抗扰控制器各部分模型的公式及其参数整定原则, 即可得到模糊自抗扰控制器, 其结构如图 7 所示。

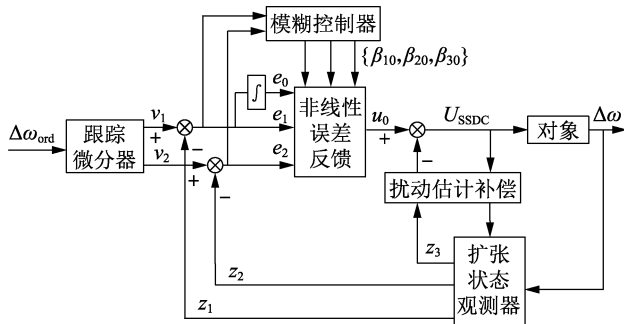


图 7 基于模糊控制的自抗扰控制器

Fig.7 Diagram of ADRC controller based on fuzzy control

4 算例分析

在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中, 搭建 IEEE 次同步振荡第一标准模型与光伏电站并网经串补送出的打捆系统进行仿真, 系统拓扑结构如图 1 所示。打捆系统中, 火电机组额定输出功率为 800 MW, 光伏电站额定输出功率为 150 MW。

系统串补度设置为 30%, 仿真运行 10 s 时, 在打捆系统并网点处施加三相短路故障, 故障持续时间设置为 0.05 s。在没有附加阻尼控制的情况下, 火电机组转速信号的响应特性如图 8 所示。图中, 转速 ω 为标么值, 后同。

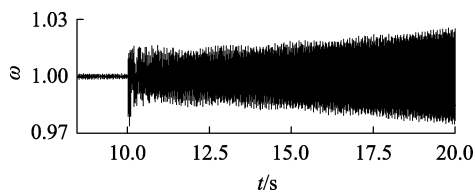


图 8 无次同步振荡阻尼控制器时转速的响应特性

Fig.8 Response characteristics of speed signal without SSDC

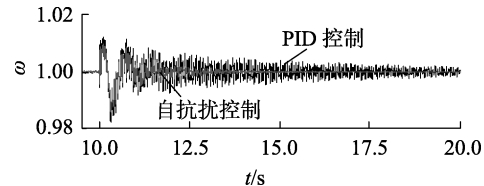
由图 8 可知, 在没有附加控制的情况下, 系统受

到扰动后, 火电机组转速信号呈发散状态。

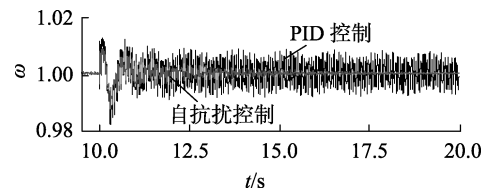
下面验证所设计 ADRC 附加阻尼控制在不同工况下的抑制效果, 并传统 PID 控制进行对比。

4.1 不同串补度

保持光伏电站输出功率为 150 MW, 将系统串补度分别设置为 30% 和 40%, 其他运行条件不变, 火电机组转速信号响应特性如图 9 所示。



(a) 串补度为 30%



(b) 串补度为 40%

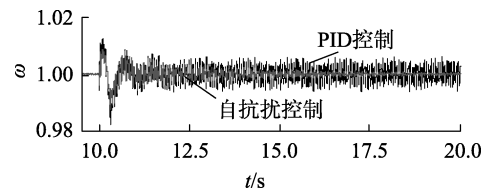
图 9 不同串补度下自抗扰控制与 PID 控制的抑制效果对比

Fig.9 Comparison of inhibitory effect between ADRC and PID with different series compensation degrees

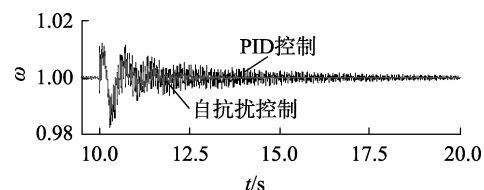
由图 9 可知, 当串补度为 30% 时, 传统 PID 控制和自抗扰控制都对系统的 SSO 有抑制效果, 但自抗扰控制的超调量更小, 收敛时间更短; 当串补度进一步提高到 40% 时, PID 控制只能维持火电机组转速不发散, 而在自抗扰控制下, 转速信号逐渐收敛, 验证了自抗扰控制器的有效性和鲁棒性。

4.2 不同光伏容量

保持系统串补度为 30%, 将光伏电站容量分别设置为 100 MW 和 200 MW, 其他运行条件不变, 火电机组转速信号响应特性如图 10 所示。



(a) 光伏容量为 100 MW



(b) 光伏容量为 200 MW

图 10 不同光伏容量下自抗扰控制与 PID 控制的抑制效果对比

Fig.10 Comparison of inhibitory effect between ADRC and PID with different photovoltaic capacities

由图10可知,当光伏容量较大时,传统PID控制和自抗扰控制对SSO都有抑制效果;当光伏容量降低时,PID控制难以抑制振荡,而自抗扰控制能够使转速信号逐渐收敛。

仿真结果表明,与传统PID控制器相比,自抗扰控制器具有更好的抑制效果,可以进一步提高系统的稳定性。

5 结论

本文采用模糊控制来弥补自抗扰控制器参数不易整定的缺陷,针对光伏、火电打捆经串补送出的SSO问题,设计出模糊自抗扰附加阻尼控制器。并基于PSCAD/EMTDC仿真软件,以IEEE次同步振荡第一标准模型为基准,搭建光火打捆经串补送出的交流系统。

时域仿真结果表明,所设计的模糊自抗扰附加阻尼控制器在抑制火电机组的SSO时,具有超调小、收敛速度快的优势,且抑制效果优于传统的PID控制器。

参考文献:

- [1] CARRASCO J M, FRANQUELO L G, BIALASIEWICA J T, et al. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1002-1016.
- [2] 陈钦磊, 郭春林, 于鹏, 等. 光伏、火电打捆经串补送出系统的次同步振荡研究[J]. 现代电力, 2017, 33(5): 59-67.
CHEN Qinlei, GUO Chunlin, YU Peng, et al. Research on subsynchronous oscillations in power system with photovoltaic-thermal-bundled power transmitted by series compensation[J]. Modern Electric Power, 2017, 33(5): 59-67.
- [3] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 15-30.
- [4] 李辉, 陈耀君, 赵斌, 等. 双馈风电场抑制系统次同步振荡分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1613-1620.
LI Hui, CHEN Yaojun, ZHAO Bin, et al. Analysis and control strategies for depressing system sub-synchronous oscillation of DFIG-based wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1613-1620.
- [5] 赵书强, 张学伟, 高本峰, 等. 风火打捆经直流送出的次同步振荡分析与抑制措施[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(3): 41-50.
ZHAO Shuqiang, ZHANG Xuwei, GAO Benfeng, et al. Analysis and countermeasure of sub-synchronous oscillation in wind-thermal bundling system sent out via HVDC transmission[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(3): 41-50.
- [6] ZHU Xinyao, SUN Haishun, WEN Jinyu. Subsynchronous interaction and its mitigation in DFIG-based wind farm and turbine-generator bundled systems[J]. Advanced Materials Research, 2013, 860-863: 319-323.
- [7] 李宽, 李兴源, 陈实, 等. 光伏并网抑制由直流输电引起的次同步振荡的可行性分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 41-46.
LI Kuan, LI Xingyuan, CHEN Shi, et al. Analysis on feasibility of damping HVDC-induced subsynchronous oscillation by photovoltaic grid-connection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 41-46.
- [8] 陈实, 李兴源, 李宽. 光伏并网附加控制抑制交流串补引起的次同步谐振[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 24-29.
CHEN Shi, LI Xingyuan, LI Kuan. Supplementary photovoltaic grid-connection control for damping SSR induced by series capacitive compensation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 24-29.
- [9] 顾威, 李兴源, 王渝红, 等. 基于改进粒子群算法的次同步阻尼控制器设计[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 52-56.
GU Wei, LI Xingyuan, WANG Yuhong, et al. Design of subsynchronous damping controller based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 52-56.
- [10] 王同旭, 马鸿雁, 聂沐晗. 电梯用永磁同步电机BP神经网络PID调速控制方法的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 43-47.
WANG Tongxu, MA Hongyan, NIE Muhan. The research of PMSM BP neural network PID control in elevator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 43-47.
- [11] JIANG Quanyuan, CHENG Shijie, CAO Yijia. A genetic approach to design a HVDC supplementary subsynchronous damping controller[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1059-1064.
- [12] 韩京清. 自抗扰控制技术——估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 255-261.
- [13] 马燕峰, 周一辰, 刘海航, 等. 一种基于自抗扰控制的多机低频振荡本地控制方法[EB/OL]. (2016-08-16) [2017-05-02]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20160816.1049.004.html>.
- [14] 徐晓宁, 周雪松, 马幼捷, 等. 基于自抗扰控制技术的微网运行控制器[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3336-3346.
XU Xiaoning, ZHOU Xuesong, MA Youjie, et al. Micro grid operation controller based on ADRC[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3336-3346.
- [15] 蔡斌军, 朱建林. 光伏并网逆变器的自抗扰电流跟踪控制[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 104-108.
CAI Binjun, ZHU Jianlin. ADRC current track control of PV grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 104-108.
- [16] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
HAN Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique[J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13-18.
- [17] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver, USA: IEEE, 2003: 4989-4996.
- [18] CROW M L, SINGH A. The matrix pencil for power system modal extraction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 501-502.
- [19] 韩京清, 袁露林. 跟踪-微分器的离散形式[J]. 系统科学与数学, 1999, 19(3): 268-273.
HAN Jingqing, YUAN Lulin. The discrete form of tracking-differentiator[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 1999, 19(3): 268-273.
- [20] 陈洪, 高延滨, 孙华, 等. 自适应模糊自抗扰控制器的研究与设计[J]. 控制系统, 2008, 24(8): 32-33.

CHEN Hong, GAO Yanbin, SUN Hua, et al. The design and research of fuzzy self-adapted ADRC arithmetic[J]. Control System, 2008, 24(8): 32-33.

[21] SHI Hongmei, SI Wei. Simulation & realization of PMSM servo system based on fuzzy active-disturbance rejection[C]//The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Beijing, China; IEEE, 2009: 446-451.

[22] 王耀南, 孙炜. 智能控制理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 55-80.

作者简介:



高本锋

高本锋(1981—),男,山东聊城人,讲师,博士,主要研究方向为高压直流输电和电力系统次同步振荡(E-mail: gaobenfeng@126.com);

姚磊(1992—),男,河北张家口人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统次同步振荡(E-mail: yaolay2011@126.com)。

Supplementary damping control of SSO based on fuzzy active disturbance rejection control for photovoltaic-thermal-bundled system transmitted by series compensation

GAO Benfeng, YAO Lei

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Aiming at photovoltaic-thermal-bundled power system, a supplementary damping controller based on fuzzy ADRC (Active Disturbance Rejection Control) is designed to suppress the sub-synchronous resonance caused by series compensation. The oscillation modes of bundled power system are recognized, and the rotation rate deviation obtained by band pass filters is used as input to design supplementary damping controller based on ADRC. Considering the fluctuating and intermittent characteristics of photovoltaic, which makes the operating state complicated, the fuzzy control is used to improve the parameters of ADRC. The simulation example consisting of IEEE SSO (Sub-Synchronous Oscillation) first benchmark model and grid-connected photovoltaic, is constructed based on PSCAD/EMTDC. The results show that the designed multi-channel supplementary damping controller based on fuzzy ADRC can effectively suppress SSO with strong robustness, which has greater advantages than traditional PID controller.

Key words: photovoltaic-thermal-bundled power system; sub-synchronous oscillation; series compensation; active disturbance rejection control; fuzzy control

(上接第120页 continued from page 120)

Promotion strategy of photovoltaic accommodation ability for regional power grid

LI Hongzhong¹, GAO Yunan², ZHANG Xueying³, LIN Dong³, QIANG Wei¹, SUN Weiqing⁴

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Shaoxing Power Supply Company, Shaoxing 312000, China; 3. Guangdong Power Grid Co., Ltd.,

Guangzhou 510600, China; 4. Department of Optical-Electrical and Computer Engineering,

University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the problem of transmission channel obstruction caused by large-scale photovoltaic power reversal, a power flow evaluation model for transmission channel is proposed. The load rate expectation of transmission channel is adopted to evaluate the load rate level, and the power flow entropy of transmission channel is used to determine the power fluctuation intensity, on this basis, the two-dimensional evaluation level of transmission channel obstruction is adopted to judge the possibility of blocking in the transmission channel. The membership function of fuzzy mathematics is applied to determine the type of accommodation ability promotion measure, and the stepwise expansion method and sensitivity coefficient method are used to guide the implementation of network solution and non-network solution respectively. The validity of the proposed method is verified by an actual power grid in a region.

Key words: photovoltaic power generation; transmission channel obstruction; load rate; power fluctuation; accommodation ability promotion