# 含双馈风电机组系统的广域阻尼控制器协调优化策略

聂永辉1,徐晗桐2,蔡国伟2,张庆峰2,杨德友2

(1. 东北电力大学 教务处,吉林 吉林 132012;2. 东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012)

摘要:为了提高含双馈风电机组系统抑制低频振荡的能力,提出一种基于自抗扰控制器的广域阻尼控制器协 调优化策略。首先对含有双馈风电机组的电力系统进行建模;然后基于系统可观/可控性综合几何指标选 择广域阻尼控制回路;最后利用人工蜂群算法对自抗扰控制器和广域阻尼控制器进行协调优化,以增强系统 的稳定性。通过2区域4机系统和新英格兰10机39节点系统案例验证了所提出的方法在抑制含双馈风电机 组系统低频振荡方面的可行性和有效性。

**关键词:**含双馈风电机组系统;低频振荡;自抗扰控制;广域阻尼控制器;人工蜂群算法;协调控制;优化 中图分类号:TM 712;TM 614 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.202007013

# 0 引言

随着电力系统的区域互联、风电场的接入以及 各种先进控制设备的应用,电力系统的低频振荡现 象时有发生,给电力系统的安全运行带来了巨大 影响<sup>[1-2]</sup>。

为了解决电力系统低频振荡问题,国内外已开 展许多相关的研究工作。文献[3]利用无模型自适 应控制的方法,设计出具有自适应调节功能的阻尼 控制器。文献[4]通过模型预测控制与柔性直流输 电技术相结合的方法,提高了电力系统的稳定性。 文献[5]通过改进蛙跳算法优化模型预测控制器的 参数,实现了电力系统的阻尼控制,提高了电力系统 安全稳定运行的能力。文献[6-7]提出双馈风电机 组附加阻尼控制的方法,通过提高双馈风电机组并 网系统振荡模式下的阻尼,以抑制电网因风电场功 率的波动而引发的低频振荡现象。文献[8]提出了 一种新型广域阻尼控制器设计方法,并采用子空间 算法对电力系统进行降阶,以解决控制器鲁棒性的 问题。

自抗扰控制技术不依赖系统数学模型,将作用 于被控对象的所有不确定性因素视为总扰动,通过 对象的输入输出信息对其进行估计并补偿,从而减 小扰动对电力系统的影响。该控制方法在电力系统

#### 收稿日期:2019-12-18;修回日期:2020-05-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61973072,51577023, 51577032);国家重点研发计划项目(2016YFB0900104);吉 林省教育厅"十三五"科学技术研究项目(JJKH20180445KJ, JJKH20180435KJ)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61973072,51577023,51577032),the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0900104) and "13th Five-Year" Scientific and Technology Research Project of Jilin Province Department of Education(JJKH20180445KJ, JJKH20180435KJ) 遇到扰动时仍能得到良好的控制效果,具有较强的 鲁棒性。文献[9]针对送端电网大规模风电接入可 能加剧火电机组次同步振荡的问题,提出了一种基 于改进遗传算法的自抗扰附加阻尼控制方法。文献 [10]提出了一种基于自抗扰控制技术的光储微电网 无功支撑控制策略,从而解决光储微电网运行中负 荷投切、分布式电源波动性等引起的并网点电压异 常的问题。文献[11]提出了一种利用自抗扰控制技 术将汽轮机汽门开度与励磁系统相结合的控制策 略,可以有效增强电力系统的稳定性。文献[12]提 出了一种将自抗扰控制技术与非线性控制技术相结 合的分散控制方法,利用分散控制抑制电网低频振 荡。文献[13]提出一种基于自抗扰控制技术的光伏 电站附加阻尼控制方法,以抑制电力系统的功率振 荡。虽然利用自抗扰控制技术对电力系统稳定控制 设计进行大量研究,但是自抗扰控制器(ADRC)能 否和广域阻尼控制器协调配合,从而有效抑制风电 并网系统的区间低频振荡,提高电力系统稳定性,是 电力系统稳定控制的研究课题之一。

为了解决上述问题,本文提出一种采用ADRC 与传统广域电力系统静态稳定器(PSS)协调控制的 方法。以双馈风电机组并网系统作为研究对象,通 过广域阻尼控制器抑制风电并网系统对区间低频振 荡现象,并在MATLAB/Simulink中进行仿真分析,验 证本文所提方法对提高电力系统稳定性的可行性和 有效性。

#### 1 双馈风电机组模型

双馈风电机组模型由双馈感应电机(DFIG)、传动系统与桨距角控制等部分组成<sup>[14]</sup>,如附录A中图A1所示。本文仅介绍DFIG与传动系统模型,其余模型参见文献[15]。

DFIG的4阶数学模型见式(1)。

$$\begin{cases} \frac{x'_{s}}{\omega_{s}} \frac{\mathrm{d}\,i_{ds}}{\mathrm{d}\,t} = u_{ds} - \left(r_{s} + \frac{x_{s} - x'_{s}}{\omega_{s}T'_{0}}\right)i_{ds} - (1 - s_{r})\,e'_{d} - \frac{L_{m}}{L_{r}}u_{dr} + \frac{1}{\omega_{s}T'_{0}}\,e'_{q} + x'_{s}i_{qs} \\ \frac{x'_{s}}{\omega_{s}} \frac{\mathrm{d}\,i_{qs}}{\mathrm{d}\,t} = u_{qs} - \left(r_{s} + \frac{x_{s} - x'_{s}}{\omega_{s}T'_{0}}\right)i_{qs} - (1 - s_{r})\,e'_{q} - \frac{L_{m}}{L_{r}}u_{qr} - \frac{1}{\omega_{s}T'_{0}}\,e'_{d} - x'_{s}i_{ds} \\ \frac{\mathrm{d}\,e'_{d}}{\mathrm{d}\,t} = s_{r}\omega_{s}e'_{q} - \omega_{s}\frac{L_{m}}{L_{r}}u_{qr} - \frac{1}{T'_{0}}\left[e'_{d} + (x_{s} - x'_{s})i_{qs}\right] \\ \frac{\mathrm{d}\,e'_{q}}{\mathrm{d}\,t} = -s_{r}\omega_{s}e'_{d} + \omega_{s}\frac{L_{m}}{L_{r}}u_{dr} - \frac{1}{T'_{0}}\left[e'_{q} + (x_{s} - x'_{s})i_{ds}\right] \end{cases}$$

其中, $x_s,x'_s$ 分别为定子电抗、定子暂态电抗; $s_r$ 为转 差率; $L_r$ 和 $L_m$ 分别为转子绕组的自感和定、转子绕 组的互感; $e'_a,e'_q$ 分别为暂态电势的 $d_q$ 轴分量; $T'_o$ 为 转子时间常数; $i_{ds},i_{qs}$ 分别为定子绕组电流的 $d_q$ 轴 分量; $u_{ds},u_{qs}$ 分别为定子电压的 $d_q$ 轴分量; $u_{dr},u_{qr}$ 分 别为转子电压的 $d_q$ 轴分量; $\omega_s$ 为同步角速度; $r_s$ 为 定子电阻。

传动系统模型见式(2)。

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}\,\omega_{\mathrm{t}}}{\mathrm{d}\,t} = \frac{1}{2\,H_{\mathrm{t}}} \left(T_{\mathrm{m}} - T_{\mathrm{sh}}\right) \\ \frac{\mathrm{d}\,\omega_{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}\,t} = \frac{1}{2\,H_{\mathrm{g}}} \left(T_{\mathrm{sh}} - T_{\mathrm{e}}\right) \\ \frac{\mathrm{d}\,\theta_{\mathrm{tw}}}{\mathrm{d}\,t} = \omega_{\mathrm{t}} - \omega_{\mathrm{r}} \\ T_{\mathrm{sh}} = K_{\mathrm{sh}}\theta_{\mathrm{tw}} + D_{\mathrm{sh}} \frac{\mathrm{d}\,\theta_{\mathrm{tw}}}{\mathrm{d}\,t} \end{cases}$$
(2)

其中, $H_t$ 、 $H_s$ 分别为风机、DFIG的惯性时间常数; $T_m$ 、  $T_{sh}$ 和 $T_s$ 分别为风机、转动轴的机械转矩和DFIG的电 磁转矩; $\omega_t$ 、 $\omega_r$ 分别为风机折算到高速侧的角速度、 DFIG的转子角速度; $\theta_{tw}$ 为轴系扭曲角; $K_{sh}$ 、 $D_{sh}$ 分别 为传动轴刚度系数和阻尼系数。

# 2 含双馈风电机组系统的广域阻尼控制

随着风电大规模并网,系统出现低频振荡现象的概率明显增加,且风电机组出力的随机性使传统 广域PSS的控制效果降低。在本文提出的含双馈风 电机组系统的广域阻尼控制策略中,ADRC可以通 过估计补偿的方式消除内外扰动对互联系统的影响 以及随机扰动对广域PSS控制效果的影响,进而提 高传统广域PSS的控制性能。同时ADRC能够增强 DFIG的阻尼控制能力,进而提升含双馈风电机组系 统的阻尼。所提出的广域阻尼控制策略如图1所 示。图中,P<sub>ref</sub>、Q<sub>ref</sub>分别为定子的有功、无功功率参 考值;P<sub>a</sub>、Q<sub>a</sub>分别为系统的有功、无功功率;i<sup>ref</sup>和i<sup>ref</sup>分 别为 $d_q$ 轴转子电流参考值; $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$ 分别为转子绕组 电流的 $d_q$ 轴分量; $V_{damp}$ 为ADRC提供的控制电压;  $u_{dr}^{ref}$ 分别为转子电压参考值的 $d_q$ 轴分量; $d\omega$ 为 本地发电机组角速度信号; $\Delta\omega$ 为角速度偏差量。



# 图 1 含双馈风电机组系统的广域阻尼控制策略 Fig.1 Wide-area damping control strategy of doubly-fed wind turbine system

本文将ADRC加入DFIG中,以产生附加阻尼转 矩抑制系统的低频振荡,ADRC原理<sup>[16]</sup>详见附录B。 DFIG可以进行有功、无功功率独立解耦控制,其控 制原理见附录C中图C1、图C2。在电压波动允许的 范围内,DFIG注入节点的无功功率可以有效地抑制 系统功率振荡<sup>[15]</sup>。在DFIG变流器的无功外环控制 器中附加阻尼控制,调节DFIG向电网输送的无功功 率以提供更强的电压支撑,进而提高其抑制互联系 统功率振荡的能力。

同时,利用几何测量法选择合适的广域PSS 安 装地点及反馈信号,通过在发电机内安装广域PSS 进一步提高风电并网系统进入区间振荡模式后的系 统阻尼。广域PSS将发电机的相对功角和角速度作 为反馈输入构成闭环控制。广域PSS模型的控制结 构见附录C中图C3。图中,u为PSS提供的励磁辅助 控制电压; $T_a$ 为隔直参数,其作用为滤除直流分量使 其输出不受输入信号稳态变化的影响; $K_p$ 为增益参 数; $T_1 - T_4$ 为超前滞后参数,其作用为通过配置系统 的主导极点以提升主振模态的阻尼比。

#### 3 含双馈风电机组系统协调优化控制设计

本文建立含双馈风电机组系统的优化控制模型,利用人工蜂群算法(ABC)对ADRC以及广域PSS的参数进行优化设计,使其控制效果达到最佳。 ADRC主要包括非线性微分跟踪器(TD)、扩张状态观测器(ESO)和非线性误差反馈控制律(NLSEF)3 个部分,其结构如附录B中图B1所示。

#### 3.1 ADRC的参数设计

ADRC的参数设计对提高系统稳定性具有重要 影响,选取合适的仿真步长*h*可以有效抑制扰动信 号对系统的影响。 TD中的滤波因子 $h_0$ 用于抑制微分信号中的噪声,对于固定的参考输入不需要抑制噪声,可取 $h_0$ =  $h_0$ 速度因子 $r_0$ 表示系统跟踪参考信号的快慢,合适 的取值能够减小系统起始误差,在一定程度上提高 了系统小干扰稳定性。ESO中的可调参数为 $\beta_{01}$ 、  $\beta_{02}$ 、 $\beta_{03}$ 、 $\delta_0$ 增益系数 $\beta_{01}$ 、 $\beta_{02}$ 、 $\beta_{03}$ 在一定程度上能够 影响观测效果,取值要满足系统的稳定性要求,增益 系数一般取为 $\beta_{01}$ =3 $w_{\lambda}\beta_{02}$ =3 $w^2_{\lambda}\beta_{03}$ = $w^3_{\lambda}$ ,w与系统的 带宽有关且较易确定,取值范围较大;参数 $\delta$ 通常取 2h~5h或0.1。TD与ESO中的参数一般通过离线整 定得到。

NLSEF中的可调参数为 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\delta_0$ 、 $b_0$ 。合理地选 取参数 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 可以减小系统误差,改善系统动态效 果,通常取 $\beta_2 > \beta_1$ ; $\delta_0$ 整定方法与ESO中参数 $\delta$ 基本 相同。 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\delta_0$ 需要根据系统的控制效果在线调 试,在合理范围内控制品质对其摄动不敏感,较易整 定。补偿因子 $b_0$ 为系统输入增益b的估计值,对于 时滞特性较大的系统可增大 $b_0$ 以更好地补偿未知干 扰和未建模动态等不确定性对系统的影响。

#### 3.2 含双馈风电机组系统优化模型

根据 3.1 节对 ADRC 的相关参数进行整定,整定 后的参数值分别为 $h_0=h=0.1$ 、 $\beta_{01}=6.4$ 、 $\beta_{02}=13.7$ 、 $\beta_{03}=$ 9.7、 $\delta=0.1$ 。 $b_0$ 、 $r_0$ 和广域 PSS 参数  $K_{PSS}$ 和  $T_1$ — $T_4$ 通过 优化得到。

本文采用ABC 对控制器的参数进行优化,主要 目的是应用时间乘以绝对误差积分准则(ITAE)构 建优化控制模型搜索合适的控制器参数,使适应度 函数取值最小化。与发电机实际转子转速的微分相 关的适应度函数 f<sub>ITAF</sub> 见式(3)。

$$\min f_{\text{ITAE}} = \int_{0}^{t_{\text{sim}}} t \left( \sum_{j=1}^{n} \left| \Delta \omega_{j}(t) \right| \right) dt$$
 (3)

其中,n为系统中安装的同步发电机总数; $t_{sim}$ 为系统 仿真时间; $\Delta \omega_j(t)$ 为第j台发电机角速度和同步角速 度的偏差量。约束条件包括待整定参数的取值范 围,如式(4)所示。

s.t. 
$$\begin{cases} b_0^{\min} < b_0 < b_0^{\max} \\ r_0^{\min} < r_0 < r_0^{\max} \\ K_{\text{PSS}}^{\min} < K_{\text{PSS}} < K_{\text{PSS}} \\ T_i^{\min} < T_i < T_i^{\max} \quad i = 1, 2, 3, 4 \end{cases}$$
(4)

一般而言, $b_0$ 和 $r_0$ 的取值范围为[0.01,10], $K_{PSS}$ 的取值范围为[0.01,50], $T_1 - T_4$ 的取值范围为 [0.01,1], $T_d=10$ 。在满足式(4)所示的约束条件下, 利用ABC对式(3)进行迭代寻优,直至适应度函数 取值最小或达到最大迭代次数为止,所得结果为控 制器参数的最优值。

#### 3.3 含双馈风电机组系统的协调控制设计流程

所提出的广域阻尼控制策略分别在DFIG与同步发电机中安装ADRC与广域PSS,以提高系统的阻

尼,利用ABC协调优化2种控制器的参数,从而减小 2种控制器间的交互作用。ABC原理详见文献[17]。 双馈风电机组并网条件下广域阻尼控制的协调优化 设计流程如下:①首先建立含双馈风电机组系统的 模型,并利用可观测性和可控性的综合几何指标法 选择广域阻尼控制回路;②根据第2节提出的含双 馈风电机组系统的广域阻尼控制策略,在DFIG中安 装ADRC调节无功控制环节的功率输出抑制系统的 功率振荡;③确定模型的待优化参数,并根据式(3) 和式(4)建立优化模型,对ADRC和广域PSS中的参 数进行协调优化;④通过ABC进行迭代寻优确定各 控制器的参数,并将优化后的ADRC和广域PSS应 用于测试系统以验证所提控制方法的有效性。

# 4 仿真算例

搭建含双馈风电机组的2区域4机系统及新英格兰10机39节点系统,验证本文所提方法在抑制系统低频振荡方面的可行性与有效性。

#### 4.1 2区域4机系统

基于 MATLAB / Simulink 搭建 2 区域 4 机非线 性仿真系统进行分析验证,如图 2 所示,系统参数见 文献 [15,18]。同步发电机组  $G_1 - G_4$ 的容量均为 900 MW,含有 100 台 1.5 MW 双馈风电机组可等效 为1台 150 MW 的双馈风电机组。



### 图 2 含双馈风电机组的电力系统模型 Fig.2 Model of power system with doubly-fed wind turbine

通过特征值分析法得到1个区间低频振荡模式 和2个本地振荡模式,其中区间低频振荡模式中系 统阻尼不足,因此采用综合几何指标法选择广域阻 尼控制器的控制回路以抑制区间低频振荡<sup>[19]</sup>,反映 同步发电机组可控性和反馈信号可观性的综合几何 指标见表1。表中Δω<sub>13</sub>、Δω<sub>24</sub>和Δω<sub>24</sub>为不同机

表1 综合几何指标

Table 1 Controllability geometric indexes

华山坦沪旦		综合几何指标						
反电机编写	$\Delta \omega_{13}$	$\Delta \omega_{14}$	$\Delta \omega_{_{23}}$	$\Delta \omega_{_{24}}$				
$G_1$	1.0000	0.9674	0.9087	0.8641				
$G_2$	0.8214	0.7644	0.5761	0.7254				
$G_3$	0.8735	0.8413	0.8286	0.7217				
$G_4$	0.8439	0.7234	0.5986	0.7099				

组之间相对角速度差。由表1可知,由 $G_1$ 和 $\Delta\omega_{13}$ 所构成反馈回路的综合几何指标最大,说明 $G_1$ 为可控性最强的发电机组, $\Delta\omega_{13}$ 为可观性最强的反馈信号, $\Delta\omega_{13}$ 同时也作为双馈风电机组的ADRC的输入信号。

首先采用固定参数的 ADRC 和相位补偿法对广域 PSS 进行设计。假设补偿因子  $b_0$  和速度因子  $r_0$ 均 取 1,在线调试后的参数为  $\beta_1=2$ 、 $\beta_2=3.6$ 、 $\delta_0=0.2$ 。系 统传递函数如式(5)所示。

$$H_{\rm PSS} = 30 \frac{10\,s}{1+10\,s} \frac{1+0.05\,s}{1+0.03\,s} \frac{1+3\,s}{1+5.4\,s} \tag{5}$$

假设母线7-9之间联络线在1.0 s时发生三相短路故障,持续0.1 s后跳闸,仿真时长为40 s。假设初始风速为5 m/s,第3 s时风速变为12 m/s。不同运行情况下系统联络线的传输功率P<sub>7-9</sub>的响应曲线见图3。由图3可知,未安装控制器时P<sub>7-9</sub>不断振荡,大约在第5 s时系统失稳;安装广域PSS 与基于ADRC的广域阻尼控制器均能对系统功率振荡起到较好的抑制效果,但基于ADRC的广域阻尼控制器可以使功率振荡快速衰减到0,体现出更好的控制性能。这是由于广域阻尼控制器具有扰动估计补偿作用,可以有效地抑制DFIG对互联系统区间低频振荡的影响。



图 3 不同运行情况下P<sub>7-9</sub>响应曲线 Fig.3 Response curves of P<sub>7-9</sub> under different operating conditions

图4为ESO的状态量估计的观测误差 $e_1$ 、 $e_2$ 曲线和ADRC输出的 $\lambda$ 响应曲线。图中, $e_1$ 、 $e_2$ 和 $\lambda$ 均为标 幺值。由图4可知,在故障发生时ESO的系统状态 估计值 $z_1$ 和 $z_2$ 与实际系统状态量的误差较大,即 $e_1$ 与  $e_2$ 增大。随着故障解除,误差 $e_1$ 与 $e_2$ 逐渐减小并最终 为0,说明ESO系统能够有效地跟踪系统的状态量, 并且能够通过被控对象的输入和输出信号估计其与 扰动相关的扩张状态量,从而改变ADRC输出 $\lambda$ ,使 误差迅速衰减为0,逐渐消除了风电并网引起的功





Fig.4 Curves of ESO observation error and ADRC output

率振荡,系统趋于稳定。上述分析表明 ADRC 能够 有效地估计并补偿系统扰动,抑制互联系统的功率 振荡,显著地提高系统稳定性。

本文分别利用遗传算法(GA)、粒子群优化(PSO) 算法和ABC对广域阻尼控制器中的参数 $b_0$ 、 $r_0$ 、 $K_{PSS}$ 、  $T_1 - T_4$ 进行优化以验证其控制效果。在线调试确定 参数为 $\beta_1$ =1.7、 $\beta_2$ =4.5、 $\delta_0$ =0.3,各算法独立进行50次 仿真运算,取最优值作为最后的优化结果。表2和 图5分别对比了3种优化算法的控制性能指标和收 敛特性, $f_{TTAE}$ 为标幺值。由表2和图5可知,ABC相 较于另外2种算法,迭代次数较少,收敛速度较快; 适应度即目标函数 $f_{TTAE}$ 数值较小,系统响应的超调 量更小,调节时间更短,系统的稳定性更强。因此基 于ABC优化的广域阻尼控制器能够更加显著地提 高系统阻尼。附录C中表C1为不同算法下各参数 优化结果。

#### 表2 3种优化算法结果比较

Table 2 Comparison of results among three

optimization algorithms

算法	迭代次数	$f_{\text{ITAE}}$	超调量	调节时间/s
GA	28	0.2021	0.0085	18.4
PSO	12	0.1231	0.0063	16.5
ABC	8	0.0824	0.005 9	12.2



#### 图 5 3种优化算法收敛特性曲线

Fig.5 Convergence characteristic curves of three optimization algorithms

基于上述优化结果,通过特征值分析法和非线 性仿真算例验证广域阻尼控制器在提高系统稳定性 方面的优越性,如附录C中表C2和图6所示,图6中 机端电压V<sub>11</sub>为标幺值。由表C2可知,系统未安装广 域阻尼控制器时,由于缺乏对多机电力系统整体的 可控性与可观测性,无法给区间低频振荡模式提供 足够的阻尼;安装后以广域反馈信号作为其输入,明 显提高了区间低频振荡模式的阻尼,抑制系统的区 间低频振荡。对比采用不同广域控制器后的特征值 分析结果可知,相较于传统广域PSS,广域阻尼控制 器由于可以实时观测风机并网系统的随机扰动信 号,并以扰动估计补偿的方式提高对系统的阻尼控 制能力,因此在抑制系统低频振荡方面的效果更好, 不仅可以提高系统对区间低频振荡的阻尼水平,增 强互联电力系统的稳定性,而且在一定程度上提高 了本地振荡模式下系统的阻尼。这证明了广域阻尼 控制器在提高风电并网系统的稳定性方面具有可行 性和优越性。由图6可知,当系统出现短路故障时, 采用不同控制方法时系统的联络线传输功率 $P_{7-9}$ 、相 对功角 $\Delta\delta_{13}$ 和机端电压 $V_{11}$ 都能趋于稳定。传统广域 PSS采用区域间的同步发电机组转速差作为反馈信 号,较好地改善了系统联络线发生故障后互联系统 的运行状态,削减了区间振荡幅度,但由于缺乏对风 电并网系统随机扰动的实时观测,所需稳定时间较 长且振荡品质不理想,在第20s左右实现稳定。而 广域控制器对系统区间振荡具有较好的抑制作用, 使系统快速恢复到稳定状态。



- 图 6 不同控制方式下 $P_{7-9}$ 、 $\Delta \delta_{13}$ 和 $V_{11}$ 响应曲线对比
- Fig.6 Comparison of response curves of  $P_{7-9}$ ,  $\Delta\delta_{13}$  and  $V_{11}$  between different control modes

# 4.2 新英格兰10机39节点系统

新英格兰 10 机 39 节点包含 10 台同步发电机  $G_1 - G_{10}$ 、39 个系统节点、12 台变压器和 34 条电力线 路,系统参数见文献[20]。系统可分为 3 个区域:区 域 1 由  $G_1 - G_3$ 组成;区域 2 由  $G_4 - G_7$ 组成;区域 3 由  $G_8 - G_{10}$ 组成。在该系统中接入 100 台 1.5 MW 的双 馈风电机组(本文等值为 1 台 150 MW 的机组)。所 构成的含双馈风电机组系统见附录 C 中图 C4。

在正常运行方式下将控制器的开环测试系统进 行线性化处理并进行模态分析,系统包含9种机电 模式:主导区间模式阻尼严重不足,振荡频率最低, 衰减较慢;其他模式振荡频率较高,衰减较快。因此 有必要在该测试系统中配置广域阻尼控制器以加强 主导区间模式的阻尼特性,抑制区间低频振荡。

根据系统综合几何指标法选择 $G_1$ 、 $G_1$ 与 $G_{10}$ 角 速度差 $\Delta\omega_{1-10}$ 构成反馈控制回路。在线调试后确 定参数为 $\beta_1$  = 3.2、 $\beta_2$  = 5.6、 $\delta_0$  = 0.5,并采用 ABC 对 ADRC 和广域 PSS 进行协调优化,优化结果为 $b_0$  = 0.3017、 $r_0$  = 0.5608、 $K_{PSS}$  = 26.0136、 $T_1$  = 0.6313、 $T_2$  = 0.5601、 $T_3$  = 0.0371、 $T_4$  = 0.0522。

在非线性仿真系统中,模拟第1.0 s时发生三相 短路故障,持续0.1 s后跳闸,仿真结果如附录C中图 C5所示。由图C5可知,当系统出现短路故障时,对 于2种控制器,系统的区域联络线传输功率 $P_{3-4}$ 、相 对功角  $\Delta\delta_{1-10}$ 和相对角速度  $\Delta\omega_{1-10}$ 都能够达到稳定状 态。仅安装传统广域 PSS 时,系统振荡幅度较大且 需要经过较长时间才能够稳定运行;而采用广域阻 尼控制器时,系统振荡能够迅速衰减,改善了系统的 运行环境,证明了广域阻尼控制器在抑制风电并网 系统的低频振荡方面具有更好的效果。

# 5 结论

本文针对风电并网系统可能出现的低频振荡现 象,提出了一种与ADRC相结合的广域阻尼控制器 的协调优化方法,以抑制系统的低频振荡现象。通 过仿真进行验证,得到如下结论。

(1)当含双馈风电机组的电力系统发生三相短路故障时,基于ADRC的广域阻尼控制器与传统广域 PSS 相比,可以通过扰动估计补偿更有效地抑制系统的低频振荡,具有较强的适应性和鲁棒性。

(2)利用 ABC 对 ADRC 和广域 PSS 进行协调优 化并应用于系统仿真,验证了 ABC 在含双馈风电机 组系统中阻尼控制器参数优化方面具有可行性与有 效性;同时,证明了广域阻尼协调优化控制在抑制含 双馈风电机组系统低频振荡方面具有优越性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

#### 参考文献:

- [1] 郭成,李群湛,王德林. 互联电力系统低频振荡的广域Prony分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):69-73.
  GUO Cheng,LI Qunzhan,WANG Delin. Wide-area Prony analysis of low frequency oscillation in interconnected power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 69-73.
- [2] 秦超,曾沅,苏寅生,等. 基于安全域的大规模风电并网系统低频振荡稳定分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(5):100-106.
   QIN Chao,ZENG Yuan,SU Yinsheng, et al. Low-frequency oscillatory stability analysis based on security region for power system with large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(5):100-106.
- [3] 李建,赵艺,陆超,等. 无模型自适应广域阻尼控制设计方法
  [J]. 电网技术,2014,38(2):395-399.
  LI Jian,ZHAO Yi,LU Chao, et al. Design of model-free adaptive wide area damping controller[J]. Power System Technology,2014,38(2):395-399.
- FUCHS A, IMHOF M, DEMIRAY T, et al. Stabilization of large power systems using VSC-HVDC and model predictive control [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1):480-488.
- [5] BIJAMI E, ASKARI J, FARSANGI M M. Design of stabilising signals for power system damping using generalised predictive control optimised by a new hybrid shuffled frog leaping algorithm[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(10):1036-1045.
- [6] 马燕峰,刘会强,俞人楠.风电场中STATCOM抑制系统功率振荡[J].电力自动化设备,2018,38(2):67-73.
   MA Yanfeng,LIU Huiqiang,YU Rennan. Power oscillation suppression based on STATCOM in wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(2):67-73.
- [7] 李辉,陈宏文,杨超,等. 双馈风电场模糊附加阻尼控制策略 [J]. 中国电机工程学报,2013,33(31);51-57.

LI Hui, CHEN Hongwen, YANG Chao, et al. A fuzzy additional damping control strategy of DFIG wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31):51-57.

[8] 索江镭,胡志坚,仉梦林,等.大规模风电场并网下的互联电力 系统广域阻尼协调控制[J].电网技术,2014,38(6):1459-1464.

SUO Jianglei, HU Zhijian, ZHANG Menglin, et al. Wide-area damping coordinated control of interconnected power grid with grid-connected large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2014, 38(6):1459-1464.

[9]毕悦,刘天琪,赵磊,等.风火打捆外送系统次同步振荡的改进 自抗扰直流附加阻尼控制[J].电力自动化设备,2018,38 (11):174-180.

BI Yue, LIU Tianqi, ZHAO Lei, et al. Improved active disturbance rejection control additional damping control for subsynchronous oscillation of wind-fire bundling output system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 174-180.

- [10] 麦倩屏,陈鸣.基于自抗扰控制技术的光储微电网无功支撑策略[J].电网技术,2019,43(6):2132-2138.
   MAI Qianping, CHEN Ming. Reactive power support strategy of optical storage microgrid based on auto disturbance rejection control technology[J]. Power System Technology,2019,43 (6):2132-2138.
- [11] 余涛,沈善德,李东海,等. 汽轮发电机组汽门开度和励磁系统的自抗扰综合控制[J]. 电力系统自动化,2003,27(3):36-41. YU Tao,SHEN Shande,LI Donghai,et al. Nonlinear coordinated auto-disturbance-rejection governor and excitation controller for synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(3):36-41.
- [12] 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[J].中国电机工程学报,2017,37(5):1360-1372.

MA Yanfeng,ZHOU Yichen,LIU Haihang, et al. A local control method of multi-machine low frequency oscillation based on active disturbance rejection control[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(5):1360-1372.

[13] 马燕峰,蒋云涛,陈磊,等.光伏电站自抗扰附加阻尼控制抑制 低频振荡策略研究[J].电网技术,2017,41(6):1741-1747.
MA Yanfeng, JIANG Yuntao, CHEN Lei, et al. An ADRC additional damping control strategy research on low frequency oscillation suppression of photovoltaic plants[J]. Power System Technology,2017,41(6):1741-1747.

- [14] 赵祖熠,解大,楚皓翔,等. 基于储能系统的双馈风电机组机网 扭振抑制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(8):33-39.
   ZHAO Zuyi,XIE Da,CHU Haoxiang,et al. Generator-grid torsional vibration suppression for DFIG system with ESS[J].
   Electric Power Automation Equipment,2016,36(8):33-39.
- [15] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1994:199-330.
- [16] 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,2008;243-287.
- [17] 刘渝根,陈超. 基于人工蜂群算法优化支持向量机的接地网腐 蚀速率预测模型[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):182-200.
   LIU Yugen, CHEN Chao. Corrosion rate prediction model of grounding grid based on support vector machine optimized by artificial bee colony algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(5):182-200.
- [18] 李辉,叶仁杰,高强,等. 传动链模型参数对双馈风电机组暂态 性能的影响[J]. 电机与控制学报,2010,14(3):24-30.
  LI Hui, YE Renjie, GAO Qiang, et al. Influence of models and parameters on transient performances of a wind turbine with DFIG[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(3): 24-30.
- [19] 陈刚,程林,孙元章,等.基于综合几何指标的广域电力系统稳定器设计[J].电力系统自动化,2013,37(2):18-22.
   CHEN Gang, CHENG Lin, SUN Yuanzhang, et al. Wide-area power system stabilizer design based on joint geometric index
   [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2):18-22.
- [20] ARAUJO P B D, ZANETTA L C. Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2001, 23(3):173-178.

#### 作者简介:



聂永辉(1970—),男,吉林吉林人,教授,博士,主要研究方向为电力系统优化运行与控制(E-mail:yonghui\_n@aliyun.com); 徐晗桐(1994—),男,辽宁沈阳人,硕 士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行与控制(E-mail:x\_htong@163.com)。 (编辑 王欣竹)

聂永辉

# Coordinated optimal strategy of wide-area damping controller in doubly-fed wind turbine system

### NIE Yonghui<sup>1</sup>, XU Hantong<sup>2</sup>, CAI Guowei<sup>2</sup>, ZHANG Qingfeng<sup>2</sup>, YANG Deyou<sup>2</sup>

(1. Academic Administration Office, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. College of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: To improve the ability of doubly-fed wind turbine system to suppress low-frequency oscillation, a coordinated optimal strategy of wide-area damping controller based on auto-disturbance rejection controller is proposed. The model of power system with doubly-fed wind turbine is established, the wide-area damping control loop is selected subsequently based on the observable / controllable comprehensive geometric index of system, and the auto-disturbance rejection controller and the wide-area damping controller are coordinated optimized by the artificial bee colony algorithm to enhance the system stability. The feasibility and effectiveness of the proposed method in suppressing low-frequency oscillation of doubly-fed wind turbine system are verified by 2-area 4-machine system and New England 10-machine 39-bus system.

Key words: doubly-fed wind turbine system; low-frequency oscillation; auto-disturbance rejection control; widearea damping controller; artificial bee colony algorithm; coordinated control; optimization

附录 A



Fig.A1 Doubly fed wind power generation system

附录 B

ADRC 的核心思想主要是将未知扰动作为信息,实时地从被控对象的输入输出信号中提取出来<sup>[9,15]</sup>,并视为扩张状态进行估计,从而通过非线性反馈控制率消除扰动对被控对象的影响,具有鲁棒性较强、不依赖模型的特点。ADRC 主要包括非线性微分跟踪器(TD)、扩张状态观测器(ESO)和非线性误差反馈律(NLSEF)3 个部分,其结构如图 B1 所示。



(b) ESO 原理框图

 $-\beta_{01}$ 

1/s

 $Z_1$ 





(1) 非线性微分跟踪器根据系统的输入信号 v<sub>0</sub>,通过式(B1)输出过渡信号 v<sub>1</sub>及其微分 信号 v<sub>2</sub>,以达到协调跟踪过程快速性与超调性之间矛盾的目的,如式(B1)所示。

$$\begin{cases} e_{0} = v_{1} - v_{0} \\ f_{h} = f_{h} a_{n} e_{0} v_{2} r_{0} \\ v_{1} = v_{1} + h v_{2} \\ v_{2} = v_{2} + h f_{h} \end{cases}$$
(B1)

 $f_{han}(e_0, v_2, r_0, h_0)$ 可表示为:

$$\begin{cases} d = r_0 h_0 \\ d_0 = h_0 d \\ y = e_0 + h_0 v_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r_0 |y|} \\ a = \begin{cases} v_2 + y/h_0 & |y| \le d_0 \\ v_2 + (a_0 - d) \operatorname{sign}(y)/2 & |y| > d_0 \\ f_{\text{han}} = -\begin{cases} r_0 \operatorname{sign}(a) & |a| > d \\ r_0 a/d & |a| \le d \end{cases}$$
(B2)

其中, $v_0$ 为跟踪目标; $v_1$ 、 $v_2$ 为跟踪过程输出值;h为仿真步长; $r_0$ 为速度因子; $h_0$ 为滤 波因子; $f_{han}(e_0,v_2,r_0,h_0)$ 为最速综合控制函数; $b_0$ 为系统输入增益b的估计值。

(2) ESO 是 ADRC 系统最为核心的部分,其观测系统状态和估计总扰动的能力对控制器性能有显著影响。ESO 通过受控对象输出 y 和输入 u 跟踪系统的状态量,并用估计值 z<sub>1</sub>和 z<sub>2</sub>表示,并且对系统内部的未知干扰进行估计,形成扩张状态量 z<sub>3</sub>,并利用非线性误差反馈律进行补偿,进而使 ADRC 变为线性的积分串联型结构。根据图 B1(b)为 ESO 的结构框图,考虑系统已知部分的非线性 ESO 可表示为:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ z_1 = z_1 + h(z_2 - \beta_{01}e) \\ z_2 = z_2 + h(z_3 - \beta_{02}f_{al}(e, 0.5, \delta) + b_0u) \\ z_3 = z_3 + h(-\beta_{03}f_{al}(e, 0.25, \delta)) \end{cases}$$
(B3)

$$f_{al}(e,\alpha,\delta) = \begin{cases} e/\alpha^{1-\alpha} & |e| \le \delta \\ |e|^{\alpha} \operatorname{sign}(e) & |e| > \delta \end{cases}$$
(B4)

其中, e 为 ESO 输出与系统输出的误差信号;  $\beta_{01}$ 、 $\beta_{02}$ 、 $\beta_{03}$ 为增益系数;  $z_1$ 、 $z_2$ 为状态量估 计;  $z_3$ 为系统总扰动估计;  $\delta$  为滤波因子;  $b_0$ 为补偿因子;  $f_{al}$ 是为了避免高频振颤现象出现 的幂次分段函数。

(3)非线性误差反馈律根据系统误差信息进行反馈控制,消除系统误差,达到抑制系统扰动、提高系统稳定性的目的,如式(B5)所示。

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_2 - z_2 \\ u_0 = \beta_1 f_{al}(e_1, 0.5, \delta_0) + \beta_2 f_{al}(e_2, 1, \delta_0) \\ u = u_0 - z_3 / b_0 \end{cases}$$
(B5)

其中, $u_0$ 为非线性反馈控制律; $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\delta_0$ 为比例系数;反馈控制量 $u_0$ 通过扰动估计 $z_3$ 补偿,得到受控对象的输入量。

在 ADRC 的设计过程中,可以假定被控对象的数学模型为:

$$y^{(2)}(t) = bu(t) + f(y(t), u(t), d(t))$$
(B6)

其中, f(y(t),u(t),d(t))包含了系统的内部不确定性和外部扰动。将式(B5)中被控对象输入量 u(t)的表达式代入式(B6)中,则被控对象可以表示为:

$$y^{(2)}(t) = bu_0(t) - z_3 + f(y(t), u(t), d(t))$$
(B7)

当 ESO 可以准确地估计扩张扰动状态  $z_3$ 时,则有  $z_3 \approx f(y(t), u(t), d(t))$ ,那么被控对象

$$y^{(2)}(t) \approx b u_0(t)$$
 (B8)

此时,系统便不受内部和外部扰动的影响。这便是 ADRC 估计并补偿扰动的过程。

附录 C



图 C1 有功控制环

Fig.C1 Block diagram of active power control



图 C2 无功控制环

Fig.C2 Block diagram of reactive power control



图 C3 广域 PSS 控制结构图

Fig.C3 Structure diagram of wide area PSS controller

表 C1 不同算法下各参数优化结果

Table C1	Parameter	optimization	results under	different	algorithms
		1			0

算法	平均适	L	$r_0$	V	T /a	T /a	T (c	T
	应度值	$D_0$		Apss	<i>I</i> 1/8	12/8	13/8	14/8
GA	0.007 4	0.263 5	0.621 7	27.340 8	0.813 3	0.560 3	0.071 3	0.041 8
PSO	0.003 8	0.435 9	0.794 3	20.413 8	0.627 0	0.516 2	0.031 3	0.025 4
ABC	0.001 3	0.397 0	0.758 8	23.808 3	0.982 2	0.702 1	0.053 1	0.016 4

# 表 C2 控制器优化前后低频振荡模式比较

Table C2 Comparison of low frequency oscillation modes before and after optimization

模	莫 不含广域控制器			ſ	广域 PSS			广域阻尼控制器		
式		城南	阳豆レ		垢卖	阳尼比		垢卖	阳已山	荡
编	特征值	<b></b>	阳化	特征值	<b></b>	阳化	特征值	频平	면 / 년 년	模
号	<u>1</u>	/Hz	/%		/Hz	/%		/Hz	/%	式
	-1.803 9	1.218 7	0.229 3	-1.971 8	1.262 1	0.241 3	-2.410 8	1.322 6	0.278 6	本
1	±j7.657 3			±j7.929 9			±j8.310 1			地
2	-2.106 5	1 250 2	0.239 5	-1.976 7	1.316 8	0.232 4	-2.425 1	1.392 1	0.267 2	本
2	±j8.540 1	1.359 2		±j8.274 0			±j8.746 8			地
-0. 3 ±j4	-0.132 7	0 (52 0	0.032 3	-0.435 5	0.663 6	0.103 9	-0.702 4	0.711 4	0.155 2	X
	±j4.102 6	0.652.9		±j4.169 6			±j4.470 1			间



图 C5 不同控制方式下  $P_{3.4}$ 、 $\Delta \delta_{1.10}$ 和 $\Delta \omega_{1.10}$ 响应曲线 Fig.C5 Response curves of  $P_{3.4}$ 、 $\Delta \delta_{1.10}$  and  $\Delta \omega_{1.10}$  under different control methods