

DOI: 10.7667/PSPC201704

# 基于区域极点配置的风电系统弱阻尼低频振荡模式抑制

李生虎<sup>1</sup>, 孙琪<sup>1</sup>, 石雪梅<sup>2</sup>, 黄杰杰<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 安徽省电力公司经济技术研究院, 安徽 合肥 230061)

**摘要:** 风电并网不仅影响原有低频振荡模式, 而且可能引入新的模式。改善单个低频振荡模式, 可能削弱其他模式阻尼。基于双馈风电机组详细建模, 建立风电系统状态空间方程, 选择控制变量和输出变量。考虑双馈风电机组出力变化, 分析弱阻尼低频模式区域极点配置的必要性。兼顾电网原有及新引入弱阻尼低频模式, 构建降阶模型。采用基于线性矩阵不等式的区域极点配置法, 设计输出反馈控制器, 将所有弱阻尼低频模式配置在设定区域, 提高其阻尼比, 并增加系统稳定裕度。算例分析表明, 所设计控制器有效提高所有弱阻尼低频模式的阻尼, 改善了风电系统振荡特性。

**关键词:** 风电系统; 低频振荡; 弱阻尼; 区域极点配置; 输出反馈控制器; 双馈感应发电机

## Suppression of weakly damped low-frequency modes of wind power system based on regional pole placement

LI Shenghu<sup>1</sup>, SUN Qi<sup>1</sup>, SHI Xuemei<sup>2</sup>, HUANG Jiejie<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Economics and Technology Research Institute, Anhui Electric Power Company, Hefei 230061, China)

**Abstract:** Wind power integration will influence the existing low-frequency oscillation modes and possibly introduce new modes. Suppression of one single low-frequency oscillation mode may decrease damping of other modes. Based on detailed modeling to the doubly-fed induction generator (DFIG), the state space equations of wind power system are established and the control variables and output variables are determined. The impact of DFIG output is analyzed to reveal the necessity of the regional pole placement of the weakly damped oscillation modes. A reduced-order model is derived considering both the existing and newly introduced modes. The regional pole placement based on linear matrix inequality is applied to design the output feedback controller. All the weakly damped modes are placed within the desired region to increase the damping ratio and improve the stability margin. Numerical results show that the designed output feedback controller effectively increases the damping of all weak damping modes and suppresses the oscillation characteristic of wind power systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51637004).

**Key words:** wind power system; low frequency oscillation; weak damp; regional pole placement; output feedback controller; doubly-fed induction generator

## 0 引言

一般认为, 电力系统中阻尼比低于 0.1 的低频振荡模式是弱阻尼低频振荡模式(以下简称弱阻尼模式)<sup>[1]</sup>。大规模风电并网将影响电网中原有低频振荡模式。风电机组(如双馈感应发电机, DFIG)的结

构和控制与传统同步发电机组不同, 可能引入新的弱阻尼模式<sup>[2]</sup>。因此需要量化风电机组对弱阻尼模式的影响, 设计控制器以阻尼弱阻尼模式, 同时不降低系统稳定裕度。

针对风电系统低频振荡, 文献[3-6]分别研究了风电渗透率、DFIG 并网位置、运行方式和 DFIG 动态与同步电机机电振荡模态的交互作用等对低频振荡模式的影响, 但没有考虑 DFIG 引入模式。文献[7]

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51637004)

对风电系统进行小扰动分析, 不仅考虑了原有模式, 还考虑了 DFIG 引入的弱阻尼模式(以下简称引入模式)。文献[5,8]研究了 DFIG 出力对低频振荡模式的影响, 发现适当的 DFIG 出力能改善原有模式的阻尼, 但未说明改善程度能否使系统阻尼满足运行要求。

在 DFIG 中安装稳定器(DFIG-PSS), 可以阻尼风电系统中低频振荡模式。文献[9-10]设计控制器用于抑制风电系统中最严重振荡模式和引入模式。文献[11]采用极点配置法, 设计控制器参数, 提高主导振荡模式的阻尼。上述控制器设计, 只针对单个振荡模式, 没有考虑可能削弱其他模式阻尼。

区域极点配置能对多个弱阻尼模式进行协调控制, 改善电网总体振荡特性。文献[12]采用差分进化算法, 设计 DFIG 附加控制器参数, 将闭环系统特征值配置在稳定区域。文献[13-14]采用基于线性矩阵不等式(LMI)的区域极点配置, 分别设计同步机组附加阻尼控制和直流输电广域附加控制。但是未见文献将基于 LMI 的区域极点配置用于风电系统输出反馈控制器设计。

针对含 DFIG 风电系统, 对 DFIG 详细建模, 建立风电系统状态空间方程, 选择控制变量和输出变量。考虑 DFIG 出力影响, 分析弱阻尼模式区域极点配置的必要性。兼顾原有和引入弱阻尼模式, 构造降阶系统。采用基于 LMI 的区域极点配置法, 设计输出反馈控制器, 将所有弱阻尼模式配置在设定区域, 提高弱阻尼模式的阻尼比, 同时增大系统稳定裕度。算例分析验证了所设计控制器的应用效果。

## 1 风电系统降阶模型

### 1.1 控制变量和输出变量选择

DFIG 结构如图 1 所示<sup>[15]</sup>, 其中  $V$ 、 $I$ 、 $X$ 、 $P$  分别表示电压、电流、电抗和功率, 下标  $s$ 、 $r$ 、 $g$ 、 $t$  分别表示定子、转子、网侧变流器和风力机。

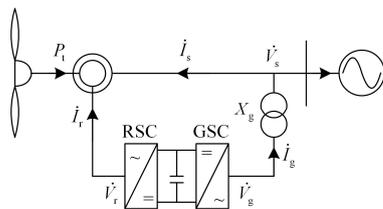


图 1 DFIG 拓扑结构

Fig. 1 Configuration of DFIG

为确定 DFIG 引入模式, 需对其详细建模, 以确定风电系统状态变量。桨距角控制如图 2 所示<sup>[16]</sup>, 图中:  $\omega$  表示转速;  $\beta$  表示桨距角;  $K_{p1}$ 、 $K_{i1}$  分别表示桨距角控制的比例和积分系数;  $p$  表示微分算子;

上标\*表示参考值。

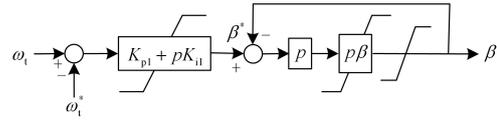


图 2 桨距角控制

Fig. 2 Pitch angle control

转子侧变流器(RSC)控制策略如图 3 所示, 图中:  $Q$  表示无功功率; 下标  $d$ 、 $q$  表示直轴和交轴分量;  $X_m$  表示励磁电抗;  $K_{p2}$ 、 $K_{p3}$  和  $K_{i2}$ 、 $K_{i3}$  分别表示 RSC 控制外环比例和积分系数;  $K_{p4}$ 、 $K_{p5}$  和  $K_{i4}$ 、 $K_{i5}$  分别表示 RSC 控制内环比例和积分系数<sup>[17]</sup>。

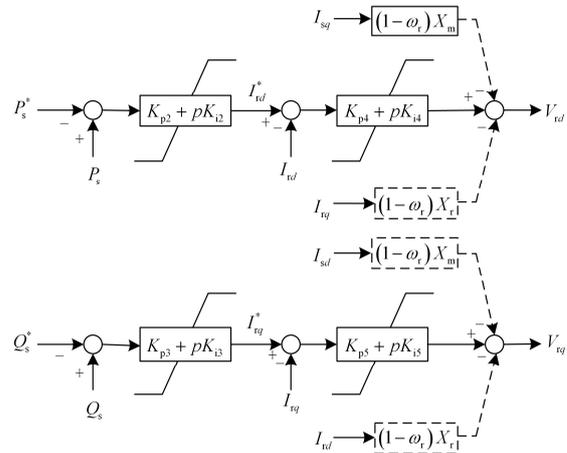


图 3 RSC 控制框图

Fig. 3 Control diagram of RSC

网侧变流器(GSC)控制策略如图 4 所示, 图中:  $V_{dc}$  表示直流电容电压;  $V_{dc}^*$  表示其参考值;  $K_{p6}$ 、 $K_{p7}$  和  $K_{i6}$ 、 $K_{i7}$  分别表示 GSC 控制外环比例和积分系数;  $K_{p8}$ 、 $K_{p9}$  和  $K_{i8}$ 、 $K_{i9}$  分别表示 GSC 控制内环比例和积分系数<sup>[18]</sup>。

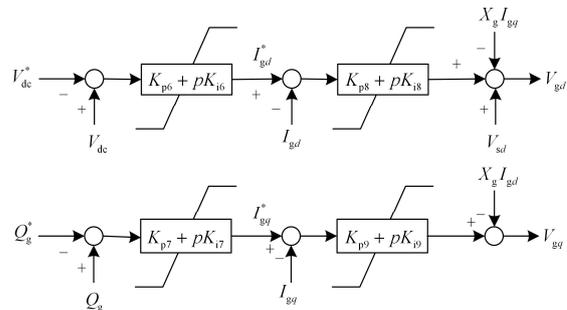


图 4 GSC 控制框图

Fig. 4 Control diagram of GSC

根据控制器安装位置, 选择控制变量和输出变量。与同步机组有关的弱阻尼模式与功角和转速有关, 将其作为输出变量, 将附加励磁电压作为控制变量<sup>[19]</sup>。当 DFIG-PSS 输出信号附加在 RSC 有功外

环时, 阻尼振荡效果最好<sup>[20]</sup>, 因此选择 RSC 附加有功参考值  $P_{\text{ref}}$  作为控制变量。因为引入模式可通过转速动态响应体现<sup>[7]</sup>, 所以选择转速作为输出变量。

确定含 DFIG 风电系统的状态变量、控制变量和输出变量后, 建立风电系统的状态空间方程。

## 1.2 用于控制器设计的降阶模型

采用风电系统全阶模型时, 需考虑很多与弱阻尼模式无关的模式, 缺乏针对性, 且计算量大, 因此本文采用降阶模型。风电系统中易引发低频振荡的是弱阻尼模式, 将其提取出来组成降阶模型, 用于设计控制器。

不妨设电网原有和DFIG引入弱阻尼模式, 共有  $n$  个, 对应特征值为  $\lambda_e$  ( $e=1, 2, \dots, n$ )。计算  $\lambda_e$  对应留数矩阵  $R_e$ , 由弱阻尼模式组成的传递函数矩阵为

$$H(s) = \sum_{e=1}^n \frac{R_e}{s - \lambda_e} \quad (1)$$

式中:  $H$  是传递函数矩阵;  $s$  是拉普拉斯算子。

针对与弱阻尼模式强相关的同步机组和DFIG, 安装控制器。设第  $\tau$  台机组对应的控制变量是  $u_\tau$ , 将  $H$  中与  $u_\tau$  有关的子矩阵  $H_\tau$  转化为状态空间方程, 得到用于设计第  $\tau$  台机组控制器的系统降阶模型为

$$\begin{cases} p\mathbf{x}_{z\tau} = \mathbf{A}_{z\tau}\mathbf{x}_{z\tau} + \mathbf{B}_{z\tau}u_\tau \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}_{z\tau}\mathbf{x}_{z\tau} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{x}_{z\tau}$  是状态变量;  $\mathbf{y}$  是输出变量;  $\mathbf{A}_{z\tau}$  是状态矩阵;  $\mathbf{B}_{z\tau}$  是输入矩阵;  $\mathbf{C}_{z\tau}$  是输出矩阵;  $\mathbf{x}_{z\tau}$  是  $n$  维状态变量; 下标  $z$  表示降阶系统。

## 2 区域极点配置

状态反馈控制器和输出反馈控制器, 都可用于区域极点配置。但是前者状态量获取比较困难, 有时还需要状态观测器, 计算更复杂。因此本文采用基于输出反馈控制器的区域极点配置, 对多个弱阻尼模式进行协调控制。

第  $\tau$  台机组的输出反馈控制器的状态空间表达式为

$$\begin{cases} p\mathbf{x}_{k\tau} = \mathbf{A}_{k\tau}\mathbf{x}_{k\tau} + \mathbf{B}_{k\tau}\mathbf{y} \\ u_\tau = \mathbf{C}_{k\tau}\mathbf{x}_{k\tau} + \mathbf{D}_{k\tau}\mathbf{y} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{x}_{k\tau}$  是  $l$  维状态变量;  $\mathbf{D}_{k\tau}$  是系数矩阵; 下标  $k$  表示输出反馈控制器。

联立式(2)和式(3), 消去  $u_\tau$  和  $\mathbf{y}$ , 得到闭环系统的状态空间方程见式(4), 简写为式(5)。

$$\begin{cases} p\mathbf{x}_{z\tau} = (\mathbf{A}_{z\tau} + \mathbf{B}_{z\tau}\mathbf{D}_{k\tau}\mathbf{C}_{z\tau})\mathbf{x}_{z\tau} + \mathbf{B}_{z\tau}\mathbf{C}_{k\tau}\mathbf{x}_{k\tau} \\ p\mathbf{x}_{k\tau} = \mathbf{B}_{k\tau}\mathbf{C}_{z\tau}\mathbf{x}_{z\tau} + \mathbf{A}_{k\tau}\mathbf{x}_{k\tau} \end{cases} \quad (4)$$

$$p\mathbf{x}_{f\tau} = \mathbf{A}_{f\tau}\mathbf{x}_{f\tau} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{x}_{f\tau}$  是  $n+l$  维状态变量;  $\mathbf{A}_{f\tau}$  是  $n+l$  阶状态矩阵; 下标  $f$  表示闭环系统。

区域极点配置目的, 是重新配置状态矩阵特征值, 使其分布在期望区域中。选择一个垂直条状区域  $W$ , 如图 5 所示, 希望将  $\mathbf{A}_{f\tau}$  的特征值配置在阴影以内。已知  $\lambda = -\alpha \pm j\Omega$ , 其中  $\alpha$  是特征值实部绝对值,  $\Omega$  是虚部绝对值。区域  $W$  表达式为

$$W = \{h_1 < -\alpha < h_2\} \quad (6)$$

式中:  $h_1$  和  $h_2$  分别是左、右边界, 且  $h_1 < h_2 < 0$ 。

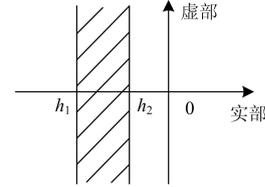


图 5 垂直条状区域  $W$

Fig. 5 Vertical strip region  $W$

式(6)中  $h_2$  由阻尼比确定, 取期望阻尼比为  $\xi_{\text{ref}}$ , 假设特征值的  $\Omega$  不变, 即模式的频率不变, 结合阻尼比定义, 推导出满足要求的  $\alpha$  为

$$\alpha \geq \frac{\xi_{\text{ref}}}{\sqrt{1 - \xi_{\text{ref}}^2}} \Omega \quad (7)$$

由此可求出  $|h_2| = \alpha_{\text{min}}$ 。因为特征值不是越靠左越好, 因此  $h_1$  不是越小越好, 根据实际控制效果适当取值。

垂直条状区域是 LMI 区域, 则存在相同维数的对称矩阵  $L$  和  $M$ , 满足式(8)。

$$L + aM + \bar{a}M^T < \mathbf{0} \quad (8)$$

式中:  $a$  表示垂直条状区域中任意点; 上标  $T$  表示矩阵转置; 上划线表示共轭。

区域  $W$  表示为式(8)的形式为

$$\begin{bmatrix} 2h_1 & 0 \\ 0 & -2h_2 \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \bar{\lambda} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^T < \mathbf{0} \quad (9)$$

对比式(8)和式(9)可知:

$$\begin{cases} L = \begin{bmatrix} 2h_1 & 0 \\ 0 & -2h_2 \end{bmatrix} \\ M = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

状态矩阵  $\mathbf{A}_{f\tau}$  的特征值分布在区域  $W$  中的条件是, 存在一个对称正定矩阵  $Z_\tau$ , 使下列线性矩阵不等式成立<sup>[21]</sup>:

$$L \otimes Z_\tau + M \otimes (\mathbf{A}_{f\tau} Z_\tau) + M^T \otimes (\mathbf{A}_{f\tau} Z_\tau)^T < \mathbf{0} \quad (11)$$

式中,  $\otimes$  表示 Kronecker 乘积。

将式(10)代入式(11), 得负定判据:

$$\begin{bmatrix} 2h_1 Z_r - A_{fr} Z_r - Z_r^T A_{fr}^T & \mathbf{0}_{(n+1) \times (n+1)} \\ \mathbf{0}_{(n+1) \times (n+1)} & -2h_2 Z_r + A_{fr} Z_r + Z_r^T A_{fr}^T \end{bmatrix} < \mathbf{0} \quad (12)$$

求解式(12), 即可得到形如式(3)的输出反馈控制器状态空间表达式。

### 3 算例分析

算例采用两区域四机系统<sup>[20]</sup>, 如图 6 所示。其中同步发电机组采用 3 阶模型, 实际出力分别为:  $P_{G2}=494 \text{ MW}$ ,  $P_{G3}=700 \text{ MW}$ ,  $P_{G4}=700 \text{ MW}$ 。励磁系统采用 1 阶模型。负荷采用恒阻抗模型。

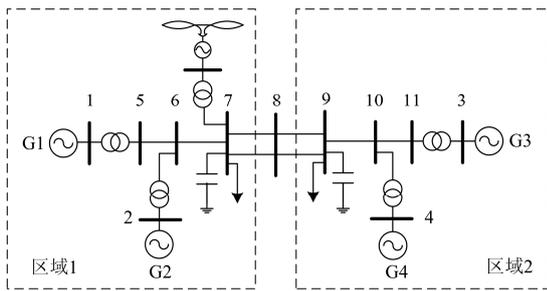


图 6 两区域四机系统

Fig. 6 Two-area four-machine system

节点 7 连接一个由 DFIG 组成的风电场。为简化分析, 将风电场等值为一台 DFIG<sup>[22]</sup>。取空气密度  $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p$  函数参数:  $c_1=0.5176$ ,  $c_2=116$ ,  $c_3=0.4$ ,  $c_4=5$ ,  $c_5=21$ ,  $c_6=0.0068$ ,  $c_7=0.08$ ,  $c_8=-0.035$ <sup>[23]</sup>。DFIG 参数如表 1 所示。

表 1 DFIG 参数

Table 1 Parameters of DFIG

风力机	叶片半径	34 m	惯性时间常数	3.5 s
传动轴	刚度系数	0.8 p.u./rad	互阻尼系数	2.4 p.u.
桨距角	$K_{p1}=6, K_{i1}=2.5 \times 10^{-4}$			
感应电机	额定功率	2 MW	额定电压	690 V
	定子电阻	0.03 p.u.	定子电抗	0.44 p.u.
	转子电阻	0.045 p.u.	转子电抗	0.45 p.u.
	励磁电抗	6.55 p.u.	惯性时间常数	3 s
直流电容	电容电压	1200 V	电容值	0.5 F
RSC	控制外环	$K_{p2}=0.57, K_{i2}=0.042$ $K_{p3}=K_{p2}, K_{i3}=K_{i2}$		
	控制内环	$K_{p4}=0.048, K_{i4}=2.1 \times 10^{-4}$ $K_{p5}=K_{p4}, K_{i5}=K_{i4}$		
	控制外环	$K_{p6}=1.64, K_{i6}=9.5 \times 10^{-4}$ $K_{p7}=K_{p6}, K_{i7}=K_{i6}$		
GSC	控制内环	$K_{p8}=0.4, K_{i8}=6.0 \times 10^{-4}$ $K_{p9}=K_{p8}, K_{i9}=K_{i8}$		
	变压器电抗	0.08 p.u.		

对含 DFIG 的风电系统进行特征值分析, 特征值均在左半复平面, 系统稳定。忽略  $\alpha$  过大的两对共轭复根和一个实根, 其余特征值见图 7。风电系统有 11 个振荡模式, 其中弱阻尼模式有 4 个, 用“\*”表示。

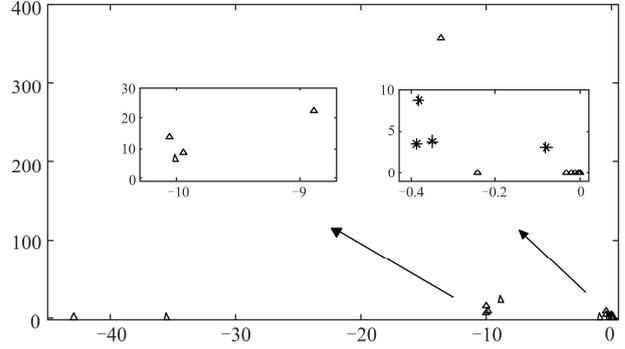


图 7 风电系统特征值

Fig. 7 Eigenvalues of wind power system

接入DFIG前, 系统稳定。低频振荡模式见表2, 存在3个弱阻尼模式。根据参与因子, 判断与区域1中G1和G2强相关的是局部模式1, 与区域2中G3和G4强相关的是局部模式2, 与区域1中G2和区域2中G3强相关的是区间模式。

表 2 测试系统低频振荡模式

Table 2 Low frequency oscillation modes of test system

模式	特征值/p.u.	阻尼比	频率/Hz	强相关机组
1	$-0.26 \pm 3.63j$	0.07	0.58	G1, G2
2	$-0.35 \pm 3.90j$	0.09	0.62	G3, G4
3	$-0.09 \pm 3.07j$	0.03	0.49	G2, G3

分别在节点7接入出力相同的恒功率电源和 DFIG, 系统都稳定, 低频振荡模式如表3、表4所示。接入恒功率电源, 对低频振荡模式的个数和类型没有影响; 接入DFIG, 风电系统中有4个弱阻尼模式, 出现引入模式4, 与DFIG强相关, 说明确定引入模式时, 需要考虑DFIG动态模型。DFIG并网, 改变了与区间模式强相关的机组, 提高了模式1阻尼比, 但模式2、3、4仍是弱阻尼模式。

表 3 接入恒功率源后系统低频振荡模式

Table 3 Low frequency oscillation modes of test system with constant power source

模式	特征值/p.u.	阻尼比	频率/Hz	强相关机组
1	$-0.28 \pm 3.61j$	0.08	0.57	G1, G2
2	$-0.35 \pm 3.90j$	0.09	0.62	G3, G4
3	$-0.09 \pm 3.07j$	0.03	0.49	G2, G3

表 4 DFIG并网后风电系统低频振荡模式

Table 4 Low frequency oscillation modes of test system with DFIG

DFIG				
模式	特征值/p.u.	阻尼比	频率/Hz	强相关机组
1	-0.43±3.35j	0.13	0.53	G1, G2
2	-0.35±3.94j	0.09	0.63	G3, G4
3	-0.09±3.00j	0.03	0.48	G1, G3
4	-0.38±8.81j	0.04	1.40	DFIG

### 3.1 弱阻尼模式区域极点配置的必要性

DFIG 出力增大, 对风电系统中弱阻尼模式阻尼比的影响如图 8 所示, 其中 DFIG 出力用 DFIG 输出功率占系统总输出功率的百分比表示。

由图8(a)可见, DFIG出力增大, 局部模式1阻尼比先增大后减小, 局部模式2阻尼比基本不变; 由图8(b)可见, DFIG出力增大, 区间模式阻尼比先减小后增大, 引入模式阻尼比不变。随着DFIG出力增大, 局部模式1的阻尼比能达到的最大值低于0.14, 区间模式的阻尼比能达到的最大值是0.06, 局部模式2和引入模式的阻尼比始终低于0.1。

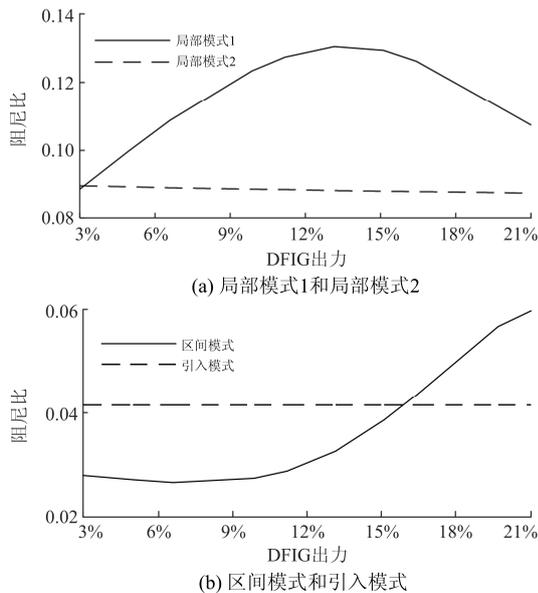


图 8 弱阻尼模式阻尼比

Fig. 8 Damping ratios of weak damping modes

由以上分析可知, 调整DFIG出力, 对引入模式阻尼比没有影响, 对改善原有模式阻尼比的作用有限, 风电系统中仍存在阻尼比不满足要求的弱阻尼模式。因此, 提高所有弱阻尼模式的阻尼比, 要进行区域极点配置。

### 3.2 风电系统中弱阻尼模式的区域极点配置

图 7 中, 弱阻尼模式的  $\alpha$  小于 0.5, 靠近虚轴。

结合表 4 可知, 区间模式的  $\alpha$  最小, 阻尼比最低, 在复平面中最靠近虚轴。因此设计控制器时, 只要区间模式位于设定区域, 其阻尼比满足要求, 那么其他模式也应能位于该区域。

电力系统中希望低频振荡模式的阻尼比不小于 0.1~0.3, 取  $\xi_{ref}=0.3$ , 代入式(7)求得  $\alpha \geq 0.9$ 。考虑到实际情况中, 各个模式频率可能会有变化, 留出稳定裕度, 不妨取  $h_2=-1, h_1=3h_2$ 。代入式(12), 得到输出反馈控制器的状态空间表达式。

测试系统中, 与弱阻尼模式强相关的机组有 5 台, 分别设计每台机组的输出反馈控制器。仿真证明, 所设计控制器将系统中所有弱阻尼模式配置在设定区域, 并增大其阻尼比。仅给出 DFIG 加入控制器后, 闭环系统极点分布图, 如图 9 所示。图中, 局部模式、区间模式和引入模式位于设定区域, 满足区域极点配置。引入模式阻尼比是 0.3, 其他模式阻尼比大于 0.3, 均满足阻尼比要求。

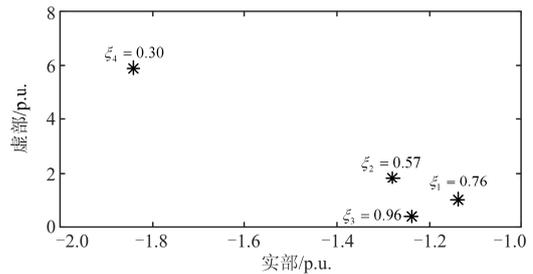


图 9 加入 DFIG 控制器后的弱阻尼模式

Fig. 9 Weak damping modes with DFIG controller

同步机组加入控制器后, 闭环系统中局部模式、区间模式和引入模式的阻尼比如图 10、图 11 所示。由图 10 可以看出: 加入 G1 控制器后, 与 G1 强相关的局部模式 1 和区间模式, 阻尼比分别是 0.76 和 0.96; 加入 G2 控制器后, 与 G2 强相关的局部模式 1 阻尼比是 0.58。由图 11 可以看出: 加入 G3 控制器, 与 G3 强相关的局部模式 2 和区间模式, 阻尼比分别是 0.55 和 0.96; 加入 G4 控制器后, 与 G4 强相关的局部模式 2 阻尼比是 0.47。可以发现, 同步机组中加入控制器, 与该机组强相关的弱阻尼模式阻尼比都大于 0.3, 满足阻尼比要求。

由图 9—图 11 可以看出: 虽然每台机组的控制器, 都能提高所有弱阻尼模式阻尼比, 但是每台控制器对各个模式阻尼比的改善程度不同。各台机组的控制器对与该机组强相关的模式, 能显著提高其阻尼比, 使其满足要求; 对与该机组不相关模式的阻尼比, 虽有不同程度的提高, 但未必满足阻尼比要求。

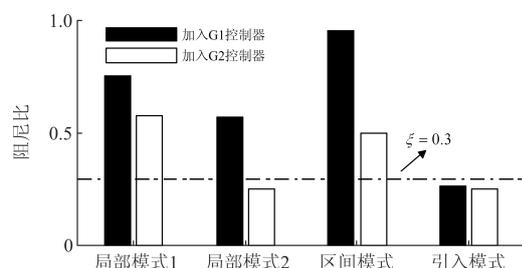


图 10 加入G1、G2控制器后的弱阻尼模式阻尼比

Fig. 10 Damping ratios of weak damping modes with G1/G2 controller

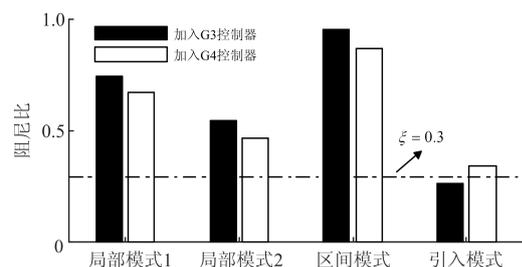


图 11 加入G3、G4控制器后的弱阻尼模式阻尼比

Fig. 11 Damping ratios of weak damping modes with G3/G4 controller

## 4 结论

本文基于含 DFIG 风电系统的状态空间方程, 构造了弱阻尼模式降阶模型。考虑 DFIG 出力影响, 说明区域极点配置的必要性。采用基于 LMI 的区域极点配置法, 设计输出反馈控制器, 将系统中所有弱阻尼模式配置在设定区域, 得到如下结论:

1) 含DFIG的风电系统中, 调整DFIG出力, 对引入模式阻尼比没有影响, 只影响电网中原有弱阻尼模式, 且对其阻尼比改善作用有限, 系统仍存在阻尼比不满足要求的模式。因此, 若想改善所有弱阻尼模式, 需要进行区域极点配置。

2) 与弱阻尼模式强相关的机组中, 安装基于 LMI 区域极点配置法设计的输出反馈控制器, 能将所有弱阻尼模式配置在设定区域, 满足区域极点配置。每台机组的控制器, 能显著提高与该机组强相关模式的阻尼比, 使其满足要求; 也能不同程度提高其他模式阻尼比, 避免了改善单个弱阻尼模式, 可能削弱其他模式阻尼的情况。

后续研究将引入大扰动, 进一步检验本文设计控制器抑制弱阻尼低频振荡模式的控制效果。

## 参考文献

[1] 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.  
[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): 1-6.

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): 1-6.

[3] GAUTAM D, VITTAL V, HARBOUR T. Impact of  
increased penetration of DFIG-based wind turbine  
generators on transient and small signal stability of power  
systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009,  
24(3): 1426-1434.

[4] 王忱, 石立宝, 姚良忠, 等. 大规模双馈型风电场的小  
扰动稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4):  
63-70.

WANG Chen, SHI Libao, YAO Liangzhong, et al. Small  
signal stability analysis of the large-scale wind farm with  
DFIGs[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 63-70.

[5] 杨黎晖, 马西奎. 双馈风电机组对电力系统低频振荡  
特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10):  
19-25.

YANG Lihui, MA Xikui. Impact of doubly fed induction  
generator wind turbine on power system low-frequency  
oscillation characteristic[J]. Proceedings of the CSEE,  
2011, 31(10): 19-25.

[6] DU W, BI J, CAO J, et al. A method to examine the  
impact of grid connection of the DFIGs on power system  
electromechanical oscillation modes[J]. IEEE Transactions  
on Power Systems, 2016, 31(5): 3775-3784.

[7] 李辉, 陈宏文, 杨超, 等. 含双馈风电场的电力系统低  
频振荡模态分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28):  
17-24.

LI Hui, CHEN Hongwen, YANG Chao, et al. Modal  
analysis of the low-frequency oscillation of power systems  
with DFIG-based wind farms[J]. Proceedings of the  
CSEE, 2013, 33(28): 17-24.

[8] 陈树勇, 常晓鹏, 孙华东, 等. 风电场接入对电力系统  
阻尼特性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1570-1577.  
CHEN Shuyong, CHANG Xiaopeng, SUN Huadong, et al.  
Impact of grid-connected wind farm on damping  
performance of power system[J]. Power System  
Technology, 2013, 37(6): 1570-1577.

[9] 关宏亮, 迟永宁, 戴慧珠, 等. 并网风电场改善系统阻  
尼的仿真[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 81-85.

GUAN Hongliang, CHI Yongning, DAI Huizhu, et al. A  
simulation on wind farm integration in improving power  
system damping[J]. Automation of Electric Power Systems,

- 2008, 32(13): 81-85.
- [10] 王国民, 吴政球, 彭程, 等. 双馈电机改善系统阻尼的研究[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 144-148.  
WANG Guomin, WU Zhengqiu, PENG Cheng, et al. Contribution of doubly fed induction generator to power system damping[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 144-148.
- [11] 张子泳, 胡志坚, 李勇汇. 大型双馈风力发电系统小信号动态建模及附加阻尼控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 127-133.  
ZHANG Ziyong, HU Zhijian, LI Yonghui. Small signal dynamic modeling and additionally damping controller designing for large wind generation system based on DFIG[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 127-133.
- [12] KE D P, CHUNG C Y, XUE Y. Controller design for DFIG-based wind power generation to damp interarea oscillation[C] // 2010 5th International Conference on Critical Infrastructure (CRIS), Beijing, China, 2010: 1-6.
- [13] 马燕峰, 赵书强, 顾雪平. 基于输出反馈和区域极点配置的电力系统阻尼控制器研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 175-184.  
MA Yanfeng, ZHAO Shuqiang, GU Xueping. Research on power system damping controllers based on output feedback and region poles assignment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 175-184.
- [14] 徐式蕴, 孙华东, 易俊, 等. 基于凸多面体理论的交直流系统鲁棒分散协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 5968-5975.  
XU Shiyun, SUN Huadong, YI Jun, et al. Robust decentralized coordinated control of HVDC system based on polytopic theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 5968-5975.
- [15] LI S. Power flow modeling to doubly-fed induction generators (DFIGs) under power regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3292-3301.
- [16] 李生虎, 朱国伟. 基于有功备用的风电机组一次调频能力及调频效果分析[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(10): 28-33.  
LI Shenghu, ZHU Guowei. Capability and effect of primary frequency regulation by wind turbine generators with active power reserve[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(10): 28-33.
- [17] 苏咏梅, 王振宇, 易善明. 不同风力发电机组同时并网稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 101-107.  
SU Yongmei, WANG Zhenyu, YI Shanming. Stability analysis for wind power integration with different WTGS[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 101-107.
- [18] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 7pp. DOI 10.1186/s41601-016-0019-8
- [19] 冯双, 蒋平, 吴熙. 抑制共振机理低频振荡的PSS设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 1-6.  
FENG Shuang, JIANG Ping, WU Xi. PSS design method for suppressing low-frequency oscillation of resonance mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 1-6.
- [20] MIAO Z, FAN L, OSBOM D, et al. Control of DFIG-based wind generation to improve interarea oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(2): 415-422.
- [21] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [22] 高骏, 王磊, 周文, 等. 双馈风电机组电网背景谐波运行与谐波抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 164-169.  
GAO Jun, WANG Lei, ZHOU Wen, et al. Study on operating behavior and suppression strategy of doubly-fed induction generators wind turbine under harmonic grid voltage conditions[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 164-169.
- [23] HEIER S. Grid integration of wind energy conversion systems[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1998.

收稿日期: 2017-01-03; 修回日期: 2017-05-12

作者简介:

李生虎(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划与可靠性、风电系统分析与控制、柔性输电技术; E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn

孙琪(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为风电系统分析与控制; E-mail: hfutsunqi@mail.hfut.edu.cn

石雪梅(1974—), 女, 硕士, 教授级高工, 研究方向为风电系统稳定性. E-mail: ahshixm@126.com

(编辑 姜新丽)