

计及全风况小干扰稳定的双馈风机变换器 控制参数设计*

李玉博¹, 贾燕冰¹, 王金浩², 马荣荣¹

(1. 太原理工大学 电力系统运行与控制山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

2. 国网山西省电力科学研究院, 山西 太原 030001)

摘 要: 随着双馈风电并网容量增大, 系统的稳定性与风机变换器控制参数的相关性也越来越大, 风机变换器控制参数整定时必须计及电网小干扰稳定性。针对双馈风机单机无穷大系统, 建立风机工作在全风况下的小信号模型, 采用李雅普诺夫线性化方法并考虑风速分区, 分别推导出风机在最大功率跟踪区、恒转速区、恒功率区电网小干扰稳定分析的状态方程。分析风机变换器控制参数与特征根之间的相关性, 引入表征系统稳定性强弱的小干扰稳定裕度指标, 提出使系统全风况小干扰稳定的风机变换器控制参数设计方案。实例仿真表明: 所提方案可快速获取有效参数, 并保证全风况下电网小干扰稳定性。

关键词: 双馈风机; 小干扰稳定; 控制参数设计; 风速分区

中图分类号: TM 614 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)11-0094-10

Control Parameters Design of DFIG Converter Considering the Small-Signal Stability of Power Grid Under All Possible Wind Speeds*

LI Yubo¹, JIA Yanbing¹, WANG Jinhao², MA Rongrong¹

(1. Shanxi Key Laboratory of Power System Operation and Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China)

Abstract: With the increase of doubly-fed induction generator (DFIG) wind capacity connected to power grid, the stability of power grid was much related to the parameters of wind converter controllers, and wind turbine converter parameter setting must consider small-signal stability of grid. The small-signal model of wind turbine and infinite power grid under all possible wind speeds was established. The small-signal stable mathematical state equations were established respectively in maximum power tracking zone, constant speed zone and constant power zone by Lyapunov linearization method. Index of stability margin was introduced to evaluate the small-signal stability of grid, and the parameters setting method was proposed with considering the relevance between wind turbine controller parameters and eigenvalues which could maintain the small-signal stability of grid under different wind speeds. Simulation results showed that suitable parameters of wind converter could be obtained by the proposed method to maintain the stability of power grid under all of the possible wind speeds.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); small-signal stability; control parameters design; wind speed partition

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51777132); 山西省煤基重点科技攻关项目(MD2014-06); 国网山西省电力公司项目(52053016000W)

作者简介: 李玉博(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定性。

贾燕冰(1980—), 女, 硕士生导师, 研究方向为电力系统运行、新能源消纳。

0 引言

双馈感应发电机因具有四象限有功与无功功率调节、柔性并网等优点成为目前广泛使用的风力发电机型^[1]。双馈风机中变换器控制系统复杂^[2],其稳定性与控制策略、控制参数等密切相关。随着大规模双馈风机并网,小干扰稳定问题日益严峻^[3]。如何针对性的对双馈风机的控制器参数进行设计,确保电网的小干扰稳定性,已成为亟待解决的问题。

目前,对变换器控制参数设计时主要从控制器本身性能要求出发,确定各参数的可行范围。文献[4]提出脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)变换器控制参数设计方案,但未计及风机并网后控制参数对电网小干扰稳定的影响。

在双馈风机并网小干扰稳定性分析方面,文献[5-8]逐步提出包括电容、双馈发电机、风力机轴系、变换器控制器、桨距角控制器动态模型在内的完整的双馈风机小信号模型。文献[5-7]详细分析发电机电气参数、风力机机械参数与系统特征根之间的关系,对于提高风机并网稳定性具有重要意义。但在小信号建模中都没有考虑完整的变换器控制模型。文献[8]计及完整的变换器控制模型,研究全风况下特征根轨迹,并给出各特征根与状态变量参与度关系,为控制器参数设计提供了一定的理论参考。

本文在现有研究的基础上,充分考虑全风速下的双馈风机系统中各环节动态模型,采用李雅普诺夫小干扰稳定分析方法,研究电网小干扰稳定性与变换器控制参数之间的相关性,引入表征系统稳定性强弱的小干扰稳定裕度指标,提出使系统全风况小干扰稳定的风机变换器控制参数设计方案。最后通过实例仿真验证所提策略的有效性。

1 风机小信号建模

双馈风机由双馈感应发电机、风力机轴系、转子侧与网侧变换器控制器、直流电容以及桨距角控制器模型构成。图1所示为双馈风机单机无穷大系统结构图,并标注了各支路功率、电流的参考方向。参数上标 mean 表示实测值。

双馈感应发电机模型采用忽略定子暂态过程的二阶模型^[8],引入状态变量 E_d 、 E_q ,被称为暂态

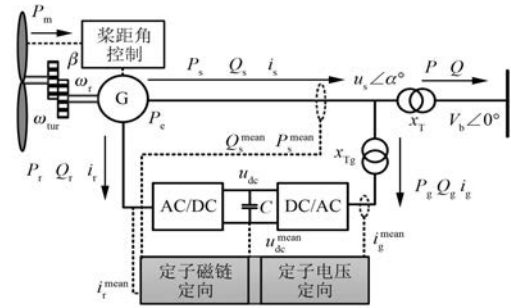


图1 双馈风机单机无穷大系统结构

电势 d 、 q 分量。

风力机轴系采用等效的两质量块模型^[9],引入状态变量 ω_{tur} 、 ω_r 、 θ_s , ω_{tur} 为风力机转子的转速, ω_r 为发电机转子的转速, θ_s 为风力机相对于发电机转子的角位移。

转子侧变换器控制器采用定子磁链定向于 d 轴的控制策略,控制框图如图2所示。4个PI环节引入4个状态变量 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 , K_{Pi} 、 K_{Li} ($i=1,2,3,4$) 分别为相应的控制参数。

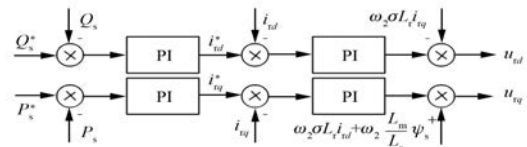


图2 转子侧变换器控制器框图

图2中,上标*都表示参考值; L_s 为定子自感; P_s 、 Q_s 为定子侧支路有功、无功功率值; i_{rd} 、 i_{rq} 为转子端电流 d 、 q 分量; ψ_s 为定子磁链; $\omega_2 = s\omega_1$ 。

网侧变换器控制器采用定子电压定向于 q 轴的控制策略。控制框图如图3所示, $i_{gd}^* = 0$ 。引入3个状态变量 x_5 、 x_6 、 x_7 。 K_{Pi} 、 K_{Li} ($i=5,6,7$) 分别为相应的控制参数。

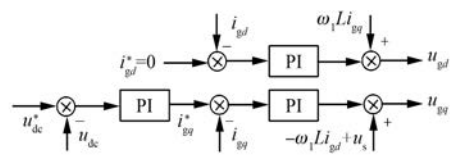


图3 网侧变换器控制器框图

图3中, i_{gd} 、 i_{gq} 为变换器并网侧电流 d 、 q 分量; u_{gd} 、 u_{gq} 为变换器并网侧电压 d 、 q 分量; u_{dc} 为电容端电压; $L = x_{Tg}$ 为变换器网侧变压器等值电抗。

参考图1的功率流向,在背靠背变换器间的电容支路列写方程

$$cu_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = P_r + P_g \quad (1)$$

以一阶微分方程表示风电机组桨距角控制系统^[10]:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{T_{servo}}(\beta_0 - \beta) \quad (2)$$

式中: β ——桨距角;

β_0 ——桨距角初值;

T_{servo} ——控制器惯性时间常数。

2 全风况下特征方程的建立

研究某风场常规 2 MW 双馈机组在不同风速区间下的功率特性与机械特性。风机参数如表 1 所示。

表 1 风机参数

起动风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	额定风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	切出风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	额定转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	发电机 极对数
3	10.4	25	12.5	4

经过计算:当风速处于 3~8 m/s 时,风机运行在最大功率跟踪区,通过调节转速使风功率系数最大以实现最大功率的追踪, $\beta=0^\circ$;当风速处于 8~10.4 m/s 时,风机运行在恒转速区,风机转速等于额定转速,机械功率小于额定机械功率,桨距角控制器不动作, β 依然为 0° ;当风速处于 10.4~25 m/s 时,风机运行在恒功率区,机械功率和风机转速为额定值,桨距角控制开始动作, β 随风速增大而上升。该型风机桨距角 β 、风机转速 ω_{tur} 及机械功率 P_m 与风速关系见图 4。

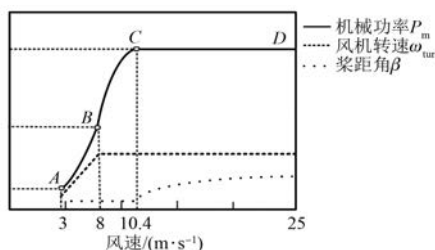


图 4 双馈风力发电机 3 种运行区

风机运行在各工作区捕获的机械功率为

$$P_m = \begin{cases} \frac{1}{2}\rho\pi R^5 \frac{C_p^{\max}}{\lambda_{opt}^3} (\omega_{tur}^{\text{ref}})^3 & AB \text{ 段} \\ \frac{1}{2}\rho\pi R^5 \frac{C_p}{\lambda(V)^3} (\omega_{tur}^{\text{norm}})^3 & BC \text{ 段} \\ P_m^{\text{norm}} & CD \text{ 段} \end{cases} \quad (3)$$

$$\omega_{tur}^{\text{ref}} = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \quad (4)$$

式中: ρ ——空气密度;

R ——风机叶片半径;

C_p ——风能利用系数;

$C_p^{\max}$ ——最大风能利用系数;

λ_{opt} ——最优叶尖速比;

$\omega_{tur}^{\text{ref}}$ ——参考转速;

ω_{tur} ——风机转速;

λ ——叶尖速比;

V ——风速。

由式(3)可见,风机处于 3 个运行区段时,其输出功率特性差别较大,因此,需要建立 3 组状态微分方程组与输入方程组,分别分析各区段时风机接入电网对系统小干扰稳定性的影响。

选取状态变量:

$$\mathbf{x} = [\beta \ \omega_{tur} \ s\theta_s \ E_d \ E_q \ x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ u_{dc}]^T。$$

选取输入变量: $\mathbf{y} = [i_{rd} \ i_{rq} \ i_{gd} \ i_{gq}]^T$ 。

采用李雅普诺夫线性化方法,将 3 组状态微分方程组与输入方程组分别在平衡点处线性化,可得:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{x}' = \mathbf{A}' \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{y} \\ \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{y} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

消去输入变量,可得:

$$\Delta \mathbf{x}' = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{A}$ ——状态矩阵。

(1) 高于额定风速时的矩阵 $\mathbf{A}'$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$ 。

$$\mathbf{A}' = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \end{bmatrix}, \mathbf{C} = [\mathbf{C}_{11} \ \mathbf{C}_{12}],$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} a_2 R_s & c_2 + L_m - b_2 L_s & 0 & c_3 \\ d_2 + a_2 L_s - L_m & R_s b_2 & d_3 & 0 \\ 0 & c_2 & -g_2 & c_3 + x_{Tg} \\ 0 & 0 & d_3 - h_6 - x_{Tg} & -h_7 \end{bmatrix}$$

各分块矩阵表示如下:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{A}_{11} = a_{11}, \quad \mathbf{A}_{12} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0], \\
 & \mathbf{A}_{21} = \begin{bmatrix} a_{21} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{22} = \begin{bmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{42} & a_{43} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{53} & 0 & a_{55} & a_{56} & 0 & 0 & a_{59} & a_{510} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{63} & 0 & a_{65} & a_{66} & a_{67} & a_{68} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{75} & a_{76} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{85} & a_{86} & a_{87} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{95} & a_{96} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{105} & a_{106} & 0 & 0 & a_{109} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{16} & 0 & K_{p6} \\ 0 & a_{143} & 0 & a_{145} & a_{146} & a_{147} & a_{148} & a_{149} & a_{1410} & a_{1411} & a_{1412} & a_{1413} & a_{1414} \end{bmatrix}; \\
 & \mathbf{B}_{11} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0], \quad \mathbf{B}_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} \\ b_{71} & b_{72} & b_{73} & b_{74} \\ b_{81} & b_{82} & b_{83} & b_{84} \\ b_{91} & b_{92} & b_{93} & b_{94} \\ b_{101} & b_{102} & b_{103} & b_{104} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ b_{141} & b_{142} & b_{143} & b_{144} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}_{11} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\
 & \mathbf{C}_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & c_1 - b_1 L_s & a_1 R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_1 R_s & d_1 + a_1 L_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -h_2 & -h_3 & -h_4 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

以上矩阵中各元素的表达式见本文附录。

(2) 低于额定风速时的矩阵 $\mathbf{A}'$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$ 。

低于额定风速时桨距角控制器不动作,所以低于额定风速下的矩阵:

$$\mathbf{A}' = \mathbf{A}_{22}, \mathbf{B} = \mathbf{B}_{21}, \mathbf{C} = \mathbf{C}_{12}, \mathbf{D} = \mathbf{D}$$

低于额定风速时分为最大功率跟踪区与恒转速区,参考式(3),这两个区域机械功率计算公式

不同导致各电气量初始值不同,故其状态矩阵虽然表达式相同,但实际状态方程不同。

状态矩阵 $\mathbf{A}$ 的特征根位置可以反映电网的小干扰稳定性,矩阵 $\mathbf{A}$ 所有特征根的实部为负,表明系统小干扰稳定。对特征根 $\lambda = \sigma \pm j\omega$,特征根的实部 σ 刻画系统振荡的阻尼,虚部 ω 指出振荡频率。振荡阻尼、振荡频率为

(1) 根据变换器性能要求,在各参数可行域内生成一组控制器参数。

(2) 额定风速下,计算状态矩阵 A 的特征根。

(3) 变换器控制器参数相关因子求解。按特征根实部由大到小排序,在额定风速下,针对每个特征根,按照相关因子绝对值降序,依次调整控制器参数。参数增大 0.01,求解特征根,若特征根实部增大,则调整步长 $d=-0.01$,否则 $d=0.01$;在参数可行范围内按照步长 d 调整,使得系统小干扰稳定裕度值 Y 增大,且同时不使其他特征根失稳。若可以使得所有特征根均稳定,则至(4),否则至(1)。

(4) 从额定风速开始,减小风速,步长 0.1 m/s,计算特征根:

① 若存在不稳定特征根,在该风速下,特征根按实部降序排列,求解变换器控制器相关因子。针对每个不稳定特征根,按照相关因子降序依次调整控制器参数,使该特征根稳定,且同时不使其他特征根失稳。若可以使得所有特征根均稳定,至②,否则至(1)。

② 若所有特征根均稳定,减小风速,若风速大于等于切入风速,至(5),否则,至(4)。

(5) 检验:将风速从额定风速减小到切入风速,步长 0.1 m/s,求解特征根,验证特征根是否一直位于小干扰稳定区域。若满足要求,则输出各参数值,否则至(1)。

4 算例分析

针对图 1 中双馈风机单机无穷大系统,风机采用表 1 所给机型,运用本文所提出的变换器控制参数整定方案,进行控制参数设计。

根据文献[4]提出的控制参数设计方案,选定变换器控制器参数的可行范围,在可行范围内生成随机初始值如表 2 所示。其中,积分参数与比例参数成固定比例,不再列出。在额定风速下计算得到的特征根如表 3 所示。可见: $\lambda_{1,2}$ 、 $\lambda_{3,4}$ 位于小干扰不稳定区域。此时系统小干扰稳定裕度为 3 830.3。

状态变量 $x_1 \sim x_7$ 与各特征根之间的相关因子模值如表 4 所示,可以用来反映变换器控制参数 $K_{P1} \sim K_{P7}$ 与各特征值之间的关系。特征值 $\lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{14}$ 与状态变量 $x_1 \sim x_7$ 相关因子为零,所以其不受变换器控制参数的影响。

表 2 初始控制器参数

参数编号	可行范围	初始值
K_{P1}	[1, 15]	15
K_{P2}	[1.9, 4]	2
K_{P3}	[0.1, 1]	0.2
K_{P4}	[0.1, 8]	1
K_{P5}	[0.25, 3]	1.85
K_{P6}	[0.05, 0.9]	0.05
K_{P7}	[1.5, 9]	1.5

表 3 额定风速下特征值

特征根编号	实部	虚部
$\lambda_{1,2}$	1.403 7	± 13.794
$\lambda_{3,4}$	0.045 947	$\pm 0.946 34$
λ_5	-0.026 483	0
$\lambda_{6,7}$	-0.674 27	$\pm 0.533 95$
λ_8	-0.806 4	0
λ_9	-1.844 3	0
λ_{10}	-4	0
λ_{11}	-8.068 9	0
λ_{12}	-62.753	0
λ_{13}	-391.79	0
λ_{14}	-3 393.1	0

表 4 相关因子

变量	$\lambda_{1,2}$	$\lambda_{3,4}$	λ_5	$\lambda_{6,7}$	λ_8	λ_{13}
x_1	1.456	0	0	0.515 1	0.631 6	0
x_2	1.014 9	0	0	0.527 5	0.574 4	0
x_3	1.184 8	0	0	0	0.561	0
x_4	0	0	0	0	0	3.036 7
x_5	3.008	0.014 6	0	0	0	0
x_6	0	0.225 3	0	0	0.265 4	0
x_7	0	0.253 6	0.310 6	0.237	0.799 5	0

由表 4 可知,按照相关因子模值降序,依次调整控制器参数 K_{P5} 、 K_{P1} 、 K_{P3} 、 K_{P2} ,使 $\lambda_{1,2}$ 向左移动;依次调整控制器参数 K_{P7} 、 K_{P6} 、 K_{P5} ,使 $\lambda_{3,4}$ 向左移动;调整控制器参数 K_{P7} ,使 λ_5 向左移动;依次调整控制器参数 K_{P2} 、 K_{P1} 、 K_{P7} ,使 $\lambda_{6,7}$ 向左移动;依次调整控制器参数 K_{P7} 、 K_{P1} 、 K_{P2} 、 K_{P3} 、 K_{P6} ,使 λ_8 向左移动;调整控制器参数 K_{P4} ,使 λ_{13} 向左移动,并逐渐使系统裕度值 Y 增大。

图 6 所示为控制器参数调整过程,横坐标代表控制参数调整顺序,纵坐标代表系统小干扰稳定裕度值 Y 大小。

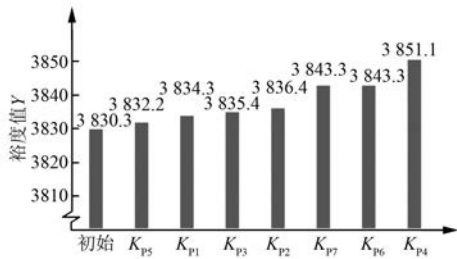


图 6 变换器控制参数调整过程

可见根据相关因子模值降序,依次调整变换器控制参数后,系统小干扰稳定裕度由 3 830.3 增大至 3 851.1。参数调整后的特征值如表 5 所示,可见所有特征值都位于小干扰稳定区域。调整后控制器参数如表 6 所示。

表 5 调整后特征值

特征根编号	实部	虚部
$\lambda_{1,2}$	-0.019 73	$\pm 0.806 69$
λ_3	-0.060 77	0
λ_4	-0.402 2	0
$\lambda_{5,6}$	-0.675 46	$\pm 0.922 86$
λ_7	-1.844 3	0
λ_8	-4	0
$\lambda_{9,10}$	-4.861 3	± 13.176
λ_{11}	-8.068 9	0
λ_{12}	-62.753	0
λ_{13}	-399.59	0
λ_{14}	-3 393.1	0

表 6 调整后控制器参数

K_{P1}	K_{P2}	K_{P3}	K_{P4}	K_{P5}	K_{P6}	K_{P7}
8	1.9	1	0.6	1.75	0.05	3.5

从额定风速 10.4 m/s 开始,以步长 0.1 m/s 减小风速,并计算特征根。经过计算:当风速为 4 m/s 时,出现特征根越界的情况,其中, $\lambda_{1,2} = 0.002\ 360\ 9 \pm j0.123\ 91$ 小干扰不稳定,其余特征根都位于稳定区域。根据相关因子分析,不稳定特征根 $\lambda_{1,2}$ 的相关因子如表 7 所示。

表 7 相关因子

特征根编号	x_1	x_5	x_7	x_3	x_6	x_4
$\lambda_{1,2}$	0.389 1	0.374 9	0.367 5	0.067	0.044 5	0.011 1

由表 7 可知, $\lambda_{1,2}$ 受状态变量 x_1 、 $x_3 \sim x_7$ 的影响,即控制器参数 K_{P1} 、 $K_{P3} \sim K_{P7}$ 都会影响 $\lambda_{1,2}$ 。按照相关因子模值降序排列,为了减小调整后对其他风速条件下小干扰稳定性的影响,从与其最相关的参数调整入手,以尽可能小的参数变化使得系统稳定。表 8 所示为依次调整 K_{P1} 、 K_{P5} 、 K_{P7} 后使系统在 4 m/s 小干扰稳定的控制器参数。

表 8 控制器参数

K_{P1}	K_{P2}	K_{P3}	K_{P4}	K_{P5}	K_{P6}	K_{P7}
8.7	1.9	1	0.6	1.95	0.05	3.3

依据整定步骤,继续以步长 0.1 m/s 逐渐减小风速并计算特征根,发现直到切入风速时系统都是小干扰稳定的。

检验:采用表 8 中的控制器参数,当风速从额定风速降低到切入风速时,验证全风况下特征根是否一直位于坐标平面左侧,特征根位置变化如图 7 所示。由于控制器参数发生变化,图 7 中特征根编号与前述特征根编号不相关,只描述与控制器参数相关的 9 个特征根的变化轨迹,箭头所指方向为随着风速减小特征根的变化方向。

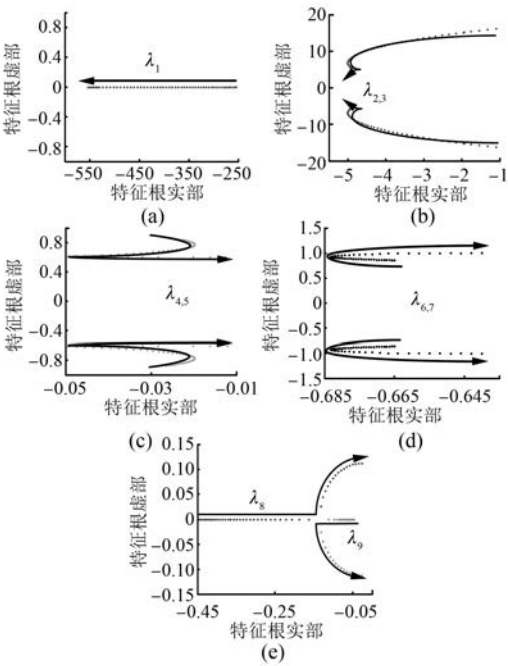


图 7 全风况下特征根轨迹

观察图 7 可得,在表 8 给定的变换器控制参数下,系统全风况小干扰稳定。表 8 中变换器控制参数值即为整定结果。

5 仿真验证

为验证全风况下系统的小干扰稳定性,基于 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建如图 1 双馈风机单机无穷大系统仿真模型。风机参数见表 1,变换器控制参数见表 8。分别在风机 3 个运行区下,以风速的波动作为干扰,研究风机桨距角 β 、风机转速 ω_{wr} 与风机并网功率 P 的动态响应。仿真结果如图 8~图 10 所示。

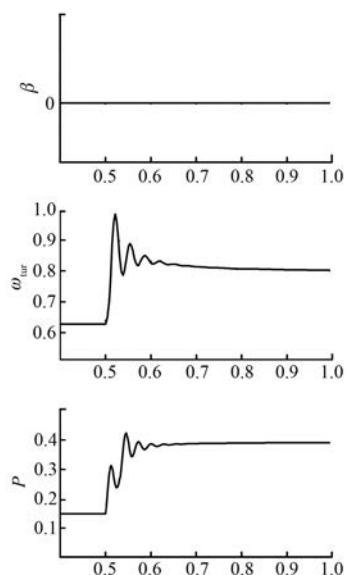


图 8 最大功率跟踪区仿真结果

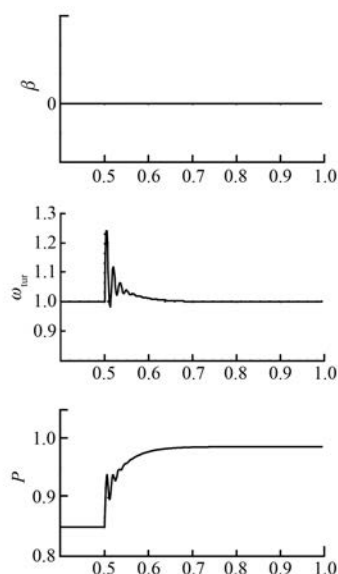


图 9 恒转速区仿真结果

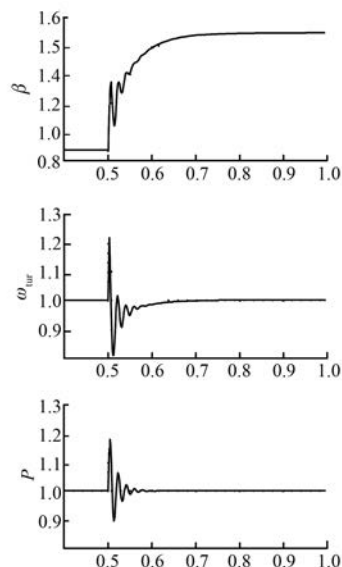


图 10 恒功率区仿真结果

在最大功率跟踪区,0.5 s 时风速由 5 m/s 阶跃上升至 7 m/s,根据此区段特性,桨距角控制器不动作, β 保持为 0° ,而 ω_{wr} 应从 0.62 上升至 0.8, P 应从 0.14 上升至 0.39。在恒转速区,0.5 s 时风速由 8 m/s 阶跃上升至 10 m/s,桨距角控制器不动作, β 依然保持为 0° ,而 ω_{wr} 保持为 1, P 应从 0.85 上升至 0.98。在恒功率区,0.5 s 时风速由 11 m/s 阶跃上升至 13 m/s,而 ω_{wr} 与 P 保持为 1,桨距角控制器开始动作, β 应从 0.82° 上升至 1.53° 。仿真结果表明:采用本文所提策略进行变换器控制参数整定,可有效保证系统的小干扰稳定性。

6 结 语

基于李雅普诺夫线性化方法与相关因子分析方法,本文针对双馈风机并网小干扰稳定问题开展了深入研究,主要研究内容如下。

(1) 建立包括完整变换器控制器的双馈风机无穷大系统动态数学模型。其中:转子侧变换器采用定子磁链定向控制策略,网侧变换器采用定子电压定向控制策略。基于风机在最大功率跟踪区、恒转速区、恒功率区功率特性的差异,分区建立小干扰稳定分析状态方程与输入方程。据此提出计及电网小干扰稳定的双馈风机变换器控制参数设计方案,并在方案中引入系统小干扰稳定裕

度指标,以提高系统稳定性。算例分析表明:按照所提方案进行变换器控制参数整定,可保证系统小干扰稳定性。

(2) 基于 MATLAB/Simulink 搭建完整的双馈风机单机无穷大系统,并进行仿真分析。仿真分析验证了该系统可稳定运行,与小干扰稳定性分析得出的结论一致,进而验证了本文所提变换器控制参数设计方案的有效性。

【参考文献】

- [1] 沈阳,阮毅,赵梅花,等.双馈风力发电系统转子侧 PWM 变换器及其对双馈感应发电机的运行控制[J].电机与控制应用,2012,39(1): 52-56.
- [2] 刘诗怡,刘其辉.风力发电系统中的变流器模型简化方法[J].可再生能源,2017,35(6): 854-860.
- [3] 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.
- [4] 张兴.PWM 整流器及其控制策略的研究[D].合肥:合肥工业大学,2003.
- [5] 李辉,张志科,杨超,等.双馈风电机组参数及运行状态的小干扰稳定性分析[J].电机与控制学报,2013,17(2): 14-21.
- [6] YANG L H, XU Z, ØSTERGAARD J, et al. Hopf bifurcation and eigenvalue sensitivity analysis of doubly fed induction generator wind turbine system [C] // Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2010: 1-6.
- [7] YANG L, XU Z, ØSTERGAARD, J, et al. Oscillatory stability and eigenvalue sensitivity analysis of a DFIG wind turbine system[J].IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(1): 328-339.
- [8] 陈波,吴政球,王国民,等.双馈风电机组全风况条件下小干扰稳定性分析[J].太阳能学报,2012,33(4): 525-531.
- [9] 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影响[J].电机与控制学报,2010,14(3): 24-30.
- [10] 关宏亮.大规模风电场接入电力系统的小干扰稳定性研究[D].保定:华北电力大学(保定),2008.
- [11] 倪以信.动态电力系统的理论和分析[M].北京:清华大学出版社,2002.

收稿日期: 2018-05-31

[附录]

各元素表达式如下:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= -\frac{1}{T_{\text{servo}}}, a_{21} = -\frac{m_2}{2H_{\text{tur}}T_B}, \\
 a_{22} &= -\frac{1}{2H_{\text{tur}}}\left(\frac{m_2}{T_B} - D_s\right), a_{23} = -\frac{D_s\omega_1}{2H_{\text{tur}}}, \\
 a_{24} &= -\frac{K_s}{2H_{\text{tur}}}, a_{32} = -\frac{D_s}{2H_{\text{gen}}\omega_1}, a_{33} = -\frac{D_s}{2H_{\text{gen}}}, \\
 a_{34} &= -\frac{K_s}{2H_{\text{gen}}\omega_1}, a_{35} = \frac{l_1}{2H_{\text{gen}}\omega_1T_B}, \\
 a_{36} &= \frac{l_2}{2H_{\text{gen}}\omega_1T_B}, a_{42} = \omega_0, a_{43} = \omega_0\omega_1, \\
 a_{53} &= \omega_1E_{q0} - \omega_1\frac{L_m}{L_r}f_1, \\
 a_{55} &= -\omega_1\frac{L_m}{L_r}f_2 - \omega_1\frac{R_r}{L_r} + b_1\omega_1R_r\frac{L_m^2}{L_r^2}, \\
 a_{56} &= -\omega_1\frac{L_m}{L_r}f_3 + s_0\omega_1, a_{59} = -\omega_1\frac{L_m}{L_r}f_4, \\
 a_{510} &= -\omega_1\frac{L_m}{L_r}f_5, \\
 a_{63} &= \omega_1\frac{L_m}{L_r}e_1 - \omega_1E_{d0}, \\
 a_{65} &= \omega_1\frac{L_m}{L_r}e_2 - \omega_1s_0, \\
 a_{66} &= \omega_1\frac{L_m}{L_r}e_3 - \omega_1\frac{R_r}{L_r} - a_1\omega_1R_r\frac{L_m^2}{L_r^2}, \\
 a_{67} &= \omega_1\frac{L_m}{L_r}e_4, a_{68} = \omega_1\frac{L_m}{L_r}e_5, \\
 a_{75} &= -(u_{sd0}b_1 + i_{sq0}c_1), a_{76} = a_1u_{sq0} + d_1i_{sd0}, \\
 a_{85} &= -K_{P1}(u_{sd0}b_1 + i_{sq0}c_1), \\
 a_{86} &= K_{P1}(a_1u_{sq0} + d_1i_{sd0}), a_{87} = K_{I1}, \\
 a_{95} &= c_1i_{sd0} + b_1u_{sq0}, \\
 a_{96} &= a_1u_{sd0} + d_1i_{sq0}, \\
 a_{105} &= K_{P3}(c_1i_{sd0} + b_1u_{sq0}), \\
 a_{106} &= K_{P3}(a_1u_{sd0} + d_1i_{sq0}), a_{109} = K_{I3}, \\
 a_{143} &= \frac{e_1i_{rd0} + f_1i_{rq0}}{Cu_{dc0}}, \\
 a_{145} &= \frac{e_2i_{rd0} + f_2i_{rq0} + h_1i_{gq0}}{Cu_{dc0}},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{146} &= \frac{e_3 i_{rd0} + f_3 i_{rq0}}{Cu_{dc0}}, \\
a_{147} &= \frac{e_4 i_{rd0}}{Cu_{dc0}}, a_{148} = \frac{e_5 i_{rd0}}{Cu_{dc0}}, \\
a_{149} &= \frac{f_4 i_{rq0}}{Cu_{dc0}}, a_{1410} = \frac{f_5 i_{rq0}}{Cu_{dc0}}, \\
a_{1411} &= \frac{g_1 i_{gd0}}{Cu_{dc0}}, a_{1412} = \frac{h_2 i_{gd0}}{Cu_{dc0}}, \\
a_{1413} &= \frac{h_3 i_{gd0}}{Cu_{dc0}}, a_{1414} = \frac{h_4 i_{gd0}}{Cu_{dc0}}, \\
b_{31} &= \frac{l_3}{2H_{\text{gen}} \omega_1 T_B}, b_{32} = \frac{l_4}{2H_{\text{gen}} \omega_1 T_B}, \\
b_{51} &= -\omega_1 \frac{L_m}{L_r} f_6, b_{52} = -\left(\omega_1 \frac{L_m}{L_r} f_7 - \omega_1 R_r \frac{L_m^2}{L_r^2} h_2\right), \\
b_{53} &= -\omega_1 \frac{L_m}{L_r} f_8, b_{54} = -\omega_1 \frac{L_m}{L_r} f_9, \\
b_{61} &= \omega_1 \frac{L_m}{L_r} e_6 - a_2 \omega_1 R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}, \\
b_{62} &= \omega_1 \frac{L_m}{L_r} e_7, b_{63} = \omega_1 \frac{L_m}{L_r} e_8, b_{64} = \omega_1 \frac{L_m}{L_r} e_{89}, \\
b_{71} &= a_2 u_{sq0} + d_2 i_{sd0}, b_{72} = -(b_2 u_{sd0} + c_2 i_{sq0}), \\
b_{73} &= d_3 i_{sd0}, b_{74} = -c_3 i_{sq0}, \\
b_{81} &= K_{P1}(a_2 u_{sq0} + d_2 i_{sd0}) - 1, \\
b_{82} &= -K_{P1}(b_2 u_{sd0} + c_2 i_{sq0}), \\
b_{83} &= K_{P1} d_3 i_{sd0}, b_{84} = -K_{P1} c_3 i_{sq0}, \\
b_{91} &= a_2 u_{sd0} + d_2 i_{sq0}, b_{92} = c_2 i_{sd0} + b_2 u_{sq0}, \\
b_{93} &= d_3 i_{sq0}, b_{94} = c_3 i_{sd0}, \\
b_{101} &= K_{P3}(a_2 u_{sd0} + d_2 i_{sq0}), \\
b_{102} &= K_{P3}(c_2 i_{sd0} + b_2 u_{sq0}) - 1, \\
b_{103} &= K_{P3} d_3 i_{sq0}, b_{104} = K_{P3} c_3 i_{sd0}, \\
b_{141} &= \frac{u_{rd0} + e_6 i_{rd0} + f_6 i_{rq0} + h_5 i_{gd0}}{Cu_{dc0}}, \\
b_{142} &= \frac{u_{rq0} + e_7 i_{rd0} + f_7 i_{rq0}}{Cu_{dc0}}, \\
b_{143} &= \frac{e_8 i_{rd0} + f_8 i_{rq0} + g_2 i_{gd0} + h_6 i_{gd0} + u_{gd0}}{Cu_{dc0}}, \\
b_{144} &= \frac{e_9 i_{rd0} + f_9 i_{rq0} + h_7 i_{gd0} + u_{gd0}}{Cu_{dc0}},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_1 &= -\frac{L_r}{L_m^2}, a_2 = -\frac{L_r}{L_m}, b_1 = \frac{L_r}{L_m^2}, b_2 = \frac{L_r}{L_m}, \\
c_1 &= -b_1 x_T, c_2 = -b_2 x_T, c_3 = x_T, \\
d_1 &= a_1 x_T, d_2 = a_2 x_T, d_3 = -x_T, \\
e_1 &= -i_{rq0} \sigma L_r, e_2 = -K_{P1} K_{P2}(b_1 u_{sd0} + c_1 i_{sq0}), \\
e_3 &= K_{P1} K_{P2}(a_1 u_{sq0} + d_1 i_{sd0}), e_4 = K_{I1} K_{P2}, \\
e_5 &= K_{I2}, e_6 = K_{P1} K_{P2}(a_2 u_{sq0} + d_2 i_{sd0}) - K_{P2}, \\
e_7 &= -[K_{P1} K_{P2}(b_2 u_{sd0} + c_2 i_{sq0}) + s_0 \sigma L_r], \\
e_8 &= d_3 K_{P1} K_{P2} i_{sd0}, e_9 = -c_3 K_{P1} K_{P2} i_{sq0}, \\
f_1 &= \frac{L_m}{L_s} \psi_s + i_{rd0} \sigma L_r, f_2 = K_{P3} K_{P4}(c_1 i_{sd0} + b_1 u_{sq0}), \\
f_3 &= K_{P3} K_{P4}(a_1 u_{sd0} + d_1 i_{sq0}), f_4 = K_{I1}, f_5 = K_{I4}, \\
f_6 &= K_{P3} K_{P4}(a_2 u_{sd0} + d_2 i_{sq0}) + s_0 \sigma L_r, \\
f_7 &= K_{P3} K_{P4}(c_2 i_{sd0} + b_2 u_{sq0}) - K_{P4}, \\
f_8 &= d_3 K_{P3} K_{P4} i_{sq0}, f_9 = c_3 K_{P3} K_{P4} i_{sd0}, \\
g_1 &= K_{I5}, g_2 = K_{P5}, \\
h_1 &= d_1, h_2 = K_{I6} K_{P7}, h_3 = K_{I7}, \\
h_4 &= -K_{P6} K_{P7}, h_5 = d_2, h_6 = d_3 - L, h_7 = -K_{P7}, \\
l_1 &= i_{sd0} + b_1 E_{q0}, l_2 = i_{sq0} + a_1 E_{d0}, \\
l_3 &= a_2 E_{d0}, l_4 = b_2 E_{q0}, \\
m_1 &= -\frac{0.258 \ 8 \rho \pi R^2 V^3 e^{-\frac{21}{\lambda_{i0}}}}{\omega_{\text{tur0}}}, \\
&\left\{ 0.4 - \left[\frac{116 \times 21}{\lambda_{i0}^3} - (0.4\beta_0 - 5) \frac{21}{\lambda_{i0}^2} - \frac{116}{\lambda_{i0}^2} \right] \cdot \right. \\
&\quad \left. \frac{1}{\left(\frac{1}{\lambda_0 + 0.08\beta_0} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)^2} \cdot \right. \\
&\quad \left. \left[\frac{0.08}{(\lambda_0 + 0.08\beta_0)^2} + \frac{0.07^2 \beta_0}{(\beta_0^3 + 1)^2} \right] \right\}, \\
m_2 &= -\frac{0.258 \ 8 \rho \pi R^2 V^3 e^{-\frac{21}{\lambda_{i0}}}}{\omega_{\text{tur0}}} \left\{ \frac{1}{\omega_{\text{tur0}}} \left(\frac{116}{\lambda_{i0}} - 0.4\beta_0 - 5 \right) - \right. \\
&\quad \left[\frac{116 \times 21}{\lambda_{i0}^3} - (0.4\beta_0 - 5) \frac{21}{\lambda_{i0}^2} - \frac{116}{\lambda_{i0}^2} \right] \cdot \\
&\quad \left. \frac{1}{\left(\frac{1}{\lambda_0 + 0.08\beta_0} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)^2} \frac{1}{(\lambda_0 + 0.08\beta_0)^2} \frac{R}{V} \right\}^\circ
\end{aligned}$$