

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.05.003

# 风机出力变化下直驱风电场小干扰稳定性分析

袁国富, 杜文娟, 王海凤

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 针对风机出力变化下永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)构成的大规模并网风电场在直流电压时间尺度下的小干扰稳定问题, 文中基于劳斯-赫尔维茨判据提出一种在风速不确定条件下的并网 PMSG 风电场稳定性判据。首先, 建立风速的 Weibull 分布模型、PMSG 的功率特性模型以及考虑直流电压控制环节和锁相环(phase-locked loop, PLL)环节的大规模风电场动态等值状态空间模型; 然后, 计算风电场的稳定概率, 并深入研究直流电压时间尺度下风速分布、直流电压外环和 PLL 控制参数对风电场小干扰振荡稳定的影响机理; 最后, 通过一个包含 3 个子风电场共计 260 台风机的规模化并网风电场算例, 利用模式分析法和时域仿真验证文中理论推导的正确性。研究发现, 风电场失稳风险随风速增加而增加, 风电场稳定概率随系统稳定风速极限的增大而增大, 相关结论可以为大规模 PMSG 风电场的规划提供依据。

**关键词:** 直驱风电场; 小干扰稳定; 直流电压时间尺度; 直流电压外环; 锁相环(PLL); Weibull 分布

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)05-0035-11

## 0 引言

随着风力发电在全球范围内的大规模推广, 与之相关联的电力电子设备在电网中的占比逐步提高, 电力电子设备多时间尺度控制的特性导致电网稳定性问题愈加复杂<sup>[1-5]</sup>。永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)经网侧换流器(grid-side converter, GSC)与外部交流电力系统相连接, 并通过锁相环(phase-locked loop, PLL)实时跟踪风机端口电压<sup>[6-10]</sup>。现有研究表明, GSC 的功率外环和电流内环控制器, 均有可能与 PLL 产生动态交互, 导致并网风电场小干扰振荡失稳<sup>[11]</sup>。由于 GSC 的功率外环和电流内环控制器的响应速度相差近 10 倍, 文献[12]将其对应的时间尺度分为 2 个不同的范围, 即直流电压时间尺度(约为 10 Hz)和交流电流时间尺度(约为 100 Hz), 现有文献通常将两者分开进行研究<sup>[13-16]</sup>。

文献[17-21]分别基于模式分析法、阻抗分析法、开环传递函数研究并网 PMSG 风电场在直流电压和交流电流时间尺度下的小干扰振荡稳定性问题。文献[17-18]运用模式法和时域仿真, 研究并网 PMSG 在弱连接条件下的 PLL 环节和电流控制环节的动态特性, 发现 GSC 和 PLL 的动态交互是导致系统失稳的主要原因。文献[19]采用阻抗法, 研究并网 PMSG 风电场的振荡稳定性, 发现直流电压时间尺度下的等效负电阻效应是造成风电场振荡失稳的主要原因。然而, 大部分研究针对特定算

例进行数值仿真, 通过调整风机控制参数或 PLL 参数分析某个特定数值指标的变化, 缺乏对小干扰振荡稳定性内在机理的深入研究以及对各参数间相互影响关系的解析, 且所得结论大多适用于单个 PMSG 并网系统, 鲜有针对大规模风电场的讨论。文献[20-21]利用传递函数框图, 从机理的角度深入分析 PMSG 风电场在直流电压时间尺度及全时间尺度下的稳定性, 但均未考虑实际风电场中风速概率分布对并网 PMSG 风电场振荡稳定性的影响。

基于此, 文中采用大规模风电场动态等值模型、模式分析及时域仿真相结合的方法, 深入研究直流电压时间尺度下风速概率分布对并网 PMSG 风电场振荡稳定性的影响, 提出描述风速影响并网 PMSG 风电场稳定性的指标, 即系统稳定风速极限, 同时在风机出力变化下进一步计算并网 PMSG 风电场稳定概率, 分析风电场各控制参数稳定边界。

## 1 风速概率分布及风机的功率特性模型

风能资源分布是风电场规划建设的关键指标之一, 而风速概率分布模型是评估风能资源分布特征的重要工具, 主要反映特定区域某一段时间内各个风速区间的出现频率<sup>[22-23]</sup>。为了拟合风速分布, 众多学者提出了多种模型, 包括 Weibull 分布模型、Rayleigh 分布模型以及对数正态分布模型等。其中, 两参数 Weibull 分布的适用性最广, 拟合效果最佳<sup>[24]</sup>。两参数 Weibull 分布的概率函数形式如下:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (1)$$

式中:  $k$  为 Weibull 分布的形状参数;  $c$  为 Weibull 分布的尺度参数;  $v$  为风机轮毂处的风速。

收稿日期: 2025-02-01; 修回日期: 2025-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077144)

由贝茨理论, 风机的输出机械功率<sup>[25-26]</sup>为:

$$P_0 = \frac{\pi}{8} \rho D_W^2 v^3 C_p \quad (2)$$

式中:  $P_0$ 为风机的输出机械功率;  $\rho$ 为空气密度;  $D_W$ 为风轮的直径;  $C_p$ 为风能利用系数, 极限值为0.593。

变速恒频发电机在不同风速下的运行控制可分为4个区域<sup>[27]</sup>, 如图1所示。图中,  $v_{in}$ 为切入风速;  $v_r$ 为额定风速;  $v_{out}$ 为切除风速;  $P$ 为风机输出机械功率;  $P_{0N}$ 为风机额定功率。最大风能追踪区始终保持风能利用系数为最大值, 风机输出机械功率可用式(2)表示, 而启动区、恒转速区、恒功率区的风能利用系数并不固定, 故仅用式(2)很难直接求得风机的功率特性曲线。

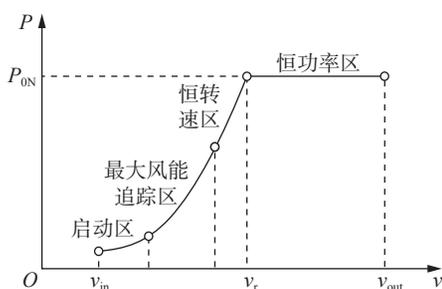


图1 变速恒频发电机功率特性曲线

Fig.1 Power characteristic curve of variable speed constant frequency generator

实际工程中, 可以通过供应商提供的技术规范手册查找得到风机的功率特性表, 然后用拟合的方式得到风机的功率特性曲线, 文中采用最小二乘法拟合。拟合得到的风机功率特性方程一般为:

$$P = F(v) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v \leq v_{in} \\ f_p(v) & v_{in} < v \leq v_r \\ P_{0N} & v_r < v \leq v_{out} \\ 0 & v_{out} < v \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $F(v)$ 为以风速 $v$ 为自变量的分段函数;  $f_p(v)$ 为风速 $v$ 在 $(v_{in}, v_r]$ 间的函数。

## 2 PMSG 风电场线性化模型

含有  $N$  台 PMSG 的并网风电场通过阻抗值为  $X_L$  的外送线路连接至母线电压为  $V_b$  的外部交流电网, 结构如图2所示。

则第  $i$  台 PMSG 的状态空间模型为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Delta X_i = A_i \Delta X_i + B_i \Delta V_i \\ \Delta I_i = C_i \Delta X_i \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\Delta X_i$ 为第  $i$  台 PMSG 的状态变化量列向量;  $\Delta V_i = [\Delta V_{ix} \quad \Delta V_{iy}]^T$ ;  $\Delta I_i = [\Delta I_{ix} \quad \Delta I_{iy}]^T$ ;  $\Delta V_{ix} + j\Delta V_{iy}$ 、 $\Delta I_{ix} + j\Delta I_{iy}$ 分别为交流电网公共  $xy$  坐标系下第  $i$  台

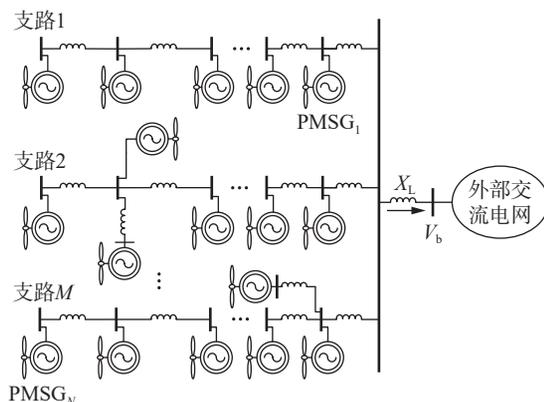


图2 并网 PMSG 风电场示意

Fig.2 Schematic diagram of a grid-connected PMSG wind farm

PMSG 的端电压变化量和输出电流变化量;  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$ 分别为第  $i$  台 PMSG 的状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵。

由式(4)进一步可得风电场  $N$  台 PMSG 的状态空间模型:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Delta X = \text{diag}(A_1 \quad A_2 \quad \cdots \quad A_N) \Delta X + \\ \text{diag}(B_1 \quad B_2 \quad \cdots \quad B_N) \Delta V \\ \Delta I = \text{diag}(C_1 \quad C_2 \quad \cdots \quad C_N) \Delta X \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\Delta X = [\Delta X_1^T \quad \Delta X_2^T \quad \cdots \quad \Delta X_N^T]^T$ ;  $\Delta I = [\Delta I_1^T \quad \Delta I_2^T \quad \cdots \quad \Delta I_N^T]^T$ ;  $\Delta V = [\Delta V_1^T \quad \Delta V_2^T \quad \cdots \quad \Delta V_N^T]^T$ 。

实际工程中, 一个风电场通常采用来自同一供应商的同型风机, 初始参数设定相同, 且风电场内风速空间分布一般不会有太大差异, 可认为各 PMSG 的线性化模型近似相同<sup>[28]</sup>。选取其中一台作为代表风机, 进而假设各风机的线性化模型相同, 则有:

$$\begin{cases} A_i = A_p \\ B_i = B_p \\ C_i = C_p \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $A_p$ 、 $B_p$ 、 $C_p$ 分别为代表风机的状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵。

不考虑外部电力系统母线电压波动, 则有:

$$\Delta V = X_E \Delta I \quad (7)$$

式中:  $X_E$ 为风电场网络方程。

$$X_E = X_M \otimes E_1 \quad (8)$$

式中:  $E_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ ;  $\otimes$ 为克罗内克乘积;  $X_M$ 为风电场网络阻抗矩阵。

$$X_M = \begin{bmatrix} x_{11} + X_L & x_{12} + X_L & \cdots & x_{1N} + X_L \\ x_{21} + X_L & x_{22} + X_L & \cdots & x_{2N} + X_L \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} + X_L & x_{N2} + X_L & \cdots & x_{NN} + X_L \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: 对角线元素  $x_{ii}$  为连接第  $i$  台风机到风电场并网点的线路电抗; 非对角线元素  $x_{ij}$  为连接第  $i$  台风机和第  $j$  台风机到风电场并网点的线路公共部分的线路电抗。

由于矩阵  $\mathbf{X}_M$  为实对称矩阵, 若其特征值为  $\lambda_n (n=1, 2, \dots, N)$ , 则存在矩阵  $\mathbf{P}_N$  使得:

$$\begin{cases} \mathbf{P}_N^{-1} = \mathbf{P}_N^T \\ \mathbf{P}_N \mathbf{X}_M \mathbf{P}_N^{-1} = \text{diag}(\lambda_1 \ \lambda_2 \ \dots \ \lambda_n) \end{cases} \quad (10)$$

进而对风电场全阶模型的状态变化量  $\Delta \mathbf{X}$ , 输入变化量  $\Delta \mathbf{V}$ , 输出变化量  $\Delta \mathbf{I}$  进行变换:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{X} = \mathbf{P}_M \Delta \mathbf{Y} \\ \Delta \mathbf{V} = \mathbf{P}_2 \Delta \mathbf{V}_Y \\ \Delta \mathbf{I} = \mathbf{P}_2 \Delta \mathbf{I}_Y \\ \mathbf{P}_M = \mathbf{P}_N \otimes \mathbf{E}_m \\ \mathbf{P}_2 = \mathbf{P}_N \otimes \mathbf{E}_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{E}_m$  为  $m$  阶单位矩阵,  $m$  为 PMSG 模型阶数;  $\mathbf{E}_2$  为二阶单位矩阵;  $\mathbf{P}_M$ 、 $\mathbf{P}_2$  为变换矩阵;  $\Delta \mathbf{Y}$ 、 $\Delta \mathbf{V}_Y$ 、 $\Delta \mathbf{I}_Y$  分别为  $\Delta \mathbf{X}$ 、 $\Delta \mathbf{V}$ 、 $\Delta \mathbf{I}$  变换后的值。

将式(11)与式(6)代入式(5)和式(7), 其详细相似变换过程见文献[29], 可得:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Delta \mathbf{Y}_n = \mathbf{A}_p \Delta \mathbf{Y}_n + \mathbf{B}_p \Delta \mathbf{V}_{Yn} \\ \Delta \mathbf{I}_{Yn} = \mathbf{C}_p \Delta \mathbf{Y}_n \\ \Delta \mathbf{V}_{Yn} = \lambda_n \mathbf{E}_1 \Delta \mathbf{I}_{Yn} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\Delta \mathbf{Y}_n$ 、 $\Delta \mathbf{V}_{Yn}$ 、 $\Delta \mathbf{I}_{Yn}$  分别为变换后的第  $n$  台 PMSG 的状态变化量、端电压变化量、输出电流变化量矩阵。

经以上推导将风电场等效变换成  $N$  个一台风机和一个等值电抗  $\lambda_n$  与外部电力系统相连接的等效子系统, 其中第  $n$  个线性化等值子模型的结构如图 3 所示。

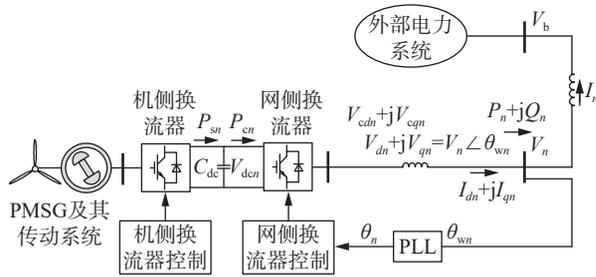


图 3 第  $n$  个线性化等值子模型

Fig.3 The  $n$ th linearized equivalent submodel

图 3 中,  $V_{dcn}$  为第  $n$  个等效子系统直流电压;  $C_{dc}$  为直流电容;  $P_{sn}$  为第  $n$  个等效子系统机侧输入功率;  $P_{cn}$  为第  $n$  个等效子系统流过 GSC 的有功功率;  $V_{cdn}$ 、 $V_{cqn}$  分别为第  $n$  个等效子系统 GSC 交流侧电压  $V_{cn}$  的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $V_n$ 、 $I_n$  分别为第  $n$  个等效子系统中风机的并网点电压和输出电流;  $V_{dn}$ 、 $V_{qn}$  分别

为  $V_n$  的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $P_n$ 、 $Q_n$  分别为第  $n$  个等效子系统中风机向外部电力系统注入的有功和无功功率;  $\theta_{wn}$ 、 $\theta_n$  分别为第  $n$  个等效子系统中风机并网点电压的实际相位和量测相位。

若考虑 PMSG 连接到外部电力系统的线路动态:

$$\begin{cases} \lambda_n \frac{d}{dt} \Delta I_{Ynx} = \omega_0 \Delta V_{Ynx} + \omega_0 \lambda_n \Delta I_{Yny} \\ \lambda_n \frac{d}{dt} \Delta I_{Yny} = \omega_0 \Delta V_{Yny} - \omega_0 \lambda_n \Delta I_{Ynx} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\omega_0$  为系统工频角速度;  $\Delta \mathbf{V}_{Yn} = [\Delta V_{Ynx} \ \Delta V_{Yny}]^T$ ;  $\Delta \mathbf{I}_{Yn} = [\Delta I_{Ynx} \ \Delta I_{Yny}]^T$ 。

将式(13)代入式(12)可得第  $n$  个等效子系统的状态空间模型为:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Delta \mathbf{Y}_n = \mathbf{A}_Y(n) \Delta \mathbf{Y}_n \\ \mathbf{A}_Y(n) = \left( \mathbf{E}_4 - \frac{\lambda_n}{\omega_0} \mathbf{B}_p \mathbf{C}_p \right)^{-1} (\mathbf{A}_p + \lambda_n \mathbf{B}_p \mathbf{E}_1 \mathbf{C}_p) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{A}_Y(n)$  为第  $n$  个等效子系统的状态空间矩阵;  $\mathbf{E}_4$  为四阶单位矩阵。

采用文献[30]中仅考虑直流电压控制外环和 PLL 共同确定的直流电压动态时间尺度下的 PMSG 状态空间模型对代表风机进行建模:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \Delta \mathbf{X} = \mathbf{A}_p \Delta \mathbf{X}_p + \mathbf{B}_p \Delta \mathbf{V}_p \\ \Delta \mathbf{I}_p = \mathbf{C}_p \Delta \mathbf{X}_p \end{cases} \quad (15)$$

其中:

$$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} -\frac{V_{pd0} K_{ppv}}{C_{pdc} V_{pdc0}} & -\frac{V_{pd0}}{C_{pdc} V_{pdc0}} & 0 & -\frac{I_{pd0} V_{pq0} - I_{p0} V_{pd0}}{C_{pdc} V_{pdc0}} \\ K_{piv} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_{ipll} V_{p0} \\ 0 & 0 & 1 & -K_{ppll} V_{p0} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{B}_p = \begin{bmatrix} -\frac{I_{px0}}{C_{pdc} V_{pdc0}} & 0 & -K_{ipll} \frac{V_{py0}}{V_{p0}} & -K_{ppll} \frac{V_{py0}}{V_{p0}} \\ -\frac{I_{py0}}{C_{pdc} V_{pdc0}} & 0 & K_{ipll} \frac{V_{px0}}{V_{p0}} & K_{ppll} \frac{V_{px0}}{V_{p0}} \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

$$\mathbf{C}_p = \begin{bmatrix} K_{ppv} \cos \theta_{p0} & \cos \theta_{p0} & 0 & -I_{py0} \\ K_{ppv} \sin \theta_{p0} & \sin \theta_{p0} & 0 & I_{px0} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中:  $\Delta \mathbf{V}_p = [\Delta V_{px} \ \Delta V_{py}]^T$ ;  $\Delta \mathbf{I}_p = [\Delta I_{px} \ \Delta I_{py}]^T$ ;  $\Delta \mathbf{X}_p$  为代表风机的状态变化量列向量;  $V_{pdc}$  为代表风机直流电压;  $C_{pdc}$  为代表风机直流电容;  $V_p$  为代表风机的端电压;  $\Delta V_{px} + j\Delta V_{py}$ 、 $\Delta I_{px} + j\Delta I_{py}$  分别为交流电网公共  $xy$  坐标系下代表风机的端电压变化量和输出

电流变化量;  $V_{pd}$ 、 $V_{pq}$ 、 $I_{pd}$ 、 $I_{pq}$  分别为代表风机的端电压和输出电流的  $d$ 、 $q$  轴分量; 下标为 0 表示相应变量处于稳态值;  $K_{ppv}$ 、 $K_{piv}$  分别为直流电压控制外环的比例系数和积分系数;  $K_{ppll}$ 、 $K_{ipll}$  分别为 PLL 的比例系数和积分系数;  $\theta_p$  为代表风机并网点电压测量相位。

### 3 小干扰稳定性极限分析

根据图 3、式(9)、式(13)和式(14), 当大规模风电场中  $N$  台 PMSG 动态特性相同, 且仅考虑 GSC 直流电压外环控制和 PLL 控制时, PMSG 动态等效模型的第  $n$  个等效子系统特征方程  $\Delta|Ex - A_Y(n)| = 0$  ( $E$  为单位矩阵,  $x$  为特征值) 为:

$$x^4 + ax^3 + bx^2 + cx + d = 0 \quad (19)$$

其中:

$$a = \left[ \left( K_{ipll} - \frac{K_{piv}}{C_{pdc} V_{pdc0}} \right) \frac{\lambda_n P_{n0}}{\omega_0 V_{n0}} - \left( K_{ppll} + \frac{K_{ppv}}{C_{pdc} V_{pdc0}} \right) V_{n0} + \frac{K_{ppv} K_{ipll} + K_{piv} K_{ppll}}{C_{pdc} V_{pdc0}} \left( \frac{\lambda_n P_{n0}}{\omega_0 V_{n0}} \right)^2 \right] K_p \quad (20)$$

$$b = \left[ \frac{K_{ppv} K_{ppll}}{C_{pdc} V_{pdc0}} \left[ V_{n0}^2 - \left( \frac{\lambda_n P_{n0}}{V_{n0}} \right)^2 \right] - \frac{K_{ipll} K_{piv}}{C_{pdc} V_{pdc0}} \times \left( \frac{\lambda_n P_{n0}}{\omega_0 V_{n0}} \right)^2 - \left( K_{ipll} V_{n0} + \frac{K_{piv} V_{n0}}{C_{pdc} V_{pdc0}} \right) \right] K_p \quad (21)$$

$$c = \frac{K_{ppv} K_{ipll} + K_{piv} K_{ppll}}{C_{pdc} V_{pdc0}} \left[ V_{n0}^2 - \left( \frac{\lambda_n P_{n0}}{V_{n0}} \right)^2 \right] K_p \quad (22)$$

$$d = \frac{K_{ipll} K_{piv}}{C_{pdc} V_{pdc0}} \left[ V_{n0}^2 - \left( \frac{\lambda_n P_{n0}}{V_{n0}} \right)^2 \right] K_p \quad (23)$$

$$K_p = 1 \left/ \left[ -\frac{K_{ppv} K_{ppll}}{C_{pdc} V_{pdc0}} \left( \frac{\lambda_n P_{n0}}{\omega_0 V_{n0}} \right)^2 + \left( \frac{K_{ppv}}{C_{pdc} V_{pdc0}} - K_{ppll} \right) \left( \frac{\lambda_n P_{n0}}{\omega_0 V_{n0}} \right) + 1 \right] \right. \quad (24)$$

根据劳斯-赫尔维茨稳定性判据, 该四阶系统稳定的充要条件为:

$$\begin{cases} a > 0 \\ b > 0 \\ 0 < c < ab \\ 0 < d < \frac{abc - c^2}{a^2} \end{cases} \quad (25)$$

将式(19)中各参数代入式(25), 并整理以上不等式可得系统稳定的充要条件为:

$$\begin{cases} X_n < 1 & H > 1 \\ X_n < H & H \leq 1 \\ X_n = \lambda_n P_{n0} / V_{n0} \end{cases} \quad (26)$$

其中:

$$H = \frac{\omega_0}{3K_c} \left( -K_b - 2\sqrt{K_b^2 - 3K_a K_c} \cos \left( \frac{1}{3} \times \arccos \left( \frac{2K_b(K_b^2 - 3K_a K_c) - 3K_c(K_a K_b - 9K_0 K_c)}{2\sqrt{(K_b^2 - 3K_a K_c)^3}} \right) \right) \right) \quad (27)$$

$$K_0 = K_{ipll} K_{ppll} + \frac{K_{ppv} K_{ppll}^2}{C_{pdc} V_{pdc0}} + \frac{K_{ppv} K_{piv} + K_{piv} K_{ppll}}{C_{pdc}^2 V_{pdc0}^2} - \frac{K_{ipll} K_{ppv} \left( K_{ppll} + \frac{K_{ppv}}{C_{pdc} V_{pdc0}} \right)^2}{K_{ipll} K_{ppv} + K_{ppll} K_{piv}} \quad (28)$$

$$K_a = K_{ipll}^2 - \frac{K_{ipll} K_{ppv}^2 - K_{piv}^2}{C_{pdc}^2 V_{pdc0}^2} + \frac{K_{piv} K_{ppll}^2}{C_{pdc} V_{pdc0}} + \frac{2K_{ipll} K_{piv} \left( K_{ipll} - \frac{K_{piv}}{C_{pdc} V_{pdc0}} \right) \left( K_{ppll} + \frac{K_{ppv}}{C_{pdc} V_{pdc0}} \right)}{K_{ipll} K_{ppv} + K_{ppll} K_{piv}} \quad (29)$$

$$K_b = \frac{K_{ipll} K_{ppv} + K_{ppll} K_{piv} - K_{ppv} (K_{ipll}^2 + \omega_0^2 K_{ppll}^2)}{C_{pdc} V_{pdc0}} + \frac{K_{ipll} K_{piv} \left( K_{ipll} - \frac{K_{piv}}{C_{pdc} V_{pdc0}} \right)^2}{K_{ipll} K_{ppv} + K_{ppll} K_{piv}} - \frac{K_{ppll} (K_{piv}^2 + \omega_0^2 K_{ppv}^2)}{C_{pdc}^2 V_{pdc0}^2} \quad (30)$$

$$K_c = \frac{K_{ipll} (K_{piv}^2 + \omega_0^2 K_{ppv}^2) - \omega_0^2 K_{ppll} K_{piv} - K_{ipll}^2 K_{piv}}{C_{pdc} V_{pdc0}} \quad (31)$$

由于实际风电场中  $V_{n0} \approx 1$  p.u., 则根据式(26)进一步可得:

$$P_{n0} < P_{nmax} = \frac{H + 1 - |H - 1|}{2\lambda_n} \quad (32)$$

式中:  $P_{nmax}$  为系统稳定极限输出功率。

再由式(3)可得  $v = G(P) = f_p^{-1}(P)$ ,  $G$  为  $f_p$  的逆函数, 联立式(32), 可构造系统稳定风速极限  $v_{nmax}$ 。

$$v < v_{nmax} = G_n(P_{nmax}) = G_n \left( \frac{H + 1 - |H - 1|}{2\lambda_n} \right) \quad (33)$$

基于风电场动态等值模型的  $N$  个等效子系统的风速  $v \leq v_{nmax}$ , 则系统稳定, 若其中存在风速  $v > v_{nmax}$ , 则系统失稳。故只须确定  $N$  个系统的风速  $v < v_{max} = \min(v_{1max}, v_{2max}, \dots, v_{Nmax})$ , 则系统稳定。

由式(33)可知,  $v_{nmax}$  的值随  $\lambda_n$  的增大而减小, 当  $\lambda_n$  取风电场网络电抗矩阵  $X_M$  的最大特征值  $\lambda_{max}$  时, 确定  $P_{nmax}$  的最小值  $P_{max}$  和  $v_{nmax}$  的最小值  $v_{max}$ 。

将  $v_{max}$  结合式(1)可得风电场在此套参数设置和网络结构下的稳定概率  $p(v_{max})$ 。

$$p(v_{\max}) = \begin{cases} 1 - \int_{v_{\max}}^{\infty} \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) dv & v_r \geq v_{\max} \\ 1 & v_r < v_{\max} \end{cases} \quad (34)$$

由式(34)可知,若 $v_{\max}$ 大于风机额定风速 $v_r$ ,则风电场在任何工作风速下运行能够振荡稳定;反之,风电场概率振荡失稳。

由以上分析,在PMSG风电场中 $N$ 台PMSG动态特性相同的条件下,风电场在直流电压动态时间尺度下系统稳定风速极限以及风电场稳定概率的分析流程如下:

(1) 对含有 $N$ 台PMSG的大规模风电场进行动态等值,计算出风电场网络阻抗矩阵 $\mathbf{X}_M$ ,并得到其特征值 $\lambda_n (n=1,2,\dots,N)$ 以及最大特征值 $\lambda_{\max}$ ;

(2) 根据式(26)计算风机控制参数对应的指标 $H$ ,由于假设PMSG风电场各风机参数取值一致,故各动态子系统对应的 $H$ 取值相同;

(3) 根据式(33)计算系统稳定风速极限值 $v_{\max}$ 。若风机工作风速 $v < v_{\max}$ ,则在直流电压时间尺度下,风电场振荡稳定;否则,风电场振荡失稳,可进一步由式(34)求得在此工况下风电场的稳定概率。

## 4 算例分析

### 4.1 系统模型

文中风电场算例如图4所示,一个大规模风电场包含3个子风电场,其中风电场A包含100台PMSG,风电场B包含100台PMSG,风电场C包含60台PMSG,且所有PMSG来自同一厂家的同一型号风机。输电线路阻抗 $X_L$ 分别取0.1、0.15、0.06 p.u.。风机的额定输出功率为0.048 p.u.,且功率因数为1。外部电力系统为无穷大系统,在探究单个风电场时其余风电场等效为恒功率源。进行全阶模式分析时,采用文献[31]中PMSG模型和文献[32]中控制参数,并使PLL控制参数保持在直流电压时间尺度。文中使用MATLAB软件,通过编程进行仿真计算。

### 4.2 系统稳定风速极限理论验证

根据风机的功率特性表,使用最小二乘法拟合得到该风机功率特性曲线,如图5所示,风机功率特性的函数表达式为式(35)。

$$P = F(v) = \begin{cases} 0 & 0 < v \leq 4.5 \\ 10^{-5}(1.66v^3 + 25.5v^2 - 162.15v + 215.45) & 4.5 < v \leq 12 \\ 0.0476628 & 12 < v \leq 24.5 \\ 0 & 24.5 < v \end{cases} \quad (35)$$

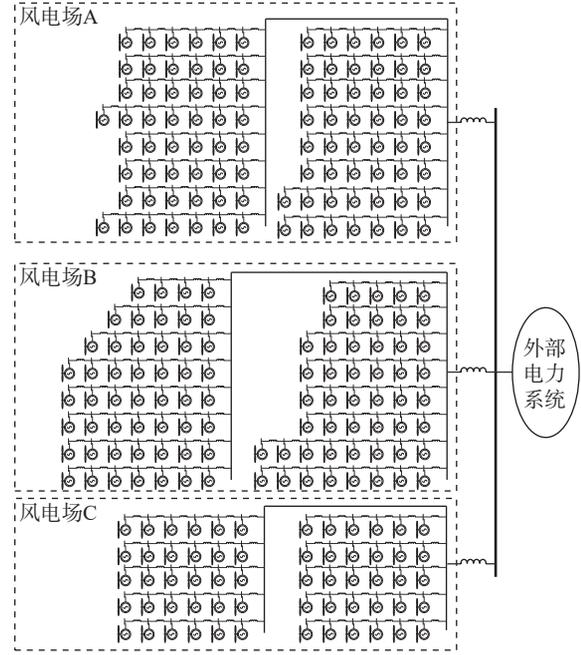


图4 PMSG风电场结构

Fig.4 Structure of PMSG wind farm

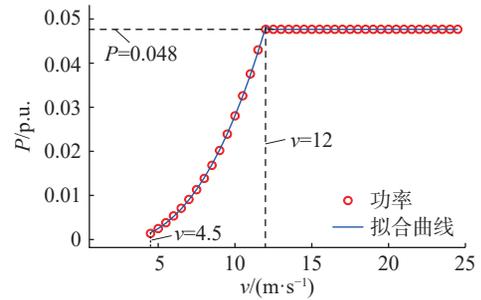


图5 风机功率特性曲线

Fig.5 Power characteristic curve of wind turbine

根据第3章的系统稳定判断流程,首先分别对风电场A、B、C进行动态等值。风电场内各风机为同一厂家同一型号,因此各风机参数可视为完全一致,进一步忽略各风机端口电压和潮流的细微差异,各风电场分别选择其风电场内首台风机作为代表风机,并由式(9)求得A、B、C风电场的最大等值阻抗 $\lambda_{\max 1} = 10.01$  p.u.、 $\lambda_{\max 2} = 15.01$  p.u.、 $\lambda_{\max 3} = 3.61$  p.u.。将各风电场首台风机的控制参数代入式(26),可进一步求得此参数下各风电场的运行参数指标 $H$ 为0.2123。再由式(32)和式(33)可求得A、B、C风电场的极限输出功率 $P_{\max 1}$ 、 $P_{\max 2}$ 、 $P_{\max 3}$ 和稳定风速极限 $v_{\max 1}$ 、 $v_{\max 2}$ 、 $v_{\max 3}$ 。

为验证理论方法的准确性,分别建立3个子风电场的全解模型,并计算其振荡模式。直流电压尺度下3个子风电场与PLL相关的振荡模式在复平面的分布见图6—图8。

由图6—图8可得,在直流电压尺度下,风电场

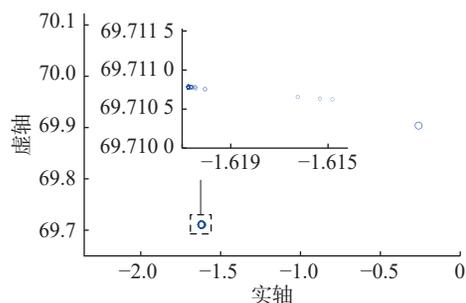


图6 风电场 A 振荡模式分布

Fig.6 Distribution of wind farm A oscillation modes

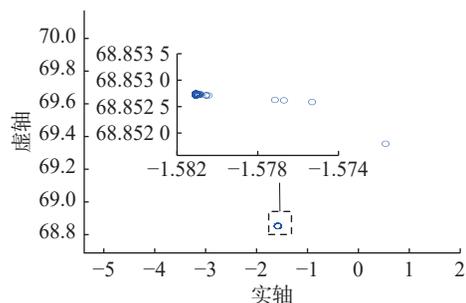


图7 风电场 B 振荡模式分布

Fig.7 Distribution of wind farm B oscillation modes

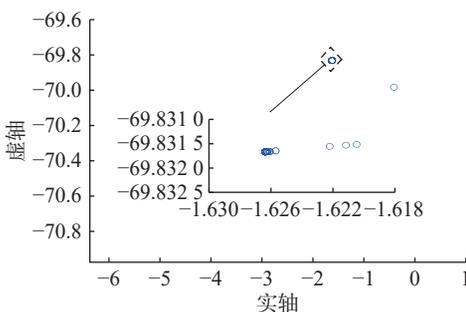


图8 风电场 C 振荡模式分布

Fig.8 Distribution of wind farm C oscillation modes

A 和 C 振荡模式稳定, 而风电场 B 有一对不稳定的振荡模式  $0.53 \pm j69.35$ , 除此对振荡模式外, 风电场 B 其余振荡模式皆稳定。

表 1 为 3 个子风电场输出有功功率  $P_0$  为 0.02 p.u. 时的运行风速  $v_0$ 、系统稳定极限输出功率和系统稳定风速极限, 以及模式分析法所得 PLL 和电压外环主导的振荡模式。

表 1 风电场运行结果  
Table 1 Wind farm calculation results

参数	A	B	C
$v_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	8.95	8.95	8.95
$v_{\max} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	9.12	8.02	12.86
$P_0 / \text{p.u.}$	0.02	0.02	0.02
$P_{\max} / \text{p.u.}$	0.021 2	0.014 2	0.058 8
PLL模式	$-0.26 \pm j69.9$	$0.53 \pm j69.4$	$-1.44 \pm j70.3$
电压外环模式	$-0.36 \pm j28.8$	$-0.55 \pm j27.5$	$-0.15 \pm j29.6$

由表 1 可知, 当风机运行速度  $v_0$  小于系统稳定风速极限  $v_{\max}$  时, 风电场振荡模式实部为负数, 系统稳定; 当风机运行速度  $v_0$  大于系统稳定风速极限  $v_{\max}$  时, 风电场振荡模式位于复平面右侧, 系统不稳定。

图 9 为风电场 A 振荡模式随风速增大的变化情况。可见, 风速增大, 振荡模式实部逐渐向复平面右侧移动。当运行风速  $v_0$  大于系统稳定风速极限  $v_{\max}$  时, 风电场振荡模式实部进入复平面右半部, 系统失稳。这证明了在风电场内部风机参数相同的条件下, 文中所提方法能够准确分析直流电压动态时间尺度下 PMSG 风电场小干扰稳定问题。

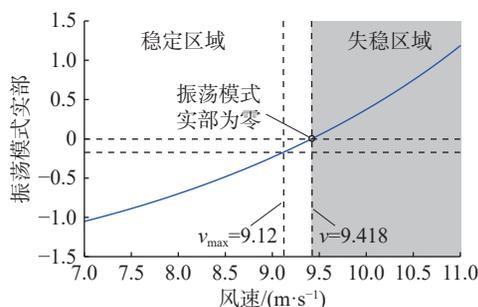


图9 风电场 A 振荡模式随风速变化

Fig.9 Wind farm A oscillation mode varies with wind speed

各子风电场的时域仿真如图 10 所示。时域仿真中小扰动设置为在 0.5 s 时因风速突减各风机输出功率降低 10%, 持续 0.2 s 后恢复。时域仿真结果与前文相对应, 进一步说明文中所推导理论的正确性。

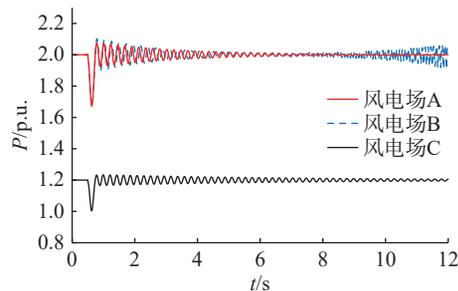


图 10 子风电场时域仿真

Fig.10 Time domain simulation of sub wind farms

### 4.3 系统稳定风速极限结论下的风电场稳定概率

表 2 为风机所在海域风机轮毂高度处全年风速分布情况。经过计算可得该海域的平均风速为 8.65 m/s, 标准差为 3.93 m/s, 形状参数  $k = 2.36$ , 尺度参数  $c = 9.76$  m/s。可得风速的 Weibull 分布方程式 (36), 该风电场风速 Weibull 分布拟合见图 11。

$$f(v) = 0.242 \left( \frac{v}{9.76} \right)^{1.36} \exp \left( - \left( \frac{v}{9.76} \right)^{2.36} \right) \quad (36)$$

将表 1 中系统稳定风速极限  $v_{\max}$  代入式 (34),

表 2 风电场风速分布

Table 2 Wind speed distribution in wind farms

风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	小时数	风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	小时数
0	43.8	13	420.5
1	87.6	14	367.9
2	262.8	15	280.3
3	350.4	16	175.2
4	525.6	17	113.9
5	700.8	18	64.8
6	779.6	19	32.4
7	884.8	20	26.3
8	928.6	21	13.1
9	814.7	22	7.9
10	692.0	23	2.6
11	639.5	24	0.9
12	543.1	25	0.9

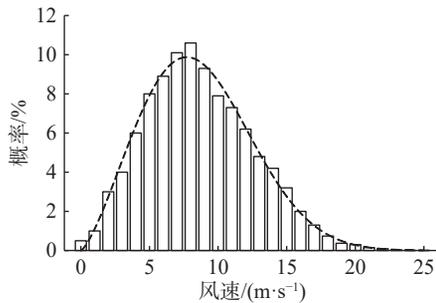


图 11 Weibull 分布拟合

Fig.11 Weibull distribution fitting

结合式(36)可得各子风电场的稳定概率,具体见表3。

表 3 风电场稳定概率

Table 3 Probability of wind farm stability

参数	A	B	C
$v_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	9.12	8.02	12.86
$P_{\max}/\text{p.u.}$	0.021 2	0.014 2	0.058 8
额定功率/p.u.	0.048	0.048	0.048
稳定概率/%	57	47	100
失稳概率/%	43	53	0

由表3可得,风电场A和B的系统稳定风速极限均小于风机额定风速(12 m/s),稳定概率分别为57%和47%,则风电场A和B会出现概率失稳,失稳概率分别为43%和53%。风电场C的稳定风速极限大于风机额定风速,风电场C不会失稳。图12为风速由7 m/s逐渐变化到12 m/s,各风电场由全阶模型模式分析法所得振荡模式在复平面上的分布。风电场A和B振荡模式随风速增加逐渐移动到失稳区域,且系统稳定风速极限理论计算得到的振荡模式临界稳定点和全阶模型模式法分析得到的临界稳定点近似相同;风电场C在风速变化过程

中始终保持稳定。可得风电场的稳定概率随稳定风速极限 $v_{\max}$ 的增大而增加。

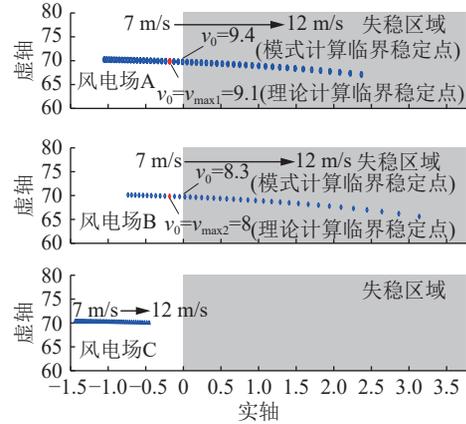


图 12 风电场振荡模式随风速变化

Fig.12 Variation of wind farm oscillation mode with different wind speed

可见,由配置同一套参数的同型号风机组成的风电场,其风电场内风机数量、拓扑、外送输电线路电抗皆有所不同,导致由式(9)所得 $\lambda_{\max}$ 不尽相同,风电场稳定风速极限亦不尽相同。故在风电场规划时,计算风电场稳定风速极限有利于规避风电场振荡失稳风险,对风电场建设有重大意义。

#### 4.4 风电机组控制参数稳定域

现分析风机 PLL 和直流电压外环参数在直流电压时间尺度下对风电场稳定性的影响。在风电场结构、外送输电线路电抗值、以及风机台数不变的前提下,调节风电场 A 的风机 PLL 和直流电压外环参数,系统稳定风速极限变化如图 13 所示。可见, $K_{\text{ppll}}$ 增大、 $K_{\text{ipll}}$ 减小、 $K_{\text{ppv}}$ 增大、 $K_{\text{piv}}$ 增大时,系统稳定风速极限 $v_{\max}$ 逐渐增大,系统稳定性逐渐提高。当稳定风速极限 $v_{\max}$ 大于风机额定风速时,风电场在任意工作风速下均能够稳定运行。

为验证图 13 及其所得结论的正确性,使风机处于额定风速下,调节 PLL 和直流电压外环参数,风电场 A 全阶模式分析如图 14 所示。当 $K_{\text{ppll}}$ 增大、 $K_{\text{ipll}}$ 减小、 $K_{\text{ppv}}$ 增大、 $K_{\text{piv}}$ 增大时,振荡模式实部逐渐减小,系统稳定性逐步提高。风电场 A 使用全阶模型通过模式分析法所求振荡模式与理论计算系统稳定风速极限 $v_{\max}$ 变化趋势相同。

图 15 给出了图 13 和图 14 所求 PLL 和直流电压外环参数在直流电压时间尺度内的稳定域。图 15 中红色虚线表征随 PLL 和直流电压外环参数变化系统稳定风速极限 $v_{\max}$ 等于额定风速 $v_r$ ;蓝色实线表征全阶振荡模式实部为 0。根据模式分析理论,振荡模式实部为正时,系统存在失稳风险。在图 15

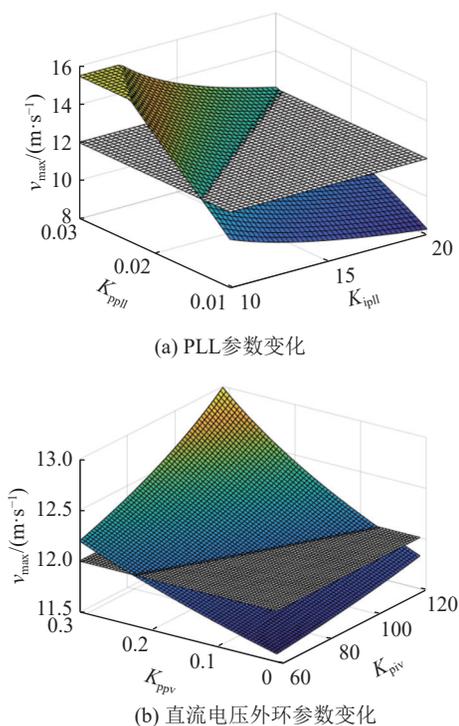


图 13 风速极限随 PLL 和直流电压外环参数变化  
Fig.13 Variation of wind speed limit with the parameters of the PLLs and the DC voltage outer loops

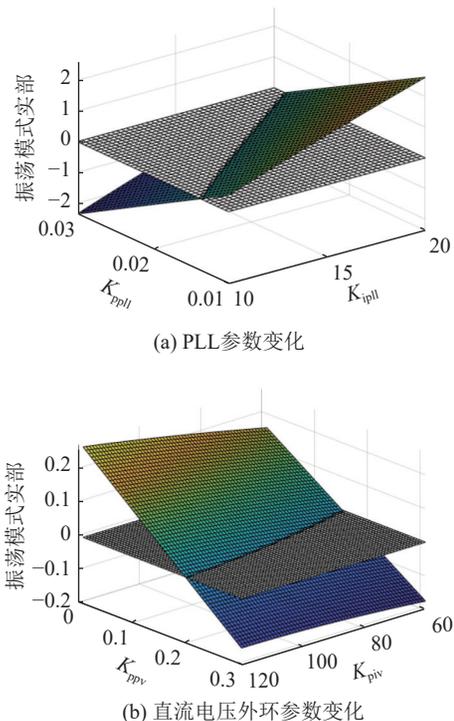


图 14 振荡模式实部随 PLL 和直流电压外环参数变化  
Fig.14 Variation of the real part of the oscillation mode with the parameters of the PLLs and the DC voltage outer loops

中选取  $u$ 、 $t$ 、 $w$ 、 $z$  4 个点, 控制参数互不相同, 运行风速分别取 9 m/s 和 12 m/s 时的时域仿真如图 16 和图 17 所示, 其故障设置与前文相同。额定风速下时域仿真结果与图 13 和图 15 中参数稳定域分

析结果一致, 当控制参数位于  $v_{\max} > v_r$  区域内时, 系统振荡稳定; 反之, 当控制参数位于  $v_{\max} < v_r$  区域内时, 系统受到小扰动后振荡失稳。图 15 中额定风速下的参数不稳定区域中的  $t$  点和  $z$  点, 在风速为 9 m/s 时, 系统却稳定。由上述算例可得, 不同风速下参数稳定域不尽相同, 为保证风电场在任意工作风速下的稳定运行, 应分析额定风速下的参数稳定域, 以判断风机控制参数的合理性。

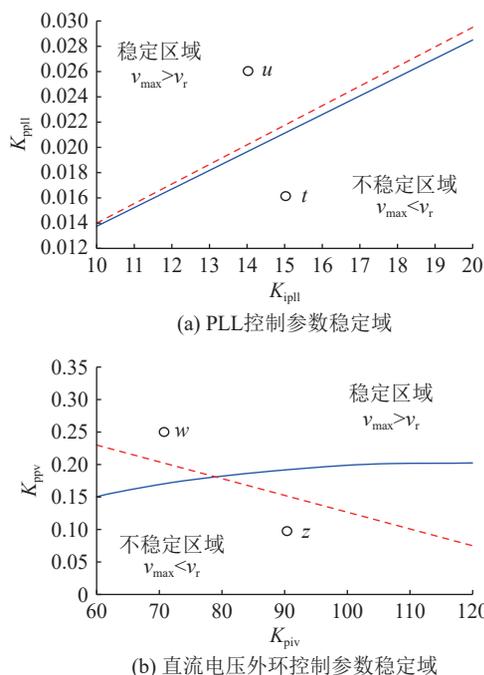


图 15 PLL 和直流电压外环参数稳定域  
Fig.15 Stability region of PLL and DC voltage outer loop parameters

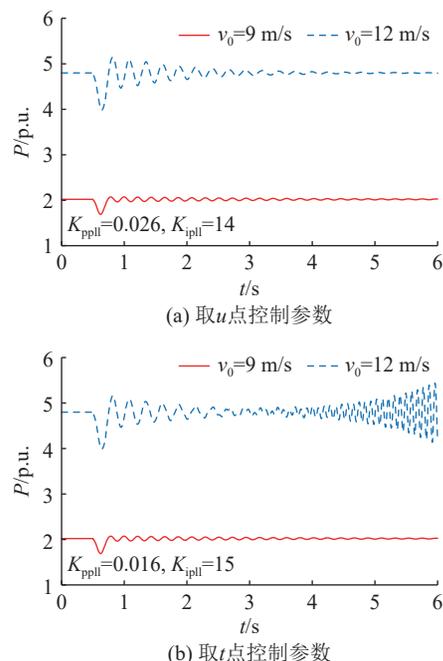


图 16 PLL 控制参数变化时域仿真  
Fig.16 Time domain simulation with variation of PLL parameter

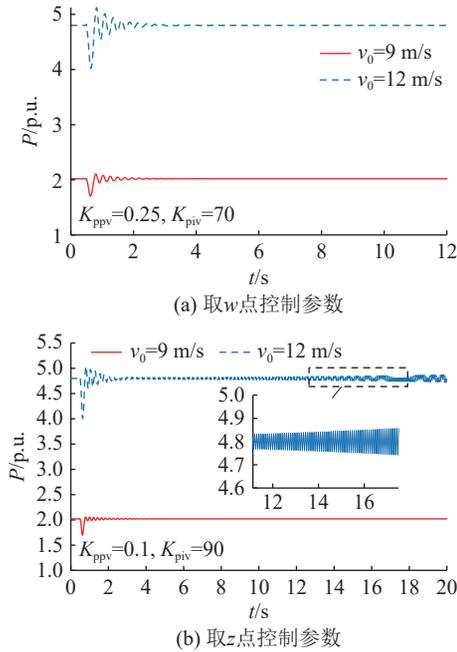


图 17 直流电压外环参数变化时域仿真

Fig.17 Time domain simulation with variation of DC voltage external loop parameter

## 5 结论

文中针对风机出力变化条件下并网 PMSG 风电场在直流电压时间尺度下的小干扰稳定问题, 推导出一种在风速不确定条件下的并网 PMSG 风电场稳定性判据, 并进一步计算风电场稳定概率。主要结论如下:

(1) 基于劳斯-赫尔维茨判据提出系统稳定风速极限, 在直流电压时间尺度内能够准确表征不同风速下并网 PMSG 风电场的小干扰稳定性, 且风电场失稳风险随风速增加而增加。

(2) 配置同一套参数的同型号风机组成的风电场, 其风电场内风机数量、拓扑、外送输电线路电抗皆有所不同, 风电场稳定风速极限亦不尽相同, 其稳定概率亦不尽相同, 且风电场稳定概率随系统稳定风速极限的增大而增加。

(3) 系统稳定风速极限随 PLL 比例参数的增大、PLL 积分参数的减小、电压外环比例参数的增大和电压外环积分参数的增大而增大, 分析额定风速下的控制参数稳定域, 以保证风电场在任意工作风速下的稳定性。

### 参考文献:

[1] 张超, 王维庆, 邱衍江, 等. 大规模风电并网地区次同步谐波检测方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2194-2202.  
ZHANG Chao, WANG Weiqing, QIU Yanjiang, et al. Detection method of subsynchronous harmonic in regions with large scale wind power paralleled in grid[J]. High Voltage Engineer-

ing, 2019, 45(7): 2194-2202.

- [2] 姜齐荣, 王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7185-7201.  
JIANG Qirong, WANG Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7201.
- [3] 任蓓蕾, 郭昆丽, 蔡维正, 等. 基于改进线性自抗扰控制器的直驱风机次同步振荡抑制及阻抗稳定性分析[J]. 发电技术, 2024, 45(6): 1135-1145.  
REN Beilei, GUO Kunli, CAI Weizheng, et al. Subsynchronous oscillation suppression of direct-drive wind turbines based on improved linear active disturbance rejection control and analysis of impedance stability[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(6): 1135-1145.
- [4] 王进钊, 严干贵, 刘侃. 基于交替方向隐式平衡截断法的直驱风电场次同步振荡分析的模型降阶研究[J]. 发电技术, 2023, 44(6): 850-858.  
WANG Jinzhao, YAN Gangui, LIU Kan. Research on model reduction of direct drive wind farm subsynchronous oscillation analysis based on alternating direction implicit balanced truncation method[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(6): 850-858.
- [5] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4732.  
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4732.
- [6] DU W J, WANG X B, WANG H F. Sub-synchronous interactions caused by the PLL in the grid-connected PMSG for the wind power generation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 98: 331-341.
- [7] 方天治, 黄淳, 陈乃铭, 等. 一种提高弱电网下 LCL 型并网逆变器鲁棒性的相位超前补偿策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(20): 4813-4822.  
FANG Tianzhi, HUANG Chun, CHEN Naiming, et al. A phase-lead compensation strategy on enhancing robustness of LCL-type grid-tied inverters under weak grid conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4813-4822.
- [8] 邵冰冰, 赵书强, 高本锋, 等. 多直驱风机经 VSC-HVDC 并网系统场内/场网次同步振荡特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3835-3847.  
SHAO Bingbing, ZHAO Shuqiang, GAO Benfeng, et al. Inside-wind-farm/wind-farm-grid sub-synchronous oscillation characteristics analysis in multiple D-PMSGs interfaced with VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3835-3847.
- [9] 陈平, 杜文娟. 基于新能源下混合风电场不同类型风机动态特

- 性相似环节引起的振荡风险研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(12): 114-124.
- CHEN Ping, DU Wenjuan. Study on the oscillation risk caused by similar dynamic characteristics of different types of wind turbines in hybrid wind farms based on new energy[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(12): 114-124.
- [10] 黄肖琪, 周羽生, 周文晴, 等. 基于储能和无功优化的直驱机组海上风电场低电压穿越策略[J]. 电测与仪表, 2024, 61(7): 57-64.
- HUANG Xiaoqi, ZHOU Yusheng, ZHOU Wenqing, et al. Low voltage ride through strategy of the D-PMSG offshore wind power farm based on energy storage and reactive power optimization[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(7): 57-64.
- [11] 张天翼, 杜文娟, 陈晨, 等. 弱连接条件下并网直驱风电场引发无串补电力系统次同步共振机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5875-5885.
- ZHANG Tianyi, DU Wenjuan, CHEN Chen, et al. A mechanism investigation on SSTOs in power systems without series compensated lines induced by PMSG wind farms under the condition of weak grid connection[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(18): 5875-5885.
- [12] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395.
- YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395.
- [13] HUANG Y H, WANG L Y, ZHANG S D, et al. Impacts of phase-locked loop dynamic on the stability of DC-link voltage control in voltage source converter integrated to weak grid[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2022, 12(1): 48-58.
- [14] 吴广禄, 周孝信, 王姗姗, 等. 柔性直流输电接入弱交流电网时锁相环和电流内环交互作用机理解析研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2622-2633, 2830.
- WU Guanglu, ZHOU Xiaoxin, WANG Shanshan, et al. Analytical research on the mechanism of the interaction between PLL and inner current loop when VSC-HVDC connected to weak grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(9): 2622-2633, 2830.
- [15] WANG D, LIANG L, SHI L, et al. Analysis of modal resonance between PLL and DC-link voltage control in weak-grid tied VSCs[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(2): 1127-1138.
- [16] 席云烽, 唐超, 黄云辉, 等. 风电接入弱送端柔直系统次同步振荡主导模式及参与因子分析[J]. 电测与仪表, 2024, 61(12): 125-132.
- XI Yunfeng, TANG Chao, HUANG Yunhui, et al. Dominant mode and participation factor analysis of sub-synchronous oscillation of wind power connected to weak transmission end of the flexible HVDC system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(12): 125-132.
- [17] FAN L L, MIAO Z X. An explanation of oscillations due to wind power plants weak grid interconnection[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(1): 488-490.
- [18] DU W J, WANG Y J, WANG H F, et al. Small-disturbance stability limit of a grid-connected wind farm with PMSGs in the timescale of DC voltage dynamics[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 2366-2379.
- [19] 李光辉, 王伟胜, 刘纯, 等. 直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(一): 宽频带阻抗特性与振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6547-6562.
- LI Guanghui, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Mechanism analysis and suppression method of wideband oscillation of PMSG wind farms connected to weak grid (part I): analysis of wideband impedance characteristics and oscillation mechanism[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(22): 6547-6562.
- [20] DU W J, WANG Y J, WANG Y, et al. Analytical examination of oscillatory stability of a grid-connected PMSG wind farm based on the block diagram model[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(6): 5670-5683.
- [21] 王一珺, 王海风. 直流电压动态时间尺度下大规模直驱风电场振荡稳定性及参数稳定域分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 92-107.
- WANG Yijun, WANG Haifeng. Analysis of oscillation stability and parameter stability region of large-scale direct-drive wind farm under DC voltage dynamic time scale[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(S1): 92-107.
- [22] 熊昊然, 程杉. 基于二元指数多项式的风速风向联合概率分布[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 207-213.
- XIONG Haoran, CHENG Shan. Joint probability distribution of wind speed and direction based on binary exponential polynomial[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(2): 207-213.
- [23] 李蕊, 闫涛, 王铭, 等. 基于栈式自编码器和 Softmax 判别分类器的风速短期概率预测[J]. 供用电, 2023, 40(3): 79-85.
- LI Rui, YAN Tao, WANG Ming, et al. Short-term probabilistic prediction method of wind speed based on SAE-SDC[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(3): 79-85.
- [24] 李军, 胡非, 王丙兰, 等. 风速的 Weibull 分布参数[J]. 太阳能学报, 2012, 33(10): 1667-1671.
- LI Jun, HU Fei, WANG Binglan, et al. Weibull parameters for wind speed[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2012, 33(10): 1667-1671.
- [25] 杨金明, 吴捷, 杨俊华, 等. 风力发电技术探讨[J]. 太阳能, 2003(3): 13-15, 11.
- YANG Jinming, WU Jie, YANG Junhua, et al. On wind electric power generation technology[J]. *Solar Energy*, 2003(3): 13-15, 11.
- [26] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追

- 踪控制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 62-67.
- LIU Qihui, HE Yikang, ZHAO Rende. The maximal wind-energy tracing control of avariable-speed constant-frequency wind-power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 62-67.
- [27] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- YE Hangye. Control technology of wind turbine[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [28] 辛焕海, 董炜, 袁小明, 等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6013-6027.
- XIN Huanhai, DONG Wei, YUAN Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027.
- [29] DU W J, WANG Y J, WANG H F, et al. Reduced-order method for detecting the risk and tracing the sources of small-signal oscillatory instability in a power system with a large number of wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1563-1582.
- [30] 代晓峰, 付强, 杜文娟, 等. 计及直驱风机差异性的并网风电场次同步频段小干扰稳定性[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2743-2756.
- DAI Xiaofeng, FU Qiang, DU Wenjuan, et al. Small disturbance stability of grid-connected wind farms in sub-synchronous frequency band considering difference of PMSGs[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2743-2756.
- [31] LI S H, HASKEW T A, SWATLOSKI R P, et al. Optimal and direct-current vector control of direct-driven PMSG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2325-2337.
- [32] DU W J, REN B X, WANG H F, et al. Comparison of methods to examine sub-synchronous oscillations caused by grid-connected wind turbine generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4931-4943.

作者简介:



袁国富

袁国富(1997), 男, 硕士, 研究方向为新能源电力系统稳定分析与控制(E-mail: ygf711@qq.com);

杜文娟(1979), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制;

王海风(1960), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制等。

## Analysis of small signal stability in direct-drive wind farm under wind power generation variations

YUAN Guofu, DU Wenjuan, WANG Haifeng

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The small-signal stability problem of large-scale grid-connected wind farms consisting of permanent magnet synchronous generators (PMSGs) under wind power variations is addressed in this paper, with focus placed on the DC-link voltage timescale. A stability criterion for grid-connected PMSG-based wind farms under uncertain wind speed conditions is proposed based on the Routh-Hurwitz criterion. Firstly, a Weibull distribution model for wind speed is established, along with a power characteristic model of the PMSG and a dynamic equivalent state-space model of the large-scale wind farm, in which the DC-link voltage control loop and the phase-locked loop (PLL) are incorporated. Secondly, the stability probability of the wind farm is calculated, and the influence mechanisms of wind speed distribution, DC-link voltage outer loop control parameters, and PLL control parameters on the small-signal oscillation stability of the wind farm at the DC-link voltage timescale are thoroughly investigated. Finally, the correctness of the theoretical derivation is validated by modal analysis and time-domain simulations through a case study of a large-scale grid-connected wind farm comprising 260 wind turbines distributed across three sub-wind farms. It is found that the risk of wind farm instability is increased with wind speed, while the stability probability of the wind farm is enhanced as the system's critical stable wind speed is raised. The relevant conclusions can be provided as a basis for the planning of large-scale PMSG-based wind farms.

**Keywords:** direct-drive wind farms; small-signal stability; DC voltage time scale; DC voltage outer-loop; phase-locked loop (PLL); Weibull distribution

(编辑 方晶)