

基于 Routh 法和最小二乘法的 分布式风电机组变速恒频控制

贺昆^{1†}, 潘小雷², 孟庆超², 侯坤², 张伟², 王江东²

(1. 兰西晟晖发电有限公司, 黑龙江 绥化 152000; 2. 北京京能国际控股有限公司东北分公司, 吉林 长春 130117)

摘 要: 风电机组在运行时会受到风速的影响, 难以保持最佳的运行状态, 导致控制性能不理想, 输出功率较低。对此, 提出了基于 Routh 法和最小二乘法的分布式风电机组变速恒频控制方法。计算风电机组的输出功率, 构建风电机组功率-转速方程, 分析其运行状态, 在 Routh 法的作用下, 利用传递函数构建风电机组运行状态的特征方程, 再生成 Routh 判据, 并建立 Routh 表, 对风电机组的稳定性进行判断。以风电机组稳定性和最大输出功率为目标, 设定目标函数和约束条件, 构建风电机组变速恒频控制模型, 利用最小二乘法求解分布式风电机组变速恒频控制参数。实验结果表明, 该方法在实际应用中能够在风速变化下使输出功率上升幅度最大达到 102.3%, 风能利用率为 94.15%, 控制鲁棒性较好。

关键词: Routh 法; 最小二乘法; 分布式风电机组; 变速; 恒频; 控制; 发电机

中图分类号: TM614

文献标识码: A

Distributed Wind Turbine Variable Speed Constant Frequency Control Based on Routh Method and Least Squares Method

HE Kun^{1†}, PAN Xiaolei², MENG Qingchao², HOU Kun², ZHANG Wei², WANG Jiangdong²

(1. Lanxi Shenghui Power Generation Co., Suihua, Heilongjiang 152000 China;

2. Beijing Jingneng International Holdings Co., Ltd., Northeast Branch, Changchun, Jilin 130117, China)

Abstract: Wind turbines are affected by wind speed during operation, making it difficult to maintain optimal operating conditions, resulting in suboptimal control performance and the low output power. A distributed variable speed constant frequency control method for wind turbines based on Routh method and least squares method is proposed. Calculate the output power of the wind turbine, construct the power-speed equation of the wind turbine, analyze its operating status, use the transfer function under the Routh method to construct the characteristic equation of the wind turbine operating status, generate the Routh criterion, and establish the Routh table to judge the stability of the wind turbine. Targeting the stability and maximum output power of wind turbines, setting objective functions and constraints, constructing a variable speed constant frequency control model for wind turbines, and using the least squares method to solve the distributed variable speed constant frequency control parameters of wind turbines. The experimental results show that this method can increase the output power by up to 102.3% under wind speed changes in practical applications, with a wind energy utilization rate of 94.15% and good control robustness.

Key words: Routh method; least squares method; distributed wind turbines; variable speed; constant frequency; control; alternator

传统定速恒频风电机组在风速变化时,难以保持最优的运行状态,导致风能利用效率低下,且对电网稳定性产生不利影响。为此,变速恒频风电机组应运而生,其能够调节发电机的转速,在不同风况下保持稳定的输出功率,有效提高风能的转换效率,也保证了电网的运行稳定与安全。然而,现有的变速恒频控制方法难以适应复杂多变的电网条件,导致其控制性能较差。

因此,在该研究背景下,国内外不少研究学者对此展开了研究,并提出了自己的观点。刘颖明等提出了基于塔架主动阻尼控制的控制方法^[1],先构建风电机组的转矩—转速模型,设计一个塔架主动阻尼控制环,结合量子遗传算法对变速系统的控制参数进行优化,通过计算塔架侧向主动阻尼增益值,结合适应度函数,基于迭代计算,选择最优的控制参数组合实现对风电机组的有效控制。该方法在选择控制参数的过程中,需要考虑多方面的因素,导致控制参数的调整与优化较为困难,影响到控制方法的控制性能。蔡葆锐等提出了基于惯性/下垂控制的控制方法^[2],针对不同类型的变速型风电机组运行特性展开分析,计算其动态响应能力、功率调节范围等参数,引入虚拟惯性对系统的控制参数进行优化,在下垂控制的基础上,根据系统频率的偏差和变化率调节下垂系数,设计自适应下垂控制算法,将其与惯性控制相结合,生成风电机组的频率协调控制策略。该方法在设计时,未考虑不同风速对风电机组控制的影响,导致方法的控制性能不足。胡正阳等提出了控制方法^[3],先分析电机在不同状态下的响应特性,再构建相应电机状态模型,并对电机的双向支撑能力进行评估,以系统频率稳定性为控制目标,计算电机组的最优惯量支撑水平,结合电机组自身的运行状态,动态调整惯量支撑,引入自适应增益,实现对电机组的动态控制。电机系统运行过程中的风速是实时变化的,设计的控制方法很难对这种实时变化做出及时的响应,导致该方法的控制性能需要进行提升。钟鸣等提出了基于线性二次型积分调节器的控制算法^[4],建立风电机组的线性化模型和状态空间模型,结合集成干扰自适应控制器,设计线性二次型积分调节器并构建权重矩阵,利用滤波器对风电机组的状态进行估计,通过估计结果对风电机组的状态进行实时调整。该方法设计的调节器过于依赖权重矩阵的设置,导致其对控制参数的辨识限于局部最优,影响该方法的控制输出功率。

为了解决现有方法控制性能不足、输出功率较

低的问题,设计了基于 Routh 法和最小二乘法的分布式风电机组变速恒频控制方法。本研究通过 Routh 法分析控制系统的稳定性,可以为控制策略的设计提供可靠的数学基础,确保控制系统的稳定运行。利用最小二乘法进行系统参数的辨识和模型优化,可以显著提高控制策略的鲁棒性,使风电机组在不同风速和电网条件下都能保持最优的运行状态。此外,本研究将推动分布式风电机组变速恒频控制技术的发展,为风电行业的可持续发展提供有力支持。

1 分布式风电机组变速恒频控制方法设计

1.1 分布式风电机组稳定影响相关特性分析

利用 SCADA 系统采集风电机组的各项运行参数,如风速、空气密度等,对这些参数对风电机组运行稳定影响进行相关分析,并将其用于后续设计与分析^[5]。

针对处理后的数据,分析分布式风电机组的运行状态。由于风能自身具有不稳定的特性,风电机组在不同运行速度下的输出功率不同^[6],为此,需寻找风电机组的最佳运行速度,提高风电机组的运行效率。在这个过程中,需要先对不稳定系统条件下影响风电机组运行输出功率特性的影响因素进行相关性分析。建立模型,分析风速、空气密度对风能输出功率的相关影响^[7]。其具体计算式如下所示。

$$\begin{cases} P_f = \frac{1}{2} C_p A_p \rho_f v_k^3 \\ C_p = \frac{\omega_c R_k}{v_k \beta_c} \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_f 表示风电机组捕捉的风能,即风电机组的输出功率, C_p 表示风电机组在运行过程中的能量输出系数, A_p 表示风电机组叶片的扫动面积, ρ_f 表示空气密度, v_k 表示当前时刻的风速, ω_c 表示风电机组叶片的转动角速度, R_k 表示风电机组叶片的长度, β_c 表示风电机组桨与风叶之间的距离角。由上式可知,能量输出系数、叶片的扫动面积、空气密度、风速等均对输出功率存在影响。

式(1)计算的 P_f 能够反映风电机组的功率情况,以此为基础,构建风电机组功率—转速的方程,从而分析转速与功率的相关关系^[8]。得到的风电机组功率—转速方程如下所示。

$$P_f^* = \sum_{f=1}^T P_f \frac{\bar{\omega}_f^2 \times (h_c + t_c)}{m_k} \quad (2)$$

式中, P_f^* 表示风电机组在一段时间内输出的

总功率， ω_f 表示风电机组的转速， h_c 表示风电机组的惯性参数， t_c 表示风电机组的调节参数， m_k 表示风电机组的最佳平衡点， T 表示风电机组的运行时间。

根据式(2)中构建的风电机组功率—转速方程，分析风电机组的运行状态^[9]，为后续对风电机组状态进行评估奠定基础。

1.2 基于 Routh 法的风电机组变速恒频控制模型构建

根据式(2)建立的风电机组功率—转速方程，利用传递函数，建立特征方程，再利用 Routh 法对风电机组运行状态的稳定性进行判断^[10]。建立的风电机组特征方程如下所示：

$$\begin{cases} G(s) = \frac{k_s \times \prod_{i=1}^m (s_a + s_i)}{\prod_{j=1}^m (s_a + s_j)} \\ T^* = P_f^* \times G(s) \end{cases} \tag{3}$$

式中， $G(s)$ 表示传递函数， k_s 表示常数增益参数， s_a 表示增益复变量， s_i 表示特征初始点， s_j 表示特征极点， T^* 表示特征方程。

利用 Routh 法生成 Routh 判据^[11]。生成的判据如下所示：

$$D(s) = s_a^n + a_{n-1}s_a^{n-1} + \cdots + a_1s_a + a_0 \tag{4}$$

式中， $D(s)$ 表示基于特征方程的 Routh 判据， $a_{n-1}, a_{n-2}, \cdots, a_1$ 表示判断系数。

由此生成对应的 Routh 表具体如下所示：

$$\begin{cases} s_a^{n-1} & \cdots & s_a^2 & s_a \\ a_{n-1} & \cdots & a_2 & a_1 \\ b_1 & \cdots & b_{n-2} & b_{n-1} \end{cases} \tag{5}$$

式中， b_1, b_{n-2}, b_{n-1} 分别表示 Routh 表中的判断参数。

依据生成的 Routh 表对风电机组的运行稳定性进行判断，若 Routh 表中的第一列元素均大于 0，则风电机组当前处于稳定状态，反之，则处于不稳定状态，需要对风电机组进行调控^[12]。

在该过程中，需要设定控制目标函数。本次研究中，以风电机组稳定性与最大输出功率为控制目标设定相应的目标函数^[13]。其设定的控制目标函数如下所示。

$$\begin{cases} J_m = \alpha_w J_w + \alpha_g J_g \\ J_w = D(s) \times T^* \\ J_g = \max P_f^* \end{cases} \tag{6}$$

式中， J_m 表示设定的控制目标函数， J_w 表示运行稳定性参数， J_g 表示额定输出功率， α_w, α_g 分

别表示不同控制目标对应的权重系数。
在考虑风电机组稳定性的基础上，设定相应的约束条件如下所示。

$$\begin{cases} v_{\min} \leq v_k \leq v_q \\ \omega_{\min} \leq \omega_f \leq \omega_{\max} \\ P_f \leq P_t^{\max} \\ \beta_{\min} \leq \beta_c \leq \beta_{\max} \end{cases} \tag{7}$$

式中， $v_{\min}$ 表示启动风电机组的最低风速， v_q 表示风电机组最高启动风速， $\omega_{\min}$ 表示桨叶最低转速， $\omega_{\max}$ 表示桨叶转动最高速度， $P_t^{\max}$ 表示风电机组所能输出的最大功率， $\beta_{\min}, \beta_{\max}$ 分别表示桨距角所能达到的最小值和最大值。

结合式(6)和式(7)，构建风电机组变速恒频控制模型，为实现对风电机组的变速恒频控制奠定基础。

1.3 基于最小二乘法的风电机组变速恒频控制模型求解

将构建的风电机组变速恒频控制模型作为基础，利用最小二乘法，最优化求解各项参数，捕捉到其中最优参数解。将其应用到风电机组变速恒频控制模型求解中，能够对控制模型中的参数进行进一步辨识，并寻找到最优的模型参数组合^[14-15]，从而得到控制模型的最优解。基于最小二乘法的风电机组变速恒频控制模型求解的具体过程如图 1 所示。

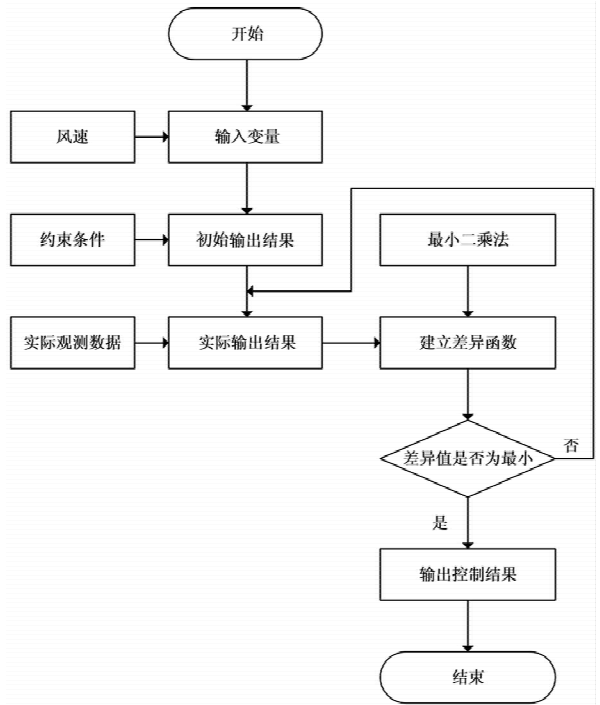


图 1 基于最小二乘法的控制模型迭代优化求解流程

如图 1 所示,最小二乘法的迭代优化求解流程如下:

首先,将风速作为输入变量,输入到目标函数,结合约束条件,得到初始的输出结果。

其次,将初始输出结果与实际的输出结果进行对比,利用最小二乘法,计算初始输出结果与实际输出结果之间的差异值,如下所示:

$$f_z = \min \sum_{i=1}^K (p_i - J_m^*)^2$$

(8)

式中, f_z 表示基于最小二乘法构建的差异值最小函数, p_i 表示工况实际值, J_m^* 表示目标函数的初始输出值。

再次,通过多次迭代,筛选输出结果之间的差异值最小的结果,作为最优的输出结果,将其作为控制结果输出。其输出的控制结果如下所示:

$$J'_m = f_z + J_m \times h_c$$

(9)

式中, J'_m 表示控制模型的求解结果, h_c 表示控制模型的求解函数。

最后,利用该公式,实现对风电机组的变速恒频控制,有效控制风电机组的转速,确保其发电效率和发电质量。至此,基于 Routh 法和最小二乘法的分布式风电机组变速恒频控制方法的设计完成。

2 实验测试

设计了对比实验,其中,本文设计的控制方法为方法 1,基于塔架主动阻尼控制的风电机组变速控制参数优化策略研究中的控制方法为方法 2,基于惯性/下垂控制的变速型风电机组频率协调控制方法为方法 3。为对比三种方法在实际应用中的效果,设计的对比实验如下。

以某区域的风力发电系统为研究对象,该系统包含多组风电机组,系统的额定功率为 3 MW,额定输出电压为 700 V,系统频率为 70 Hz。该风力发电系统的具体结构如图 2 所示。

如图 2 所示,该风电机组的启动风速为 5 m/s,最高启动风速为 20 m/s,额定输出功率为 1000 kW。

在该风力发电系统的基础上,利用数据采集器实时采集该系统中风电机组的运行数据,并将采集到的运行数据进行整理和分析。利用 MATLAB 软件构建仿真环境,由此展开仿真实验。

实验参数如表 1 所示。

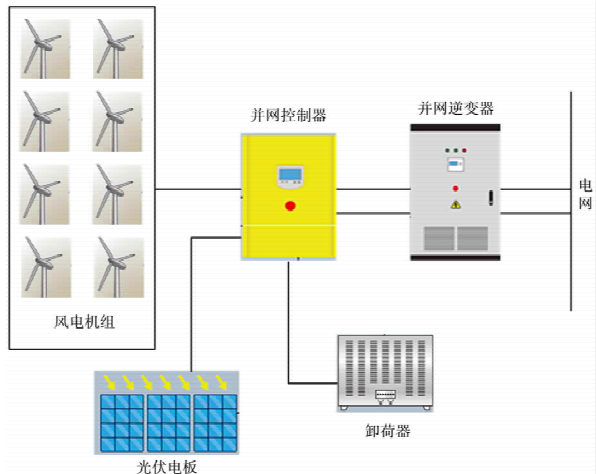


图 2 某风力发电系统的具体结构

表 1 实验参数

实验参数		参数设置
Routh 法参数	常数增益参数 k_s	2.45
	特征初始点 s_i	0.2
最小二乘法参数	迭代次数	50 次
	学习率	0.01
	收敛精度	0.01
系统采样率		100 Hz
实验周期		4 h
模型响应时间		0.01 ms

利用本文设计的方法采集风电机组的运行数据,统计风电机组在一段时间内的启动风速及输出功率相关性关系,具体如图 3 所示。

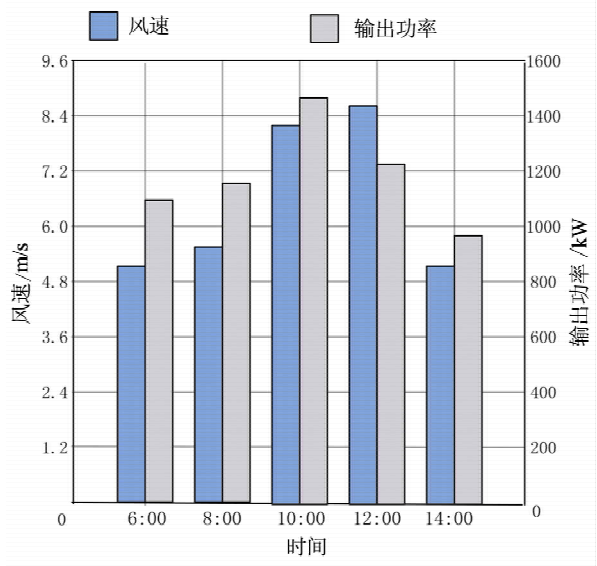


图 3 风电机组的风速及输出功率

如图 3 所示,随着风电机组的启动风速增加,

风电机组的输出功率不断增加。当风电机组的启动风速达到一个数值后,其输出功率则不会增加,反而会下降。这为后续的风电机组变速恒频控制的开展奠定基础。

为了测试本文方法控制准确性和鲁棒性,基于上述不同风速条件下,利用三种方法对该风电机组进行变速恒频控制。通过对比控制前后相同时间内风电机组的输出功率,验证本文方法的控制准确性和鲁棒性。三种方法的控制结果如表 2 所示。

表 2 三种方法的控制结果

风电机组编号	控制前功率/kW	方法 1/kW	方法 2/kW	方法 3/kW
#001	458.6	845.7	654.2	566.2
#002	443.2	866.5	674.1	544.1
#003	475.1	874.4	687.2	557.4
#004	482.6	853.6	647.1	566.2
#005	471.2	845.9	657.8	587.4
#006	462.3	866.1	632.1	511.5
#007	489.7	882.2	654.4	524.8
#008	496.6	874.5	624.5	563.4
#009	481.5	874.4	674.1	547.4
#010	520.5	894.6	612.5	595.4
#011	499.5	881.4	621.4	524.4
#012	502.3	847.5	674.4	521.2

如表 2 所示,与控制前的输出功率相比,利用方法 1 进行控制后,风电机组的输出功率大幅上升,上升幅度最大达到了 102.3%,说明本文方法能够实时响应风速变化,获得最优控制参数,准确控制机组输出功率,控制性能较好。方法 2 和方法 3 虽然也让风电机组的输出功率得到了上升,但其上升幅度远低于方法 1,控制性能较差。

为进一步验证上述三种方法在实际应用中的效果,以风能利用率为评价指标,对比三种方法的控制性能。具体的统计结果如图 4 所示。

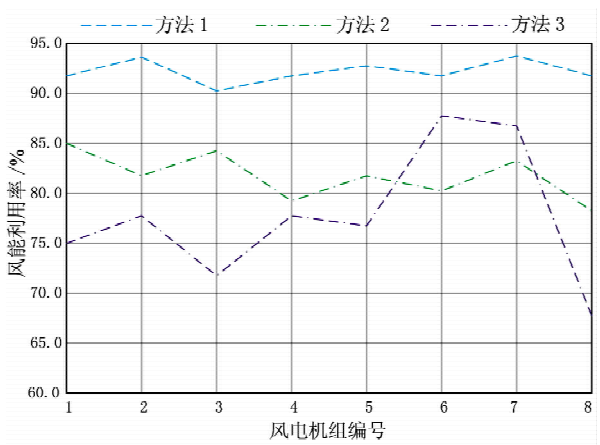


图 4 三种方法的风能利用率

如图 4 所示,利用方法 1 对多组风电机组进行控制,控制后的风电机组风能利用率均得到了提高,平均风能利用率为 94.15%,高于其余两种方法。因此,本文设计的方法在实际应用中控制性能较好。

3 结 论

本文通过 Routh 法,使得控制策略更加精准地适应环境变化,优化风能捕获效率,为风电机组在复杂多变的风况下持续稳定运行提供了坚实的理论基础。不仅提升了风电机组的整体性能,还为增强风能利用率、降低运行成本提供新思路。

参考文献

[1] 刘颖明,张书源,王晓东. 基于塔架主动阻尼控制的风电机组变速控制参数优化策略研究 [J]. 太阳能学报, 2023, 44 (10): 296—305.

[2] 蔡葆锐,杨蕾,黄伟. 基于惯性/下垂控制的变速型风电机组频率协调控制方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (15): 169—177.

[3] 胡正阳,高丙团,张磊,等. 风电机组双向支撑能力分析与自适应惯量控制策略 [J]. 电工技术学报, 2023, 38 (19): 5224—5240.

[4] 钟鸣,崔寅,付晓艺. 基于线性二次型积分调节器的风电机组功率载荷协同变桨控制 [J]. 内蒙古电力技术, 2023, 41 (5): 81—87.

[5] 王宇焱,邱晓燕. 考虑加快电网频率恢复的风电机组自适应虚拟惯性控制策略 [J]. 可再生能源, 2023, 41 (4): 514—521.

[6] 陈浚俊,耿光超,江全元. 基于储能的风电机组故障电压穿越自适应协调控制 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (7): 158—165.

[7] 海涛,何山,袁至,等. 基于改进转子转速和桨距角协调控制的变速风电机组一次调频策略 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43 (9): 87—94.

[8] 盛四清,占志刚,吴林林,等. 考虑频率二次跌落的风电机组调频控制研究 [J]. 太阳能学报, 2023, 44 (8): 485—491.

[9] 赵平,倪世杰,黄宇昕,等. 海上风电柔性直流系统与风电机组协调控制策略 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35 (8): 62—70.

[10] 辛悦,彭乔,刘天琪,等. 基于周期性最大功率点检测的风电机组功率备用控制方法 [J]. 电力自动化设备, 2024, 44 (2): 103—109+116.

[11] 雷航,刘河生,张瑞刚,等. 基于单纯形法的风电机组独立变桨控制技术研究及仿真 [J]. 热力发电, 2023, 52 (3): 144—150.

[12] 李臻博,代林旺,李少林,等. 双馈风电机电压源电流源双模式运行平滑切换控制策略 [J]. 电气传动, 2022, 52 (22): 13—20.

[13] 刘其辉,洪晨威,逢思敏,等. 基于弹性系数的双馈风电机组控制参数对次同步振荡作用分析及调整方法 [J]. 电工技术学报, 2022, 37 (14): 3528—3541.

[14] 曾雪洋,张纯,王顺亮,等. 基于减载系数变化的风电机组一次调频控制 [J]. 电力自动化设备, 2022, 42 (8): 119—125+139.

[15] 李少林,王伟胜,张兴,等. 基于频率响应区间划分的风电机组虚拟惯量模糊自适应控制 [J]. 电网技术, 2021, 45 (5): 1658—1665.