

# 大型风力发电机偏航系统控制策略 研究现状及展望

沈小军 杜万里

(同济大学电子与信息工程学院电气工程系 上海 200092)

**摘要** 偏航系统控制策略直接决定着风力发电系统的经济效益。本文在介绍偏航系统工作原理的基础上,把风力发电机偏航系统控制策略分为重启对风策略和执行对风策略,并分别评述了研究现状。分析结果表明当前业界的研究热点主要集中于偏航系统执行对风策略方面,偏航系统重启对风策略新的研究开展较少。文中在量化分析偏航系统实际运行数据、风电场风速风向实测数据及风电机组功率曲线的基础上,指出传统的偏航系统重启对风策略存在过多将偏航系统寿命消耗在低风速区的不足,影响了偏航系统寿命周期综合经济效益;偏航系统重启对风策略制定需综合考虑风电场实际风能特征、风电机组发电功率特征等因素,研究能实现偏航系统动作寿命的高效利用的新型重启对风策略具有重要的价值,值得关注。

**关键词:** 风力发电机 偏航系统 控制策略 经济运行

**中图分类号:** TM315

## Expectation and Review of Control Strategy of Large Wind Turbines Yaw System

Shen Xiaojun Du Wanli

(Tongji University Shanghai 200092 China)

**Abstract** Yaw system control strategy directly determines the economic benefits of wind power system. According to the operational principle, yaw system control strategy is divided into reboot tracing wind strategy and implement tracing wind strategy, and research status is reviewed separately. Analysis results show that current research hotspot is implement tracing wind strategy of yaw system, but new research on the reboot tracing wind strategy of the yaw system is less. Based on quantitative analysis results of yaw system real operation data, field wind source data and power curve of wind turbine, this paper points out that the traditional reboot tracing strategy of yaw system has the defect of the more lifetime of yaw system consumed in low wind speed segment, and influences comprehensive benefit of yaw system life cycle; formulating yaw system reboot wind tracing strategy should comprehensive consider wind farm wind source characteristics and wind turbine power generation characteristic, and there is great value that carried out new reboot wind tracing strategy to realize the efficient utilization of the yaw system operation life and should be concerned.

**Keywords:** Wind turbines, yaw system, control strategy, economic operation

## 1 引言

风能因其巨大的蕴藏量、可再生、分布广、绿色无污染等诸多优点,在世界范围内得到了广泛重

视<sup>[1,2]</sup>。风能的高效利用依赖于风电机组对风向的高效追踪。偏航系统是实现风电机组快速精准有效对风,避免风能损失的执行机构,是水平轴风力发电机不可或缺的关键部件;对于大型风力发电机,当偏航系统追风功能丧失后,风电机组必须停机<sup>[3]</sup>。

偏航系统性能的直接决定着风电机组的安全性

和经济性。风能独特的随机性、间歇性、塔影效应、反调峰特性对偏航系统的控制策略提出了很高要求。本文在介绍偏航系统工作原理的基础上，概述了偏航系统控制策略研究现状，结合实际运行数据，讨论了传统偏航系统控制策略存在的局限性。

## 2 偏航系统工作原理

偏航系统又称对风装置，一般由偏航驱动装置、偏航传动装置、偏航制动器、偏航计数器、风速风向计、偏航轴承、纽缆保护装置等组成。偏航系统一般可分为主动偏航系统和被动偏航系统，其中被动偏航系统是依靠风力通过相关机构完成机组对风动作的偏航方式，主要用于小型风机；大型风机一般采用主动偏航，主动偏航系统功能框图与工作过程如图 1 所示<sup>[4,5]</sup>。

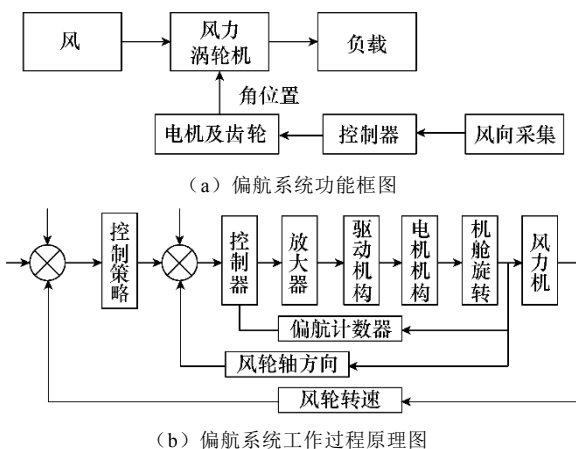


图 1 偏航系统功能框图与工作过程

Fig.1 Yaw system function diagram and working process

偏航系统工作过程如下：风速风向传感器作为感应元件将风向的变化用电信号传输到偏航电机控制回路控制器中，控制处理器经过比较判断发出偏航命令到偏航电机，偏航电机通过偏航齿轮箱、减速器与调向小齿轮带动偏航大齿轮运动，机舱随之运动，当对风动作完成后，风向风速传感器失去电信号，偏航电机停止工作，偏航制动器锁紧，偏航过程结束。

## 3 偏航系统控制策略研究现状

偏航系统高效精确的追风与其控制策略是密不可分的，因此，先进的偏航系统控制方法及策略研究是当前的研究热点和焦点。

风力发电机主动偏航是偏航控制器通过风向传

感器的输出信号来控制偏航动作。当风向变化超过设定允许范围时，偏航控制器便会发出偏航指令控制偏航电机带动偏航大齿圈执行偏航校正动作，使机舱准确对风，以获取最大发电功率。研究者认为偏航系统追风策略应分为两个层面：①偏航系统什么工况下应该重启对风；②满足重启对风条件后如何高效准确地实现对风。典型的主动偏航系统控制策略如图 2 所示。

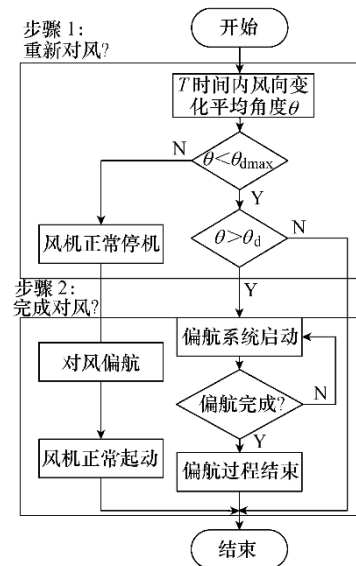


图 2 大型风力发电机偏航系统控制策略流程

Fig.2 Control strategy flow of large wind Turbines yaw system

### 3.1 偏航系统重启对风策略

文献资料检索与现场调研结果表明，大型风电机组偏航系统重启对风策略较为简单，主要采用简单的偏航误差角  $\theta$  和时延阈值  $T$  整定予以判断，当对风误差角  $\theta$  大于整定阈值  $\theta_d$ ，且持续时间  $T$  大于  $T_d$  时，则启动重新对风，以追求全风速段的 MPPT 和理论最大发电量为目标。现场绝大部分风力发电机重启对风策略中偏航误差角  $\theta$ 、时延  $T$  参数整定未区分风速，覆盖可利用风速全段；只有少部分风电机组对可利用风速段分高、低两级风速分别进行差异化参数整定。

### 3.2 偏航系统执行对风策略

文献资料检索分析结果表明风电机组偏航系统完成对风策略的研究受到了广泛关注，取得了诸多研究成果，代表性的研究成果有：

#### 3.2.1 基于爬山算法的偏航系统控制策略

爬山控制算法通过采用递归调用方式逐步提高风电机组的输出功率以使输出功率趋近最大输出功率，并被用于风机的输出功率检测。该算法提供了

一个框架来分析和描述解决离散优化问题的启发式算法，它是一种局部择优的方法，是对深度优先搜索的一种改进算法，从收敛结果和与其他算法相比这两方面可以来评估该算法的性能<sup>[6]</sup>。爬山算法从当前的节点开始，和周围的邻居节点的值进行比较。如果当前节点最大，那么返回当前节点作为最大值，反之就用最高的邻居节点替换当前节点，从而实现到最高点目的。

偏航系统采用的爬山算法通过控制功率并采用递归调用的方式逐步提高输出功率，追踪使输出功率逼近最大输出功率  $P_{\max}$ 。为了达到期望的最大输出功率值，需连续测量合适时间间隔内的发电机输出电压和电流，求出风机输出功率值，并将所测量得到的功率值与上一时刻测量值进行比较，取功率大的测量值作为新功率值，不断寻找最大输出功率点，直至达到最大功率。偏航电机的旋转方向由前后功率值比较决定，功率变大电机正转，反之，偏航控制器控制电机反转。此外，为了防止偏航电机频繁启停造成不必要的损耗，从经济的角度需设定一个对应偏航电机启停判断操作的给定输出功率阈值。爬山算法下的偏航系统控制策略如图 3 所示<sup>[7]</sup>。其中， $\Delta P$  为两次功率测量值之差； $P_{\text{ref}}$  为参考功率值。

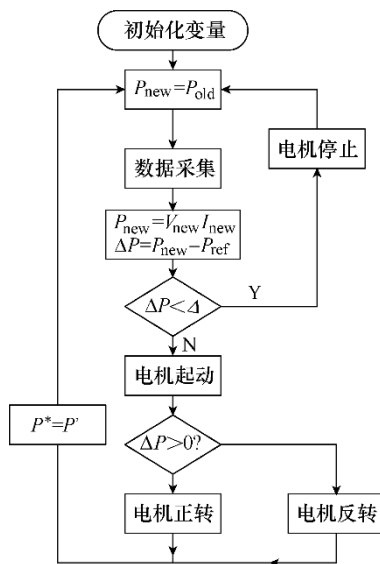


图 3 基于爬山算法的偏航系统控制策略流程图

Fig.3 Control strategy flow chart of yaw system based on hill climbing algorithm

### 3.2.2 基于 VHC 算法的偏航系统控制策略

VHC 算法能搜索偏航过程中风机输出功率的最大值，能在功率监测误差的范围内提高机舱对风精度。风向标 VC 控制算法适用于大范围的风向变化，

它无需对风向判断便可直接给出风的变化方向，而且对于风向变化是鲁棒的。但风向标控制算法的风向判断会在  $\pm 15^\circ$  内失效，需要采用其他算法或策略继续进行偏航控制。因此，当风向变化绝对值大于  $15^\circ$  时，偏航控制器进行风向标 VC 控制。当与风向角度差缩小到  $15^\circ$  内时，偏航电机继续旋转直至机舱旋转  $5^\circ$ ，而后的  $3^\circ$  转而进行 HC 算法控制。如果功率变化值大于功率差值给定值，继续进行偏航，否则，结束偏航动作。

当风向变化绝对值大于设定偏航起始而小于  $15^\circ$  时，偏航控制器则直接根据功率变化进行功率控制。若功率变化小于功率差值给定值，不进行偏航动作。反之，功率变化超出功率差值给定值，则控制偏航电机逆时针转过  $5^\circ$ 。如果风向变化绝对值仍然小于  $15^\circ$ ，则继续进行以下操作，否则进行按照前段上段进行控制。

如果功率变化变小，说明偏航方向正确，继续在原偏航方向上进行功率算法偏航控制，直至功率变化值小于给定允许值。如果功率变化变大，则控制偏航电机顺时针转过  $5^\circ$ ，如果功率变化变大，说明功率变化是风速变化引起的，偏航电机不再旋转。否则，在原方向上继续进行偏航控制，直至功率变化小于功率差值给定值。

基于风向标和输出功率的偏航控制策略流程图如图 4 所示<sup>[8]</sup>。其中： $V_d$  为风向； $P^*$  为功率给定值；

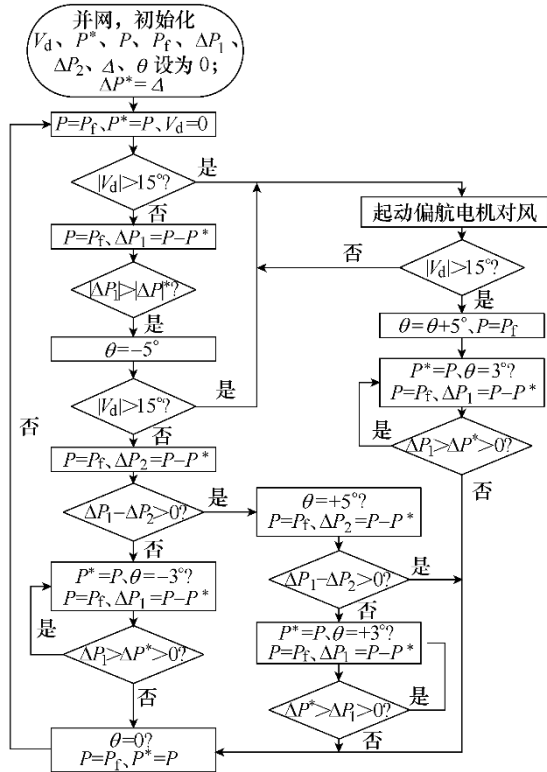


图 4 基于风向标和输出功率的偏航控制策略流程图  
Fig.4 Control strategy flow chart of yaw system based on vane and output power

$P$  为中间变量;  $P_f$  为检测得到的瞬时功率反馈值;  $\Delta P_1$ 、 $\Delta P_2$  为风速或风向变化时的功率变化值;  $\Delta P^*$  为功率差值给定值;  $\Delta$  为  $\Delta P^*$  某常量赋值;  $\theta$  为偏航电机旋转角度。

3.2.3 基于 KHC 算法的偏航系统控制策略

功率检测算法在小范围风向变化时能够在一定程度上实现精确对风, 但仍会带来风向在极小范围变化时以及干扰情况下偏航系统频繁动作的不足, 这会使得偏航系统主要部件磨损严重, 降低部件可靠性, 缩短了偏航结构的使用年限, 降低了偏航系统的综合效益。因此 KHC 算法在以爬山法为核心的基础上, 同时采用了优化卡尔曼滤波算法。

卡尔曼滤波算法工作原理为 [9]: 通过短时采样, 获取风速参数, 包括  $[v(n), v(n+k)]$  与对应角度, 得到风的摇摆范围为

$$\theta_s(n+k) = 2 \arcsin \left( \frac{v_{\max} - v_{\min}}{v_{\max} + v_{\min}} \right) \quad (1)$$

然后采用动态阻尼系数  $\xi(n+k)$  通过预测调节

$$\xi(n+k) = K \ln \left( \frac{\theta(n+k) - \theta_{av}(n+k)}{200} + 1 \right) \quad (2)$$

式中,  $\theta_{av}(n+k)$  为  $[n, \dots, n+k]$  时间内的样本均值; 参数  $k$  为修正比例系数。

则预测结果为

$$\begin{cases} \theta(n+k) = \theta_0(n+k) + \xi(n+k)\theta_m(n+k) \\ \theta_m(n+k) = \frac{v_{\min}}{v(n+k)} \\ \theta_0(n+k+1) = \theta(n+k+1) - \xi(n+k+1) \times \theta_m(n+k) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\theta_0(n+k)$  为系统实际角度;  $\theta_m(n+k)$  为系统最大偏航角;  $\theta_0(n+k+1)$  为由  $n+k$  时的结果与  $n+k+1$  时的风速得到的目标角度。

通过采用卡尔曼滤波的方法, KHC 偏航系统控制策略能够利用短时间内风向在一定范围内连续性变化的特性, 使偏航系统既能够准确预测、自适应跟踪风向, 避免了偏航机构的频繁动作。通过预测偏航系统目标角度, 能够优化偏航系统运作性能, 提高系统的稳定性、可靠性与对风的准确性。

3.2.4 PIDNN 偏航系统控制策略

PIDNN 控制策略基于 CPSO 算法, 此算法是对随机合作粒子群算法 (CRPSO) 的一种改进算法 [10]。CRPSO 算法包含了多个子群, 采用随机方式在子群中选择每个子群的最优位置用于粒子速度与位置的更新 [11]。CPSO 算法综合了 CRPSO 算法与 PSO 算法的优点, 不仅能使用其他子群最优位置, 而且还保留了子群自身的最优位置, 保持了粒子的多样性并提高了算法的收敛速度。该算法在粒子进化过程中考虑了更多的信息, 使系统的全局搜索和局部搜索能力得到平衡, 易于发现全局最优值, 使得偏航系统的鲁棒性得到增强 [12]。PIDNN 控制策略将偏航电机与矢量控制部分以及三相逆变附加电路视为整体被控对象并加以控制, PIDNNC-I 控制系统简化框图如图 5 所示。

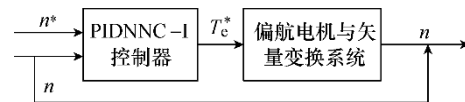


图 5 PIDNNC-I 控制系统简化框图  
Fig.5 Simplified block diagram of PIDNNC-I control system

控制系统的 PIDNNC-I 控制器包括 PIDNNI 辨识器、PIDNNC 控制器、以及积分控制器。PIDNNI 辨识器用于完成了 NARMA 模型近似模型 NARMA-L2 的参数辨识 [13]; PIDNNC 控制器可由辨识后再经由代数变换得到。PIDNNC-I 控制策略在大范围误差跟踪时采用 PIDNNC 控制, 在小范围

误差跟踪时采用 PIDNNC 和积分的合成控制，以提高控制系统的鲁棒性与控制精度。

3.2.5 基于模糊控制算法的偏航系统控制策略

偏航系统的模糊控制能够对输入信息进行模糊化处理，并制定出模糊控制规则，一般包括模糊控制器的设计、模糊规则库的建立、模糊状态表的建立、模糊控制查询表的建立等步骤 [14]。模糊控制器的系统方框图如图 6 所示。

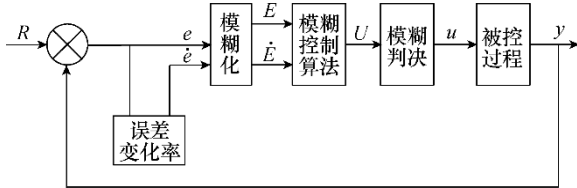


图 6 模糊控制器系统流程图

Fig.6 Block diagram of fuzzy controller system

除去单一的模糊控制，把模糊控制与传统 PID 控制器相结合也是偏航系统常见的控制策略。该控制策略能将模糊控制与 PID 各自的优点综合在一起，并能相互补充彼此存在的不足，更好的完善偏航系统的追风性能，比较常见的将模糊控制与 PID 控制结合在一起的方法有 PID-Fuzzy 分段复合控制和 Fuzzy-PID 合成控制等方法。

PID-Fuzzy 分段复合控制方法是通过 PID 控制与模糊控制分段切换来实现偏航系统控制。偏航系统工作开始阶段会预先进行判断，如果检测到的反馈值与系统的给定值之间的偏差大于设定的阈值，利用模糊控制良好的动态性能，减少超调；如果偏差减小到阈值给定值往下，则切入 PID 控制，以减少系统稳态误差 [15]。由于模糊控制能有效消除偏航系统中的超调和振荡，并且快速响应系统的变化，同传统的 PID 控制器相比，将模糊控制与 PID 相结合分段控制的方案，使得偏航系统具有更好的追踪性能，改善了系统的性能。

Fuzzy-PID 的控制结构组成包括常规 PID 和模糊控制器两部分。它的核心部分是组模糊规则，通过模糊推理、模糊关系合成等运算，获得控制量。它的功能方框图如图 7 所示 [16]。其中  $e$  为偏差； $ec$  为偏差变化率。

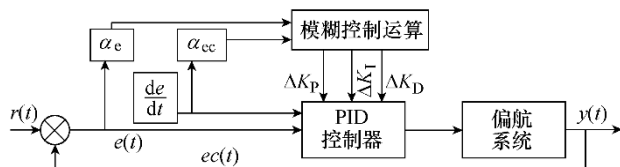


图 7 Fuzzy-PID 控制系统结构图

Fig.7 Diagram of Fuzzy-PID control system

通过对偏差以及偏差变化率集合赋值，便可建立模糊规则库，进而建立模糊状态表与模糊状态查询表。同 PID-Fuzzy 控制分段相比，Fuzzy-PID 复合控制具有在偏航系统控制方面有着更优越的表现，对于提高偏航系统的稳定性与鲁棒性有着重要意义 [17]。

3.2.6 基于人工神经内分泌免疫调节的偏航系统控制策略

神经内分泌免疫系统是一种存在于生物体的复杂调节系统，它是一种多维立体网络机构，并协调互相检查。人工神经内分泌免疫系统算法包括当前偏差算法、偏差处理算法、主控制参数优化算法、参数优化遗传算法 [18]。

基于人工神经内分泌免疫调节的偏航控制策略在研究偏航控制的基础上，提出了基于生物学信息处理机制的网络优化控制模型，并分析研究了生物神经内分泌免疫调节控制，用“风偏离单元”和“风偏差处理单元”模拟机体免疫系统，“控制单元”模拟生物内分泌系统，“优化单元”模拟生物神经系统，并建立自适应偏航追踪最大功率神经网络，实现对偏航系统的精确有效控制。人工神经内分泌免疫偏航控制系统的结构如图 8 所示。其中  $\epsilon$  为风向偏差。

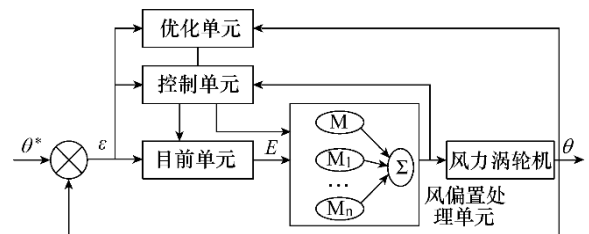


图 8 基于人工神经内分泌免疫的偏航系统控制结构图

Fig.8 Control structure diagram of yaw system

based on artificial nerve endocrine immune

风偏差单元以及风偏执处理单元的性能由控制单元调整，优化单元根据遗传算法优化处理单元和控制单元的参数。

4 讨论与展望

偏航系统新型控制算法与控制策略的运用，在很大程度上完善了偏航系统的追风性能，对提高风电系统的发电量及发电效率和延长调向组件的寿命均发挥了重要的作用。由第 3 节可知，当前业界对

偏航系统的控制策略研究主要集中在第二层次，即如何能使机组快速精确实现对风，而对第一层面关于偏航系统重启对风策略研究较少，未引起足够的重视。

风电场实际运行数据统计结果表明，风电机组的偏航系统的动作是非常频繁的，如图 9 是中国南方某海岛风场五年偏航系统动作次数统计。由图 9 可知偏航系统动作次数最少的已达到近 170 次/天，最多的已达到 380 多次/天。笔者对张北风电基地某陆上风电场风电机组的偏航次数统计结果平均也达到近 200 次/天。

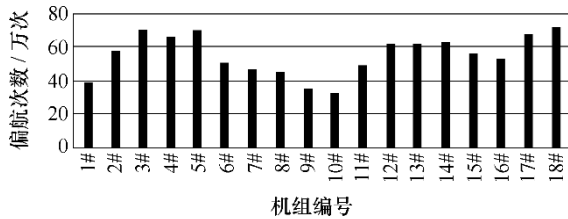
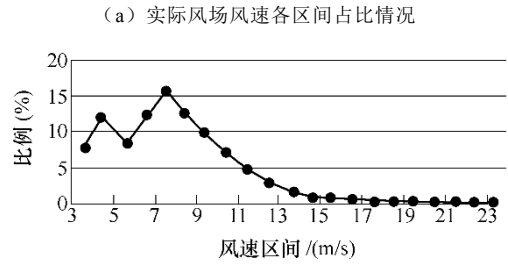
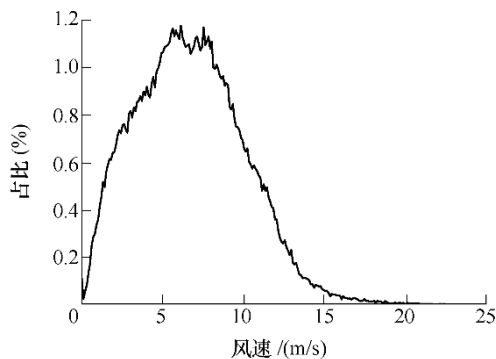


图 9 某海上风场五年偏航运行数据统计图  
Fig.9 Statistical diagram of an offshore wind farm five years yaw operation data

风力发电机组偏航过程中会产生陀螺力矩等问题，频繁启停会对偏航系统和与其关联的其它部件造成损伤，影响风机系统的稳定运行。统计表明风力发电机偏航系统常见故障有齿轮断裂、回转支撑故障、振动噪声、偏航计数器故障、偏航过载、偏航位置故障、左右偏航反馈丢失、偏航位置传感器故障等<sup>[19,20]</sup>。上述故障不但缩短了偏航系统的使用寿命，加重了工作人员繁重工作量，并且由于故障发生、故障检修与故障消除过程中需机组长时间停运，产生极大的运行维护费用和发电损失，从而降低了风电机组运行周期内的综合经济效益。

再者，风场风速是变化的，并且低风速区与中风速区占比较大，高风速区所占比例较小，如图 10 是张北某风场的实际风速与偏航动作次数分布统计情况。



(a) 实际风场风速各区间占比情况  
(b) 各风速区间内偏航次数占比情况  
图 10 张北某风场的实际风速与偏航动作次数分布  
Fig.10 Actual wind speed and yaw motion frequency distribution of one wind farm in zhangbei area

由图 10 可知，小风时刻风向变化频繁，大风时刻风向变化则相对缓慢稳定，在低风速区与中风速区偏航次数很多，而在高风速区占比却相对较小。鉴于中、低风速的占比大，而风力机输出机械功率满足式 (4)

$$P_{V_{max}} = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 C_p V^3 \quad (4)$$

式中  $\rho$ ——空气密度；  
 $R$ ——风轮半径；  
 $C_p$ ——风能利用系数；  
 $V$ ——风速。

假设  $C_p$  为定值，则风力机输出机械功率增长可表达为

$$\begin{cases} \Delta P = \frac{|(V + \Delta v)^3 - (V)^3|}{V_{manfa}^3} P_{额定功率} \\ \Delta P = 0 \quad V \geq V_{manfa}, V < V_{ongrid} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\Delta P$ ——风速  $V$  增加  $\Delta V$  时的功率输出增量；  
 $V_{manfa}$ ——满发风速；  
 $V_{ongrid}$ ——并网风速。

由式 (5) 可知风力机输出功率在不同风速区间增长不同，具有在中风速区间增速极快，而在低风速区风速增长极为缓慢，在高风速区功率保持不变的特点，如图 11 所示。

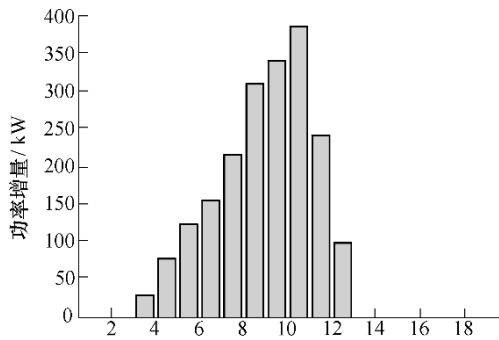


图 11 风速增加 1m/s 所对应输出功率增长示意图

Fig.11 Power output growth diagram corresponding to wind speed increase of 1m/s

可见,若能提出新的偏航系统重启对风策略,在不增加偏航系统动作次数的情况下,减少功率输出增长较慢风速区间内的偏航次数,增加功率增长迅速风速区间内的偏航次数,实现如图 12 所示的偏航系统寿命转移和分配,增加风电机组的经济效益是值得期待的,也是具有工程价值的。

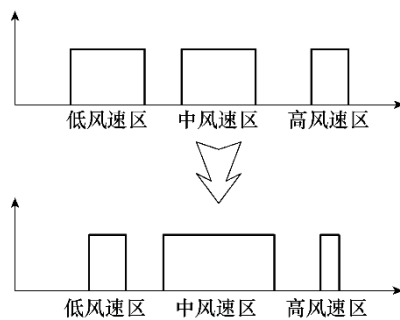


图 12 偏航系统寿命转移示意图

Fig.12 Schematic diagram of yaw system life transition

综上所述,既有的偏航系统重启对风策略对风能特征的处理相对简单,容易将偏航系统寿命消耗在低风速区,不利于实现偏航系统寿命周期综合经济效益优化。考虑偏航系统频繁启停动作所带来的机电损耗、机械寿命损失等因素,结合风电场实际风资源分布以及风电机组出力特性,从偏航系统全寿命周期经济效益最优的角度研究偏航系统重启对风控制策略具有重要的理论意义和工程价值,值得深入研究。

## 5 结论

偏航系统是风力发电关键部件,其控制策略直接决定着风力发电系统的经济效益。智能化、复合化的对风控制策略有效地提升了偏航系统追踪风向变化的性能。现有偏航系统重启对风控制策略以追

求理论风能利用力和发电量为目标,未考虑风力发电系统寿命周期经济效益最优的问题。风向变化规律与风速大小作为风场风能资源测量与分析的两个重要方面,同时也应是偏航系统对风行为控制过程中的关键变量,从寿命周期角度研究偏航系统重启对风策略是值得研究的。笔者初步的研究结果已表明结合风电机组出力特性,采用多级阈值策略,增大中速区间的风能利用率,不仅能有效降低偏航系统总动作次数,还能不降低总发电量,具有显著的经济效益。

## 参考文献

- [1] Ling S, Yongjun G, Zuwen W, et al. Design of large-scale wind power yawing bearing test-bed control system[C]. IEEE International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), 2011: 319-323.
- [2] Denny E, O'Malley M. Wind generation, power system operation, and emissions reduction [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 341-347.
- [3] 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.
- [4] Kojabadi H M, Chang L, Boutot T. Development of a novel wind turbine simulator for wind energy conversion systems using an inverter-controlled induction motor [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(3): 547-552.
- [5] Zhang Y, Ula S. Comparison and evaluation of three main types of wind turbines[C]. IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008: 1-6.
- [6] Jacobson S H, Yücesan E. Analyzing the performance of generalized hill climbing algorithms [J]. Journal of Heuristics, 2004, 10(4): 387-405.
- [7] 李晓燕, 王志新. 风力机偏航控制策略及系统设计 [J]. 微计算机信息, 2007, 23(25): 1-3.  
Li Xiaoyan, Wang Zhixin. Yaw Control strategy and system design for wind turbine[J]. Micro Computer Information, 2007, 23(25): 1-3.
- [8] 王志新, 张华强. 风力发电技术与功率控制策略研究[J]. 自动化仪表, 2008, 29(11): 2-4.  
Wang Zhixin, Zhang Huaqiang. Research on wind energy generation technology and power control strategy [J]. Automation Instrumentation, 2008, 29(11): 2-4.
- [9] 顾露香, 乐秀璠, 杨虞琨, 等. KHC 算法在风力发

- 电机组偏航系统的运用 [J]. 华电技术, 2011, 33(9): 92-94.
- Gu Luxiang, Le Xiufan, Yang Yukun, et al. Application of KHC algorithm in wind turbine yaw system[J]. Huadian Technology, 2011, 33(9): 92-94.
- [10] Piao H, Wang Z, Zhang H. Cooperative-PSO-based new learning algorithm for PID neural network and nonlinear control design[J]. The Mediterranean Journal of Measurement and Control, 2009, 5(2): 60-70.
- [11] Zhao L, Yang Y. PSO-based single multiplicative neuron model for time series prediction [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(2): 2805-2812.
- [12] 朴海国, 王志新. 基于 CPSO 的 PID 神经网络及偏航电机控制策略 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14(9): 55-62.
- Piao Haiguo, Wang Zhixin. Control strategy of CPSO-based PID neural network and a yaw motor[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(9): 55-62.
- [13] Narendra K S, Mukhopadhyay S. Adaptive control using neural networks and approximate models[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1997, 8(3): 475-485.
- [14] 李毅, 温正忠, 赵少刚, 等. 风力发电机偏航系统模糊控制的研究 [J]. 现代机械, 2007(1): 29-30.
- Li Yi, Wen Zhengzhong, Zhao Shaogang, et al. Resarch on Fuzzy logic controlling of wind driven-generator yaw system[J]. Modern Machinery, 2007(1): 29-30.
- [15] 李毅, 温正忠. 风力发电偏航系统的 PID-Fuzzy 分段复合控制研究 [J]. 机械设计与制造, 2007(4): 54-55.
- Li Yi, Wen Zhengzhong. Study on PID-Fuzzy composite control for yaw system of wind driven-generator[J]. Machines Design and Manufacture, 2007(4): 54-55.
- [16] Chen F, Yang J. Fuzzy PID controller used in yaw system of wind turbine[C]. IEEE 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, 2009: 1-4.
- [17] 朴海国, 王志新. 风电机组偏航 Fuzzy-PID 合成控制系统仿真[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 183-188.
- Piao Haiguo, Wang Zhixin. Simulation of fuzzy-PID synthesis yawing control system of wind turbine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 183-188.
- [18] Chenghui Z, Pengju L, Jianping W, et al. Research on intelligent controller of wind-power yaw based on modulation of artificial neuro-endocrine-immunity system[J]. Procedia Engineering, 2011(15): 903-907.
- [19] Arabian Hoseynabadi H, Oraee H, Tavner P J. Failure modes and effects analysis(FMEA) for wind turbines [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(7): 817-824.
- [20] 王秋芬, 黄芳林. 基于 Ansys 的大型风电机组偏航连接系统计算方法研究 [J]. 机械强度, 2011, 33(4): 607-612.
- Wang Qiufen, Huang Fanglin. Study on the calculation method of yawing connect system of large wind turbines based on Ansys[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(4): 607-612.

---

#### 作者简介

沈小军 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 研究方向为长期从事电力设备带电状态评估技术, 新能源与节能技术研究。

杜万里 男, 1989 年生, 硕士研究生, 研究方向为风电场经济运行。