

# 基于 PSO 与模糊 PI 控制结合的最大风能捕获研究

任志玲 杨永伟 孙雪飞

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院 辽宁 葫芦岛 125105)

**摘要** 针对风速突变引起风力机转速、转矩、功率等跟踪效果差问题,提出一种基于粒子群优化算法和模糊 PI 转矩控制器方法。根据低风速、高风速下风力机产生的功率是否达到额定功率,将风力发电机的运行区域划分为低负荷和满负荷。在低负荷区控制发电机最优转矩控制,保持最佳叶尖比运行能较好地跟踪功率,实现风能的最大捕获。将该策略应用于一个 5 MW 风力机模型中,并与前馈空气转矩(ATF)和传统模糊控制(CMPPT)两种策略比较。仿真结果表明,该策略在低风速情况下能很好地跟踪风速,实现最大风能的捕获。

**关键词** 变速风力机 ATF 控制器 CMPPT 控制器 PSO 模糊 PI 控制器

中图分类号 TP3 TM315 文献标识码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2018.11.024

## MAXIMUM WIND ENERGY CAPTURE BASED ON PSO AND FUZZY PI CONTROL

Ren Zhiling Yang Yongwei Sun Xuefei

(School of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, Liaoning, China)

**Abstract** Aiming at the poor tracking effect of wind turbine speed, torque and power caused by sudden change of wind speed, we proposed a method based on particle swarm optimization (PSO) and fuzzy PI torque controller. The operating area of wind turbine was divided into low load and full load according to whether the power generated by wind turbines under low wind speed and high wind speed reached the rated power. In the low load area, the optimal torque of the generator was controlled, and the optimal blade tip ratio was maintained to track the power better, so as to achieve the maximum capture of wind energy. We applied the method into a 5 MW wind turbine model, and compared it with feed forward air torque control (ATF) and CMPPT. The simulation results show that the strategy can track the wind speed well in low wind speed and achieve maximum wind capture.

**Keywords** Variable speed wind turbine ATF controller CMPPT controller PSO Fuzzy PI controller

## 0 引言

风能是一种安全、清洁、无污染的能源。目前全世界约有 75 个国家拥有商用风力发电装置,其中 22 个国家使用的风力发电机装机容量已超过 1 千兆瓦级。为了实现风能的最大捕获,学者们提出了许多的控制方法,如文献[1]中将 PI 与 SMC 的结合,模型预测控制(MPC)简化计算,并将模糊控制器嵌入模型参考自适应控制框架,但由于风速的突变并不能达到功率实时跟踪。文献[2]中将模糊模型和神经网络相结合,

对变速风力发电机的 MPPT 进行了研究,虽实现了风能的捕获,但风能利用系数较低。文献[3]中介绍了前馈气动力矩控制器(ATF)跟踪最优发电机转速,但是跟踪效果并不佳。文献[4]中考虑了范德霍文风模型分别针对高、低频设计了 LQG 控制器和 PI 控制器,但是转矩出现波动较大。文献[5]提出了一种基于永磁同步发电机爬山搜索(HCS)的 Wilcoxon 径向基函数网络 MPPT 策略,但是步长的选取需要经过多次尝试,功率和转矩变化响应时间较长。本文提出了一种基于粒子群优化(PSO)算法和最优模糊 PI 控制器,以最大限度地实现风能捕获。根据不同风速下粒子群算

法对低负荷区域的模糊隶属函数进行调整,利用增益同步控制器得到各风速优化的 PI 增益,该 PI 控制器保证了最佳叶尖比。将该策略应用于 5 MW 风力机中,并与 ATF 和 CMPPT 两种控制策略进行参数比较,实验结果表明本策略具有实时跟踪风速变化引起的转速、转矩和功率的变化,在低负荷区域具有明显跟踪、响应快等特点。

## 1 风力机模型

图 1 表示风力发电系统的简易模型图,风速吹动风力机旋转获得的直接功率数学模型为:

$$P_v = 0.5\rho Av^3 \quad (1)$$

式中: $A$  表示风扫过风轮的有效面积, $v$  表示风速, $\rho$  表示空气密度,一般取  $1.225 \text{ kg/m}^3$ 。

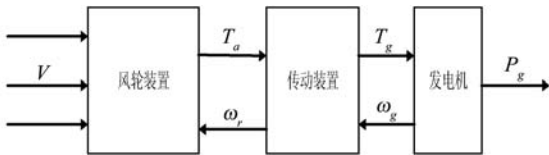


图 1 风力发电系统框图

叶尖比的表达式为:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \quad (2)$$

式中: $\omega_r$  表示风轮角速度, $R$  表示风力机的半径。

为了表示实际风能捕获的效率,引入风能利用系数  $C_p$ ,最大风能利用系数  $C_p$  采用如下表达式:

$$\begin{cases} C_p = 0.5 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-21/\lambda_i} \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda_{\text{TSR}} + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (3)$$

根据式 (3) 得到图 2 所示的风能利用系数曲线图。

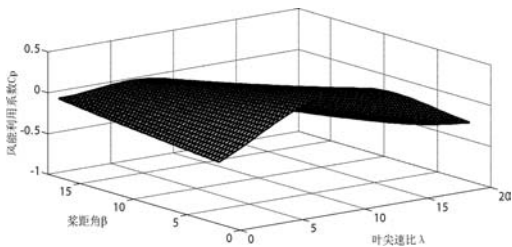


图 2 最大风能利用系数曲线

风力机捕获的功率、转矩方程为:

$$\begin{cases} P_a = 0.5\rho Av^3 C_p(\lambda, \beta) \\ T_a = \frac{P_a}{\omega_r} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_a$  表示风力机的输出功率, $T_a$  表示风力机产生的转矩, $\omega_r$  表示风力机角速度。

根据图 3 得到传动数学模型<sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} J_r \dot{\omega}_r = T_a - T_{ls} - K_r \omega_r \\ T_{ls} = K_{ls}(\theta_r - \theta_{ls}) + B_{ls}(\omega_r - \omega_{ls}) \\ J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - K_g \omega_g - T_g \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\theta_r$ 、 $\theta_{ls}$ 、 $\omega_{ls}$ 、 $\theta_g$  分别为转子侧偏差角、变速箱侧偏差角、低速轴偏差角、发电机侧偏差角; $T_a$ 、 $T_{ls}$ 、 $T_{hs}$ 、 $T_g$  分别表示风轮转矩、低速轴转矩、高速轴转矩、发电机的力矩;风力机传动比  $n$ :

$$n = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} = \frac{\theta_g}{\theta_{ls}} \quad (6)$$

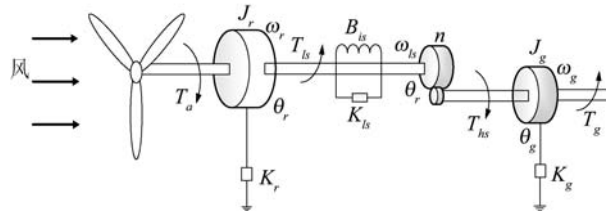


图 3 二质量传动模型

文献[6]中转矩表达式:

$$\begin{aligned} T_{ls}^* &= \left( K_{ls} - \frac{B_{ls}K_r}{J_r} \right) \omega_r + \frac{1}{n} \left( \frac{B_{ls}K_g}{J_g} - K_{ls} \right) \omega_g - B_{ls} \left( \frac{J_r + n^2 J_g}{n^2 J_r J_g} \right) T_{ls} + \\ &\quad \frac{B_{ls} T_a}{J_r} + \frac{B_{ls} T_g}{n J_r} \end{aligned} \quad (7)$$

从图 2 可以看出当叶片与风向正交(桨距角  $\beta$  为  $0^\circ$ ),最佳叶尖比  $\lambda_{\text{opt}}$  为 7.55 时  $C_p$  最大,利用最大风能利用系数  $C_{p(\text{max})}$  曲线实现最大风能捕获。为保持  $\lambda_{\text{opt}}$ ,此时应根据速度控制器调节转子速度。利用传统最大功率跟踪(简称 CMPPT)控制策略实现上最大风能的捕获<sup>[7]</sup>,电磁转矩计算公式为:

$$\begin{cases} T_{g(\text{opt})} = K_{\text{opt}} \omega_g^2 - K \omega_g \\ K_{\text{opt}} = \frac{\rho \pi R^5 C_{p(\text{max})}}{2 \lambda^3 n^3} \quad K = \left( K_g + \frac{K_r}{n^2} \right) \end{cases} \quad (8)$$

将  $X = [\omega_r \ \omega_g \ T_{ls}]$  扩展成  $X_e = [\hat{\omega}_r \ \hat{\omega}_g \ \hat{T}_{ls} \ \hat{T}_a]$ ,并使用卡尔曼滤波估计  $X_e$  得到转矩  $T_{g(\text{opt})}$  表达式<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} T_{g(\text{opt})} = \frac{\hat{T}_a}{n} - \left( \frac{K_r}{n^2} + K_g \right) \hat{\omega}_g - \frac{K_c}{n^2} (\omega_{g(\text{ref})} - \hat{\omega}_g) \\ \omega_{g(\text{ref})} = \sqrt{\frac{\hat{T}_a}{n K_{\text{opt}}}} \end{cases} \quad (9)$$

上述提出的方法称为前馈空气转矩控制器(ATF),其中  $K_c$  是为减小稳态误差而选择的参数。

## 2 最优模糊 PI 控制设计

### 2.1 粒子群算法(PSO)

粒子群优化算法(PSO)是通过模拟鸟群觅食行为

而发展起来的一种基于群体协作的随机搜索算法,它提供了一种基于种群的搜索过程,其中的个体称为粒子,随着时间而改变它们的位置(状态)。在粒子群优化系统中,相当于粒子在多维搜索空间中飞行,在飞行过程中,每个粒子根据自己的经验和相邻粒子的位置来调整最佳的位置。在粒子群算法中,每个粒子都有一个速度和位置,相应的方程描述如下:

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \gamma_{1i}(P_i - x_i(k)) + \gamma_{2i}(G - x_i(k)) \quad (10)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad (11)$$

式中: $i$ 为粒子数, $k$ 为离散时间指数, $v_i$ 为粒子的速度, $x_i$ 为粒子的位置, $P_i$ 为粒子的最佳位置(全局最佳), $G$ 为种群(全局最佳)的最佳位置, $\gamma_{1i}$ 和 $\gamma_{2i}$ 为粒子在区间 $[0,1]$ 中的自由随机数。在模拟中采用下列的迭代速度方程:

$$v_i(k+1) = \varphi(k)v_i(k) + \alpha_1[\gamma_{1i}(P_i - x_i(k))] + \alpha_2[\gamma_{2i}(G - x_i(k))] \quad (12)$$

式中: $\varphi(k)$ 是惯性函数, $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 为加速度常数。在本文中采用线性递减策略,即最初的大惯性权重 0.9 线性地减少到 0.1,相应的表达式如下:

$$\varphi(k) = [\varphi(0) - \varphi(N_T)] \frac{(N_T - k)}{N_T} + \varphi(N_T) \quad (13)$$

式中: $N_T$ 是执行算法的最大时间步数, $\varphi(0)$ 是初始惯性权重, $\varphi(N_T)$ 是后惯性权重。

粒子群算法的步骤算法如下:

**步骤 1** 初始化粒子群并随机化每个粒子的位置和速度( $x_i, v_i; i = 1, \dots, M$ )。

**步骤 2** 计算每个粒子的适应度函数( $y(i) =$ 适应度( $x_i$ ))。

**步骤 3** 初始化每个  $P_i$  和  $G, P_{i0} = y_i, G = \min(P_{i0}), i = 1, 2, \dots, M$ 。

**步骤 4** 使用动态惯性权重更新粒子的速度,利用式(11)更新粒子的位置,并通过速度来控制,如下所示:

$$v_i(k+1) = \begin{cases} v_i(k+1) & v_i(k+1) < V_{\max} \\ V_{\max} & v_i(k+1) \geq V_{\max} \end{cases} \quad (14)$$

**步骤 5** 更新  $P_i$  和  $G; P_i = y_{i-new}$  和  $G = \min(P_{i-new})$ 。

**步骤 6** 如果不满足结束条件转到步骤 4 继续循环;否则,停止并返回参数  $G$ 。

## 2.2 模糊 PI 控制设计

本文采用图 4 所示的二阶模糊控控制器,包括输入数据、模糊推理、清晰化、控制作用对象等部分。如果对隶属度函数进行优化调整可以达到较好的控制效果,则利用智能优化控制方法实现这个目标<sup>[9-13]</sup>;通过输入  $e$  和  $ec$ ,经过模糊归一化,模糊推

理,清晰化以后作用于控制对象,其中  $r$  表示输入, $y$  表示输出。

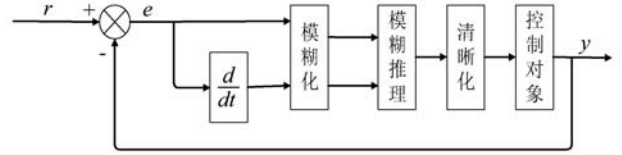


图 4 二阶模糊控制器

从系统的稳定性响应速度、超调量等方面考虑:比例系数  $k_p$  可以加快系统的响应速度,提高系统的调节精度; $k_p$  越大系统响应越快,但容易产生超调,甚至不稳定;较小时降低精度。积分系数  $k_i$  的作用为消除系统静态误差。

系统误差  $e$  和误差变化率  $ec$  论域为  $[-6,6]$ ,  $k_p$  论域为  $[-2,2]$ ,  $k_i$  论域为  $[-1,1]$ ,隶属度函数采用三角形函数,模糊子集均为  $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ ,去模糊法为去重心法。根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数模糊控制模型,应用模糊合成推理设计 PI 参数的模糊矩阵表,如表 1、表 2 所示,并查出修正参数带入下式计算:

$$\begin{cases} k_p(k) = k_p(k-1) + \{e_i, ec_i\}_p \\ k_i(k) = k_i(k-1) + \{e_i, ec_i\}_i \end{cases} \quad (15)$$

表 1  $k_p$  模糊规则表

u	e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PS	ZE	ZE
NM	PM	PM	PM	PS	PS	ZE	ZE
NS	PM	PS	PS	PS	ZE	ZE	ZE
ec	ZE	PS	PS	PS	ZE	NS	NS
PS	ZE	ZE	ZE	NS	NS	NS	NM
PM	ZE	ZE	NS	NS	NM	NM	NM
PB	ZE	ZE	NS	NM	NB	NB	NB

表 2  $k_i$  模糊规则表

u	e						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PS	ZE	ZE
NM	PM	PM	PM	PS	PS	ZE	ZE
NS	PM	PS	PS	PS	ZE	ZE	ZE
ec	ZE	PS	PS	PS	ZE	NS	NS
PS	ZE	ZE	ZE	NS	NS	NS	NM
PM	ZE	ZE	NS	NS	NM	NM	NM
PB	ZE	ZE	NS	NM	NB	NB	NB

### 3 控制原理分析

本文提出的基于 PSO 群算法的最优模糊 PI 控制器对任意风速剖面都能实现风能的最大捕获。该方法分为两个阶段,如图 5、图 6 所示。

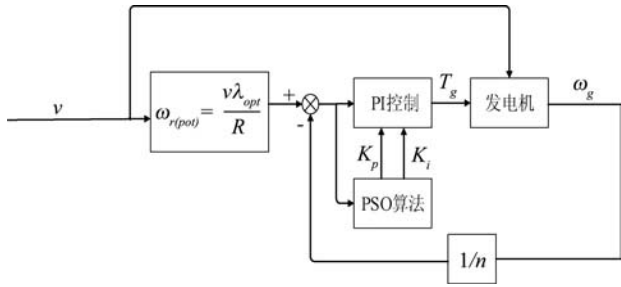


图 5 第一阶段(PSO 控制)

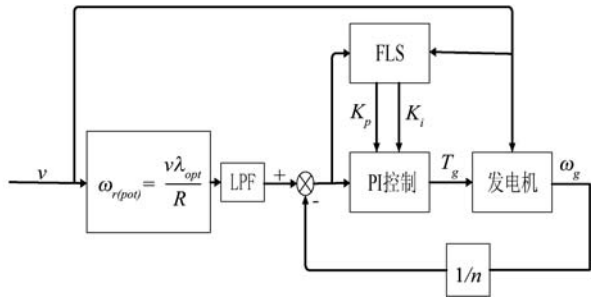


图 6 第二阶段(模糊 PI 控制)

第一阶段主要是利用粒子群算法(PSO)导出某些风速下的 PI 增益(如图 5 所示控制结构);第二阶段是利用第一阶段得到的 PI 增益对模糊系统的隶属函数进行调优(如图 6 所示)。本文主要考虑是低负荷区域实现风能的最大捕获。在低负荷区域时,假定风速在 $[3, 11.8]$ 区间内,由于实际中测量 $\omega_r$ 具有很大的噪声,我们根据实测的 $\omega_c$ 作为 $\omega_r = \frac{\omega_c}{n}$ ,以导出 $\omega_r$ 理想的精度。

利用粒子群优化算法得到不同风速下的最优 PI 增益。如图 6 所示在第二阶段,在不同风速下利用粒子群算法求出最优 $K_p$ 和 $K_i$ ,通过模糊逻辑控制对低负荷区域内的各个风速剖面进行模糊推理自动调整并修正 $K_p$ 和 $K_i$ 。考虑需要保持恒定的最佳叶尖比 $\lambda_{TSR}$ ,而且风速的变化导致转子转速也快速变化,进而导致转矩产生波动。为了减小风速快速变化引起的转矩波动,避免滤波后的最佳转子转速衰减,使用二阶低通滤波器(LPF)对最佳速度进行滤波,得到更平滑的最佳转子转速和转矩,滤波方程为:

$$H(s) = \frac{1}{\alpha^2 s^2 + 2\alpha s + 1} \quad (16)$$

式中: $s$  是 Laplace 变量因子,本文 $\alpha$  选取 0.01。

### 4 仿真结果分析

将本策略提出的控制器应用于一个 5 MW 风力机模型,在 MATLAB/Simulink 仿真软件中设置参数,相关参数设置如表 3、表 4 所示。表 5 为不同风速下采用粒子群优化后的 $K_p$ 、 $K_i$  参数。

表 3 5 MW 风力机参数

参数/单位	数值
风力机半径 $R/m$	63
空气密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	1.223
转动惯量 $J_r/(kg \cdot m^2)$	$3.56 \times 10^3$
阻尼系数 $K_{is}/(kN \cdot m/(rad \cdot s^{-1}))$	6.215
刚性系数 $B_{is}/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$	867.64
发电机转动惯量 $J_g/(kg \cdot m^2)$	534
摩擦系数 $K_f/Nm/(rad \cdot s^{-1})$	1 972
摩擦系数 $K_g/Nm/(rad \cdot s^{-1})$	4 235
齿轮比 $n$	97
最佳叶尖比 $\lambda_{opt}$	7.55

表 4 PSO 算法参数

参数名称	大小
粒子数	10
最大粒子速度	50 000
$\alpha_1$	2.2
$\alpha_2$	1.8
初始惯性权重	0.9
最终惯性权重	0.1
最大迭代次数	80

表 5 PSO 算法优化后的 $K_p$ 、 $K_i$

风速 $v/(m \cdot s^{-1})$	$K_p$	$K_i$
3	-939 182	-1 135 945
3.5	-1 530 251	-8 638 552
4	-1 139 631	-3 293 601
4.5	-1 413 165	-6 710 402
5	-1 355 848	6 625 171
6	-1 437 636	-6 739 611
7	-1 446 336	-6 764 420
8	-1 435 698	-6 795 668
9	-1 456 384	-6 782 408
10	-1 454 627	-6 737 128
10.8	-1 454 229	-6 725 318
11.35	-1 456 595	-6 738 738

为便于分析,设定仿真时间为 300 s,采用图 7 所示的组合风速进行模拟,运行仿真得到与 CMPPT 和 ATF 控制策略的比较结果如图 8 - 图 11 所示。

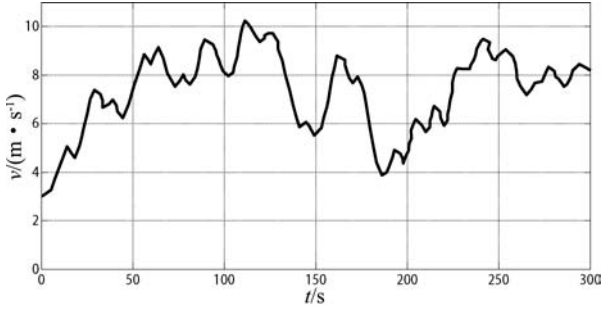


图 7 模拟风速曲线

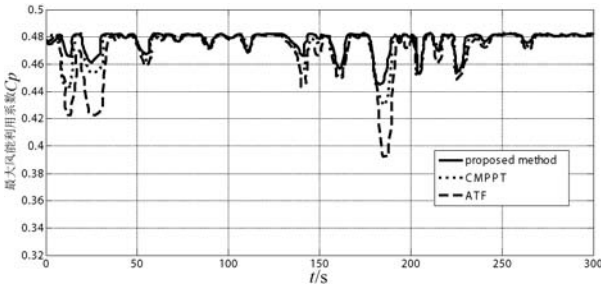


图 8 三种策略下的 Cp 比较

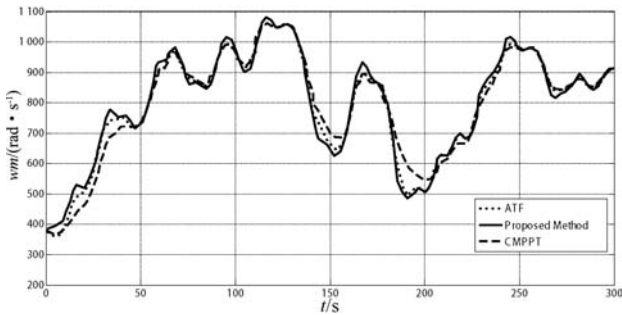


图 9 不同策略下的转速比较

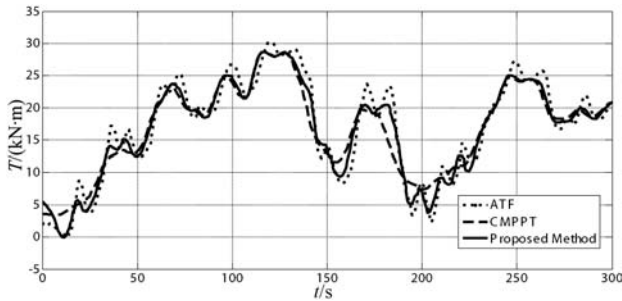


图 10 不同方法的发电机转矩比较

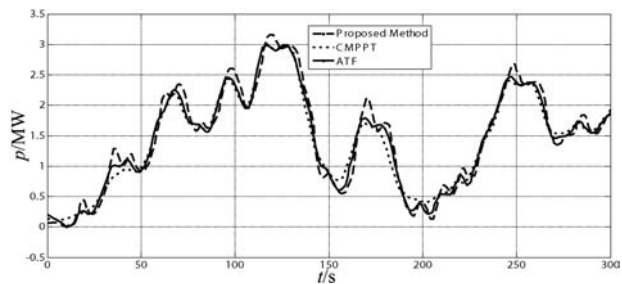


图 11 不同方法的功率比较

从图 7 显示的模拟风速曲线可以看出风速是非线性运行时变,图 8 显示了不同方法的风能利用系数,风力机的最大风能利用系数  $C_{p(max)}$  为 0.482。从图 9 中可以看出本文提出的方法能够比传统方法能更好地跟踪转速。与传统方法相比,图 10 和图 11 显示的转矩和功率曲线图中本文所提出的转矩控制具有一定的抗扰动能力,而且能更好地跟踪风速变化,系统响应时间较快,且转矩抖动幅度小。

为了比较不同方法的风能捕获效率或功率;使用统计学方法评估均值:

$$J = \frac{1}{T} \int_0^T \psi(t) dt \quad (17)$$

式中:  $\psi(t)$  可以是  $P(T)$  或  $C_p(T)$  (即输出功率或风能利用系数)。根据评估均值  $J$  的大小可以看出,在一定时间内  $J$  越大越好。表 6 显示了三种不同策略下的 (本文方法、CMPPT 和 ATF) 比较分析结果,其中:  $P_{out(avg)}$  表示一定时间内的平均输出功率;  $C_{p(avg)}$  表示一定时间内最大风能利用系数的平均值。由表 6 可见,本文提出的方法具有较好的功率捕获性能。

表 6 不同策略下的 J 比较

评估指标	CMPPT	ATF	本文方法
$P_{out(avg)}$	1.433 2	1.439 5	1.460 2
$C_{p(avg)}$	0.470 6	0.474 9	0.476 3

## 5 结 语

本文提出了一种基于粒子群算法和模糊 PI 结合的最优转矩控制器,用于实现低风速时的最大风能捕获。利用粒子群算法求出了不同风速下的最优 PI 增益,利用最优 PI 增益进行模糊 PI 控制优化参数;为了减小风速变化引起的转矩波动,采用低通滤波器。与另外的 CMPPT、ATF 两种控制策略相比,本文提出的策略能较好地跟踪转速、功率和转矩,转矩波动小。为证明结果的可靠性,采用统计学方法分析本文提出的策略,结果显示本文策略能实现风能的捕获结果,具有明显的优越性。

## 参 考 文 献

[ 1 ] 张晓光,赵克,孙力,等. 永磁同步电机滑膜变结构调速系统品质控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(15):47-52.

文的 Leader 选举改进机制和任务注册管理功能,防止了分布式系统中 Leader 选举的脑裂问题,从而保护了任务不会因为网络震荡被重复调度执行。

## 4 结 语

本文提出了一种基于改进式 Leader 选举的分布式任务调度系统,解决了电力交易系统从单体架构演进到分布式架构中的复杂任务调度问题。在分析了电力交易业务和电力交易系统的基础上,利用改进式 Leader 选举方式解决了互斥任务的调度问题,提供了可配置的失败任务处理方式。为多样性的电力交易系统提供了灵活的支持,并通过方案验证和压力测试,证明该方案不仅能够满足当前系统的需要,而且在面对更大规模业务需要时,依然能够良好运行。

## 参 考 文 献

- [1] 杨平,史连军,邵平,等. 新一代电力市场交易平台架构探讨[J]. 电力系统自动化,2017,41(24):67-76.
- [2] 严宇,李庚银,李国栋,等. 新一轮电改形势下电力直接交易组织情况分析[J]. 中国电力,2017,50(7):33-37.
- [3] 承林,王海宁,高春成. 微服务在电力交易系统中的应用研究[J]. 电网技术,2018,42(2):442-446.
- [4] 曹阳,高志远,杨胜春,等. 云计算模式在电力调度系统中的应用[J]. 中国电力,2012,45(6):14-17.
- [5] Schwegelshohn U, Yahyapour R. Attributes for communication between Grid scheduling instances[M]//Grid resource management. Kluwer Academic Publishers,2004:41-52.
- [6] Fischetti M, Martello S, Toth P. The Fixed Job Schedule Problem with Working-Time Constraints[J]. Operations Research,1989,37(3):395-403.
- [7] 杨争林,曹帅,郑亚先,等. 电力市场全景实验平台设计[J]. 电力系统自动化,2016,40(10):97-102.
- [8] 张显,郑亚先,耿建,等. 支持全业务运作的电力用户与发电企业直接交易平台设计[J]. 电力系统自动化,2016,40(3):122-128.
- [9] 王晓川,叶超群. 一种基于分布式调度机制的集群体系结构[J]. 计算机工程,2002,28(8):232-234.
- [10] 王德文,刘杨. 一种电力云数据中心的任务调度策略[J]. 电力系统自动化,2014,38(8):61-66,97.
- [11] Prisco R D, Lampson B W, Lynch N A. Revisiting the Paxos algorithm [C]//Proceedings of the 11th International Workshop on Distributed Algorithms. Springer-Verlag,1997:111-125.
- [12] 唐海东,武延军. 分布式同步系统 Zookeeper 的优化[J]. 计算机工程,2014,40(4):53-56.
- [13] Apache Software Foundation. Apache Zookeeper[EB/OL]. (2013-02-01). <http://Zookeeper.apache.org/>.
- [14] Hunt P, Konar M, Junqueira F P, et al. ZooKeeper: Wait-free Coordination for Internet-scale Systems [C]//Proceedings of the 2010 USENIX conference on USENIX annual technical conference. USENIX Association,2010:11.
- [15] Apache Software Foundation, Execution and Scheduling [EB/OL]. <https://docs.spring.io/spring/docs/3.2.x/spring-framework-reference/html/scheduling.html>.
- [16] 朱哲明. 基于 Quartz 的消息沟通平台的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2013.
- [17] 朱跃龙,韦敏,冯钧. 使用 Java 反射的可扩充水利数据库应用系统[J]. 计算机工程,2006,32(22):96-98.

## (上接第 152 页)

- [2] Dong X, Zhao Y, Xu Y, et al. Design of PSO fuzzy neural network control for ball and plate system[J]. International Journal of Innovative Computing Information & Control Ijicic, 2011, 7(12):7091-7103.
- [3] 梁琛,王鹏,韩肖清,等. 基于间歇性风速的风力发电机功率输出模型研究[J]. 电网技术,2017,41(5):1370-1374.
- [4] Munteanu I, Cutululis N A, Bratcu A I, et al. Optimization of variable speed wind power systems based on a LQG approach[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(7):903-912.
- [5] 田兵,赵克,孙东阳,等. 改进型变步长最大功率跟踪算法在风力发电系统中的应用[J]. 电工技术学报,2016,31(6):227-230.
- [6] Boukhezzer B, Siguerdidjane H. Nonlinear Control of a Variable-Speed Wind Turbine Using a Two-Mass Model [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(1):149-162.
- [7] Leithead W E, Connor B. Control of variable speed wind turbines: Design task[J]. International Journal of Control, 2000, 73(13):1189-1212.
- [8] Song Z, Shi T, Xia C, et al. A novel adaptive control scheme for dynamic performance improvement of DFIG-Based wind turbines[J]. Energy, 2012, 38(1):104-117.
- [9] Vihrialia H, Perela R, Makila P, et al. A gearless wind power drive: part 2: performance of control system [C]//Proceedings of the Wind Energy for the New Millennium European Conference (EWCE'01). 2001:1090-1093.
- [10] 张洪新,涂群章,蒋成明,等. 基于模糊 PI 控制器的 PMSM 矢量控制[J]. 装备制造技术,2017(7):127-130.
- [11] 于子捷,魏晨曦,田芳芳,等. 一种改进型扰动观测法在最大功率点跟踪中的应用[J]. 电测与仪表,2017,54(15):113-119.
- [12] 孙超. 基于改进 MPPT 算法的风光互补发电功率最大功率跟踪系统研究[D]. 天津:天津理工大学,2017.