

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.03.007

# 基于改进粒子群算法的风机频率控制研究

游广增<sup>1</sup>, 杭志<sup>2</sup>, 陈凯<sup>2</sup>, 刘超<sup>3</sup>, 钱迎春<sup>1</sup>, 李常刚<sup>2</sup>

(1. 云南电网有限责任公司电网规划建设研究中心, 云南 昆明 650011;

2. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061;

3. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院), 北京 100192)

**摘要:**高风电占比系统中, 风电机组参与系统频率调节时, 同时使用虚拟惯量控制与下垂控制会出现风机调频功率相互竞争的问题。为提高风机出力, 优化系统的调频效果, 对风电机组虚拟惯量控制和下垂控制进行协调优化。首先构建了风机参与调频的优化控制策略求解模型, 对粒子群优化(PSO)算法进行了适应性改造: 根据搜索代数对惯性权重 $\omega$ 、自我学习因子 $c_1$ 和社会学习因子 $c_2$ 进行动态调整, 加入变异操作。基于改进的PSO算法优化控制参数, 得到风机参与调频的协调控制策略, 且对风速和故障程度等因素具有较好的适应性。最后以某省级电网为算例, 仿真验证了控制策略以及改进算法的有效性。

**关键词:**风力发电; 虚拟惯量控制; 下垂控制; 协调控制; 粒子群优化

**中图分类号:** TM712

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2020)03-0043-08

## 0 引言

随着风力发电技术的进步, 各国的风电渗透率不断升高。截至2018年, 我国风电装机容量占比已达9.2%<sup>[1-2]</sup>。双馈感应风力发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)和永磁直驱风力发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)是当前风力发电的主流机型。DFIG和PMSG的转子转速与电网频率解耦, 导致风电并网后系统惯性水平下降。随着风电渗透率不断提高, 系统惯性水平降低对系统频率安全影响愈发明显<sup>[3-4]</sup>。因此, 迫切需要风电参与系统调频。

风力发电机参与电网调频的控制方法主要有虚拟惯量控制<sup>[5]</sup>和下垂控制<sup>[6]</sup>。虚拟惯量控制以系统频率变化率为输入参与调频, 多用于支撑暂态频率, 且需避免转速恢复阶段的频率二次跌落问题<sup>[7]</sup>。下垂控制使风电机组具有与常规机组类似的频率下垂特性, 能够响应系统频率变化, 持续支撑系统频率, 且在系统频率最低点处提供较强的支撑。下垂控制速度比虚拟惯量控制慢, 一般需结合减载法使用<sup>[8]</sup>。

为优化风电参与调频的调频效果, 文献[9]提出变下垂系数的控制策略提高控制策略的自适应能力; 文献[10]考虑惯性控制, 提出主动转速保护控制策略, 解决惯性控制所带来的频率二次跌落问题; 文献[11]综合惯性控制与桨距角控制, 提出风

机参与调频的综合控制策略; 文献[12]根据风机的运行区域, 提出惯性、超速、桨距角控制的协调控制策略; 文献[13]简单涉及考虑惯性控制与下垂控制的综合控制策略, 没有具体理论分析。

现有方法给出的风机参与调频典型控制参数大多适用于单一故障或单一风速场景, 当系统发生不同故障或者风速变化较大时, 典型控制参数的调频效果不佳, 适应性不足。

针对上述问题, 文中研究重点为通过协调优化风电机组频率控制参数, 增大风机出力, 改善风机调频效果。首先介绍虚拟惯量控制与下垂控制参与调频的原理, 详细分析虚拟惯量控制与下垂控制共同参与调频的竞争问题, 建立了虚拟惯量控制和下垂控制协调优化模型并求解。引入了粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法来解决控制参数整定困难的问题, 且对PSO算法进行了适应性改造, 求解得到一组适用于不同风速、不同故障下的控制参数, 有效改善风机调频效果。最后通过省级电网算例验证了方法的有效性。

## 1 风电机组调频控制问题分析

与常规火电相比, DFIG和PMSG缺乏惯量效应, 无法直接提供频率调节能力。大规模风电接入电网, 显著降低了系统惯性水平<sup>[14]</sup>。因此, 以虚拟惯量控制和下垂控制为代表的控制措施被引入风电机组中, 风电机组通过响应系统频率变化为电网提供惯性和功率支撑, 参与系统调频, 维持系统稳定。

收稿日期: 2019-11-15; 修回日期: 2019-12-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51407107)

### 1.1 虚拟惯量控制

虚拟惯量控制通过模拟同步机的惯量特性,使风机在系统频率发生变化时,根据频率变化率调整有功参考指令,释放或者吸收转子动能,达到参与系统调频的目的。因转子动能是有限的,虚拟惯量控制方法多用于支撑暂态频率,无法持续参与调频,且需避免转速恢复阶段的频率二次跌落问题。虚拟惯量控制原理见图 1,  $f$  为实时系统频率;  $T_v$  为虚拟惯量控制的时延;  $K_v$  为虚拟惯量的系数;  $\Delta P_v$  为虚拟惯量控制响应系统频率变化的有功参考信号。

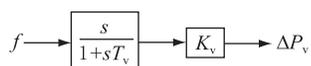


图 1 虚拟惯量控制

Fig.1 Virtual inertia control

由于时间延迟  $T_v$  一般较小,忽略  $T_v$ ,则响应于系统频率变化率的有功参考信号为:

$$\Delta P_v = K_v \frac{df}{dt} \quad (1)$$

### 1.2 下垂控制

下垂控制直接响应系统频率偏移量,能够对频率偏移提供持续支撑<sup>[15]</sup>,其原理如图 2 所示。其中,  $f_{ref}$  为系统额定频率;  $T_d$  为下垂控制的作用时间延迟;  $K_d$  为下垂控制的系数;  $\Delta P_d$  为下垂控制响应系统频率变化的有功参考指令。

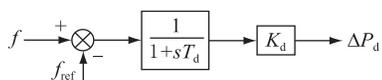


图 2 下垂控制

Fig.2 Droop control

如忽略下垂控制的时延  $T_d$ ,下垂控制响应于系统频率变化量的有功参考信号为:

$$\Delta P_d = K_d(f - f_{ref}) = K_d \Delta f \quad (2)$$

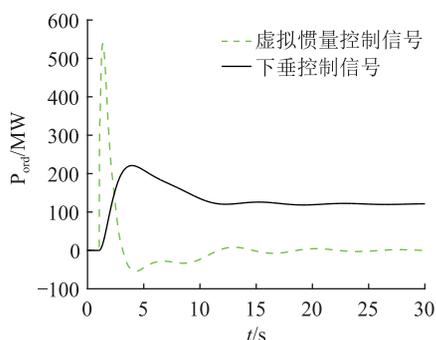
当系统频率发生变化时,综合考虑风电机组虚拟惯量控制和下垂控制,风机的总有功控制指令为:

$$P_{ord} = \Delta P_d + \Delta P_v \quad (3)$$

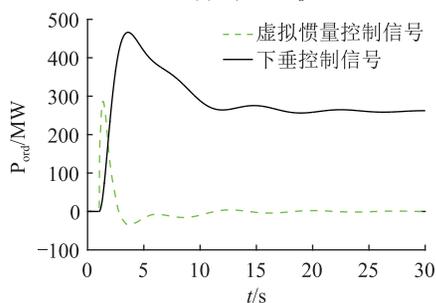
### 1.3 协调控制问题分析

当系统频率发生变化时,若只使用虚拟惯量控制,参与调频过程中的输出功率波动大,且在系统频率跌至最低点后停止作用,无法持续参与调频。若单独使用下垂控制,频率响应速度慢,在频率变化初期,无法提供支撑,且当频率变化量较小时,调频效果不佳<sup>[16-17]</sup>。为更好地实现风电机组参与一次调频,保证系统频率安全性,现有研究多同时引入虚拟惯量控制和下垂控制,进一步提高风电机组参与系统调频的能力。

如图 3 所示,下垂控制对频率偏移提供持续支撑,虚拟惯量控制支撑暂态频率,无法持续参与调频,在系统频率快速变化结束后,虚拟惯量控制几乎退出调频。此时风机的有功出力下降,在 10 s 左右,风机出力曲线中出现“凹陷”。有功下降部分包括虚拟惯量法产生的附加调频功率和风机为恢复转速吸收的部分有功。如图 4 所示,风机有功出力为  $P_{wind}$ ,同样的  $K_d$  下,  $K_v$  越大,为恢复转速所需吸收的有功就越多,风机此时的有功出力就越小,对系统频率的支撑能力就越弱。在调频功率有限的情况下,若虚拟惯量控制系数过大,会对风机下垂控制调频效果产生影响。因此,综合 2 种考虑控制策略,在系统频率快速变化结束后使风机的出力曲线平滑,需要合理搭配  $K_d, K_v$ 。



(a)  $K_v=10, K_d=5$



(b)  $K_v=5, K_d=10$

图 3 不同控制参数下有功参考信号

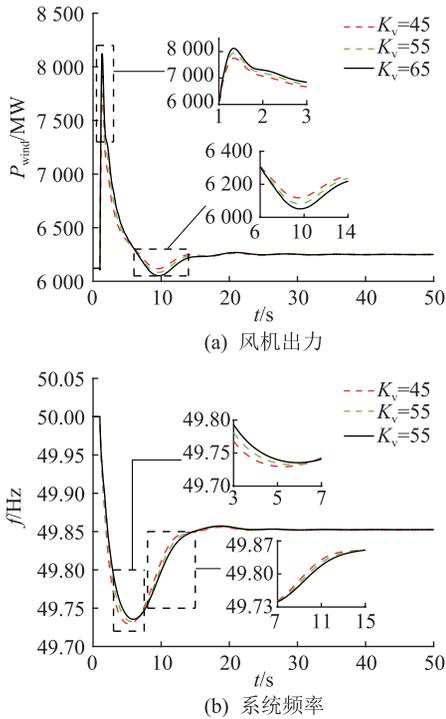
Fig.3 Active reference signal with different control parameters

因此,如何合理分配调频容量,使得风机既能通过虚拟惯量控制支撑暂态频率,又能最大限度通过下垂控制支撑稳态频率,是风机参与电网调频控制的关键问题。  $K_d, K_v$  是下垂控制与虚拟惯量控制参与系统调频的关键参数,因此,风机暂态频率与稳态频率控制的协调问题可以转化为对  $K_d, K_v$  的参数协调优化问题。

## 2 协调控制策略建模与求解

### 2.1 优化模型

根据上述分析,以提高系统的调频效果为优化

图4 不同  $K_v$  的调频效果Fig.4 Frequency regulation effect with different  $K_v$ 

目标,需要兼顾系统稳态频率偏差和暂态频率偏差。当系统发生故障时,机组需要调整出力进行系统一次调频。对于风电参与系统调频问题,频率偏移量越大,则越需要风机增大有功出力,风机出力大小与系统频率偏移,即故障严重性成正比。从风电机组角度来看,优化目标即提高风机的稳态出力和暂态出力,达到风机出力最大化,从而更好参与系统调频,维持系统安全稳定运行。

因此,以  $K_d, K_v$  为优化变量,同时考虑电压、风机转速、桨距角等各类安全稳定约束条件,构建虚拟惯量控制与下垂控制的协调控制策略优化模型如下:

$$\begin{cases} \max F = c_s(P_s - P_{s0}) + c_l(P_{l,max} - P_{s0}) \\ \text{s.t. } \beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max} \\ V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \\ \omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max} \\ K_{dmin} \leq K_d \leq K_{dmax} \\ K_{vmin} \leq K_v \leq K_{vmax} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_{s0}$  为初始稳态出力;  $P_s$  为故障后稳态出力;  $P_{l,max}$  为暂态最大出力;  $c_s, c_l$  分别为风机稳态有功变化和暂态最大有功变化所占权重;  $V$  为节点电压值;  $V_{\min}, V_{\max}$  分别为节点的电压上下限;  $\omega$  为风机转子转速,  $\omega_{\min}, \omega_{\max}$  分别为风机转速上下限;  $\beta$  为风机的桨距角,  $\beta_{\min}, \beta_{\max}$  分别为风机桨距角上下限;  $K_{dmin}, K_{dmax}$  分别为下垂控制的系数上下限;  $K_{vmin}, K_{vmax}$  分别

为虚拟惯量控制的系数上下限。

优化目标为风机在系统调频过程中提供稳态有功支撑,同时兼顾暂态过程有功支撑。为了简化问题分析,对该多目标优化问题进行加权综合,转化为单目标优化。文中主要偏向于稳态持续功率支持,以重点体现风电的旋转备用对系统频率的持续支撑能力,因此选择  $c_s$  为 0.9,  $c_l$  为 0.1。

需要说明的是,上述模型中的目标函数是最大化风机暂态和稳态出力,因此优化结果会趋于释放风机所有旋转备用。由于风机的旋转备用一般较少,在系统发生最严重功率扰动下,风机的优化出力会接近其出力上限,而在非最严重功率扰动下,风机旋转备用充裕,其对电网调频能力的支撑将更加明显。

## 2.2 优化模型求解

文中的待优化参数和风机调频功率输出之间的关系与电网频率动态过程密切相关,难以得到风机出力与待优化参数之间的解析表达式,无法使用常规规划方法求解。为准确反映风机出力与待优化参数间的关系,采用时域仿真法模拟风机响应,并采用启发式优化算法求解上述模型。

常用的启发式优化方法有遗传算法、PSO 算法等。遗传算法适用范围广,其适应度函数约束条件少。但遗传算法需进行复制、交叉和变异操作,进化速度慢,处理复杂问题时优化所需时间较长,且对新空间探索能力有限,易陷入早熟。PSO 算法易于实现,计算简单,收敛速度快且控制参数少,因此,文中选择 PSO 算法优化风机调频控制参数。

基本 PSO 算法中将待优化问题的每个解视为一个粒子,如文中所需优化的参数组  $(K_d, K_v)$ 。其优化过程一般步骤如下:

- (1) 初始化粒子群中粒子速度和位置,计算各粒子的适应值,选取局部最优参数组和全局最优参数组;
- (2) 参考粒子本身以及局部最优参数组和全局最优参数组,更新粒子速度位置;
- (3) 重复步骤(2)直至达到最大迭代次数或者误差收敛。

在上述过程中,粒子速度位置的更新为:

$$v_{jd,k+1} = \omega v_{jd,k} + c_1 r_1 (p_{best,jd} - x_{jd,k}) + c_2 r_2 (g_{best,d} - x_{jd,k}) \quad (5)$$

$$x_{jd,k+1} = x_{jd,k} + v_{jd,k} \quad (6)$$

式中:  $v$  为粒子的速度,表示参数组的变化量大小;  $j$  为粒子个数;  $d$  为优化变量个数;  $k$  为迭代次数;  $\omega$  为惯性权重;  $r_1, r_2$  为介于  $[0, 1]$  的随机数,不同粒子对

应不同的随机数;  $c_1, c_2$  分别为自我和社会学习因子;  $x$  为粒子的位置, 表示参数组  $(K_d, K_v)$  的大小。

在每一次迭代中, 更新粒子速度和位置时, 均有上下限值, 分别为  $[v_{\min, d}, v_{\max, d}], [x_{\min, d}, x_{\max, d}]$ 。当  $v, x$  的大小和变化量超出规定范围时, 即限定为边界值。

### 3 PSO 算法的改进

PSO 算法在求解优化问题时, 具有较好的寻优能力, 但是基本的粒子群优化算法容易陷入局部最优<sup>[16]</sup>。因此, 文中对算法进行了以下改进: 根据搜索代数对惯性权重  $\omega$ 、自我学习因子  $c_1$  和社会学习因子  $c_2$  进行动态调整, 引入变异操作。从而加快搜索速度, 提高搜索精度, 降低算法陷入局部最优的风险。

#### 3.1 $\omega$ 优化

$\omega$  为粒子继承上次搜索速度的能力, 较大的  $\omega$  有利于全局搜索, 跳出局部最优; 较小的  $\omega$  有利于局部搜索, 加快算法的收敛。

文中的优化目标为最大化风机出力, 根据粒子的适应值, 即对应参数组下的风机出力, 与平均适应值的比较, 将参数组  $(K_d, K_v)$  分为 2 个子群。其中, 第  $i$  代中第  $j$  个粒子的适应值  $F_{ij}$  大于等于平均适应值  $F_{iavg}$  时, 表示粒子较为接近寻求的最优参数组, 这些粒子构成第一个子群。当粒子的适应值  $F_{ij}$  小于平均适应值  $F_{iavg}$  时, 表示粒子较为远离寻求的最优解, 这些粒子构成第二个子群。

第一个子群设置较小的  $\omega$ , 且随着该代中粒子适应值最大值  $F_{imax}$  与此粒子适应值  $F_{ij}$  的差值增大而增大, 让粒子在局部最优及全局最优解附近进行局部搜索, 加快收敛速度; 第二个子群应设置较大的  $\omega$ , 增大全局搜索能力, 降低陷入局部最优的风险, 且该群体粒子的惯性权重随着代数  $i$  的增加减小。据此, 设计如下惯性权重调整策略:

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} + \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})(F_{imax} - F_{ij})}{F_{imax} - F_{iavg}} & F_{ij} \geq F_{iavg} \\ \omega_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{i}{N_{\max}} \right)^2 \right] & F_{ij} < F_{iavg} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $i$  为当前迭代次数;  $N_{\max}$  为最大迭代次数;  $\omega_{\max}, \omega_{\min}$  分别为惯性权重的上下界。当粒子  $\omega$  超出规定范围时, 即限定为边界值。

根据风机出力大小将参数组  $(K_d, K_v)$  分组, 对于不同适应值的参数组  $(K_d, K_v)$ , 动态调整惯性权重, 使群体在进化过程中保持惯性权重的多样性,

较好地权衡了局部最优搜索能力与全局最优搜索能力, 既加快了搜索的收敛速度又减少了粒子陷入局部最优的风险。

#### 3.2 自我和社会学习因子权重优化

$c_1, c_2$  分别表示粒子向自身历史最优解与群体历史最优解学习的能力。基本 PSO 算法中,  $c_1, c_2$  的取值范围为  $(0, 4)$ , 一般取  $c_1 = c_2 = 2$ 。为使算法跳出局部最优, 更快更准确地向全局最优进化, 文中根据搜索代数动态调整  $c_1, c_2$  取值。

在初期搜索阶段, 希望待优化参数组  $(K_d, K_v)$  有较强的自我学习能力, 进行大范围的全局搜索, 所以设置较大的  $c_1$  和较小的  $c_2$ ; 在搜索阶段后期, 粒子的社会学习能力更重要, 为提高算法的搜索精度, 设置较小的  $c_1$  和较大的  $c_2$ , 使粒子更准确地向全局最优方向前进。根据上述分析, 将  $c_1$  调整为随迭代次数递减的函数,  $c_2$  调整为随迭代次数递增的函数, 具体调整方式为:

$$\begin{cases} c_{1,i} = 2\sin^2 \left[ \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{i}{N_{\max}} \right) \right] \\ c_{2,i} = 2\sin^2 \left( \frac{\pi}{2} \times \frac{i}{N_{\max}} \right) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $c_{1,i}, c_{2,i}$  分别为第  $i$  代粒子的自我和社会学习因子。

根据搜索代数动态调整  $c_1, c_2$ , 使群体在初期搜索阶段, 有较强的自我学习能力, 在搜索阶段后期, 有较强的社会学习能力, 提高了算法的精度和搜索速度。

#### 3.3 变异操作优化

针对粒子易陷入局部最优的问题, 参考遗传算法, 当粒子群搜索陷入停滞超过  $N_1$  代 (即变异操作开始条件) 时, 则认为粒子陷入局部最优且无法跳出。此时引入变异操作, 将粒子重新撒向解空间, 即根据式 (9) 和式 (10) 更新参数大小及其变化量, 增加解的多样性, 从而避免粒子搜索陷入局部最优无法跳出。

$$v_{id,k+1} = v_{\min,d} + r_1(v_{\max,d} - v_{\min,d}) \quad (9)$$

$$x_{id,k+1} = x_{\min,d} + r_2(x_{\max,d} - x_{\min,d}) \quad (10)$$

改进的 PSO 算法流程如图 5 所示。

### 4 算例验证

#### 4.1 算例系统介绍

以某省级电网为例, 进行风电机组一次调频协调控制模型的参数优化<sup>[18-19]</sup>。系统中包含 3 条高压直流输电线路, 4 个风电场, 39 台等值发电机, 91 个负荷和 126 条 500 kV 及以上线路。系统中负荷

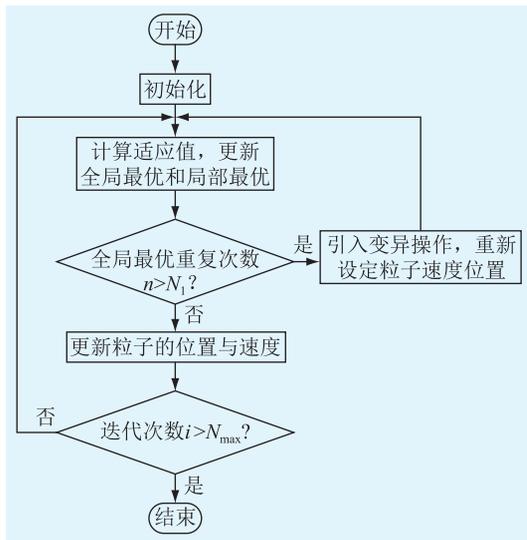


图5 改进 PSO 算法的流程

Fig.5 Flow chart of improved PSO algorithm

共计 58.876 GW,网内总发电 38.876 GW,通过高压直流输电线路受电 20 GW。系统中发电机装机容量为 69.008 GW,风机装机容量为 9.24 GW,风电渗透率约为 13.39%。假设系统内风电场的风速相同,均为 11.765 m/s,且风机减载率均设置为 10%。系统内风机总计初始出力 6 120 MW,风机典型控制参数为  $K_v = 56, K_d = 4$ <sup>[20-21]</sup>。文中使用自主开发的电力系统机电暂态仿真软件。

文中设置改进 PSO 算法参数见表 1,其中,  $m$  为种群规模。

表 1 改进 PSO 算法参数

Table 1 Parameters of improved PSO algorithm

参数	数值	参数	数值
$m$	20	$K_{vmin}$	0
$N_{max}$	50	$K_{vmax}$	100
$\omega_{min}$	0.4	$c_s$	0.9
$\omega_{max}$	0.9	$c_t$	0.4
$K_{dmin}$	0	$N_1$	6
$K_{dmax}$	100		

## 4.2 PSO 优化过程

为保证机电暂态仿真得到的参数具有较好的适应性,研究中一般选取系统最严重故障进行整定,本算例中选择双极 8 GW 直流闭锁故障。文中以系统常规机组旋转备用水平 10% 为例进行分析。

分别使用基本 PSO 算法和文中提出的改进 PSO 算法对对风电机组参与系统调频协调控制模型求解,其优化迭代过程如图 6 所示。纵坐标适应值  $F$  为风机稳态出力变化值与暂态出力变化值的和,综合考虑风机在系统发生故障后的稳态出力

暂态出力,具体计算如式(4)所示。随着迭代次数的增加,风机参与系统一次调频出力增大,优化前后参数如表 2 所示。使用改进算法所得适应值为 993.67 MW,基本 PSO 算法所得适应值为 937.08 MW,使用改进算法所得的最优解较基本算法提高了 6%,体现了改进算法的有效性。

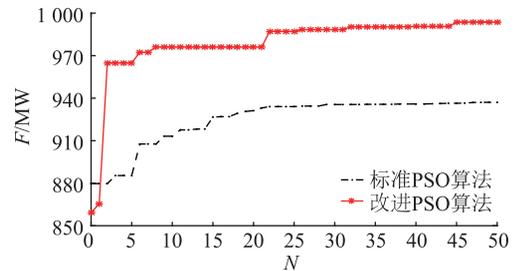


图6 一次调频协调控制模型求解结果

Fig.6 Solution of primary frequency modulation coordination control model

表 2 优化参数结果

Table 2 Optimized parameter results

迭代次数 $i$	基本 PSO 算法			改进 PSO 算法		
	$K_v$	$K_d$	$F/MW$	$K_v$	$K_d$	$F/MW$
1	36.94	9.47	879.73	64.61	8.84	859.11
$N_{max}$	62.45	7.11	937.08	44.54	8.41	993.67

由表 2 可见,与基本 PSO 算法相比,采用改进的 PSO 算法后,系统优化的最优风机控制参数中的下垂控制系数约增加了 1.30,而虚拟惯量控制系数减小了 17.09。因此,利用改进的 PSO 算法,风机系统通过降低虚拟惯量能量释放、增加下垂控制的能量支撑,达到了提高风机整体调频能力的目标。

## 4.3 风速适应性分析

为验证文中方法在分布式风速场景下的适应性,设计以下 3 种场景。场景一中,所有风电场的风速均为 11.765 m/s,风机初始出力为 6 120 MW;场景二中,使用分布式方案,系统内共 14 个风电场,对每个风电场设置不同的风速,风机的总计初始出力为 6 120 MW;场景三中,使用分布式方案,且风速与场景二不同,风机的初始出力为 6 500 MW。设置故障选取最严重故障双击直流闭锁,系统损失 8 GW 有功功率。各场景下风电场风速  $V_w$  设置见图 7。

在场景一下,改进 PSO 算法参数以及标准 PSO 算法参数的调频效果如图 8 所示。改进算法得到的参数下的风机稳态出力略大于标准优化方案参数下的风机稳态出力,风机最大暂态出力基本相等。改进算法参数下系统暂态频率最低点为 48.76 Hz,较标准算法参数下的系统暂态频率高 0.04 Hz,且改进算法参数下的系统稳态频率也略高于标准算法参数下的系统稳态频率。

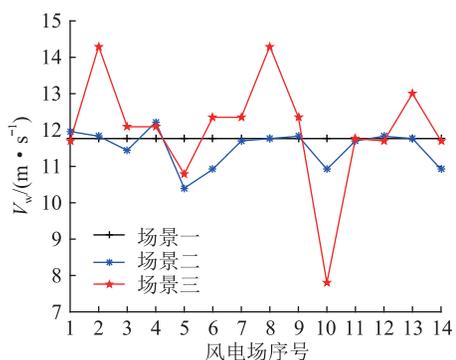


图7 风速设置

Fig.7 Wind speed setting

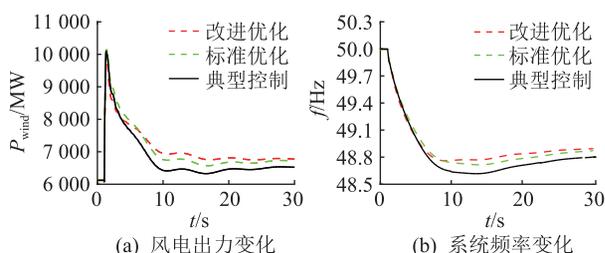


图8 场景一的调频效果

Fig.8 Frequency regulation effect in case one

图8中2种优化方案下的风机出力和电网频率变化差异较小,这主要是因为最严重扰动下,无论是标准 PSO 算法还是改进 PSO 算法所得到的控制参数均使风机耗尽全部旋转备用。从图8(a)可知,系统在趋于稳定后,2组控制参数下风机的最终稳态出力均为6800MW左右,达到风机在当前风速下的出力上限,即释放原10%减载率对应的风机备用。

在场景二下,系统内风机总计初始出力为6120MW,3种方案的调频效果对比如图9所示。3种方案下,风机暂态出力基本相同,2种优化方案的风机稳态出力最终都稳定在6800MW左右,均大于典型控制方案,达到风机在当前风速下的处理上限。改进算法参数下的系统稳态频率是3种方案中最高,达到48.91Hz,其系统暂态频率最低点为48.78Hz,较标准算法参数下的系统暂态频率高0.04Hz,且改进算法参数下的系统稳态频率也略高于标准算法参数下的系统稳态频率。

在场景三下,系统内风机总计初始出力为6500MW,3种方案的调频效果对比如图10所示。改进优化方案在系统频率和风机出力两方面,稳态值都是3种方案中最大。其中,风机出力稳态值达到7200MW左右,系统频率稳态值为48.90Hz。改进算法参数下的系统暂态频率最低点为48.76Hz,较标准算法参数下的系统暂态频率高0.04Hz,且改进

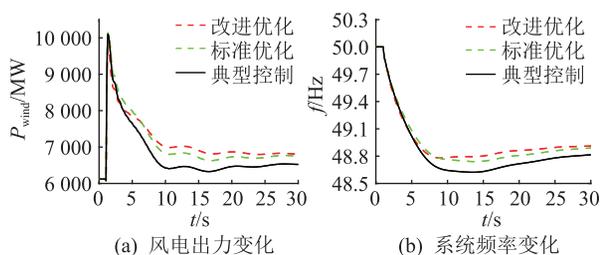


图9 场景二的调频效果

Fig.9 Frequency regulation effect in case two

算法参数下的系统稳态频率也略高于标准算法参数下的系统稳态频率。

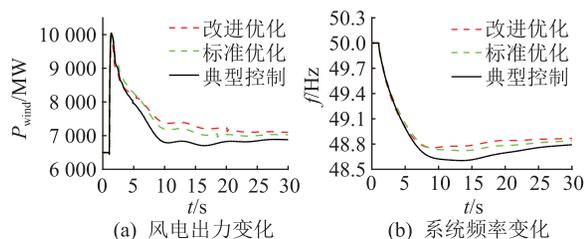


图10 场景三的调频效果

Fig.10 Frequency regulation effect in case three

#### 4.4 故障适应性分析

上述方案是在系统可能发生的最严重故障下优化得到的。为验证该方案在不同故障下的适应性,针对其他直流双极闭锁和电厂停运故障分别进行验证。在某4GW双极直流闭锁故障下,改进PSO算法参数以及标准PSO算法参数都提高了风机出力,具有良好的调频效果,风电出力和系统频率如图11所示。改进PSO算法得到的参数下,系统的暂态频率最低值为49.71Hz,较标准PSO算法优化参数下的最低频率提高0.09Hz,稳态频率也有0.01Hz提升,达到49.83Hz。特别地,比较图8中的曲线可知,由于该故障较轻,风电机组的旋转备用充裕,此时改进PSO算法所得控制方案能够显著提升系统整体调频能力。

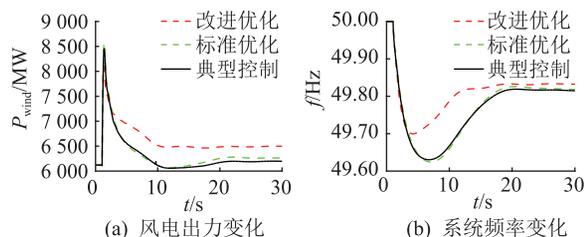


图11 双极4GW直流闭锁故障下调频效果对比

Fig.11 Frequency regulation effect of 4 GW active power loss under DC bipolar blocking event

某3GW切机故障下,改进PSO算法得到的参数下,系统暂态频率最低值为49.78Hz,较标准PSO算法优化参数下的最低频率提高0.05Hz,稳态频率

也有 0.01 Hz 提升,达到 49.85 Hz,如图 12 所示。与图 10 算例相似,由于风电机组的旋转备用充裕,改进优化方案调频性能明显优于标准优化方案。

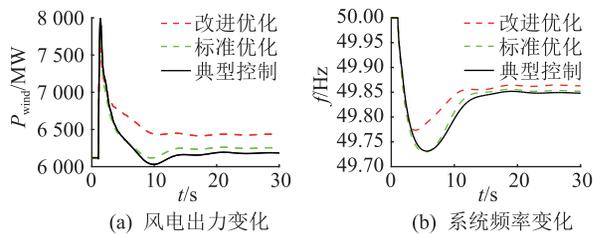


图 12 3 GW 切机故障下调频效果对比

Fig.12 Frequency regulation effect of 3 GW active power loss under cut-off event

针对最严重故障,当系统常规机组旋转备用水平分别为 10%,20%,30%时,改进控制方案下的调频效果如图 13 所示。由图 13 可知,该方案在不同的旋转备用水平下均有较好的调频效果。当系统旋转备用水平高于 10%时,系统的暂态频率和稳态频率显著提高。

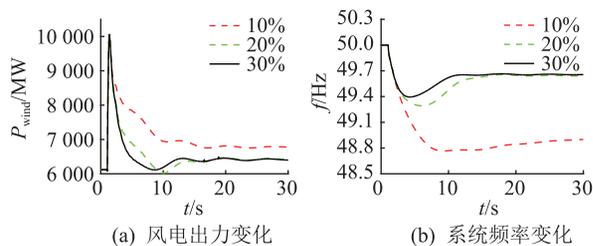


图 13 不同系统旋备的调频效果

Fig.13 Frequency regulation effect with different spinning reserve

## 5 结语

针对风机参与调频的综合控制理论分析不足,参数适应性差的问题,提出了风电机组虚拟惯量控制与下垂控制的协调控制策略,建立了风机参与调频的协调控制优化模型。通过动态调整 PSO 算法的超参数,并引入变异操作,提高了粒子的搜索能力,降低了算法陷入局部最优的风险。算例表明,基于改进的 PSO 算法求解优化模型,优化得出一组适用于不同故障的协调控制参数,增大了风机出力,具有良好的调频效果。

本文得到山东大学青年学者计划(2018WLJH-31)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

[1] 郑元杰. 大规模双馈风电并网对电力系统暂态稳定性的影响[D]. 北京:华北电力大学,2014.  
ZHENG Yuanjie. Impact of the interconnection of large-scale dfig type wind power on the transient stability of power systems

[D]. Beijing:North China Electric Power University,2014.  
[2] 林曼威,温步瀛. 大规模风电接入对电力系统暂态稳定性影响研究综述[J]. 电气技术,2017,18(4):1-8,38.  
LIN Minwei, WEN Buying. The overview of influence of large scale wind generation on transient stability of power system[J]. Electrical Engineering,2017,18(4):1-8,38.  
[3] YANG H, CHEN Y, HSU Y. Small-signal stability analysis and particle swarm optimisation self-tuning frequency control for an islanding system with DFIG wind farm [J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2019,13(4):563-574.  
[4] MORREN J, HAAN S W H D, KLING W L, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(1):433-434.  
[5] 丁磊,尹善耀. 考虑惯性调频的双馈风电机组主动转速保护控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(24):29-34,95.  
DING Lei, YING Shangyao. Active rotor speed protection strategy for dfig-based wind turbines with inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(24):29-34,95.  
[6] 潘文霞,全锐. 基于双馈风电机组的变下垂系数控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(11):126-131,186.  
PAN Wenxia, QUAN Rui. A variable droop control strategy for double-fed induction generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(11):126-131,186.  
[7] 付媛,王毅. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J]. 中国电机工程学报,2014,34(27):4706-4716.  
FU Yuan, WANG Yi. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(27):4706-4716.  
[8] 张冠锋,杨俊友. 基于虚拟惯量和频率下垂控制的双馈风电机组一次调频策略[J]. 电工技术学报,2017,32(22):225-232.  
ZHANG Guanfeng, YANG Junyou. Primary frequency regulation strategy of DFIG based on virtual inertia and frequency droop control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017,32(22):225-232.  
[9] WANG Z, WU W. Coordinated control method for DFIG-based wind farm to provide primary frequency regulation service [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(3):2644-2657.  
[10] ZHANG D, WANG Y, HU J, et al. Impacts of PLL on the DFIG-based WTC's electromechanical response under transient conditions: analysis and modeling [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2016,2(12):30-39.  
[11] 何成明. 大规模风电并网的有功协调控制研究[D]. 济南:山东大学,2015.  
HE Chengming. Studies on active power coordinated control with large-scale wind power integration [D]. Jinan:Shandong University,2015.  
[12] 王清,薛安成,张晓佳,等. 双馈风机下垂控制对系统小扰动角稳定的影响机理分析[J]. 电网技术,2017,41(4):1091-1097  
WANG Qing, XUE Ancheng, ZHANG Xiaojia, et al. Mechanism analysis of droop control of dfig influence on system

- small-signal dynamic stability based on damping torque analysis[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1091-1097.
- [13] ARANI M F M, MOHAMED A R I. Dynamic droop control for wind turbines participating in primary frequency regulation in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5742-5751.
- [14] SHI H, WEN H, HU Y, et al. Reactive power minimization in bidirectional DC-DC converters using a unified-phaser-based particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 990-1006.
- [15] 林子杰, 刘建坤, 陈静, 等. 基于粒子群算法的 MMC-UPFC 参数优化[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(6): 23-26.  
LIN Zijie, LIU Jiankun, CHEN Jing, et al. A PSO algorithm based approach for optimizing MMC-UPFC control system parameters[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(6): 23-26.
- [16] 刘世成, 张建华, 刘宗岐. 并行粒子群算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 108-112.  
LIU Shicheng, ZAHNG Jianhua, LIU Zongqi. Application of parallel adaptive particle swarm optimization algorithm in reactive power optimization of power systems[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 108-112.
- [17] CHANG-CHIEN L R, LIN W T, YIN Y C. Enhancing frequency response control by dfigs in the high wind penetrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 710-718.
- [18] 李常刚, 李华瑞, 刘玉田, 等. 计及低频减载动作的最大暂态频率偏移快速估计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 27-35.  
LI Changgang, LI Huarui, LIU Yutian, et al. Fast estimation of maximum transient frequency deviation consider under-frequency load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 27-35.
- [19] 刘萌, 徐陶阳, 李常刚, 等. 基于粒子群算法的受端电网紧急切负荷优化[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(1): 120-128.  
LIU Meng, XU Taoyang, LI Changgang, et al. Optimization of emergency load shedding of receiving-end power grid based on particle swarm optimization[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2019, 49(1): 120-128.
- [20] 陈斌. 双馈风电机组参与电力系统频率调节的综合控制方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.  
CHEN Bin. Research on the integrated control method of dfiparticipating in power system frequency regulation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [21] 陈载宇, 沈春, 殷明慧, 等. 面向 AGC 的变速变桨风电机组有功功率控制策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 9-14.  
CHEN Zaiyu, SHEN Chun, YIN Minghui, et al. Review of active power control strategy for variable-speed variable-pitch wind turbine participating in AGC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 9-14.

作者简介:



游广增

游广增(1982),男,硕士,高级工程师,从事电力系统分析工作(E-mail: mysteryou@qq.com);

杭志(1996),男,硕士在读,研究方向为新能源发电与并网;

陈凯(1993),男,硕士在读,研究方向为新能源发电与并网。

### Wind turbine generator frequency control based on improved particle swarm optimization

YOU Guangzeng<sup>1</sup>, HANG Zhi<sup>2</sup>, CHEN Kai<sup>2</sup>, LIU Chao<sup>3</sup>, QIAN Yingchun<sup>1</sup>, LI Changgang<sup>2</sup>

(1. Power Grid Planning and Research Center, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650011, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, China;

3. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China)

**Abstract:** When virtual inertia control and droop control are used simultaneously in high proportion wind power system, there will be frequency regulation power competition problems. In order to improve the frequency regulation effect of the system, it coordinates and optimizes the virtual inertia control and droop control of wind turbines. A model of coordinated control strategy is constructed for wind turbines participating in frequency regulation. The particle swarm optimization algorithm is improved: according to search algebra, inertia weight  $\omega$ , self learning factor  $c_1$  and social learning factor  $c_2$  are dynamically adjusted; and mutation operation is added. Based on the improved particle swarm optimization algorithm, the control parameters are optimized. The coordinated control strategy of wind turbine participating in frequency regulation is obtained. Finally, a provincial power grid is taken as an example to verify the effectiveness of control strategy and improved algorithm.

**Keywords:** wind power generation; virtual inertia control; droop control; coordination control; particle swarm optimization(PSO)

(编辑 钱悦)