

# 基于粒子群算法的含大规模风电互联系统的负荷频率控制

周晖<sup>1</sup>, 付娅<sup>1</sup>, 韩盟<sup>2</sup>, 肖智宏<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 北京市电力公司调度通信中心, 北京 100031;  
3. 国网北京经济技术研究院, 北京 100052)

**摘要:** 以含大规模风电的互联电力系统为研究对象, 以抑制风电并网时所引起的系统频率不稳定为目的, 提出了基于 PSO 的负荷频率控制器。传统的负荷频率控制器根据区域控制偏差来调整机组的出力, 使区域控制偏差 ACE 趋于零, 从而保证全系统发出的出力和负荷功率相匹配。把风电输出当作一个负的负荷作为等效负荷, 在传统的比例积分控制器中引入 PSO 智能控制, 可以进一步提高对等效负荷的控制效果。通过在 Matlab/Simulink 中构建的含风电的两区域互联电力系统的仿真结果表明, 无论是互联电网的频率偏差还是联络线的交换功率, 控制指标更优。

**关键词:** 风电接入; 频率稳定; 负荷频率控制器; 粒子群智能控制; 仿真

## Load frequency control of power systems with large scale of wind power integrated based on particle swarm algorithm

ZHOU Hui<sup>1</sup>, FU Ya<sup>1</sup>, HAN Meng<sup>2</sup>, XIAO Zhi-hong<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;  
2. Beijing Electric Power Dispatching and Communication Center, Beijing 100031, China;  
3. State Power Economic Research Institute, Beijing 100052, China)

**Abstract:** An interconnected power system with large scale of wind power integration is taken as our research object. In order to keep the stability of frequency, a PSO based load frequency controller is proposed. According to the amount of area control error (ACE), traditional load frequency controller is to adjust the output of units in order to make ACE approach to zero. Then output from all generators is matched to the demand from load. Output from wind units is taken as a negative load and an equivalent load is formed. Intelligent PSO is introduced into traditional load frequency controller and is expected to improve the control performance. The simulation based on the model, which is constructed on Matlab/Simulink platform demonstrates that, for the new design controller, its performance index whether frequency error of interconnected network or exchange flow for the interconnected line is better than that of traditional load frequency controller.

**Key words:** integration of wind power; frequency stability; load frequency controller; PSO intelligent control; simulation

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)10-0001-07

## 0 引言

随着当今世界化石能源的日益枯竭和环境的不断恶化, 各国都在纷纷采取措施加快可再生能源的利用和发展。风能作为一种取之不尽用之不竭的清洁能源, 得到了越来越多的重视, 目前风力发电已成为可再生能源发电技术中发展最快和最为成熟的一种<sup>[1]</sup>。由于风电场输出功率的波动性, 其大规模

的并网必然给电网带来一系列的问题<sup>[2]</sup>, 如电能质量、系统稳定性、电网的调度计划和运行的经济性等<sup>[3-4]</sup>。并且随着风电容量在系统中所占比例的增大, 上述影响越来越显著。其中, 对系统频率的影响更不可忽视, 它直接关系到电力系统的安全与稳定运行。在这种情况下, 如何抑制因风电接入而引发的系统频率的波动以保证频率安全性和稳定性, 已成为风电研究中重要的课题之一。

目前, 国内外研究克服风电接入系统后频率控制问题的主要方法有以下几个方面<sup>[5]</sup>: 提高风电预测精度<sup>[6]</sup>, 做好调度计划, 有利于减少系统的运行

**基金项目:** 国家电网公司科技项目《新一代智能变电站设计关键技术研究》

成本和备用容量；通过在风电机组中引入频率响应环节，提高其自身的有功调节，使风电场在一定程度上参与系统频率调节<sup>[7]</sup>；在风电场装设如燃料电池、飞轮等储能设备，使风电引起的功率波动就地得到平衡<sup>[8]</sup>；利用常规机组的调频能力，即现有的调速器和自动发电装置<sup>[9]</sup>。

为了维持有功功率的平衡，同时保证风电场的最大出力，目前频率控制最现实的手段是充分挖掘既有电力系统的调频能力，来满足更大的风电容量的接入。而提高现有系统调频能力最直接的手段就是负荷频率控制器的设计，它具有投入少，效果好的优点。

在以往的研究中，文献[10]介绍了风电出力的处理方式，即把风电场的出力的波动作为一个负的负荷波动接入系统中；文献[11]说明了 AGC 在风电接入时频率控制的可行性，但缺乏具体的控制策略的设计和实施。智能控制器具有较好的自适应性和处理非线性系统的优点，比传统的比例积分控制器更能适应变化条件下的控制问题，文献[12-13]说明了模糊控制和神经网络控制在负荷频率控制上的控制效果及其优越性；基于此，本文在以含风电的两区域互联系统为研究对象，建立了其负荷频率控制系统模型，然后将具有快速收敛特性的粒子群控制<sup>[14]</sup>应用于风电接入的互联电力系统中，分析它对频率性能指标的改善程度，并在 Matlab/Simulink 仿真平台上用算例加以验证。

### 1 含风电的两区域互联系统的负荷频率控制模型

负荷频率控制(LFC)是根据区域控制偏差(Area Control Error, ACE)来实现对机组的控制调节的。它通过调整机组的出力来改变系统总的发电水平,使区域控制偏差 ACE 在机组有功功率连续调节下趋于零,从而保证全系统的发电出力和负荷功率相匹配。

#### 1.1 两区域互联系统的负荷频率控制系统模型

两区域互联系统的负荷频率控制系统模型如图 1 所示,它由调速器模块、原动机模块、发电机-负荷模块、联络线模块、LFC 控制器等组成。

图中,  $\tau_{eA}$  和  $\tau_{eB}$  为两互联系统的调速器惯性时间常数,  $R_A$  和  $R_B$  为调速器的调差系数,  $\tau_{TA}$  和  $\tau_{TB}$  为汽轮发电机的惯性时间常数,  $K_{PA}$  和  $K_{PB}$  为系统增益,  $T_{PA}$  和  $T_{PB}$  为系统的惯性时间常数,控制器采用比例积分控制,其输出  $P_c$  为

$$P_c = K_{cp} \cdot ACE + \int K_{ci} \cdot ACE dt \quad (1)$$

式中:  $K_{cp}$  为比例增益;  $K_{ci}$  为积分增益。

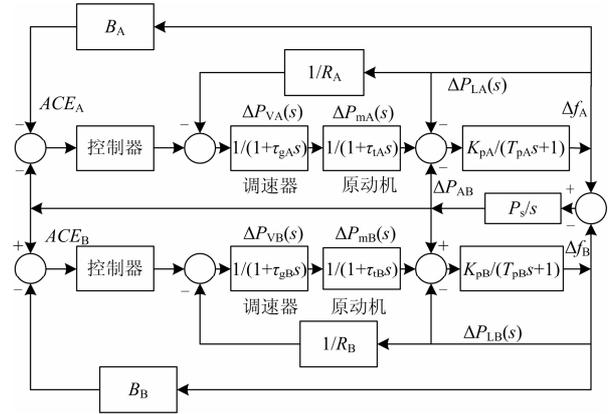


图 1 两区域互联系统的负荷频率控制模型

Fig. 1 Model of load frequency control for an interconnected grid with two regions

对于一个互联的电力系统,在给定的联络线交换功率前提下,各个控制区域只对本区域发生的负荷扰动进行控制,而由系统的负荷频率控制器对系统的频率和联络线交换功率进行同时控制。负荷频率控制器常采用联络线频率偏差控制方式(TBC-TBC),即两区域的频率控制偏差为

$$\begin{cases} ACE_A = \Delta P_{AB} + B_A \Delta f_A \\ ACE_B = \Delta P_{BA} + B_B \Delta f_B \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\Delta P_{AB}$  为联络线交换功率变化量(方向是由区域 A 指向区域 B);  $B_A$ 、 $B_B$  为频率偏差系数;  $\Delta f_A$ 、 $\Delta f_B$  为区域 A 和区域 B 的频率偏差。

#### 1.2 风速模型

风速是影响发电机出力的主要参数,目前国内外使用较多的风速模型为四分量模型<sup>[8]</sup>,即它是由基本风、阵风、渐变风和随机风这四个分量组成。它们的定义及数学表述如下。

##### (1) 基本风

基本风  $\bar{v}$  一直存在于风力机正常运行的过程,它由风电场测风所得的威布尔分布参数近似决定,即

$$\bar{v} = A \cdot \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \quad (3)$$

式中:  $\bar{v}$  为基本风速 (m/s);  $k$  和  $A$  分别为风力发电机的形状参数和尺度参数;  $\Gamma(\cdot)$  为伽马函数。由于该分量基本保持不变,在仿真时可作为常数来处理。

##### (2) 阵风

阵风  $v_{wg}$  反映了风速突然发生变化的情况,通常用它来考核系统在较大风速变化时的动态特性。

$$v_{WG} = \begin{cases} 0 & t < T_{IG} \\ v_{\cos} & T_{IG} \leq t < T_{IG} + T_G \\ 0 & t \geq T_{IG} + T_G \end{cases} \quad (4)$$

$$v_{\cos} = \max G / 2 \{1 - \cos 2\pi [(t/T_G) - (T_{IG}/T_G)]\}$$

式中,  $v_{\cos}$ 、 $T_G$ 、 $T_{IG}$ 、 $\max G$  分别为阵风的风速 (m/s)、周期 (s)、启动时间 (s) 和最大值 (m/s)。

### (3) 渐变风

渐变风速  $v_{WR}$  用来描述风速逐渐变化的特性。在电力系统静态稳定分析中, 特别是在分析风电系统对电网频率波动的影响时, 通常用于考核系统在风速渐变时系统频率的稳定性。其数学表达式为

$$v_{WR} = \begin{cases} 0 & t < T_{1R} \\ v_{\text{camp}} & T_{1R} < t < T_{2R} \\ \max R & T_{2R} < t < T_{2R} + T_R \\ 0 & T \geq T_{2R} + T_R \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $v_{\text{camp}} = \max R [1 - (t - T_{2R}) / (T_{1R} - T_{2R})]$ , 且  $v_{\text{camp}}$ 、 $\max R$ 、 $T_{1R}$ 、 $T_{2R}$  和  $T_R$  分别为渐变风速 (m/s)、最大值 (m/s)、起始时间 (s)、终止时间 (s)、保持时间 (s)。

### (4) 随机风速

随机风速  $v_{MN}$  用来反映风速的随机特性, 采用随机模块表示。

上述四种风作用在风力机上的风速为

$$v_W = \bar{v} + v_{WG} + v_{WR} + v_{WN} \quad (6)$$

在 Matlab/Simulink 环境下搭建以上四种分量风速模块, 风电场风速的变化过程见图 2。其中: 阵风的起始时间为 100 s, 终止时间为 300 s, 最大值为 0.4 m/s; 渐变风的起始时间为 300 s, 终止时间为 500 s, 最大值为 0.5 m/s; 基本风和随机风始终存在, 仿真时间为 600 s。

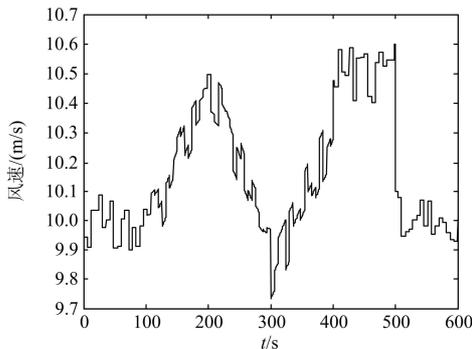


图 2 风速变化曲线

Fig. 2 Curve of wind speed

## 1.3 风电场出力模型

风的动能通过风力机转化为机械能, 风力机作为风力发电机的主要能量捕获部件, 把捕获的风能经过齿轮箱增速传递到发电机转化为电能再送入电网。其中, 风力机是风电机组最主要的部件, 其输出功率为

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p \quad (7)$$

式中:  $P_m$  为风力机输出的功率;  $C_p$  为风能利用系数, 它是关于叶尖速比和桨距角的函数, 其理论最大值为 0.593, 实际应用中达不到此值;  $S$  为风力机扫掠面积, 单位为  $\text{m}^2$ ;  $\rho$  为空气密度, 单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v$  为风速, 单位为  $\text{m}/\text{s}$ 。

目前, 国内外新建的风电场多以变速恒频双馈风力发电机为主, 其功率特性曲线如图 3 所示。在低风速时, 通过调节发电机转矩使转速跟随风速变化, 获得最佳叶尖速比和最大的风能利用系数, 以保证输出功率为最大值; 在高速时, 通过变桨距系统改变桨叶的桨距角来限制风力机获取能量, 使风力发电机组功率保持在额定值附近, 保证平稳的输出。

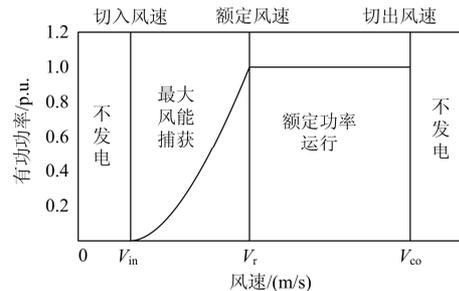


图 3 变速恒频双馈风力发电机的功率特性曲线

Fig. 3 Power characteristic curve of doubly-fed VSCF wind unit

以单机容量为 1 500 kW 的变速恒频双馈风力发电机 UP77/1500 为例, 其切入风速、切出风速、额定风速分别为 3 m/s、25 m/s 和 11 m/s, 风轮的功率系数  $C_p$  为 40%, 空气密度取  $1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 风力机直径为 77.6 m。在 Matlab/Simulink 中仿真得到风电场的输出功率变化情况见图 4, 风电场由 100 台此种风力发电机组组成, 风电场功率变化比较剧烈, 最大、最小出力分别为 137 MW 和 106 MW, 波动较大。

## 2 粒子群优化算法

### 2.1 粒子群算法的原理

粒子群算法最早是在 1995 年由美国社会心理学家 James Kennedy 和电气工程师 Russel Eberhart 共同提出的一种高性能的优化算法, 其基本思想是,

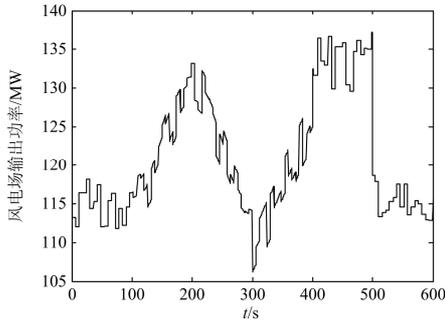


图4 风电场出力变化曲线

Fig. 4 Curve of wind power output

每个优化问题的潜在解都是搜索空间的粒子，所以粒子都有一个被优化的函数决定的适应值，每个粒子还有一个速度向量决定它们飞行的方向和距离，然后粒子们就追随当前的最优粒子在解空间中进行搜索。

假设目标搜索空间是  $D$  维的，空间中  $m$  个粒子组成一个群体，其中第  $i$  个粒子的位置表示为  $x_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ ,  $i=1, 2, \dots, m$ ，其速度表示为  $v_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。至今为止，第  $i$  个粒子搜索到的最优位置为  $p_i=(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$ ，整个粒子群搜索到的最优位置为  $p_g=(p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})$ ，粒子的更新公式为

$$\begin{cases} v_{id}(t+1) = \omega(t) \cdot v_{id}(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{id} - x_{id}(t)) + c_2 \cdot r_2 \cdot (p_{gd} - x_{id}(t)) \\ x_{id}(t+1) = x_{id}(t) + v_{id}(t+1) \end{cases} \quad (8)$$

当  $v_{id} > v_{\max}$  时，取  $v_{id} = v_{\max}$ ；当  $v_{id} < v_{\min}$  时，取  $v_{id} = v_{\min}$ 。

其中： $m$  为种群规模； $c_1$  和  $c_2$  为学习因子； $r_1$  和  $r_2$  为  $[0, 1]$  上的均匀分布的随机数； $V_{\max}$  为最大限制速度，是非负数，通常  $V_{\max}$  设为  $[-x_{\max}, +x_{\max}]$  的 10% ~ 20%。

## 2.2 粒子群算法的改进

粒子群与改进的粒子群算法对于优化问题的计算性能的改善，已经有很多的研究<sup>[15]</sup>，并都得到了证实。考虑到粒子群算法中所用的参数不多，而每个参数的设置对算法的性能都会产生影响。因此，对粒子群中的参数，采用了以下修正技术。

### (1) 惯性权值

在本文中，迭代过程采用线性微分递减调准惯性权值，其计算公式如式 (9)。

$$\omega(t) = \omega_{\text{start}} - (\omega_{\text{start}} - \omega_{\text{end}}) \left( \frac{t}{t_{\text{max}}} \right)^2 \quad (9)$$

式中： $t$  为当前迭代次数； $t_{\text{max}}$  为最大迭代次数； $\omega_{\text{start}}$  为惯性权重初值，取 0.9； $\omega_{\text{end}}$  为惯性权重终值，取

0.4。

通过对  $\omega$  变化方程及实验结果进行分析，由于在算法进化初期  $\omega$  的减小趋势缓慢，全局搜索能力很强，有利于找到很好的优化种子，较快地定位最优解的大致位置，在算法进化后期， $\omega$  的减小趋势加快，因此一旦在前期找到合适的种子，可以使得算法收敛速度加快。

### (2) 学习因子

根据经验通常设学习因子  $c_1=c_2=2$ 。本文采用反余弦函数构造学习因子调整策略，反余弦策略的特点是在初期通过加速  $c_1$ 、 $c_2$  的变化使得算法较快地进入局部搜索，在算法后期则设置比线性和凹函数策略更理想的  $c_1$  和  $c_2$  值，使粒子保持一定的搜索速度，避免过早收敛。反余弦学习因子构造方法如式 (10)。

$$\begin{cases} c_1 = c_{1\min} + (c_{1\max} - c_{1\min}) \left[ 1 - \frac{\arccos\left(\frac{-2 \times t}{t_{\max}} + 1\right)}{\pi} \right] \\ c_2 = c_{2\max} + (c_{2\max} - c_{2\min}) \left[ 1 - \frac{\arccos\left(\frac{-2 \times t}{t_{\max}} + 1\right)}{\pi} \right] \end{cases} \quad (10)$$

式中： $c_{1\max}$ 、 $c_{2\max}$  为学习因子的最大值； $c_{1\min}$ 、 $c_{2\min}$  为学习因子的最小值； $t$  为当前迭代次数； $t_{\max}$  为最大迭代次数；

### (3) 自适应变异

变异操作拓展了在迭代中不断缩小的种群搜索空间，使粒子能够跳出先前搜索到的最优值位置，在更大的空间中展开搜索，同时保持了种群的多样性，提高了算法寻找到更优解的可能性，避免算法陷入局部最优。

粒子群算法对负荷频率控制中 PI 控制器的参数进行优化，设两区域参数相同，则  $K_{ciA}=K_{ciB}=K_{ci}$ ， $K_{cpA}=K_{cpB}=K_{cp}$ ，则优化的控制器参数简化为  $K_{ci}$  和  $K_{cp}$ 。

运用以上改进技术对 PI 控制器的参数进行优化，可以看到优化时的适应值收敛曲线，见图 5，可以看出改进的 PSO 收敛速度要快于标准的 PSO。

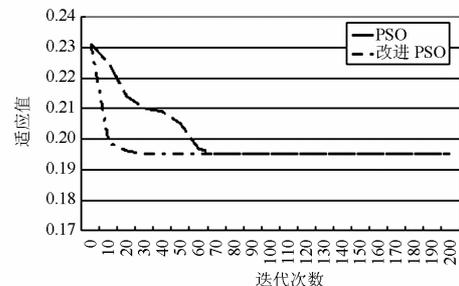


图5 PSO 与改进 PSO 的收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve for PSO and revised PSO

### 3 仿真实验及结果分析

考虑两区域互联系统的负荷频率控制问题, A、B 两控制区域各有一台 300 MW 的常规火电机组 (非再热式汽轮机组), A 区域还有一个 150 MW 的风电场, 各机组的额定频率均为 50 Hz, 两区域机组通过联络线相连, 组成互联系统。其中系统框图见图 1, 图中主要计算用参数取为:  $R_1=R_2=2.5$  p.u.,  $\tau_{g1}=\tau_{g2}=0.08$  s,  $\tau_{T1}=\tau_{T2}=0.2$  s,  $K_{P1}=K_{P2}=100$  p.u.,  $T_{P1}=T_{P2}=20$  s,  $B_1=B_2=0.41$  p.u.,  $P_s=0.068$  p.u.。

风速及风电场输出功率的变化见图 2 和图 4, 用电负荷变化一般分为随机分量、脉动分量和持续分量三种, 由于仿真时间较短, 将用电负荷的变化综合成一个随机量和下降变化的趋势, 用来模拟一个负荷下降阶段的负荷变动情况, 如图 6 所示。

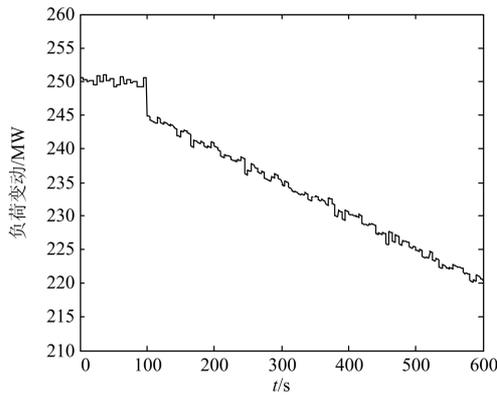


图 6 负荷变化曲线  
Fig. 6 Curve of load variation

把变化的风电场出力和变化的负荷的共同作用, 作为一个等效的负荷变动, 其变化曲线如图 7 所示。

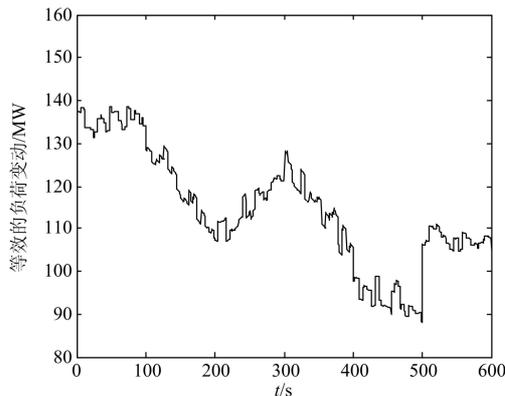


图 7 等效的负荷变化曲线  
Fig. 7 Curve of the equivalent load

为了验证所研究的控制器的控制效果, 分三种情况进行了仿真, 即分别是不含负荷频率控制时,

含传统负荷频率控制时以及基于改进 PSO 的负荷频率控制时, 它们的仿真曲线见图 8、图 9。

#### (1) 不含负荷频率控制时

针对等效负荷的变化, 两互联系统只依靠常规机组的一次调频进行控制。仿真得到的频率偏差曲线图 8 (a) 显示, 当只进行频率的一次调节时, 系统 A 的频率偏差值大致在  $-0.55 \sim -0.35$  Hz 之间波动, 频率变化范围大。按照全国互联电网调度管理规程中的规定, 互联电网频率的标准是 50 Hz, 频率偏差不得超过  $\pm 0.2$  Hz。而未加负荷频率控制时的系统频率偏差远大于该允许值, 不能起到良好的控制系统频率的作用。

此外, 从联络线的功率交换曲线图 9(a) 可以看出, 联络线交换功率的计划值为 0, 当只进行频率的一次调节时, 联络线上的交换功率在  $-70 \sim -45$  MW 之间变动, 变动范围较大, 且不能稳定在计划值, 可知此系统不能实现对联络线交换功率的控制。

需要说明的是, 在仿真初期, 频率偏差和交换功率偏差都出现了较大的波动, 这是由于仿真开始时瞬间加入较大的风电功率和负荷所致。但在系统的调节下, 这两个值都能够较快地趋于稳定。

#### (2) 含传统的负荷频率控制时

从图 8(b)、图 9(b) 中可以看出, 由于负荷频率控制器的作用, 系统的频率偏差在  $-0.1 \sim 0.1$  Hz 之间, 绝大多数的点的频率偏差在  $-0.04 \sim 0.04$  Hz 之间波动, 能够满足电力系统规定的正常频率偏差要求。联络线的交换功率在  $-6 \sim 6$  MW 之间波动, 并且在联络线交换功率的计划值 0 附近稳定, 可以很好地实现对含风电系统的联络线交换功率的控制作用。

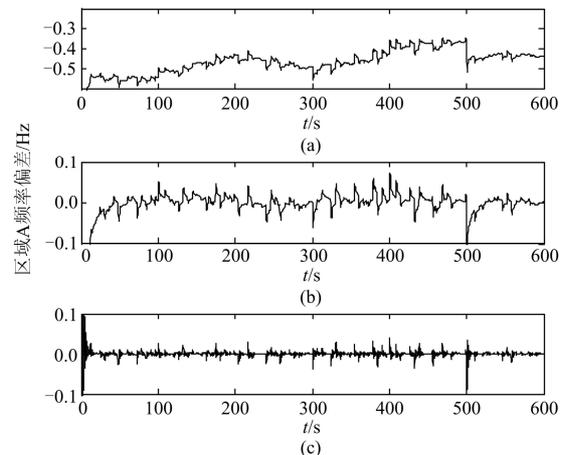


图 8 区域 A 频率偏差变化曲线图  
Fig. 8 Curve of frequency deviations in area A

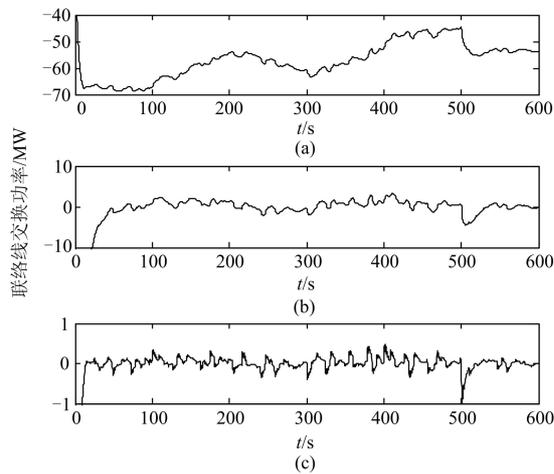


图 9 联络线交换功率偏差变化曲线图

Fig. 9 Curve of tie-line power deviations

### (3) 含改进 PSO 的负荷频率控制时

图 8(c)和图 9(c)显示,系统的频率偏差在 $-0.1 \sim 0.04$  Hz 之间波动, 绝大多数的点的频率偏差在 $-0.02 \sim 0.02$  Hz 之间波动, 频率的控制效果得到更大程度的提高。联络线的交换功率在 $-1 \sim 1$  MW 之间波动, 并且稳定于联络线交换功率的计划值 0, 对联络线交换功率的控制效果更佳。这意味着改进的控制器可以更好地实现含风电的互联电力系统的负荷频率控制作用。

将上述三种仿真结果汇总于表 1 中。由此看出, 基于改进 PSO 的 LPC 能保证频率偏差在电力系统的允许范围内, 而且联络线的交换功率波动范围也变小。

表 1 三种情况下的仿真结果汇总表

Table 1 Summary of simulations in three conditions

比较项目	不含 LFC	包含传统的 LFC	基于改进 PSO 的 LFC
区域 A 的频率偏差/ Hz	$-0.55 \sim -0.35$	$-0.1 \sim 0.1$	$-0.04 \sim 0.04$
是否满足系统频率偏差要求	不满足	满足	满足
联络线的交换功率/ MW	$-70 \sim -45$	$-3 \sim 3$	$-1 \sim 1$

## 4 结论

归纳以上所做的工作, 得出如下结论:

(1) 风电的大规模接入, 增加了电网频率的波动, 进而增加了电网调度运行的难度。为了保持系统频率的稳定性和安全性, 探讨了设计出能应对风电大规模并网造成系统频率波动的负荷频率控制器的可行性。

(2) 模拟了一段时间内的风电出力特性, 并将风电出力作为“负”的负载作为等效负荷加入到系统中, 把含风电的两互联电力系统作为研究对象, 构建了对应的仿真系统。

(3) 利用粒子群算法具有较好的寻优性能且易于实现的特点, 将其应用于传统比例积分控制器中, 可以优化控制器的参数。而采用改进粒子群算法, 可以增强该算法的收敛性能。

(4) 通过对含风电的互联电力系统三种情况下的仿真发现, 对于因波动的风电接入的互联电力系统, 在无负荷频率控制时, 系统频率不能满足要求; 加入传统的负荷频率控制后, 能使得系统频率在要求的范围内; 而采用改进 PSO 优化控制器参数的负荷频率控制, 其负荷频率控制的性能优于前两种控制方案。

需要指出的是, 以上仅对含风电的互联电力系统的负荷频率控制设计时, 如何处理风电出力的波动, 采用怎样的控制器设计进行仿真探讨, 对于该系统其频率控制能适应最大的风电出力波动范围, 将作为下一步继续探讨的课题。

## 参考文献

- [1] 施鹏飞. 风力发电的进展和趋势[J]. 中国电力, 2002, 35(9): 86-90.  
SHI Peng-fei. Progress and trends of wind power generation[J]. Electric Power, 2002, 35(9): 86-90.
- [2] CHEN Z, BLAABJERG F. Wind farm-a power source in future power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(6-7): 1288-1300.
- [3] 朱莉, 潘文霞, 霍志红, 等. 风电场并网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 98-100.  
ZHU Li, PAN Wen-xia, HUO Zhi-hong, et al. Grid-connected wind farm technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011: 98-100.
- [4] 彭晖, 黄学良. 基于 MATLAB-SIMULINK 软件风电场建模仿真研究[J]. 电工电气, 2009(3): 33-36.  
PENG Hui, HUANG Xue-liang. Wind farm modeling simulation study based on MATLAB-SIMULINK software[J]. Electrotechnics Electric, 2009(3): 33-36.
- [5] 崔杨, 兰文博, 严干贵, 等. 大规模风电接入系统后的频率控制问题初探[C] // 中国电机工程学会第十届青

- 年学术会议论文集, 吉林, 2008: 580-583.
- CUI Yang, LAN Wen-bo, YAN Gan-gui, et al. Frequency control problem of power system with large-scale wind power[C] // Conference Proceedings of the Tenth Youth of the Chinese Society of Electrical Engineering, Jilin, 2008: 580-583.
- [6] 王丽婕, 廖晓钟, 高阳, 等. 风电场发电功率的建模和预测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 118-121.
- WANG Li-jie, LIAO Xiao-zhong, GAO Yang, et al. Summarization of modeling and prediction of wind power generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 118-121.
- [7] 彭喜云, 刘瑞叶. 变速恒频双馈风力发电机辅助系统调频的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 56-61.
- PENG Xi-yun, LIU Rui-ye. Research on the frequency regulation of aiding system of VSCF double-fed wind generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 56-61.
- [8] 于芑, 赵瑜, 周玮, 等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 35-40.
- YU Peng, ZHAO Yu, ZHOU Wei, et al. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 35-40.
- [9] LUO Chang-ling, FAR H G, BANAKAR H. Estimation of wind penetration as limited by frequency deviation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(3): 789-791.
- [10] RODRIGUEZ-AMENEDO J L, ARNALTE S, BURGOS J C. Automatic generation control of a wind farm with variable speed wind turbines[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2002, 17(2): 279-284.
- [11] 贾涛. AGC 平抑风电场输出功率波动的仿真分析[C] // 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会论文集, 北京, 2008: 95-98.
- JIA Tao. Simulation analysis of AGC control wind farm fluctuation of output power[C] // China Higher Education Proceedings of the 24th Annual Conference of Power System and Its Automation Specialty, Beijing, 2008: 95-98.
- [12] SREENATH A, ATRE Y R, PATIL D R. Two area load frequency control with fuzzy gain scheduling of PI controller[C] // First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, India, 2008: 899-904.
- [13] 罗兵, 章云, 黄红梅. 小波神经网络与PID相结合的负荷频率控制[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(1): 25-28.
- LUO Bing, ZHANG Yun, HUANG Hong-mei. Load-frequency control based on wavelet neural network and PID control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(1): 25-28.
- [14] 马飞, 陈雪波, 李小华. 改进的粒子群算法在电力系统 LFC 控制中的应用[C] // 中国控制与决策学术年会论文集, 哈尔滨, 2005: 2072-2075.
- MA Fei, CHEN Xue-bo, LI Xiao-hua. Improved particle swarm optimization for LFC control of the power system[C] // Proceedings of Chinese Control and Decision Conference, Harbin, 2005: 2072-2075.
- [15] 龚纯, 王正林. 精通 Matlab 最优化计算[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- GONG Chun, WANG Zheng-lin. Optimization calculation using Matlab[M]. Second Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- 
- 收稿日期: 2013-08-12; 修回日期: 2013-10-22
- 作者简介:
- 周 晖 (1964-), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事电力市场运营、电力负荷预测、电力系统经济调度、配电系统的管理与监控的研究; E-mail: hzhou@bjtu.edu.cn
- 付 娅 (1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制;
- 韩 盟 (1982-), 男, 工程硕士研究生, 工程师, 研究方向为电网自动化与 EMS 系统高级应用。