

DOI: 10.7667/PSPC170955

基于 PSO-GSA 算法的含 DFIG 互联系统 AGC 优化控制研究

张俊武, 王德林, 陈斌, 刘柳, 潘志豪, 康积涛

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 传统双馈感应风力发电机(DFIG)的解耦控制使其无法响应电网的频率变化。随着风电渗透率的不断提高, 电网调频压力不断增大, 有必要对含 DFIG 互联系统 AGC 优化控制进行研究。首先建立了将风电作为“负的负荷”的两区域 AGC 模型, 通过引入改进的虚拟惯性控制使 DFIG 具有更好的频率响应的能力。同时以快速消除系统区域控制偏差和风机转速偏差为目的, 采用 PSO-GSA 算法对控制区 PID 控制器和 DFIG 转速控制单元 PI 控制器参数进行优化。仿真结果表明, 单个区域受负荷扰动时, 风电参与调频时能提供更多的有功功率支撑以减小同步机调频出力, 能有效缓解同步机调频压力。PSO-GSA 算法较 PSO 和 GSA 迭代速度快且适应度值更好, 基于 PSO-GSA 参数优化后的控制器对系统区域频率偏差、联络线功率变化和区域控制偏差信号的超调量和调节时间都有明显改善, 增强了系统的稳定性。

关键词: 互联系统; DFIG; AGC; PSO-GSA; 频率响应

Research on PSO-GSA algorithm optimization for interconnected AGC system including DFIG wind turbines

ZHANG Junwu, WANG Delin, CHEN Bin, LIU Liu, PAN Zhihao, KANG Jitao

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The decoupling control of the traditional Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) based on wind turbine makes it impossible to respond to the frequency variation of the power system, the pressure of frequency modulation in power system is increasing because of the daily increasing penetration of wind power, as a result, it is of great significance to study the AGC optimal control of two-area interconnected power systems which includes DFIG. Wind power is regarded as a negative load which is incorporated into the two-area interconnected automatic generation control model, DFIG has better capability of frequency response due to the improved virtual inertia control. Moreover, the proposed PSO-GSA algorithm is used to optimize the parameters of PID controller of AGC and PI controller of the speed control block. Simulation results show that frequency regulation of DFIG could effectively relieve frequency deviation and pressure of synchronous machine in the power system. Moreover, PSO-GSA algorithm in this paper has faster convergence speed and better fitness value than PSO and GSA. The controller optimized by PSO-GSA algorithm is able to improve system frequency deviation, tie line power, area control error, overshoot and stabilization time, which enhances the stability of the power system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477143).

Key words: interconnected power systems; DFIG; AGC; PSO-GSA algorithm; frequency response

0 引言

2016 年 11 月, 国家能源局印发的《风电发展“十三五”规划》指出, 到 2020 年底, 我国风电累计并网装机容量确保达到 2.1 亿 kW 以上, 年发电量

达到 4 200 亿 kWh, 约占全国总发电量的 6%。这表明, 风能将成为未来可再生能源的主要来源。

传统双馈机组(Doubly-fed Induction Generator, DFIG)的解耦控制使其无法响应电网的频率变化, 为减弱风电并网给电力系统带来的冲击, 保证电力系统安全稳定运行, 国内外学者针对风电机组参与调频的控制方法问题做了大量研究, 取得了非常丰

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477143)

硕的成果。文献[1-3]综述了风电并网给系统带来的影响和风电参与系统调频 DFIG 内部控制方法。文献[4-6]在 DFIG 中加入虚拟惯性控制环节, 通过电网频率变化调节风功率跟踪曲线, 释放风电机组“隐藏”动能, 使 DFIG 能够快速响应系统频率变化, 增大了电网的惯性。文献[7-9]综合利用桨矩角控制和次优功率运行方式的策略使 DFIG 参与系统二次调频, 实现了风电机组对电网频率的动态支持。

区域之间自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)的作用主要是通过控制区域控制偏差(Area Control Error, ACE)来调整发电出力。国内外对于 AGC 的研究主要集中在两区域非再热式火电互联和多区域水火互联系统, 对存在风电的联调系统研究较少。近年来, 风力发电得到迅猛的发展, 因此有必要对其进一步研究。此外, 将优化算法运用到动态模型进行优化的研究屡见不鲜。文献[10-12]采用粒子群算法和改进的粒子群算法对互联系统 PI 控制器参数进行优化, 改善了系统动态响应能力。文献[13]通过竞争算法对含 DFIG 两区域系统中的 PI 控制器参数进行优化, 使 DFIG 参与调频时系统频率响应能力提高, 但对风机的模拟过于简单, 不能完全反映风机特性, 有待进一步改善。文献[14]仿真对比了遗传算法 GA、蚂蚁群算法 ACO 和万有引力搜索法(Gravitational Search Algorithm, GSA)的优化能力, 证明采用 GSA 时对系统超调量、调节时间、特征值和振荡的改善效果明显。文献[15]运用 ITAE 目标函数对 DFIG 参与两区域互联系统参数进行优化, 使 AGC 系统性能更佳, 但其中用到的具体优化方法并未提及。

本文在 Matlab/Simulink 中建立了含 DFIG 两区域 AGC 模型, 通过引入改进的虚拟惯性控制改善 DFIG 的响应能力, 采用 PSO-GSA 算法进行参数优化, 系统受负荷扰动时, DFIG 缓解同步机的调频压力, 同时使系统频率动态得以改善。最后的仿真验证了本文方法的正确性和有效性。

1 含风电两区域互联系统 AGC 模型

互联系统 AGC 通过控制 ACE 信号逐渐趋于零来调整发电机出力, 保证整个系统发电机的出力和负荷平衡。在给定联络线交换功率的前提下, 系统的负荷频率控制器对系统的频率和联络线功率进行同时控制。

1.1 风电参与两区域 AGC 互联系统模型

将风电机组作为“负的负荷”纳入两区域互联系统, 通过分析各环节的传递函数得到计及风电的两区域互联电力系统 AGC 模型如图 1 所示。其中,

额定频率为 50 Hz, 调速器时间常数 $T_{g1}=T_{g2}=0.08$ s, 非再热式汽轮机时间常数 $T_{t1}=T_{t2}=0.4$ s, 负荷阻尼系数 $T_{p1}=T_{p2}=20$ s, $K_{p1}=K_{p2}=120$ Hz/p.u., 调速器调节常数 $R_1=R_2=2.4$, $T_{12}=0.0866$ (标么值)。ACE₁、ACE₂ 分别区域 1、2 的区域控制偏差; Δf_1 、 Δf_2 分别区域 1、2 的频率偏差; ΔP_{L1} 、 ΔP_{L2} 分别区域 1、2 的负荷扰动, 设其为阶跃变化。

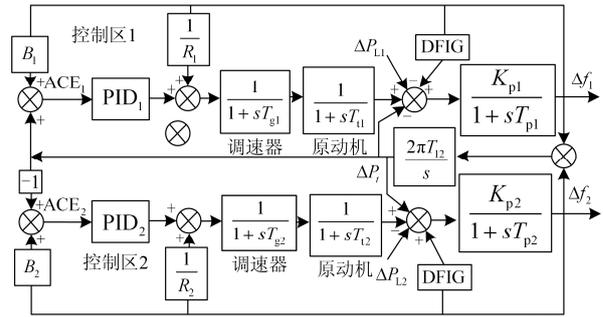


图 1 计及 DFIG 的两区域互联电力系统 AGC 模型

Fig. 1 Two-area interconnected power system integrated with DFIG wind turbines

在该模块中, PID 控制器传递函数为

$$G(s) = K_{pi} + K_{ii} \frac{1}{s} + K_{di} s, \quad i=1,2 \quad (1)$$

式中, K_{pi} 、 K_{ii} 、 K_{di} 分别为比例、积分、微分增益。

频率控制器采用联络线功率频率偏差(TBC-TBC), 两区域的区域控制偏差信号为

$$\begin{cases} ACE_1 = \Delta P_i + B_1 \Delta f \\ ACE_2 = -\Delta P_i + B_2 \Delta f \end{cases} \quad (2)$$

式中: B_1 、 B_2 为控制区的频率响应系数; ΔP_i 为联络线实际交换功率和计划交换功率偏差; Δf 为频率偏差。

1.2 DFIG 控制模块

通常情况下, DFIG 由于其解耦控制不具备频率响应能力, 风电的接入增加了电网频率的波动, 为了减小风电所带来功率的波动性, 通过附加虚拟惯性控制使 DFIG 出力随频率变化而变化。现有研究普遍根据系统实时频率偏差及其变化率得到附加环节, 当频率发生变化时, 释放转子动能, 提供有功功率支撑。为了使 DFIG 更大限度且更稳定地向系统提供有功功率, 更好地改善系统频率响应特性, 本文将附加环节加以改进, 将原有下垂控制中系统频率偏差 Δf 改进为系统频率偏差最大值 Δf_{max} , 作为虚拟惯性控制的输入。图 2 为本文所用的附加频率响应模块。其中: P_{ncref} 为某风速下风机功率输出的减载功率; ΔP_m 为风力发电机输出的机械功率; ΔP_f 为 DFIG 惯性响应环节增加出力; ΔP_r 为风机下垂控

会更新速度和位置, 更新公式为

$$\begin{cases} a_i^d = F_i^d(t)/M_i(t) \\ v_i^d(t+1) = \text{rand}_j \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \\ x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $v_i^d(t)$ 、 $x_i^d(t)$ 、 $a_i^d(t)$ 分别表示粒子 i 于 t 时刻在 d 维空间的速度、位置、加速度; rand_j 为 $[0,1]$ 的随机数; $F_i^d(t)$ 为粒子 i 于 t 时刻在 d 维空间所有力的大小; $M_i(t)$ 为表示粒子 i 于 t 时刻的惯性质量。

根据上述 GSA 原理, 在迭代过程中不断地更新每个粒子的位置和速度, 直到全局最优解 $\text{best}(t)$ 达到预设精度或者达到预设次数, 算法终止。

2.2 PSO-GSA 算法

从粒子惯性质量的修正、粒子的精英保留策略以及粒子的全局记忆能力出发, 针对 GSA 算法的加速机制和全局搜索策略做相应改进, 可得到结合 PSO 算法和 GSA 算法优点的 PSO-GSA 算法。

1) 惯性质量的修正

在 GSA 算法中, 每个粒子的惯性质量由粒子所在位置所求得的适应值决定。粒子的惯性质量越大越容易吸引其他粒子向其移动, 该粒子所代表的优化问题的解越接近搜索空间中的最优解。本文中每一个粒子设定一个相应的权值, 使惯性质量大的粒子在算法的下次迭代过程中拥有更大的惯性质量, 而惯性质量小的粒子在下次迭代过程中其惯性质量变小。数学表达式为

$$\omega_i(t) = M_i(t) \cdot \frac{N_{\max} - N_{\min}}{M_{\min} - M_{\max}} + \frac{N_{\min} M_{\min} - N_{\max} M_{\max}}{M_{\min} - M_{\max}} \quad (17)$$

式中: $\omega_i(t)$ 为每个粒子惯性质量相应的权值; N_{\max} 、 N_{\min} 为权值的最大值和最小值; M_{\max} 、 M_{\min} 为惯性质量的最大值和最小值。

改进后的每个粒子的惯性质量计算公式为

$$M_{i'}(t) = \omega_i(t) \times M_i(t) \quad (18)$$

2) 粒子的精英保留策略

GSA 算法中为了使搜索和求解达到平衡, 提高算法的求解速度, 应当在迭代过程中逐步减少式(16)中粒子的数目。因此本文在算法的每一步迭代过程中, 仅考虑一部分惯性质量较大的粒子对其他粒子的作用。假设搜索空间中惯性质量比较大起吸引作用的粒子数量为 K_{best} , 它是一个时间函数。初始化 K_{best} 为 K_0 , 随着迭代进行, K_{best} 逐渐变小。到迭代最后只剩下少数粒子吸引其他粒子。因此将式(16)修改为

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in K_{\text{best}}, j \neq i}^N \text{rand} \times F_{ij}^d(t) \quad (19)$$

3) 粒子的全局记忆能力

GSA 和 PSO 两种元启发式智能优化算法均是通过粒子在空间内的移动寻求最优解。引力搜索算法仅利用当前位置的影响来更新位置, 并没有考虑粒子的记忆能力。在 PSO 算法中, 不但考虑了粒子自身的位置, 也考虑了粒子间的群体信息交流。为了避免 GSA 算法陷入局部最优, 本文引入粒子群算法的全局记忆能力来改进 GSA 算法局部搜索能力不足的缺陷。

引入粒子群算法的全局记忆能力后, 新的混合粒子群和引力搜索算法既遵循万有引力定律和牛顿第二定律, 又具备了粒子群算法的记忆和群体交流功能。改进后的速度更新公式为

$$v_i^d(t+1) = \text{rand}_j v_i^d(t) + b_1 \text{rand}_k (p_{\text{best}}^d - x_i^d(t)) + b_2 \text{rand}_m (q_{\text{best}}^d - x_i^d(t)) + a_i^d(t) \quad (20)$$

式中: b_1 、 b_2 为 $[0,1]$ 的常数, 通过调节 b_1 、 b_2 的大小可以控制粒子群算法的记忆能力对万有引力搜索算法的影响程度, 平衡引力和群体记忆对算法的影响; rand_j 、 rand_k 、 rand_m 为 $[0,1]$ 的随机变量。

通过引入基于权值的惯性质量修正、粒子的精英保留策略以及全局记忆能力的改进, 克服基本 GSA 算法收敛速度较慢和 PSO 容易陷入局部最优的缺点, 本文将此改进的 GSA 算法称为 PSO-GSA。

2.3 PSO-GSA 算法步骤

- (1) 初始化搜索空间中所有粒子的位置、速度和权值的上下限, 设置算法迭代次数;
- (2) 计算各粒子的适应度值;
- (3) 更新 $G(t)$, $\text{best}(t)$, $\text{worst}(t)$, $M_i'(t)$, 其中 $i=1, \dots, N$;
- (4) 根据式(19)的精英保留策略计算粒子所有合力的大小;
- (5) 计算粒子的加速度, 然后根据式(20)的记忆能力更新粒子的速度;
- (6) 更新粒子的位置;
- (7) 重复步骤(2)~(6), 直到达到预设的迭代次数后停止, 输入算法的最优解;
- (8) 结束算法。

PSO-GSA 算法对待优化参数进行寻优的过程如图 3 所示。

由图 3 可见, PSO-GSA 算法与 Simulink 模型通过粒子对应的性能指标相联系。PSO-GSA 算法优化得到的粒子赋值给 PID 待优化参数, 通过运行 Simulink 模型, 计算性能指标, 再将性能指标作为粒子适应度值, 最后通过判断是否满足结束条件来判断是否结束寻优。

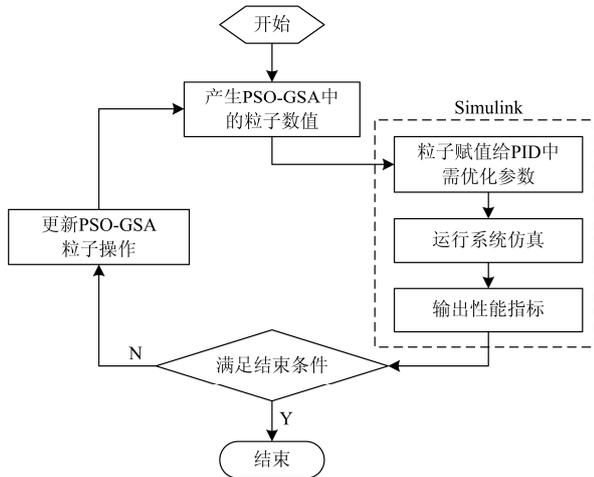


图 3 PSO-GSA 算法优化 PID 参数过程示意图

Fig. 3 Process diagram of PSO-GSA algorithm to optimize PID parameters

3 仿真分析

在 Matlab/Simulink 中构建两区域互联 AGC 控制模型(图 1), 假设两个区域具有相同的容量且运行特性相似, 全部常规发电机装机容量为 2 800 MW。将容量为 1 200 MW 的风电作为“负的负荷”接入区域 2。

3.1 不同算法比较

仿真时同步机参数与图 1 参数保持一致, 取 DFIG 风速 $v=9$ m/s, 桨距角 $\beta=0^\circ$, $T_r=0.1$, $T_w=6$, 负荷波动 0.2 p.u.。分别采用 PSO、GSA、PSO-GSA 算法仿真, 其中, 粒子数 50, 迭代次数 100, 仿真时间 30 s。研究所用不同算法仿真参数结果如表 1 所示, 图 4 为采用 3 种算法的迭代次数-适应度对比曲线。

表 1 3 种算法仿真参数结果

Table 1 Simulation results of three algorithms

	PSO	GSA	PSO-GSA
K_{p1}	-1.747 3	-0.201 4	-1.280 0
K_{i1}	-0.868 7	-0.413 4	0.050 9
K_{d1}	-0.574 4	-0.449 8	-1.280 0
K_{p2}	0.765 0	-0.287 9	-0.467 0
K_{i2}	-1.660 4	-1.047 4	-1.280 0
K_{d2}	-3.405 3	-1.196 3	-1.280 0
K_{wp}	-2.735 0	0.022 4	-1.280 0
K_{wi}	2.432 2	0.010 7	0.059 8
适应值	0.191 9	0.117 0	0.081 96

从图 4 可以看出, 采用 PSO 算法在迭代 10 次左右即可收敛, 且适应度值小于 0.2。但仿真时发现, PSO 收敛速度虽快, 却存在容易陷入局部最优值的

缺陷。GSA 算法收敛速度相较于 PSO 算法慢, 但优点是改善了粒子的适应度值。PSO-GSA 结合 PSO 收敛速度快和 GSA 适应度值好的优点, 其收敛速度介于 PSO 和 GSA 之间, 适应度值达到 0.081 96, 同时还克服了 PSO 易陷入局部最优值的缺陷。

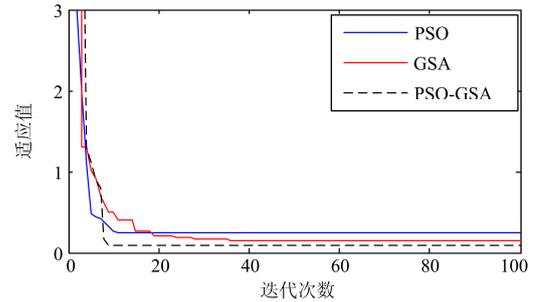


图 4 不同算法适应度对比曲线

Fig. 4 Comparison of fitness function curve based on improved PSO, GSA and PSO-GSA

3.2 动态响应性能比较

3.2.1 不同算法动态性能比较

仿真时, 控制区域 2 在 1 s 时施加固定 0.2 p.u. 扰动负荷, 得到如图 5 所示不同算法动态响应曲线。

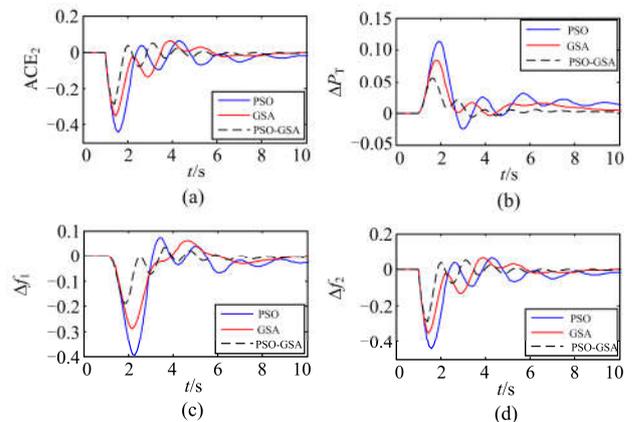


图 5 不同算法动态响应曲线

Fig. 5 Dynamic response curves of different algorithms

由图 5 可知, 由于负荷的增大, 系统的频率出现了明显的下跌。采用 PSO-GSA 算法时, 区域 1 频率的最大偏差为 -0.18 Hz, 而 PSO 算法最大频率偏差为 -0.4 Hz。在联络线功率偏差方面, 采用 PSO-GSA 算法时为 0.055 p.u., 比 PSO 算法低了 0.06 p.u., 有效地减小了区域之间联络线的功率偏差。因而采用本文所提出 PSO-GSA 算法时表现出更好的动态稳定性。

3.2.2 风电参与/不参与调频时系统动态响应曲线

仿真时, 在区域 2 加入固定的负荷扰动 0.2 p.u., 采用 PSO-GSA 算法, 而保持系统其他的参数不变,

得到如图 6 系统动态响应曲线对比结果。

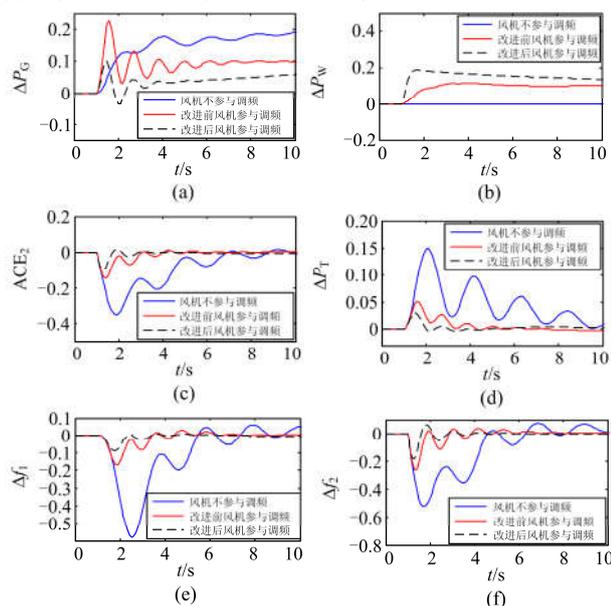


图 6 系统动态响应曲线对比

Fig. 6 Comparison of system dynamic response curve

由图 6(a)、图 6(b)可知,改进后 DFIG 参与调频时,通过响应系统的频率变化提供的附加功率比改进前多了 0.08 p.u.,同步发电机出力减小,有效地缓解了同步发电机的调频压力。由图 6(c)、图 6(d)可知:DFIG 不参与调频时,区域控制偏差最大为 0.35 p.u.,改进前 DFIG 参与调频为 0.17 p.u.,虽有明显改善,但比改进后频率偏差最大值仍多 0.02 p.u.;对于联络线功率偏差,DFIG 不参与调频时最大偏差达到了 0.15 p.u.,改进前为 0.05 p.u.,而改进后进一步降为 0.03 p.u.。因此,改进后 DFIG 参与调频使区域控制偏差和联络线功率偏差信号均得到明显改善。由图 6(e)、图 6(f)可以看出,当 DFIG 不参与系统调频时,两区域频率偏差最大跌落均超过了 0.5 Hz,改进前 DFIG 参与系统调频时最大跌落分别减小到 0.17 p.u.和 0.28 p.u.,改进后 DFIG 参与系统调频时两区域频率进一步减小到 0.09 p.u.和 0.17 p.u.,系统动态频率稳定性得到明显改善。

4 结论

本文在计及 DFIG 的两区域 AGC 系统仿真模型中,附加了改进的 DFIG 虚拟惯性环节,并运用 PSO-GSA 优化算法对系统参数进行优化。通过仿真验证,得到以下结论。

1) 改进的虚拟惯性环节改善了系统动态频率性能,缓解了同步机的调频压力,改善了系统频率动态性能。

2) 兼备 PSO 和 GSA 优点的 PSO-GSA 算法克服了 GSA 算法收敛速度较慢和容易陷入局部最优的缺点,收敛性能更强,适应度值得以改善。

3) 采用 PSO-GSA 算法优化的参数能使系统频率偏差、联络线功率、区域控制偏差信号控制指标效果更优,有利于系统的稳定运行。

参考文献

- [1] 谷俊和, 刘建平, 江浩. 风电接入对系统频率影响及风电调频技术综述[J]. 现代电力, 2015, 32(1): 46-51.
GU Junhe, LIU Jianping, JIANG Hao. Literature review on the influence of wind power on system frequency and frequency regulation technologies of wind power[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(1): 46-51.
- [2] 包宇庆, 李扬, 王春宁, 等. 需求响应参与大规模风电接入下的电力系统频率调节研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 32-37.
BAO Yuqing, LI Yang, WANG Chunqing, et al. On demand response participating in the frequency control of the grid under high wind penetration[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 32-37.
- [3] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 145-153.
LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145-153.
- [4] 赵晶晶, 吕雪, 符杨, 等. 基于双馈感应风力发电机虚拟惯性和桨距角联合控制的风光柴微电网动态频率控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3815-3822.
ZHAO Jingjing, LÜ Xue, FU Yang, et al. Dynamic frequency control strategy of wind/photovoltaic/diesel microgrid based on DFIG virtual inertia control and pitch angle control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3815-3822.
- [5] 赵晶晶, 吕雪, 符杨, 等. 基于可变系数的双馈风机虚拟惯量与超速控制协调的风光柴微电网频率调节技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 59-68.
ZHAO Jingjing, LÜ Xue, FU Yang, et al. Frequency regulation of the wind/photovoltaic/diesel microgrid based on DFIG cooperative strategy with variable coefficients between virtual inertia and over-speed control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 59-68.
- [6] 吴子双, 于继来, 彭喜云. 高风速段次优功率追踪方

- 式的风电调频方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 112-119.
- WU Zishuang, YU Jilai, PENG Xiyun. DFIG's frequency regulation method only for high wind speed with suboptimal power tracking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 112-119.
- [7] 王晓兰, 李家亮, 马呈霞. 基于功率预测的变速变桨距风电系统的优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 88-92.
- WANG Xiaolan, LI Jialiang, MA Chengxia. Optimization control of variable-speed variable-pitch wind power generation system based on power prediction[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 88-92.
- [8] 崔双喜, 王维庆, 张强. 风力发电机组独立变桨鲁棒自适应桨距角跟踪控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 52-57.
- CUI Shuangxi, WANG Qingwei, ZHANG Qiang. The independent robust adaptive pitch Angle tracking control in wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 52-57.
- [9] MAURICIO J M, MARANO A, GOMEZ-EXPOSITO A, et al. Frequency regulation contribution through variable-speed wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 173-180.
- [10] 刘斌, 王克英, 余涛, 等. PSO算法在互联电网CPS功率调节中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 36-39.
- LIU Bin, WANG Keying, YU Tao, et al. Study on the application of particle swarm optimization algorithm to power regulation of CPS in interconnected power grids[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6): 36-39.
- [11] SAIKIA L C, NANDA J, MISHRA S. Performance comparison of several classical controllers in AGC for multi-area interconnected thermal system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(3): 394-401.
- [12] 周晖, 付娅, 韩盟, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 1-7.
- ZHOU Hui, FU Ya, HAN Meng, et al. Load frequency control of power systems with large scale of wind power integrated based on particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 1-7.
- [13] ABBAS T S, FINI M H, ALIABADI S F. Fractional order PID controller design for LFC in electric power systems using imperialist competitive algorithm[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2014, 5(1): 121-135.
- [14] DAHIYA P, SHARMA V, SHARMA R N. Optimal generation control of interconnected power system including DFIG-based wind turbine[J]. IETE Journal of Research, 2015, 61(3): 285-299.
- [15] PATHAK N, BHATTI T S, VERMA A. New performance indices for the optimization of controller gains of automatic generation control of an interconnected thermal power system[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2017, 9: 27-37.

收稿日期: 2017-06-26; 修回日期: 2017-08-10

作者简介:

张俊武(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电的运行与控制, 风电场的调频及并网, 风电参与系统 AGC 控制; E-mail: 1003889130@qq.com

王德林(1970—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统机电动态、扰动传播、频率稳定与控制、连续体建模等。E-mail: dlwang@swjtu.cn

(编辑 葛艳娜)