

[文章编号] 1003-4684(2019)05-0046-06

考虑光伏发电不确定性的系统补偿 AGC 方法

龚 梦, 赵熙临, 马霁旻, 何晶晶

(湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 以包含光伏发电环节的分布式发电系统自动发电控制(AGC)为研究对象,拟通过补偿环节的引入,对系统结构进行调整,以消除光照不确定性对 AGC 的负面影响。首先,构建含光伏的互联 AGC 系统模型,并就光伏发电不确定性对 AGC 的影响进行分析;然后,设计补偿环节并通过粒子群优化算法对其参数进行优化,获取最优补偿效果;并基于分布式模型预测控制(DMPC)理论,以随机负荷曲线为扰动变量,仿真验证该系统频率变化及区域控制偏差。结果表明,在光伏发电系统输出波动情况下,AGC 系统良好的动态响应性能得到保证,从而验证了此方法的可行性和有效性。

[关键词] 自动发电控制(AGC); 分布式模型预测控制(DMPC); 光伏发电; 系统补偿

[中图分类号] TM732

[文献标识码] A

自动发电控制 AGC(Automatic Generation Control, AGC)是现代电力系统实现二次调频的重要手段,保证在电能供需不平衡时,尽可能减小频率偏差并维持电网频率在允许的范围内^[1-3]。随着能源需求与环境污染矛盾的日益尖锐,清洁能源装机容量不断提高,使得传统 AGC 过程更加复杂,这种复杂性体现在:1)光伏发电不确定性不可避免会对 AGC 产生负面影响;2)AGC 相对转动惯量的减小导致频率波动变大。针对上述问题,Arya^[4]、Mohanty^[5]、Kar^[6]等均提出将模糊控制与 PID 控制相结合的 AGC 系统控制策略,较传统比例积分微分(PID)控制,能有效改善超调及动态性能。Dahiya^[7]等人针对四区水火互联电力系统提出了一种分数阶 PID 控制器,该控制方式对负载变化具有很高的灵敏度。但上述方法均为多种控制方式的组合,复杂且不易实施。黄伟峰^[8]、Apostolopoulou^[9]等分别提出了一种基于平衡域动态模型的自适应 AGC 方法和一种无模型自适应控制算法,保证系统能达到 CPS 指标。Dahiya^[10]等针对多区域互联 AGC 系统提出了一种基于搜索算法的滑膜控制器,保证系统非线性约束下具有较好的动态性能。但综合来看,上述控制方法普遍不适用于大型控制系统。

因此,本文采用以最优化理论为内核的模型预测控制(MPC)作为 AGC 控制方法。MPC 不仅能提升具有时滞性、非线性、不确定性控制系统的鲁棒性,还能实现控制量实时在线优化^[11-14]。但在清洁能源占比较大的情况下,AGC 机组相对转动惯量降低,控制难度加大。Xu^[15]等针对受风能资源影响的 AGC 提出了一种动态增益控制(DGTC)方法,根据电力系统中不同的扰动动态计算 PI 控制参数。许昌^[16]等针对输出波动性大、随机性强的大型风电机组提出了一种机组层 WT-AGC 控制策略。Kumar^[17]等也针对风能存在的分布式发电系统 AGC 提出了一种基于模式搜索优化技术的在线自动增益调整算法(AGTA),该方法根据风电功率的变化自动计算控制器增益以达到最佳控制性能。笔者着眼于系统结构的变化,希望通过改变系统模型以获得更优的控制效果,以前期研究^[18]为基础,以分布式发电 AGC 系统为研究对象,将模型预测控制算法应用到互联电网 AGC 过程中。在考虑到光伏发电功率输出突变的情况下,以两区域互联电网为例,构建了 AGC 系统仿真模型,通过系统补偿的方式以减小光伏发电功率突变即外部环境的变化对 AGC 的影响,并采用分布式模型预测控制(DMPC)方法实现系统频率调整。

[收稿日期] 2019-08-05

[基金项目] 教育部科研项目(教外司留【2014】1685);湖北省教育厅教学研究项目(HBSY2017-10,省 2017304)

[第一作者] 龚 梦(1995-),女,湖北十堰人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为控制理论与控制工程

[通信作者] 赵熙临(1969-),男,湖北武汉人,工学博士,湖北工业大学教授,研究方向为电力系统自动化

1 分布式发电系统 AGC 模型

系统组成及等效原则,可构建其结构模型。两区域互联电网 AGC 系统的动态模型见图 1,模型中参数及变量见表 1。

以两区域电网互联为例进行分析,按照 AGC

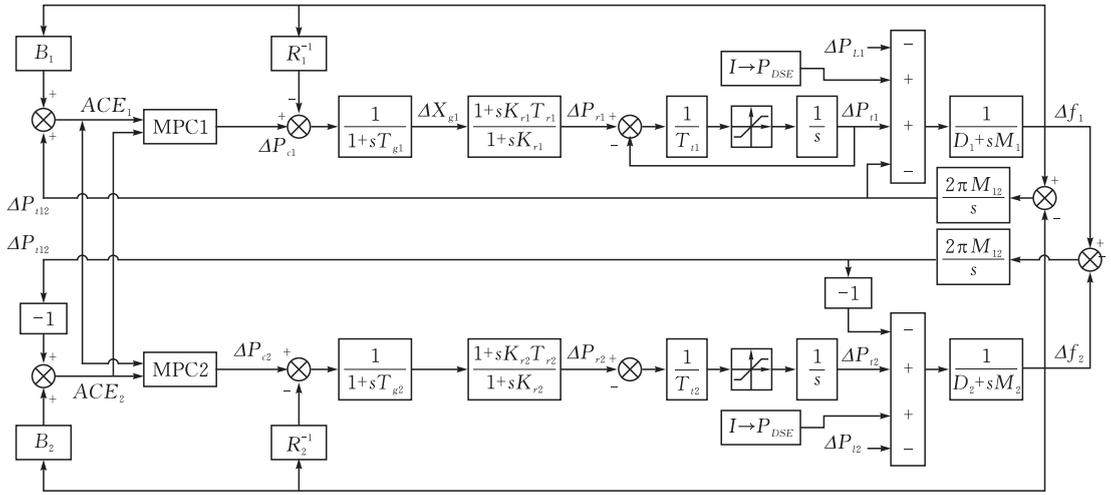


图 1 两区域互联电网分布式发电 AGC 系统动态模型

表 1 两区域互联 AGC 系统参数及变量

参数/变量	含义
T_{gi}	调速器时间常数
D_i	负荷阻尼系数
ΔP_{i1}	发电机输出功率增量
T_{ti}	发电机时间常数
T_{ri}	再热时间常数
ΔP_{r1}	再热发电机组输出热功率增量
K_{ri}	汽轮机再热系数
R_i	机组调差系数
ΔX_{gi}	调速器位置增量
M_i	机组转动惯量
B_i	系统调差系数
ΔP_{ci}	控制器控制量
Δf_i	为频率的变化量
T_{12}	联络线功率同步系数
ΔP_{L1}	负荷的变化量
ΔP_{12}	联络线交换功率变化量

分布式 MPC 控制器的设计需要将整体系统模型分解成适当的子系统模型,当以下标代表第 i 个控制区域($i=1,2$),可获取各区域系统状态方程

$$\begin{aligned} \dot{X}_i(t) &= A_{ii}X_i(t) + B_{ii}U(t) + F_{ii}W_i(t) + \\ &\sum_{i \neq j} (A_{ij}X_j(t) + B_{ij}U_j(t) + F_{ij}W_j(t)), \\ Y_i(t) &= C_{ii}X_i(t) \quad (i=1,2; j=1,2) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, $X_i \in R^n, U_i \in R^m, W_i \in R^k, Y_i \in R^r$ 分别代表第 i 个区域系统状态变量、控制变量、扰动变量和输出变量。控制过程中通过该数学模型计算后续时刻状态变量与输出变量序列,并通过目标函数的设计优化控制变量序列,将控制序列首元素的输出作为当前控制量,以实现控制过程的优化。

光伏参与 AGC 的两种方式为:一是光伏系统作

为 AGC 调整机组,但此时光伏系统不是工作在最大功率点;二是光伏发电系统等效为负荷变化作处理,其原因是考虑到实际过程中不弃风、不弃光要求。如图 1 所示,本文以分布式 MPC 为基本控制方法,区域互联电网将分解为各子系统模型以体现系统分布特征,考虑到光伏发电不参与 AGC 调整,所以本文将光伏发电波动视为功率波动。

2 光伏发电不确定影响分析

当光伏系统并网时,该系统的输出功率变化将影响电力系统负荷与资源的平衡。然而,光伏发电系统的输出功率变化是不可避免的。不确定性导致了最大功率跟踪(MPPT)的研究,其目的是追求最大功率输出^[19]。

光伏电池阵列是根据光伏电池的电压和功率需求组装而成。光伏电池是一种能吸收太阳光能量并通过光电效应将其转换为电能的半导体器件。典型的光伏电池输出特性如式(2)、(3)所示:

$$\begin{aligned} i_{PV} &= i_{ph} - i_D - i_{sh} \\ &= i_{ph} - i_o \left(\exp\left(\frac{q(v_{pv} + i_{PV}R_s)}{AKT}\right) - 1 \right) - \\ &\quad \frac{v_{pv} + i_{PV}R_s}{R_{sh}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: i_{PV}, v_{pv} 分别为电流和电压输出; i_{ph} 为光电流; i_D 为二极管结电流; i_o 为反向饱和电流; q 为电荷数; K 为波尔兹曼常数; T 为光伏电池温度; A 为二极管因子; R_s, R_{sh} 分别为光伏电池的串联和并联电阻。

$$P = VI =$$

$$V(I_{sc}(1 - A(\exp(B(V - DV)/V_{oc}) - 1)) + DI) \quad (3)$$

式中: V, I 分别为光伏阵列电压和电流; I_{sc} 为光生电流源,即为电池板对应的短路电流; V_{oc} 为光伏阵列的

开路电压; D 为占空比; A, B 为可求常数。

考虑光照变化时,例如光照强度从 800 W/m^2 减小到 600 W/m^2 ,然后又增加到 800 W/m^2 ,通过基于预测控制的最大功率跟踪(MPPT)技术的光伏发电功率输出见图 2、图 3。

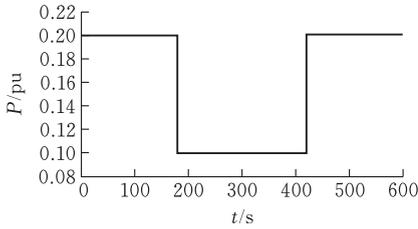


图 2 区域 1 光伏发电系统输出

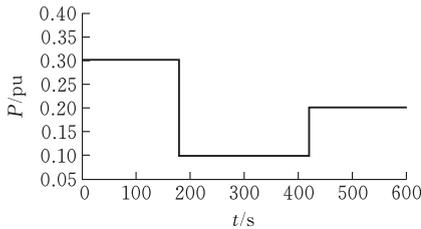


图 3 区域 2 光伏发电系统输出

随着分布式发电系统 AGC 的提出,不可避免地需要考虑光伏发电输出突变对系统控制性能的影响。当光伏发电系统输出发生突变时,分别以图 2、图 3 所示的光伏发电系统输出测试阶跃扰动下传统 AGC 维持负荷频率控制的能力。

当负荷扰动输入为阶跃信号时,给定区域 1 的扰动负荷 ΔP_{L1} 为 0.04 pu ,区域 2 的扰动负荷 ΔP_{L2} 为 0.02 pu ,则在图 2、图 3 所示光伏发电系统输出的影响下,两区域频率响应见图 4、图 5。

由图 4、图 5 可明显看到,光伏发电系统存在且输出功率发生突变时,频率响应的超调量很大,且调节时间也较长,系统的动态性能较低,以致无法达到理想的控制精度和期望。因此,光伏系统输出功率突变对 AGC 系统的影响不容忽视。

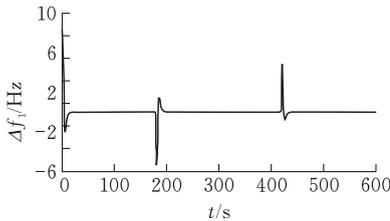


图 4 阶跃信号下 Δf_1 响应曲线

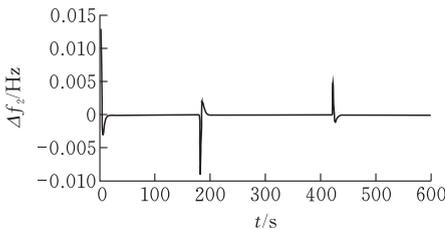


图 5 阶跃信号下 Δf_2 响应曲线

3 补偿策略

由前述可知,传统 MPC 方法具有较大的超调,会引起较大的频率波动。因此,参考串联校正环节的引入可以提高系统稳定性,改善系统性能,即在系统原有结构上增加新的环节改善系统性能,笔者采取对系统结构进行补偿的方式以避免或减小光伏发电功率输出突变对 AGC 的影响。补偿环节传递函数

$$G_c(s) = \frac{ms+n}{s+q} \quad (4)$$

其中:当 $q=0$ 时, $G_c(s)$ 等效为一个 PI 控制器;当 $q=0$ 且 $n=0$ 时, $G_c(s)$ 等效为一个比例环节,此时可通过调整 m 值来改变系统增益。

在上述补偿环节作用下,为寻求最好的控制效果,本文通过粒子群算法(PSO)^[20]进行全局寻优得到补偿环节的参数最优解,以避免或减小光伏发电不确定性对 AGC 的影响。对系统进行补偿的实现方式见图 6。

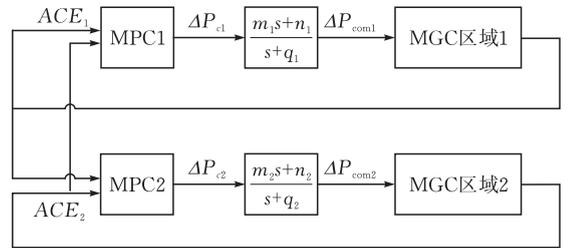


图 6 补偿后系统框图

如图 6 所示,在控制器与执行机构间增加补偿环节,以实现对该控制器的补偿。补偿环节包含 $m_1, n_1, q_1, m_2, n_2, q_2$ 六个待优化参数,本文粒子群算法(PSO)迭代规模设置为初始化 50 个粒子进行 50 次迭代。

补偿后系统状态变量、控制变量、扰动变量和输出变量分别为

$$\mathbf{X}_i = [\Delta f_i \quad \Delta P_{Li} \quad \Delta P_{ri} \quad \Delta X_{gi} \quad \Delta P_{t12} \quad \Delta P_{comi}]^T$$

$$\mathbf{U}_i = [\Delta P_{ci}]$$

$$\mathbf{W}_i = [\Delta P_{Li}]$$

$$\mathbf{Y}_i = [ACE_i \quad \Delta f_i \quad \Delta P_{t12}]^T$$

其

$$\mathbf{A}_{11} = \begin{bmatrix} \frac{-D_1}{M_1} & \frac{1}{M_1} & 0 & 0 & \frac{-1}{M_1} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_{t1}} & \frac{1}{T_{t1}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-m_1 K_{r1}}{R_1 T_{g1}} & 0 & \frac{-1}{T_{r1}} & \frac{1}{T_{r1}} & \frac{K_{r1}}{T_{g1}} & 0 \\ \frac{-m_1}{R_1 T_{g1}} & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{g1}} & 0 & 0 \\ 2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{n_1 - m_1 q_1}{R_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & -q_1 \end{bmatrix}$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} \frac{-D_2}{M_2} & \frac{1}{M_2} & 0 & 0 & \frac{1}{M_2} & 0 \\ \frac{-1}{T_{12}} & \frac{1}{T_{12}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-m_2 K_{r2}}{R_2 T_{g2}} & 0 & \frac{-1}{T_{r2}} & \frac{1}{T_{r2}} - \frac{K_{r2}}{T_{g2}} & 0 & 0 \\ \frac{-m_2}{R_2 T_{g2}} & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{g2}} & 0 & 0 \\ 2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{n_2 - m_2 q_2}{R_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & -q_2 \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_{r1}}{T_{g1}} & \frac{1}{T_{g1}} & 0 & n_1 - m_1 q_1 \end{bmatrix}^T$$

$$B_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_{r2}}{T_{g2}} & \frac{1}{T_{g2}} & 0 & n_2 - m_2 q_2 \end{bmatrix}^T$$

$$B_{12} = B_{21} = \mathbf{0}_{6 \times 1}$$

$$F_{12} = F_{21} = \mathbf{0}_{6 \times 1} \quad F_{11} = \begin{bmatrix} -1 \\ M_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$F_{22} = \begin{bmatrix} -1 \\ M_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C_{11} = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{22} = \begin{bmatrix} B_2 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$X_j \in R^n, U_j \in R^m, W_j \in R^k, Y_j \in R^r$ 分别代表与第 i 个区域的相邻的第 j 个区域系统的状态变量、控制变量、扰动变量和输出变量。 $A_{ii}, B_{ii}, F_{ii}, C_{ii}, A_{ij}, B_{ij}, F_{ij}$ 分别为对应维度的参数矩阵。

4 仿真分析

在 Matlab/Simulink 中利用 MPC 工具箱构建包含光伏发电系统的分布式发电系统 AGC 仿真模型,详细参数见表 2,并设计 DMPC 控制器。设置预测时域 $N_p = 10$,控制时域 $N_c = 3$ 。

设置仿真采样周期为 0.01 s,考虑光伏发电系统输出突变,采用上述系统补偿方式实现 AGC 控制,并与未加入补偿前的仿真结果进行对比。

表 2 两区域互联 AGC 系统动态模型仿真参数

参数	区域 1	区域 2
M_i	11	12.5
D_i	2.75	2.0
B_i	28	19
R_i	0.04	0.06
K_{ri}	0.3	0.4
T_{gi}	0.15	0.1
T_{ri}	11	9
T_{ti}	0.2	0.3
T_{12}	0.85	

以图 7、图 8 所示的某两区域电网某时段随机负荷变化曲线为例,考虑光伏不确定性,当光伏输入为图 2、图 3 所示时,对两区域互联电网 AGC 进行仿真,通过粒子群算法(PSO)进行全局寻优得到的参数最优解如见 3,两区域控制响应曲线分别见图 9—12。

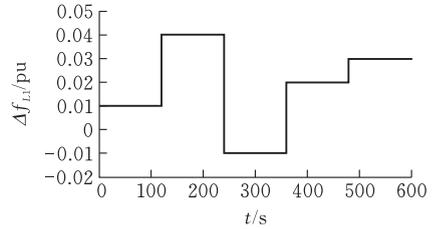


图 7 随机输入信号 ΔPL_1

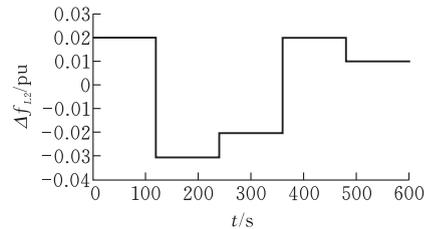
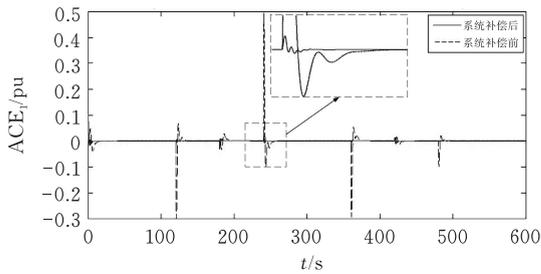
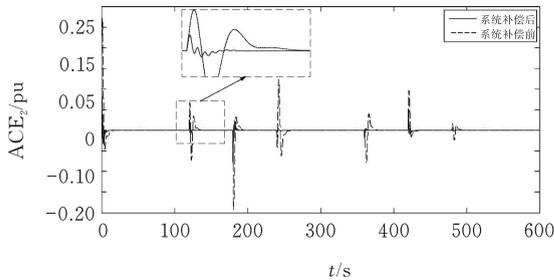
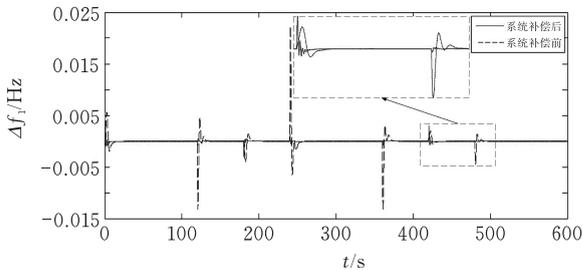
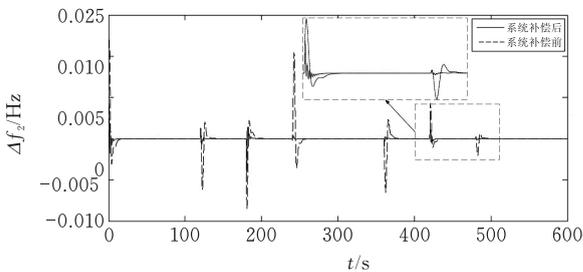


图 8 随机输入信号 ΔPL_2

表 3 随机信号下参数最优解

参数	最优解
m_1	5.187 793 973 963 098
n_1	4.591 708 935 793 283
q_1	0.763 401 703 669 231
m_2	5.107 249 768 899 896
n_2	6.428 451 138 599 305
q_2	0.579 802 457 772 249

图 9—12 表明在 DMPC 控制方式下,当光伏发电系统存在,且其输出功率产生突变的情况下,相比无系统补偿的 AGC 系统,对系统进行补偿后各输出曲线不仅超调量大大减小,而且调节时间也大大缩短,且系统最终趋于稳定。可见针对光伏发电系统存在的分布式发电系统 AGC,加入系统补偿环节能很大程度减小光伏发电输出突变给 AGC 带来的频率波动,控制效果更优。

图9 随机信号下 ΔACE_1 响应曲线图10 随机信号下 ΔACE_2 响应曲线图11 随机信号下 Δf_1 响应曲线图12 随机信号下 Δf_2 响应曲线

5 结束语

本文针对光伏发电系统输出不确定性对 AGC 频率控制存在的负面影响,提出了一种基于系统补偿的分布式模型预测控制方法。通过构建包含光伏发电系统的分布式发电系统两区域 AGC 模型,针对 DMPC 控制器加入系统补偿环节,运用粒子群优化算法进行全局寻优得到补偿参数最优解,并对系统补偿前后两种控制方式进行了仿真验证和对比。仿真结果表明,补偿后的 DMPC 方法具有更好的频率控制效果,从而验证了本文所提方法的可行性和有

效性。

[参考文献]

- [1] Milan S. Calović. Advanceses [J]. Electric Machines & Power Systems, 2012, 40(7):807-828.
- [2] 郭亮,于昌海,吴继平,滕贤亮,等.四川电网 AGC 机组协调优化控制策略研究与应用[J].电力系统保护与控制,2016,44(17):159-164.
- [3] 李中豪,黄屹俊,张沛超,等.大型风燃协调等效电厂的自动发电控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(4):44-50.
- [4] Arya Y, Kumar N. BFOA-scaled fractional order fuzzy PID controller applied to AGC of multi-area multi-source electric power generating systems[J]. Swarm & Evolutionary Computation, 2016:202-218.
- [5] Mohanty P K, Sahu B K, Pati T K, et al. Design and analysis of fuzzy PID controller with derivative filter for AGC in multi-area interconnected power system[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(15):3764-3776.
- [6] Kar S, Panda S, Pari T, et al. Design and analysis of Fuzzy PID Controller with Derivative Filter for AGC in multi-area interconnected Power System[J]. IET Generation Transmission & Distribution 10(15), August 2016.
- [7] Dahiya P, Sharma V, Naresh R. Solution approach to automatic generation control problem using hybridized gravitational search algorithm optimized PID and FOPID controllers[J]. Advances in Electrical & Computer Engineering, 2015, 15(2):23-34.
- [8] 黄伟峰,姚建刚,韦亦龙,等.无模型自适应控制算法在互联网 AGC 中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(4):78-84.
- [9] Apostolopoulou D, Sauer P W, Domínguez-García A D. Balancing authority area model and its application to the design of adaptive AGC Systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5):3756-3764.
- [10] Dahiya P, Sharma V, Naresh R. Automatic generation control using disrupted oppositional based gravitational search algorithm optimised sliding mode controller under deregulated environment[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(16):3995-4005.
- [11] Paola Falugi. Model predictive control for tracking randomly varying references [J]. International Journal of Control, 2015, 88(4):9.
- [12] 周念成,付鹏武,王强钢,等.基于模型预测控制的两区域互联网 AGC 系统研究[J].电力系统保护与控制,2012(22):46-51.

- [13] Venkat A N, Hiskens I A, Rawlings J B, et al. Distributed mpc strategies with application to power system automatic generation control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(6):1192-1206.
- [14] Yan Y, Zhang Y, Liu X. Distributed MPC strategy with application to AGC in the presence of variable speed wind turbine [C]. Control Conference. IEEE, 2015: 4151-4155.
- [15] Xu Y, Li F, Jin Z, et al. Dynamic gain-tuning control (DGTC) approach for agc with effects of WindPower [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5):3339-3348.
- [16] 许昌, 魏媛, 李涛, 等. 大型风电机组机组层 AGC 控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 69-74.
- [17] Kumar L V S, Kumar G V N, Madichetty S. Pattern search algorithm based automatic online parameter estimation for AGC with effects of wind power[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 84:135-142.
- [18] 赵熙临, 何晶晶, 付波, 等. 考虑区域间互联电网时延差异性的分布式 AGC 方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2018(3):439-444.
- [19] 郭勇, 孙超, 陈新. 光伏系统中最大功率点跟踪方法的研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(11):21-23.
- [20] 王东风, 孟丽. 粒子群优化算法的性能分析和参数选择[J]. 自动化学报, 2016, 42(10):1552-1561.

An AGC Method Based on System Compensation Considering Uncertainty of Photovoltaic Power Generation

GONG Meng, ZHAO Xilin, MA Jimin, HE Jingjing

(School of Electrical & Electronic Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: The existence of distributed generation will complicate the traditional automatic generation control (AGC) of regional interconnected power grid. The distributed generation system AGC, which includes photovoltaic generation, is selected as the research object. The system structure is adjusted through introducing compensation link to eliminate the negative impact of illumination uncertainty on AGC. Firstly, the AGC system model of the interconnected power grid including the photovoltaic power station is constructed, and the influence of the photovoltaic power uncertainty on the AGC is analyzed. Then, the compensation link is designed and introduced to make the system structure change to eliminate the adverse effect of illumination uncertainty on AGC. Furthermore, based on the distributed model predictive control (DMPC) theory, taking the step load curves as disturbance variables, the frequency variation and the regional control deviation curves of interconnected power grids are simulated and verified. The simulation results show that the proposed method can guarantee the good dynamic response performance of AGC system under the output fluctuation of PV system, and the feasibility and effectiveness of the proposed method is also verified.

Keywords: automatic generation control(AGC); distributed model predictive control(DMPC); photovoltaic power generation; system compensation

[责任编辑: 张岩芳]