

DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.19058

含规模化风电并网的负荷频率云PI控制策略研究

张斌¹, 张超², 韩晓娟³

(1. 国网冀北三河市供电有限公司, 河北省 三河市 065200; 2. 国网吉林省电力有限公司松原供电公司, 吉林省 松原市 138000; 3. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Research on Load Frequency Control Strategy Based on Cloud PI Controller in Large-scale Wind Power Connected to Grid

ZHANG Bin¹, ZHANG Chao², HAN Xiaojuan³

(1. State Grid Jibei Sanhe Power Supply Co., Ltd., Sanhe 065200, Hebei Province, China;

2. Songyuan Power Supply Company, State Grid Jilin Power Co., Ltd., Songyuan 138000, Jilin Province, China; 3. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

摘要: 针对规模化风电并网对系统调频造成的不确定性问题, 提出了一种计及风电不确定性的云模型负荷频率控制策略。首先将风电出力作为扰动信号, 与联络线功率偏差组成的区域控制偏差作为负荷频率控制器的输入量, 根据云模型规则发生器建立了具有不确定性映射关系的云(比例-积分, PI)负荷频率控制器。以含有风电的三区域互联电网为例, 通过某区域电网实测运行数据仿真分析表明, 所建立的云PI控制器能够较好地跟踪风电功率波动, 具有较强的抗干扰性。所提方法不仅满足了风电接入对电网调频的要求, 而且控制效果明显优于传统PI控制器。

关键词: 风电并网; 负荷频率; 控制; 云模型; 不确定性

ABSTRACT: Aiming at the uncertainty caused by large-scale wind power grid-connected to system frequency modulation, a cloud model load frequency control strategy considering the uncertainty of wind power was proposed. Firstly, the wind power output was regarded as the disturbance signal, and the regional control deviation composed of the wind output power and the power deviation of the tie line was regarded as the input of the load frequency controller. According to the cloud model rule generator, the cloud PI load frequency controller with uncertainty mapping relationship was established. Taking the three-area interconnected power grid with wind power as an example, the simulation analysis of the measured data in a certain regional power grid showed that the established cloud PI controller can better track the fluctuations of the wind output power and has strong anti-interference. The method proposed not only satisfies the requirements of the

frequency modulation for wind power connected to the grid, but also has better control effect than traditional PI controller.

KEY WORDS: wind power connected to grid; load frequency; control; cloud model; uncertainty

0 引言

规模化风电接入电网会加剧电网的不确定性, 而风电机组大多采用有功解耦控制, 无法有效跟踪电网频率的波动变化, 严重影响电能质量^[1-2]。

国内外学者针对风电有功输出的不确定性进行了研究。文献[3]在全风速下分别设计了变桨距模糊控制器和基于滑膜控制的发电机动态转矩控制器, 充分考虑了风电出力的不确定性对电能质量的影响。文献[4]提出了基于两阶段切换的变比调差系数策略, 提高了系统的频率动态特性。文献[5]利用虚拟惯量和下垂控制实现一次调频, 改善了频率暂态和稳态的调节能力。

利用负荷频率控制(load frequency control, LFC)是维持规模化风电并网引起的频率波动在稳定区间最有效的手段^[6-8]。文献[9]提出含风电机组的模型预测负荷频率控制策略, 利用预测信息优化控制器指令生成和分配控制器参数, 从而提升了控制器的非线性响应能力, 满足了含风电的频率调节要求。文献[10]针对三区域电力系统, 提出一种基于线性矩阵不等式与延迟边际估计的鲁棒负荷频率控制策略, 提高了系统的稳定性。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51577065)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51577065).

文献[11]利用灰狼算法优化负荷频率控制器参数,该方法具有较强的寻优能力和控制性能,提升了系统的鲁棒性和非脆弱性。文献[12]根据常规发电机组动态轨迹,设计了以全状态时域仿真为基础的含高渗透率风电互联电网自动发电控制(automatic generation control, AGC)策略,但所提出的控制方法未计及区域控制偏差(area frequently control, ACE)信号,具有一定的局限性。文献[13]针对风电并网在高峰时段的调频压力,提出了在高峰时段的非AGC机组、按期望点运行的AGC型以及按ACE自适应的AGC型,实现了负荷调节的合理性和经济性。文献[14]分析了风电参与一次调频对电网稳定性的影响,在额定风速下利用最大功率点追踪控制(maximum power point tracking, MPPT)实现风电有功输出最大跟踪,在额定风速以上采用恒功率控制,保证风电系统安全运行。文献[15]提出了一种基于事件驱动通信下的鲁棒负荷频率控制策略,该方法提高了频率调节的增益,并减少了系统稳态时的通信次数。

针对风电输出具有随机性和波动性等特点,本文提出了基于云模型理论的负荷频率控制方法。通过分析风电出力的波动特性,利用云模型规则发生器对PI控制器参数进行自适应整定,充分考虑了风电出力波动和联络线功率偏差对电网频率的影响。以某三区域互联电网实际运行数据为例,验证了该方法的可行性和有效性。

1 计及风功率不确定性的负荷频率控制模型

1.1 风电场有功输出特性

受风速等影响,风电场出力对电网造成扰动,

与单机组输出功率不尽相同,如图1所示。

从图1中可以看出,风电场出力的动态特性与机组空间排布有关。由于单台机组受各时域的风速不同,导致单台机组具有较强的随机性和波动性。而在风电场的汇集效应和叶轮惯性作用下,致使风电场整体输出功率趋于平缓。

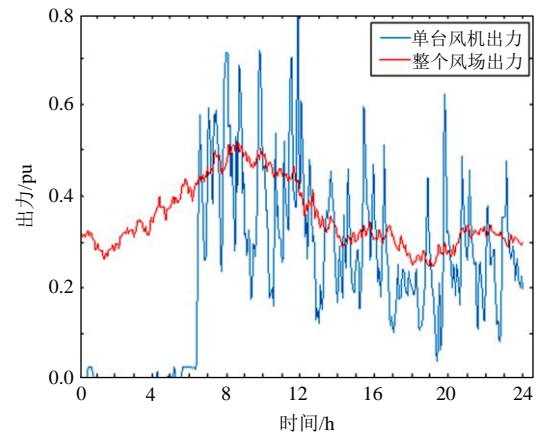


图1 单机组与风场出力曲线图

Fig. 1 Wind power output curve of single unit and wind farm

1.2 计及风电不确定性的多区域负荷频率控制模型

LFC的目的是保证互联电网频率稳定与联络线功率按计划值运行,本文将风电场输出功率作为LFC模型中的输入信号。在规模化风电场并网后,含风电的互联电力系统第*i*个区域的LFC系统模型如图2所示。

系统受风电有功扰动后的能量守恒方程为

$$\Delta P_e - \Delta P_{wind} = \Delta P_L + D\Delta\omega \quad (1)$$

式中: ΔP_e 为发电机电磁功率变化量, W; ΔP_{wind} 为风电有功出力的变化量, W; ΔP_L 为常规负荷

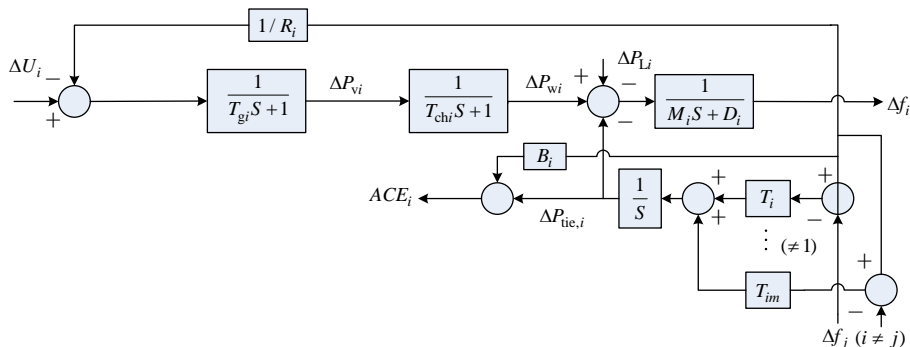


图2 第*i*个区域的LFC系统模型

Fig. 2 LFC model system in the *i*-th area

扰动, W ; D 为阻尼系数; $\Delta\omega$ 系统角频率变化量。

在含风电的负荷频率控制系统中, ACE 是受到扰动后形成的频率和联络线功率的偏差量, 其定义如下:

$$ACE_i = \beta_i \Delta f_i + \Delta P_{tie,i} \quad (2)$$

式中: β_i 为频率偏差系数; Δf_i 为区域 i 的频率偏差, Hz; ΔP_{tie} 为与区域 i 联接的联络线功率偏差, W。

2 基于云模型的负荷频率控制器设计

2.1 云模型理论

云模型理论是一种具有不确定性映射关系的理论, 其定性概念与定量数据间的转换具有模糊性和随机性。在非线性的控制系统中, 云模型能够在模糊的论域内逼近其期望值, 构成了不确定性的转换模型, 以实现精准控制功能^[16-19]。

设 U 是一个用精确数值表示的定量论域, T 是 U 上的定性概念, $CT(x)$ 是 U 到闭区间 $[0, 1]$ 的映射。对任意元素 $x \in U$ 都存在一个具有稳定倾向的随机数 μ :

$$\mu: U \rightarrow [0,1], x \in U \rightarrow u(x) \quad (3)$$

则 x 在论域 U 上的分布称为云, 记为 $C(x)$ 。每一个 x 称为云滴, 若干个云滴组成了云。

云模型是由期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 来表达一个具有模糊边界和各随机确定度组成的整体概念, 如图 3 所示。

2.2 多规则云 PI 控制器设计

在充分考虑风电出力的波动性和随机性基础上, 设计了基于云模型理论的负荷频率 PI 控制器, 如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 由风电场出力引起的扰动 ACE 以偏差量 e 的形式输入到云 PI 控制器中, 规则前件在设定的论域内对 e 进行非线性逼近处理, 生成隶属度 μ_p 、 μ_i ; 通过规则后件对 μ_p 、 μ_i 进行定量处理, 得到控制量 ΔP 和 ΔI , 经过 PI

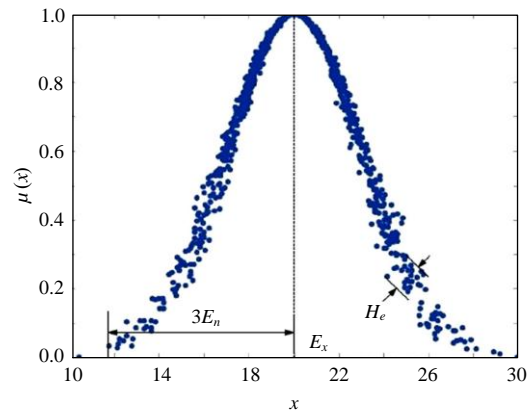


图 3 云模型的 3 个数字特征

Fig. 3 Three digital features of cloud model

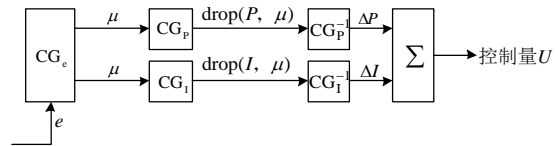


图 4 云 PI 频率控制器结构

Fig. 4 Structure of cloud PI controller

控制器得到控制量 U 。

由于风电出力波动一般集中在中、低频分量, 在满足风电功率并网要求下, 利用云规则发生器, 将风电功率分为 5 个等级。以“负大”“负小”“零”“正小”“正大”来表示, 划分结果如表 1 所示。其中, e 作为规则前件; ΔP 、 ΔI 为规则后件; $(-0.15, 0.2, 0.05)$ 三个参数分别对应 E_x 、 E_n 和 H_e 。

3 仿真实例

三区域含风电接入的互联电网负荷频率控制模型如图 5 所示。控制系统各参数见表 2。

从图 5 中可以看出, 区域 1 为规模化风电场, 暂不考虑其他负荷扰动因素。在 3 个区域中, 每个区域均有 2 台 AGC 机组, 各区域之间通过联络线互联, 互联电网采用 TBC-TBC 控制模型, 设定频率为 (50 ± 0.2) Hz, 联络线交换功率和 ACE 按照计划值运行。图 6 是国内某风电场有功输出

表 1 云模型的 3 个参数

Tab. 1 Three parameters of cloud model

规则	参量名称	等级划分				
规则前件	偏差量 e	负大(-0.15,0.2,0.05)	负小(-0.05,0.2,0.05)	零(0,0.2,0.05)	正小(0.05,0.2,0.05)	正大(0.15,0.2,0.05)
规则后件	整定值 ΔP	负大(-0.15,0.2,0.05)	负小(-0.05,0.2,0.05)	零(0,0.2,0.05)	正小(0.05,0.2,0.05)	正大(0.15,0.2,0.05)
	整定值 ΔI	负大(-0.15,0.2,0.05)	负小(-0.05,0.2,0.05)	零(0,0.2,0.05)	正小(0.05,0.2,0.05)	正大(0.15,0.2,0.05)

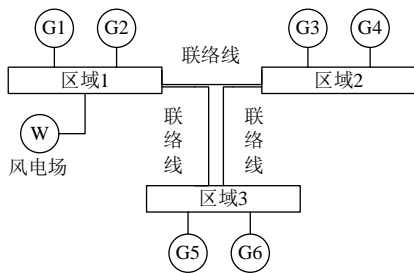


图 5 三区负荷频率控制模型

Fig. 5 LFC system model in three areas

表 2 系统参数

Tab. 2 System paraments

区域 1	区域 2	区域 3
$T_{11}=1.5$	$T_{12}=1.67$	$T_{13}=1.5$
$D_1=0.6$	$D_2=0.9$	$D_3=0.3$
$M_1=0.12$	$M_2=0.125$	$M_3=0.15$
$R_1=3; R_2=3.3$	$R_4=2.67; R_5=2.5$	$R_6=3; R_7=2.82$
$B_1=0.3483$	$B_2=0.474$	$B_3=0.483$
$T_{12}=7.42$	$T_{13}=5.13$	$T_{23}=5.314$

曲线, 该风场装机容量 45 MW, 采样时间间隔为 10 min。

图 7 为区域 1 的频率响应, 传统 PI 控制器在 60~85 s 频率出现较大的超调量(0.15 Hz、0.18 Hz), 超出了互联电网允许的频率偏差范围 ± 0.1 Hz, 呈现出较强的波动性。采用云 PI 控制器后的频率偏差均在正常范围内变化, 具有较好控制效果。

图 8 为区域 1、2 之间的联络线交换功率。从图 8 可以看出, 若联络线交换功率偏差越接近零, 则越趋于计划值。对于传统 PI 控制器, 由于各区域间是由联络线互联, 在区域 1 发生较大的负荷波动(如 15 s、60 s、70 s、85 s 时刻), 区域 2 会向区域 1 输送功率以维持各区域间的负荷平衡, 从而会出现功率攒动现象。而云 PI 控制则维持联络线功率在一个稳定区间。

图 9 为区域 1 的 ACE 响应曲线。受负荷扰动形成的 ACE 由联络线功率和频率偏差组成。

从图 7、8 中可以看出, 在 15 s、60~80 s 均出现了较大的偏差, 所引起的 ACE 在相应时刻也出现了波动(如图 9 所示)。区域 1 的频率由区域 1 负荷扰动所影响, 而区域 1、2 间的联络线受其他相邻区域影响。区域 1 的 ACE 与区域 1、2 间的联络线交换功率在某些时刻的偏差则较为相似,

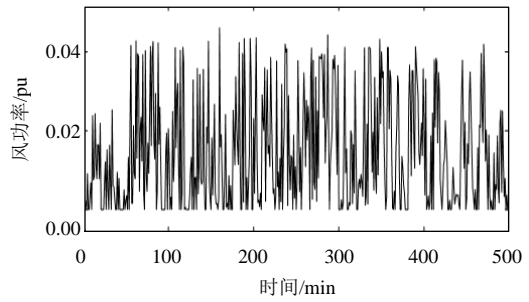


图 6 风功率波动曲线

Fig. 6 Power curve of wind farm

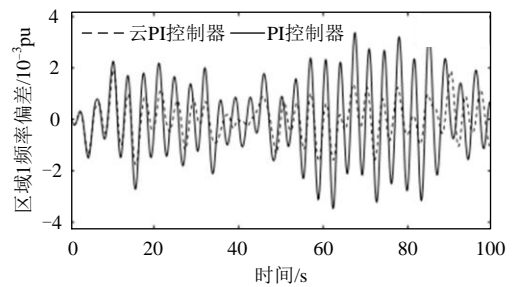


图 7 区域 1 的频率响应

Fig. 7 Frequency respond in area 1

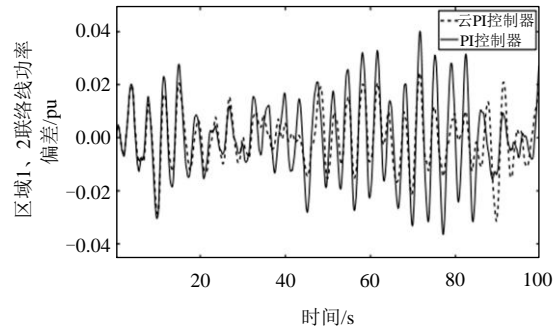


图 8 区域 1、2 之间的联络线交换功率

Fig. 8 Tie-line power deviation between two areas

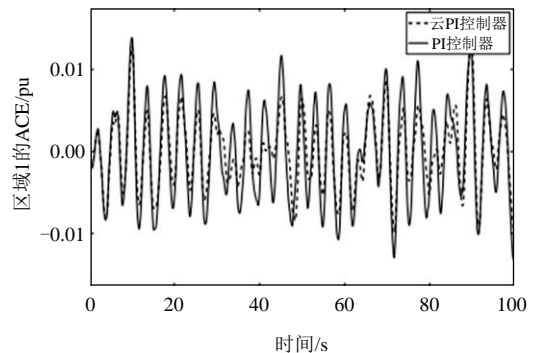


图 9 区域 1 的 ACE 响应曲线

Fig. 9 ACE respond in area 1

经过云 PI 控制器出现短暂大幅波动后趋于平缓, 而传统 PI 控制器的波动幅度依然较大。

4 结论

本文以三区域含规模化风电接入的互联电网为例, 在分析了风电波动特性的基础上建立了云 PI 控制器, 并制定了相应云规则。仿真结果表明, 云模型理论能有效改善风电扰动所产生的各项偏差, 为风电并网提供了新的解决思路。

参考文献

- [1] 付媛, 王毅, 张祥宇, 等. 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.
- [2] 樊新东, 杨秀媛, 金鑫城. 风电场有功功率控制综述[J]. 发电技术, 2018, 39(3): 268-276.
- [3] Rabindra K S, Sidhartha P, Umesh K R. DE optimized parallel 2-DOF PID controller for load frequency control of power system with governor dead-band nonlinearity[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2013, 32(49): 19-33.
- [4] 彭晓涛, 贾继超, 周际城, 等. 优化风电惯性响应的变比例系数调差策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 30(19): 1-9.
- [5] 张冠峰, 杨俊友, 孙峰, 等. 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.
- [6] 蔡邠. 电力系统频率[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [7] Kunder. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [8] 高翔, 等. 现代电网频率控制应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [9] Luo H, Hu Z, Xie X. Model predictive based automatic generation control with participation of the output-constrained wind farms[C]//IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference(APPEEC), Xi'an, 2016.
- [10] 熊林云, 王杰. 三区域延迟电力系统鲁棒负荷频率控制研究[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 894-902.
- [11] 左剑, 谢平平, 李银红, 等. 基于智能优化算法的互联电网负荷频率控制器设计及其控制性能分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 478-489.
- [12] Variani M H, Tomsovic K. Distributed automatic generation control using flatness-based approach for high penetration of wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3002-3009.
- [13] 王松岩, 于继来. 含大规模风电系统的非 AGC 与 AGC 机组高峰协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 156-163.
- [14] 李军军, 吴政球. 风电参与一次调频的小扰动稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 1-9.
- [15] 杨超, 姚伟, 文劲宇. 基于事件驱动的含风电互联电网负荷频率鲁棒控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 57-64.
- [16] 李志明, 卢曦, 孙勇, 等. 同步发电机云模型励磁控制器设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(3): 91-95.
- [17] 刘自发, 庞铖铖, 王泽黎, 等. 基于云理论和元胞自动机理论的城市配电网空间负荷预测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 98-105.
- [18] 杨薛明, 苑津莎, 王剑锋, 等. 基于云理论的配电网空间负荷预测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 30-36.
- [19] 刘华新, 苑一鸣, 周沛, 等. 基于融合理论的风电机组状态评价正态云模型[J]. 太阳能学报, 2018, 39(10): 2891-2900.

收稿日期: 2019-04-02.

作者简介:



张斌

张斌(1989), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统及配电网规划, 820682328@qq.com;



张超

张超(1989), 男, 硕士, 主要研究方向为大规模风电联网运行技术分析;



韩晓娟

韩晓娟(1970), 女, 博士, 教授, 研究方向为储能系统优化控制及经济性评估, wnhxj@163.com.

(责任编辑 杨阳)