

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210273

基于无模型算法和电动汽车辅助调节的新能源 电力系统频率协调控制

米阳¹, 伦雪莹¹, 孟凡斌², 张霄², 葛晓琳¹, 林顺富¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网安阳供电公司, 河南 安阳 455000)

摘要: 为解决风电并网导致电力系统频率偏差过大的问题, 设计了一种基于无模型负荷频率控制和电动汽车辅助调节的频率协调控制策略, 能够在系统受到风电和负荷扰动时对其频率偏差进行快速调节。利用新能源电力系统的频率偏差设计了无模型自适应滑模负荷频率控制器, 对传统机组进行二次频率调节。同时为充分利用电动汽车的快速响应能力, 采用分频技术将区域控制高频偏差信号接入集群电动汽车控制中心作为调频参考指令, 使得电动汽车参与辅助系统调频。最后通过 Matlab/Simulink 软件在不同的工况下进行对比分析, 仿真结果验证了所提出策略的有效性。

关键词: 新能源电力系统; 滑模算法; 无模型自适应控制; 电动汽车; 负荷频率控制

Frequency coordinated control of a new energy power system based on a model-free algorithm and EV auxiliary regulation

MI Yang¹, LUN Xueying¹, MENG Fanbin², ZHANG Xiao², GE Xiaolin¹, LIN Shunfu¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. State Grid Anyang Power Supply Company, Anyang 455000, China)

Abstract: There can be a problem of excessive frequency deviation caused by wind power integration. Thus a frequency coordination control strategy based on a model-free LFC and EV auxiliary regulation is designed, one which can quickly adjust the frequency deviation when the system is disturbed by wind power and load. Based on the frequency deviation of the new energy power system, a model-free adaptive SM load frequency controller is designed to adjust the secondary frequency of traditional units. At the same time, in order to make full use of the fast response ability of the EVs, frequency division technology is used to connect the high frequency deviation signal of the regional control to the cluster EV control center as the frequency modulation reference command. In this way the EVs can participate in auxiliary system frequency modulation. Finally, Matlab/Simulink software is used for comparative analysis under different working conditions, and the simulation results verify the effectiveness of the proposed strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51977127), Shanghai Committee of Science and Technology Projects (No. 18020500700), and Shanghai Green Energy Grid Engineering Technology Research Center Projects (No. 13DZ2251900).

Key words: new energy power system; sliding mode algorithm; model free adaptive control; electric vehicles; LFC

0 引言

风力发电作为一种清洁能源, 以其零排放的优

势成为了最具发展前景的发电方式之一^[1-4]。然而, 风电的输出功率受天气的影响具有波动性和不确定性^[5-6], 其渗透率的不断增大给传统电力系统的安全稳定运行带来了前所未有的挑战^[7]。因此, 如何减小风能波动对电力系统稳定的影响成为研究的热点。

频率是电力系统安全稳定的重要指标之一^[8-10], 负荷频率控制是减小系统频率偏差并保持系统稳定

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51977127); 上海市科委项目资助(18020500700); 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目资助(13DZ2251900)

的有效技术。滑模算法以其对干扰的不敏感性、响应速度快以及较好的鲁棒性等优点,常常被用来设计负荷频率控制器。文献[11]设计多域电力系统滑模负荷频率控制器,但是没有考虑新能源并网带来的影响。文献[12]对含风电的单域电力系统设计了滑模负荷频率控制,但是由于实际应用中扰动较大,仅通过传统滑模控制难以达到较好的效果,且没有考虑电动汽车的调频作用。虽然滑模负荷频率控制具有较好的鲁棒性,但传统滑模算法设计控制器需要基于精确的系统数学模型,对复杂电力系统难以实现。

为降低控制器对系统数学模型的依赖,无模型控制技术得到了发展和应用。文献[13]阐述了已有无模型算法的理论、方法及其主要特点,并对框架体系及其应用进行了回顾和展望。文献[14]提出了无模型自适应控制(Mode-Free Adaptive Control, MFAC),在难以建立受控系统精确数学模型条件下,实现对生产过程和设备的优化控制。因此将无模型自适应算法与滑模变结构算法相结合^[15],仅利用系统输入和输出数据得到等效的超局部模型来进行负荷频率控制,既可以保证控制精度又提高了鲁棒性和抗干扰能力,同时还可以降低复杂工况下传统控制器对系统模型的依赖,以及对新能源电力系统频率波动的有效调节。

电动汽车(Electric Vehicles, EVs)的大规模并网也会导致电力系统频率波动^[16-18],因此需要研究作为可控负荷和分布式电源的双重特性使其参与电网辅助调频^[19]。在含电动汽车的集成智能电网中,将EVs集群并分层控制能够有效地把电动汽车参与负荷频率控制从理论变为现实^[20]。文献[21]建立了EVs充放电静态频率特性模型,实现了EVs在分布式电源和负荷之间的快速有效转换用于参与电力系统调频。文献[22]建立了两区域互联电力系统,利用电动汽车快速响应的特点,提出了两种电动汽车自动发电控制的控制策略。此外在含有电动汽车和混合储能的电力系统控制方面,文献[23]设计了一种新型非线性鲁棒分数阶控制,以提升EVs的需求侧响应速度和性能。但上述研究均未考虑到风电对电力系统产生的影响。

基于以上分析,本文首先建立EVs与风力发电的等效数学模型,提出电动汽车辅助优化电力系统协调控制策略,利用分频技术对系统区域控制偏差(Area Control Error, ACE)信号进行处理和分解,接入集群电动汽车控制中心(Cluster Electric Vehicles

Control Center, CEVCC)进行辅助调频。考虑外界干扰以及未建模动态的影响,建立含EVs与风力发电的新能源电力系统模型,设计无模型自适应滑模负荷频率控制器(Model-free Adaptive Sliding Mode Load Frequency Controller, MFASMLFC),对系统频率偏差和联络线功率偏差进行有效调节。最终通过Matlab/Simulink对所提出策略的控制效果在不同工况下进行仿真验证。

1 新能源电力系统模型

1.1 电动汽车的等效模型

首先建立其等效的数学模型,考虑电动汽车电池充放电静态特性,得到电动汽车的等效传递函数^[21]:

$$\Delta P_{EVi} = \frac{K_{EVi}}{T_{EVi}} \Delta F_{Hi} \quad (1)$$

当电动汽车作为可控负载接入电网时,其充电等效模型如式(2)所示(其中一阶惯性环节表示控制和通信的延迟效应)。

$$\Delta P_{ci} = \frac{K_{ci}}{1+sT_{ci}} \Delta F_{Hi} \quad (2)$$

对应地,当电动汽车作为分布式电源接入电网时,其放电等效模型如式(3)所示。

$$\Delta P_{di} = \frac{K_{di}}{1+sT_{di}} \Delta F_{Hi} \quad (3)$$

式中: ΔP_{ci} 和 ΔP_{di} 分别为EVs充、放电功率变化量; ΔF_{Hi} 为ACE_i高频信号分量; K_{ci} 为充电负荷阻尼系数; T_{ci} 为充电时间常数; K_{di} 为放电的频率响应系数; T_{di} 为放电时间常数; $i=1,2$ 。

1.2 风电机组等效模型

鼠笼型感应风力发电机的功率数学模型表示为^[23]

$$P_{\omega} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{\omega}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (4)$$

式中: ρ 为空气密度; R 为风轮桨叶半径; V_{ω} 为风速; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数; λ 为叶尖速比。

$$\omega^2 = \int_J^2 (P_{\omega} - P_g) dt \quad (5)$$

式中: ω 为涡轮叶片角速度; J 为等效总转动惯量。

近似忽略发电机暂态过程得到发电机输出功率 ΔP_g 为

$$\Delta P_g = \frac{-3V^2 s(1+s)R_2}{(R_2 - sR_1)^2 + s^2(X_1 + X_2)^2} \quad (6)$$

式中: V 为相电压; R_1 为定子电阻; X_1 为定子电

抗; R_2 为转子电阻; X_2 为转子电抗; $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ 为转差率, ω_0 为同步角速度。

因此可得系统的风机、负荷扰动 ΔP_{Di} 为

$$\Delta P_{Di} = \Delta P_{gi} + \Delta P_{Li} \quad (7)$$

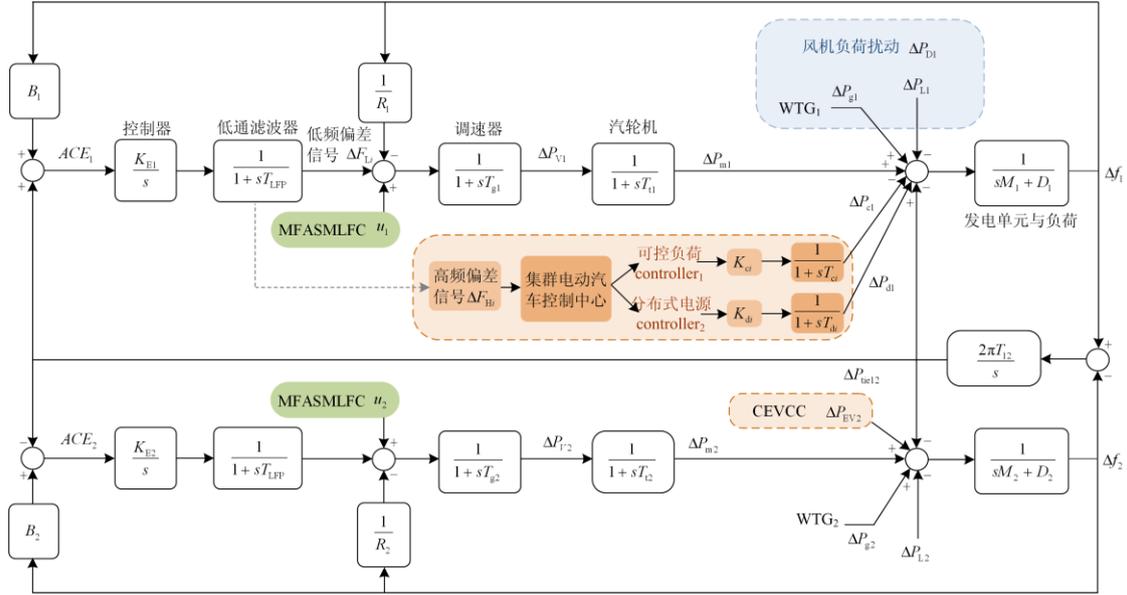


图 1 基于无模型算法和电动汽车辅助调频的双域新能源电力系统 LFC 模型

Fig. 1 LFC model of dual domain new energy power system based on MFA and EVs auxiliary frequency regulation

图 1 中: B_i 为频率偏差系数; K_{Ei} 为积分增益; R_i 为调速器参数; M_i 为发电机惯性常数; D_i 为负荷阻尼系数; $\Delta f_1, \Delta f_2$ 为频率偏差; u_i 为控制信号; T_{gi} 和 T_{vi} 分别为调速器和发电机组时间常数; T_{12} 为联络线功率系数; ΔP_{Li} 为负荷扰动; ΔP_{gi} 为风电输出频率; ΔP_{mi} 为火电输出功率; ΔP_{tie12} 为联络线功率偏差。

随着电动汽车的大规模应用和并网, 其既可作可控负荷也可作分布式电源的双重属性被用来承担适当的调频任务。因此采用分频技术, 使得 EVs 能够快速响应 ACE_i 中分解出来的高频偏差信号 ΔF_{Hi} , 即传统电力系统响应调频信号的中低频信号, 以达到改善频率响应速度和平滑调频的目的。在图 1 中, ACE_i 经过 PI 控制器产生调频信号, 经过低通滤波器对调频信号进行分解, 将高频偏差信号接入集群电动汽车控制中心作为调频参考指令, 低频偏差信号分配给采用无模型自适应滑模控制的传统机组。

3 无模型自适应滑模负荷频率控制技术

为提高传统发电机组的调频能力, 常用技术是设计滑模负荷频率控制器, 但是随着新能源和电动汽车的并网, 很难建立精确的系统模型^[24]。因此基

2 新能源电力系统分频协调控制策略

以典型的两区域电力系统拓扑结构框图为例, 考虑传统火力发电机组、风力发电机、电动汽车及其他负荷, 搭建控制系统模型如图 1 所示。

于无模型自适应控制, Michel Fliess 提出了超局部模型^[25]的概念并将其大量应用, 首先利用超局部模型代替系统中的已知建模部分以及未建模动态和未知扰动部分, 而后再进行无模型控制器的设计。所以本文针对两域新能源电力系统, 设计无模型自适应滑模负荷频率控制器来减少对系统精确模型的依赖, 同时提高复杂新能源电力系统负荷频率控制器的鲁棒性。

针对控制对象的输入和输出数据, 建立如下超局部模型^[25]。

$$\Delta \dot{f}_i = X_i + \alpha_i u_i \quad (8)$$

式中: $\Delta \dot{f}_i$ 为系统频率偏差的导数, 作为被控系统的输出项、控制器的输入项; u_i 为被控系统的输入项、控制器的输出项; α_i 是一个非物理常数, $i = 1, 2$ 。

得到一般无模型自适应控制器的输出项为

$$u_i = \frac{-X_i + \Delta \dot{f}_i}{\alpha_i} \quad (9)$$

由于 X_i 代表系统包含一切已知部分以及未知部分的模型, 需要先定义 \hat{X}_i 为 X_i 的估计值, 可由控制对象的输入和输出推算得到。 Δf_i 为已知量,

$\hat{\Delta f}_i$ 是 Δf_i 的估计值, 通过一阶导数加低通滤波器^[25]实现。因此 X_i 的估计值可以推算得

$$\hat{X}_i = \hat{\Delta f}_i - \alpha_i u_i \quad (10)$$

估计误差 $e_{\text{est-}i} = X_i - \hat{X}_i = \Delta f_i - \hat{\Delta f}_i$ 是一个有界实数。 Δf_i^* 表示输出值的参考轨迹, $e_i = \Delta f_i - \Delta f_i^*$ 表示跟踪误差。则有

$$\Delta f_i^* = \hat{X}_i + \alpha_i u_i + u_{FBCi} \quad (11)$$

$$u_i = \frac{-\hat{X}_i + \Delta f_i^* - u_{FBCi}}{\alpha_i} \quad (12)$$

式中, u_{FBCi} 为反馈控制器(Feedback Controller)。

将式(12)代入式(10)可得到

$$\hat{X}_i = \hat{\Delta f}_i - \alpha_i \left(\frac{-\hat{X}_i + \Delta f_i^* - u_{FBCi}}{\alpha_i} \right) \quad (13)$$

$$u_{FBCi} = \Delta f_i^* - \hat{\Delta f}_i = \Delta f_i^* - \Delta f_i + \Delta f_i - \hat{\Delta f}_i = -\dot{e}_i + \dot{e}_{\text{est-}i} = -\dot{e}_i \quad (14)$$

由此, 给出无模型自适应滑模负荷频率控制器框图如图 2 所示^[26-27]。

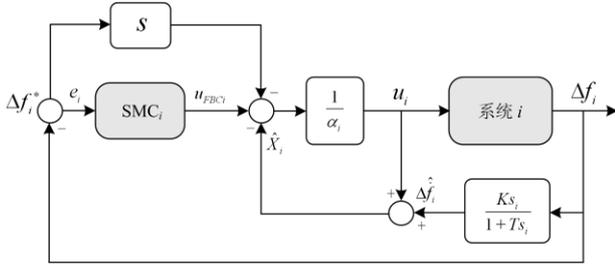


图 2 无模型自适应滑模负荷频率控制器

Fig. 2 Model-free adaptive sliding mode LFC

反馈控制器 u_{FBCi} 的选择应当使无模型自适应控制器的输出能够保持完美的跟踪, 即跟踪误差 e_i 渐进趋于 0^[28-29], 为此将其设计为滑模负荷频率控制器, 在能够保证 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_i = 0$ 的情况下增强系统的鲁棒性。

引入状态变量 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$, 定义 $x_1 = \int_0^t e_i(\tau) d\tau$, $x_2(t) = e_i(t)$ 。

设计积分滑模面为

$$s_i = c_i x_1(t) + x_2(t) \quad (15)$$

式中, $c_i > 0$, 为待设计的常数, 其选择应能够使误差在滑模面上趋近于 0。

$$\dot{s}_i = c_i \dot{x}_1(t) + \dot{x}_2(t) = c_i e_i + \dot{e}_i = c_i e_i + u_{FBCi} \quad (16)$$

选取指数趋近律为

$$\dot{s}_i = -k_i s_i - \varepsilon_i \text{sgn}(s_i) \quad (17)$$

式中: k_i 、 ε_i 均为非负常数; $\text{sgn}()$ 为符号函数。

由式(16)、式(17)可得

$$u_{FBCi} = -c_i e_i - k_i s_i - \varepsilon_i \text{sgn}(s_i) \quad (18)$$

滑模信号稳定性分析, 选取如下 Lyapunov 函数, 即^[30]

$$V = \frac{1}{2} s_i^2 \quad (19)$$

根据 Lyapunov 稳定性分析原理可得

$$\dot{V} = s_i \dot{s}_i = s_i (-k_i s_i - \varepsilon_i \text{sgn}(s_i)) = -k_i s_i^2 - \varepsilon_i |s_i| \leq 0 \quad (20)$$

因此满足滑模面可达条件 $\dot{V} \leq 0$, 控制器稳定。

将式(18)代入式(12), 可得所设计的无模型自适应滑模控制律为

$$u_i = \frac{-\hat{X}_i + \Delta f_i^* + c_i e_i + k_i s_i + \varepsilon_i \text{sgn}(s_i)}{\alpha_i} \quad (21)$$

4 仿真实验

为验证所提出的基于无模型控制和电动汽车参与辅助调频的新能源电力系统协调控制策略, 在 Matlab/simulink 平台上搭建了含风力电机和 EVs 在内的负荷频率控制仿真模型, 如图 1 所示。通过以下实例进行研究, 以验证所提出策略的有效性。两区域系统模型的参数取值如表 1 所示, 并设系统基准容量为 1 000 MW, 单车电动汽车充放电功率为 7 kW, 充放电效率为 95%, 集群电动汽车控制中心辖区内有 15 000 辆可供调配汽车。

表 1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters		
参数	区域 1	区域 2
$M_i / (\text{p.u./Hz})$	0.167	0.200
$D_i / (\text{p.u./Hz})$	0.008 3	0.006 0
T_u / s	0.300	0.250
T_{gi} / s	0.080	0.100
$R_i / (\text{Hz/p.u.})$	2.500	2.220
$B_i / (\text{p.u./Hz})$	0.425	0.456
K_{Ei}	1	1
$2\pi T_{i2} / (\text{p.u./Hz.s})$	0.272	0.272

主要研究四个仿真实例: 1) 考虑在阶跃负荷、风电扰动工况下, 单域电力系统在 PID 控制器、滑模负荷频率控制器^[31]和设计的 MFASMLFC 作用下进行有效性比较; 2) 考虑在连续的随机负荷、风电扰动工况下, 双域电力系统中单独检验电动汽车辅助调频策略的有效性^[32]; 3) 考虑连续的随机负荷、风电扰动工况下, 在双域电力系统中单独检验所设计 MFASMLFC 的有效性; 4) 考虑连续的随机负荷、风电扰动工况下, 双域电力系统在 PID 控制器与设

计的 MFASMLFC、电动汽车辅助调频的新能源电力系统协调控制策略作用下进行有效性比较。

算例 1: 单域-阶跃风电负荷扰动下 MFASMLFC 策略验证

首先为验证本文所设计 MFASMLFC 策略的有效性, 在单域电力系统中分别在 $t=0.4$ s 和 $t=10$ s 时加入了大小为 0.1 p.u. 和 0.05 p.u. 的阶跃负荷、风电输出扰动, 对电力系统 LFC 采用 PID 控制器、滑模负荷频率控制器^[31]与所设计的无模型滑模负荷频率控制器的有效性进行了同步对比分析, 所得到的系统频率偏差如图 3 所示。

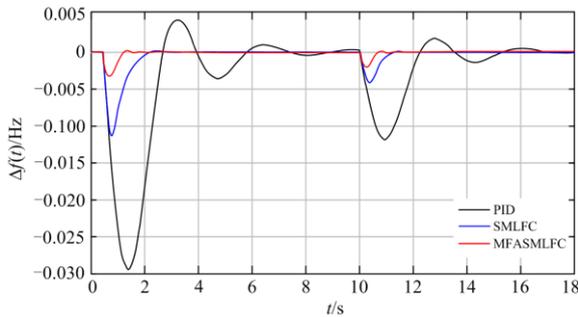


图 3 阶跃扰动下单域电力系统的频率偏差

Fig. 3 Frequency deviation of single domain power system under step disturbance

仿真结果表明, 在单域电力系统伴随阶跃扰动下, 所设计的无模型自适应滑模负荷频率控制器能够在一定时间内快速平稳系统频率偏差, 将其控制在 ± 0.003 以内, 且收敛速度较快^[33]。当系统出现扰动时, 采用 MFASMLFC 的系统频率偏差超调量明显低于另外二者, 系统调节时间缩短了 80% 和 50%, 相较于 PID 控制器和滑模负荷频率控制器, 对系统频率偏差的控制效果更加显著, 因此将无模型滑模算法应用于电力系统负荷频率控制, 将为后续研究提供降低依赖模型的基础。

算例 2: 双域-随机风电负荷扰动下 EVs 辅助 LFC 策略验证

为研究新能源电力系统中风电的随机性和波动性对系统稳定的影响, 将风电输出波动和负载扰动相叠加(输出功率如图 4 所示), 以获得连续随机的系统扰动并添加到双域电力系统中, 对所设计的计及电动汽车静态特性辅助调频策略的有效性进行仿真验证。所得区域 1 的频率偏差、联络线功率偏差如图 5 所示。

仿真结果表明, 在电动汽车辅助电力系统进行调频时, 区域 1 的系统频率偏差维持在 ± 0.2 内, 采用传统 PID 控制器的系统频率偏差超调量为 0.278,

而计及电动汽车辅助系统一次调频的系统频率偏差超调量为 0.176, 相比减小了 36.7%。然而, 当只有传统火电机组进行调频时, 在相同负荷扰动下区域 1 的频率偏差超过了 ± 0.25 , 而且联络线功率偏差也较大。电动汽车辅助系统进行二次调频能够有效减小系统频率偏差, 降低系统平稳调节的时间。

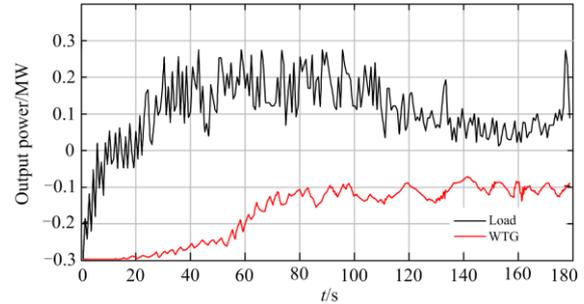


图 4 系统负荷与风机输出功率

Fig. 4 System load and output power of wind turbine

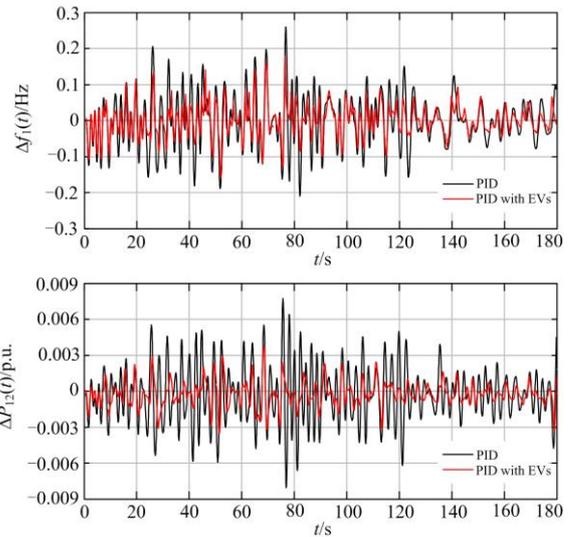


图 5 EVs 辅助 LFC 的频率偏差和联络线功率偏差

Fig. 5 Frequency deviation and tie line power deviation of EVs auxiliary LFC

算例 3: 双域-随机风电负荷扰动下 MFASMLFC 策略验证

在两域电力系统中, 加入上述风力涡轮机波动和负载扰动相叠加的连续随机系统扰动, 对 PID 控制器、滑模负荷频率控制器^[31]以及 MFASMLFC 的有效性进行对比分析, 所得区域 1 的频率偏差、联络线功率偏差如图 6 所示。

结合图 3 和图 6 的仿真结果能够充分表明, 所设计的 MFASMLFC 无论是在单域还是双域电力系统中, 都能够起到较好的频率控制效果。传统 PID

控制器、传统的滑模控制器和无模型滑模控制器，这三者同步对比，进一步验证了无模型滑模控制器相比传统滑模控制器，具有不需要系统数学模型、响应速度更快、能更有效地减小频率偏差等优点。

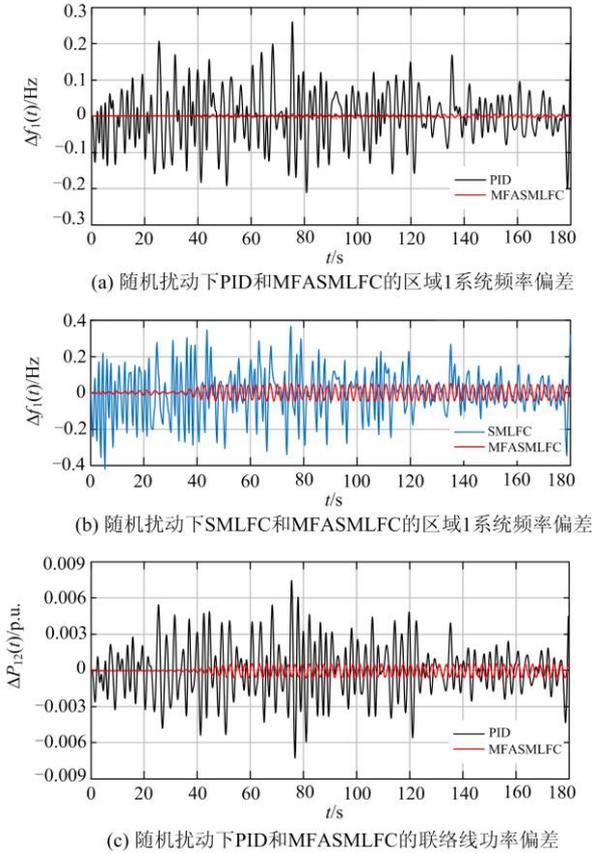


图 6 算例 3 的系统频率偏差和联络线功率偏差
Fig. 6 System frequency deviation and power deviation of tie line of case 3

算例4: 计及电动汽车辅助调频^[34]和MFASMLFC的协调控制策略验证

本案例结合算例 2、3，在数据如表 1 给出的仿真参数的两个互联电力区域中，对本文所提出的基于无模型控制与电动汽车辅助调频的电力系统负荷频率控制策略进行了有效性验证，并且与同样参数和干扰情况下的传统 PID 控制效果进行了比较。区域 1 的频率偏差以及联络线功率偏差如图 7 所示。

图 7 的仿真结果表明，在算例 2 与算例 3 的电动汽车辅助调频策略和无模型滑模控制器分别都能达到较好效果的基础上，二者结合更能稳定系统的频率波动，达到更好的调频效果，也再一次证明了无模型滑模控制在负荷频率控制中的重要性^[34]。同时证明了该策略利用电动汽车辅助调频的策略能够使得新能源电动汽车在智能电网调频中得到有效合

理的应用。

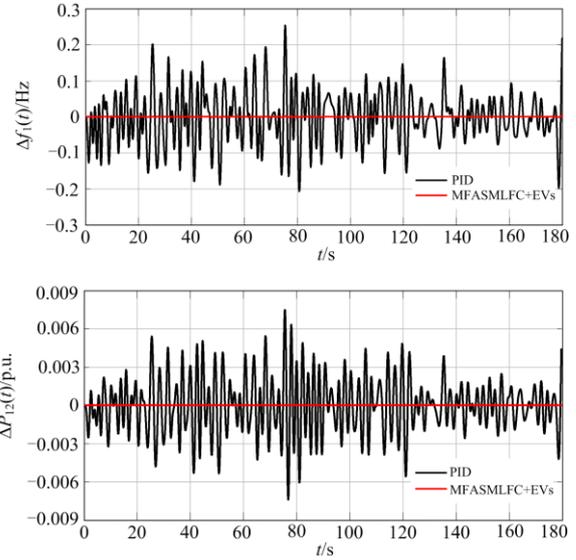


图 7 算例 4 的系统频率偏差和联络线功率偏差
Fig. 7 System frequency deviation and power deviation of tie line of case 4

5 结论

本文建立含 EVs 与风电的新能源电力系统理想化模型，提出了无模型自适应滑模负荷频率控制策略。运用 ACE 分频技术进行区域控制偏差的分解，将高频偏差信号分配给电动汽车进行辅助负荷频率控制，低频偏差信号分配给采用无模型自适应滑模负荷频率控制方法的传统机组，进行混合协调控制。最终通过 Matlab/Simulink 仿真平台对风电机组输出频率波动和负荷扰动下的系统动态响应进行了对比分析。仿真结果验证了所提策略的有效性。

参考文献

- [1] LI Xue, CAO Jia, DU Dajun. Probabilistic optimal power flow for power systems considering wind uncertainty and load correlation[J]. Neurocomputing, 2015, 148: 240-247.
- [2] 李争, 张丽平, 薛增涛, 等. 基于氢储能的双馈风力发电系统功率控制策略[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 76-83.
- [3] LI Zheng, ZHANG Liping, XUE Zengtao, et al. Power control strategy of doubly-fed wind power generation system based on hydrogen energy storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 76-83.
- [3] 程之隆, 李岚, 吴雷, 等. 基于 VSG 的并网型直驱永磁风力发电的频率调节[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 103-109.

- CHENG Zhilong, LI Lan, WU Lei, et al. Frequency adjustment of grid-connected direct-drive permanent magnet wind power generation based on VSG[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(18): 103-109.
- [4] 李少林, 王伟胜, 张兴, 等. 风力发电对系统频率影响及虚拟惯量综合控制[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(15): 64-70.
- LI Shaolin, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Impact of wind power on power system frequency and combined virtual inertia control[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(15): 64-70.
- [5] DOHERTY R, MULLANE A, NOLAN G, et al. An assessment of the impact of wind generation on system frequency control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(1): 452-460.
- [6] 裘昕月, 朱自伟, 黄春辉, 等. 考虑风电出力不确定性的综合能源系统鲁棒优化[J]. *智慧电力*, 2020, 48(5): 1-6, 59.
- QIU Xinyue, ZHU Ziwei, HUANG Chunhui, et al. Robust optimization of integrated energy system considering uncertainty of wind power output[J]. *Smart Power*, 2020, 48(5): 1-6, 59.
- [7] LIU H, HUANG K, YANG Y, et al. Real-time vehicle-to-grid control for frequency regulation with high frequency regulating signal[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(2): 141-148. DOI: 10.1186/s41601-018-0085-1.
- [8] 陈珩. *电力系统稳态分析*[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [9] 李东辉, 臧晓明, 鞠平, 等. 电力系统频率响应的改进模型与参数估计[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(5): 85-90.
- LI Donghui, ZANG Xiaoming, JU Ping, et al. The improved model and parameter estimation for frequency response of power system[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(5): 85-90.
- [10] 邹京希, 秦汉, 刘东, 等. 考虑频率约束下提升风储联合发电系统可靠性的储能系统控制策略[J]. *供用电*, 2020, 37(2): 73-78.
- ZOU Jingxi, QIN Han, LIU Dong, et al. Energy storage system control strategy for improving the reliability of an integrated power generation system of wind and energy storage unit under frequency constraint[J]. *Distribution & Utilization*, 2020, 37(2): 73-78.
- [11] MI Yang, FU Yang, WANG Chengshan, et al. Decentralized sliding mode load frequency control for multi-area power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(4): 4301-4309.
- [12] MI Yang, FU Yang, LI Dongdong, et al. The sliding mode load frequency control for hybrid power system base on disturbance observe[J]. *Electrical Power and Energy System*, 2016, 74: 446-452.
- [13] 侯忠生, 许建新. 数据驱动控制理论及方法的回顾和展望[J]. *自动化学报*, 2009, 35(6): 650-667.
- HOU Zhongsheng, XU Jianxin. On data-driven control theory: the state of the art and perspective[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 650-667.
- [14] HOU Zhongsheng. The parameter identification, adaptive control and model free learning adaptive control for non-linear systems[D]. Shenyang: Northeastern University, 1994.
- [15] RADU-EMIL P, MIRCEA-BOGDAN R, RAULCRISTIAN R, et al. Model-free sliding mode control of nonlinear systems: algorithms and experiments[J]. *Information Sciences*, 2017, 381.
- [16] KHOOBAN M H. Secondary load frequency control of time-delay stand-alone microgrids with electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 65(9): 7416-7422.
- [17] 詹祥澎, 杨军, 韩思宁. 考虑电动汽车停泊特性的充电站-电网互动策略研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(9): 43-50.
- ZHAN Xiangpeng, YANG Jun, HAN Sining. Station-to-grid interactive strategy considering parking characteristics of electric vehicles[J]. *Smart Power*, 2020, 48(9): 43-50.
- [18] 郝丽丽, 王国栋, 王辉, 等. 考虑电动汽车入网辅助服务的配电网日前调度策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(14): 35-43.
- HAO Lili, WANG Guodong, WANG Hui, et al. Day-ahead scheduling strategy of distribution network considering electric vehicle-to-grid auxiliary service[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(14): 35-43.
- [19] 何明杰, 彭春华, 曹文辉, 等. 考虑电动汽车规模化入网的动态经济调度[J]. *电力自动化设备*, 2013, 33(9): 82-88.
- HE Mingjie, PENG Chunhua, CAO Wenhui, et al. Dynamic economic dispatch considering large-scale integration of electric vehicles[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(9): 82-88.
- [20] MU Chaoxu, LIU Weiqiang, XU Wei. Hierarchically

- adaptive frequency control for an EV-integrated smart grid with renewable energy[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 14(9): 4254-4263.
- [21] 张谦, 周林, 周维维, 等. 计及电动汽车充放电静态频率特性的负荷频率控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 74-80.
ZHANG Qian, ZHOU Lin, ZHOU Luowei, et al. Load frequency control considering charging and discharging static frequency characteristics of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 74-80.
- [22] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/SMES hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [23] 蔡旭, 李征. 风电机组与风电场的动态建模[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 86-127.
- [24] FLIESS M, JOIN C. Model-free control and intelligent PID controllers: towards a possible trivialization of nonlinear control[C] // Proceedings 15th IFAC Symposium System Identification (SYSID 2009), 2009, Saint-Malo, France: 1531-1550.
- [25] 米阳, 吴彦伟, 符杨, 等. 独立光储直流微电网分层协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 37-45.
MI Yang, WU Yanwei, FU Yang, et al. Hierarchical coordinated control of island DC microgrid with photovoltaic and storage system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 37-45.
- [26] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.
- [27] PHAM T N, TRINH H, HIEN L V. Load frequency control of power systems with electric vehicles and diverse transmission links using distributed functional observers[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 238-252.
- [28] AZIZIPANAH-ABARGHOEE R, TERZIJA V, GOLESTANEH F, et al. Multiobjective dynamic optimal power flow considering fuzzy-based smart utilization of mobile electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(2): 503-514.
- [29] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [30] JIA Hongjie, LI Xiaomeng, MU Yunfei, et al. Coordinated control for EV aggregators and power plants in frequency regulation considering time-varying delays[J]. Applied Energy, 2018, 210.
- [31] MI Yang, HE Xingtang, HAO Xuezhi, et al. Frequency control strategy of multi-area hybrid power system based on frequency division and sliding mode algorithm[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 1(7): 1145-1152.
- [32] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10, 25.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10, 25.
- [33] HU Wei, TANG Jie. Study of model-free adaptive data-driven SMC algorithm[J]. International Journal of Automation and Computing, 2016, 13(2).
- [34] 张谦, 李晨, 周林, 等. 计及电动汽车实时可控能量动态变化的负荷频率控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 234-241.
ZHANG Qian, LI Chen, ZHOU Lin, et al. Load frequency control considering dynamic change of real-time controllable EV energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 234-241.

收稿日期: 2021-03-16; 修回日期: 2021-05-12

作者简介:

米阳(1976—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为微网控制、电力系统稳定控制等; E-mail: miyangmi@163.com
 伦雪莹(1996—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源电力系统负荷频率控制。E-mail: 19916939697@163.com

(编辑 许威)