

3-18-2021

## Frequency Coordinated Control Strategy of Microgrid Based on Fuzzy Prediction

Kunping Zhang

*Xuchang Electrical Vocational College, Xuchang 461000, China;*

Hao Lin

*Xuchang Electrical Vocational College, Xuchang 461000, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Frequency Coordinated Control Strategy of Microgrid Based on Fuzzy Prediction

## Abstract

**Abstract:** Aiming at the problem of frequency fluctuation of wind power generation connected to microgrid, a *frequency coordinated control strategy based on model predictive control (MPC)* is proposed. In this strategy, the wind turbine and plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) are included in the frequency control system. The pitch angle of the fan and the charge and discharge of PHEV are controlled to adjust the grid frequency and supplement the frequency modulation resources of microgrid. WTG pitch angle control system and PHEV power control system are modeled, and their control principles are described. In order to prevent excessive use of PHEV in the process of frequency modulation, the model predictive control (MPC) theory is introduced, and two independent MPC controllers are designed to control the pitch angle and the power output of PHEV respectively. The effectiveness of the proposed strategy is verified on MATLAB / simulink platform. The results show that the proposed strategy can effectively reduce the frequency deviation of microgrid and the amount of PHEV in large microgrid, and has faster response characteristics than the traditional PID control.

## Keywords

microgrid, frequency fluctuation, wind turbine generator, model predictive control, plug-in hybrid electric vehicle

## Recommended Citation

Zhang Kunping, Hao Lin. Frequency Coordinated Control Strategy of Microgrid Based on Fuzzy Prediction[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(3): 581-590.

# 基于模型预测的微电网频率协调控制策略

张坤平, 郝琳

(许昌电气职业学院, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 针对风力发电接入微电网后产生的频率波动问题, 提出了一种基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的微电网频率协调控制策略, 将风机和插电式混合动力汽车(plug-in hybrid electric vehicle, PHEV)纳入频率控制体系, 通过对风机的桨距角与PHEV的充放电进行控制, 来调节电网频率, 对微电网的调频资源进行补充。对WTG桨距角控制系统与PHEV功率控制系统进行建模, 阐述其控制原理。为了防止在调频过程中过多地使用PHEV, 引入模型预测控制(model predictive control, MPC)理论, 设计2个独立的MPC控制器来分别控制桨距角和PHEV功率输出。在MATLAB/simulink平台上验证了所提策略的有效性。结果表明: 所提策略可以有效减小微电网的频率偏差和大型微电网中PHEV的用量, 相比于传统PID控制具有更快的响应特性。

**关键词:** 微电网; 频率波动; 风力发电机; 模型预测控制; 插电式混合动力汽车

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2021)03-0581-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0298

## Frequency Coordinated Control Strategy of Microgrid Based on Fuzzy Prediction

Zhang Kunping, Hao Lin

(Xuchang Electrical Vocational College, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of frequency fluctuation of wind power generation connected to microgrid, a frequency coordinated control strategy based on model predictive control (MPC) is proposed. In this strategy, the wind turbine and plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) are included in the frequency control system. The pitch angle of the fan and the charge and discharge of PHEV are controlled to adjust the grid frequency and supplement the frequency modulation resources of microgrid. WTG pitch angle control system and PHEV power control system are modeled, and their control principles are described. In order to prevent excessive use of PHEV in the process of frequency modulation, the model predictive control (MPC) theory is introduced, and two independent MPC controllers are designed to control the pitch angle and the power output of PHEV respectively. The effectiveness of the proposed strategy is verified on MATLAB / simulink platform. The results show that the proposed strategy can effectively reduce the frequency deviation of microgrid and the amount of PHEV in large microgrid, and has faster response characteristics than the traditional PID control.

**Keywords:** microgrid; frequency fluctuation; wind turbine generator; model predictive control; plug-in hybrid electric vehicle

## 引言

如今微电网的概念已在世界范围内得到越来越

越多的关注, 特别是在配电系统中, 因其可提高系统的可靠性和能源管理能力而备受重视<sup>[1-3]</sup>。由于环境的恶化与化石能源的日益紧缺, 可再生能

收稿日期: 2020-06-03

修回日期: 2020-08-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0904005), 国家自然科学基金(51777116)

第一作者: 张坤平(1982-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为控制理论与控制工程。E-mail: zhangkunping200@163.com

源在微电网中的使用比例将会逐渐增大,尤其是风力发电,因其对环境影响小和可无限利用的特点而显著增加<sup>[4-7]</sup>。然而,由于风速是间歇性的,且风力机的输出与风速的立方成正比,因此风力发电机的发电功率会产生波动,导致电网产生较大的频率偏差<sup>[8-12]</sup>。

针对风力发电接入微电网后产生的频率波动问题,主要的控制方式为附加惯性控制和功率备用控制。针对附加惯性控制,文献[13]提出了一种在风电机组转子侧附加虚拟惯性环节的控制策略,该策略可使风力发电机主动响应频率变化,参与系统的一次调频,但响应过程有一定的延迟。文献[14]提出了一种下垂控制策略,该策略在风电厂的有功控制上添加了下垂控制,使得风力发电机组可参与一次调频。功率备用控制主要的控制手段是桨距角控制<sup>[15]</sup>。文献[16]提出了基于桨距角控制的双馈风机调频策略。利用该策略可持续地分担常规电厂的调频压力,节省调频成本。然而桨距角控制存在着机械惯性,响应速度存在欠缺。此外,随着PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle)技术的不断成熟,利用PHEV参与调频引起了学者的广泛关注。文献[17]提出了一种基于PHEV的功率控制策略,该策略通过改变PHEV的充/放电功率参考值,使得PHEV参与微电网的一次和二次调频,但对于大型系统而言,需要大

量的PHEV才能产生令人满意的频率调节效果。由于PHEV对功率的控制更为灵敏,可以与桨距角控制形成优势互补。然而目前鲜有文献涉及对桨距角和PHEV协调控制的分析。

针对上述问题,本文提出了一种基于MPC(Model Predictive Control)的微电网频率协调控制策略来调节微电网频率。该策略可在微电网频率出现偏差时,通过对WTG(Wind Turbine Generator)桨距角与PHEV的协调控制,来降低电网频率波动。此外为了防止在调频过程中过多地使用PHEV,本文引入了MPC理论,设计2个独立的MPC控制器来分别控制桨距角和PHEV功率输出。PHEV功率控制与桨距角控制相结合,能平滑风力机的风能输出,减轻PHEV的调节负担,减少PHEV的数量。将MPC应用在功率控制系统中能提高系统的响应特性,增强微电网频率控制能力。最后通过仿真验证了所提策略的有效性。

## 1 系统研究与建模

### 1.1 微电网系统

文中所采用的微电网系统模型如图1所示。该系统包含:20 MW火电、5.5 MW风电、3.5 MW的PHEV和15 MW负载。

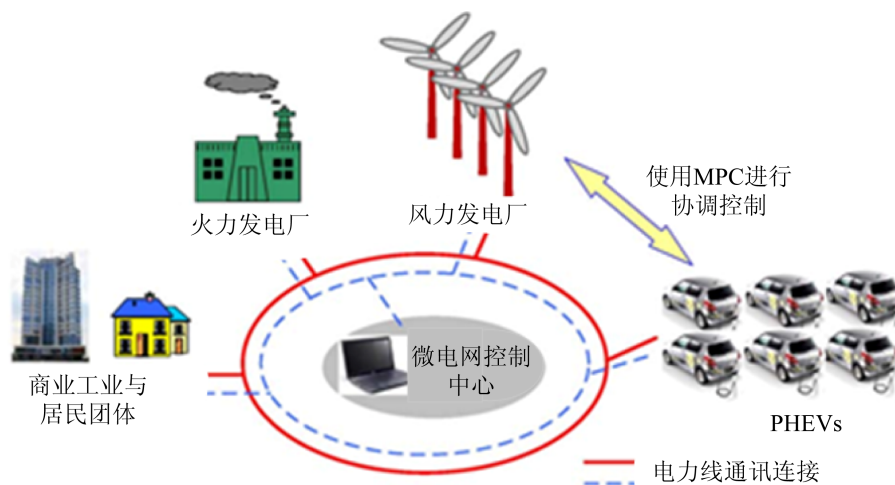


图1 文中所采用的微电网系统  
Fig. 1 Microgrid system used in this paper

### 1.2 WTG 控制系统

WTG 系统的风力机和发电机的控制框图如图 2 所示。

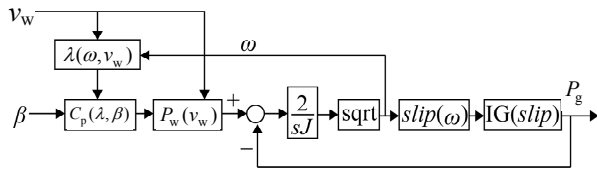


图 2 风力机和发电机的控制框图  
Fig. 2 Windmill and generator

风力机的输出功率  $P_w$  的计算公式如下:

$$P_w(v_w) = 0.5C_p(\lambda, \beta)v_w^3\rho A, \quad (1)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1(\beta)\lambda^2 + c_2(\beta)\lambda^3 + c_3(\beta)\lambda^4, \quad (2)$$

$$\lambda(\omega, v_w) = R\omega / v_w, \quad (3)$$

式中:  $v_w$  为风速;  $\rho$  为空气密度;  $A$  为风车转子横截面积;  $\beta$  为桨距角;  $\lambda$  为叶尖速比;  $C_p$  为功率系数;  $R$  为风力机半径;  $\omega$  为风力机转子角速度;  $J$  为风力机转动惯量。

发电机的输出功率  $P_g$  可以表示为

$$P_g = \frac{-3v^2s(1+s)R_2}{(R_2 - sR_1)^2 + s^2(X_1 + X_2)^2}, \quad (4)$$

式中:  $s$  为转差;  $v$  为相电压;  $X_1$  和  $X_2$  分别为定子和转子的电抗;  $R_1$  和  $R_2$  分别为定子和转子的电阻。在稳定状态下, 如果忽略能量损失, 则  $P_w = P_g$ ; 因此,  $P_w$  可以近似为

$$\begin{cases} P_w = a_1(\beta) + a_2(\beta)v_w^2, \\ a_1(\beta) = \alpha_{11} + \alpha_{12}\beta + \alpha_{13}\beta^2 + \alpha_{14}\beta^3, \\ a_2(\beta) = \alpha_{21} + \alpha_{22}\beta + \alpha_{23}\beta^2 + \alpha_{24}\beta^3, \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\alpha_{ij}$  为常数。

如式(5)所示, 可以通过调节风力机的桨距角  $\beta$  来适当调节风力机接收到的风量, 从而控制风力机的输出功率  $P_w$ , 解决输出功率波动的问题。

### 1.3 桨距角控制系统

如图 3 所示, 桨距角的控制是通过将 WTG 的功率输出曲线划分为 4 个控制区域来实现的。

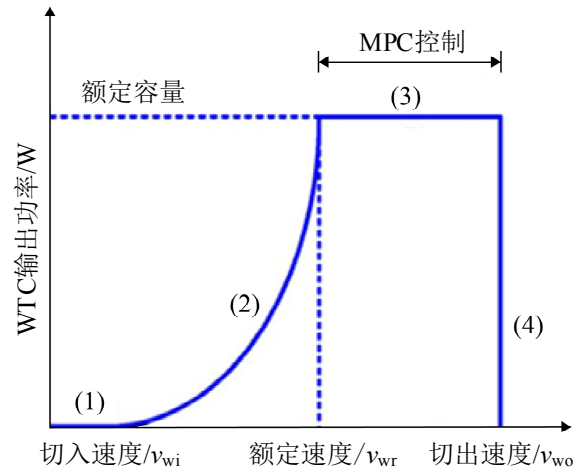


图 3 桨距角控制律  
Fig. 3 Pitch angle control law

图 3 中,  $v_w$  为风速;  $v_{wi}$  为切入速度;  $v_{wr}$  为额定速度;  $v_{w0}$  为切出速度。

其中每个区域的风速  $v_w$  的控制规律设置如下:

区域 1:  $v_w \leq v_{wi}$ , 设定桨距角  $\beta = 90^\circ$ , 在该区域内, WTG 不输出功率;

区域 2:  $v_{wi} \leq v_w \leq v_{wr}$ , 设定桨距角  $\beta = 10^\circ$ , 同时通过公式(5)计算  $P_w$ , 使 WTG 能接收最大风能;

区域 3:  $v_{wr} \leq v_w \leq v_{w0}$ , 在规定范围内( $10^\circ \sim 90^\circ$ )可变地调整桨距角, 同时通过公式(5)计算  $P_w$ , 使 WTG 的输出功率恒定。

区域 4:  $v_{w0} \leq v_w$ , 为安全起见, 设定桨距角  $\beta = 90^\circ$ , 此时 WTG 不输出功率。

$$v_{wi} = 5 \text{ m/s}, v_{wr} = 12 \text{ m/s}, v_{w0} = 24 \text{ m/s}.$$

### 1.4 PHEV 功率控制系统

针对频率偏差的 PHEV 功率控制规律, 如图 4 所示。其中 V1G 是从电网到车辆的单向充电功率控制。V2G 是从电网到车辆/从车辆到电网的双向充放电功率控制。

当功率控制为 V1G 时, PHEV 的输出功率  $P_{V1G}$  的计算公式为

$$P_{V1G} = \begin{cases} K_{\max}\Delta f, & (0 < K_{\max}\Delta f \leq P_{\max}), \\ P_{\max}, & (P_{\max} < K_{\max}\Delta f), \\ 0, & (K_{\max}\Delta f < 0). \end{cases} \quad (6)$$

当功率控制为 V2G 时, PHEV 的输出功率  $P_{V2G}$  计算公式为:

$$P_{V2G} = \begin{cases} K_{\max} \Delta f, & (|K_{\max} \Delta f| \leq P_{\max}), \\ P_{\max}, & (P_{\max} < K_{\max} \Delta f), \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\Delta f$  为频率偏差;  $K_{\max}$  和  $P_{\max}$  分别为 PHEV 的最大增益和最大功率。文中, MPC 基于所需的最小频率偏差来调整 V2G 的  $K_{\max}$ 。

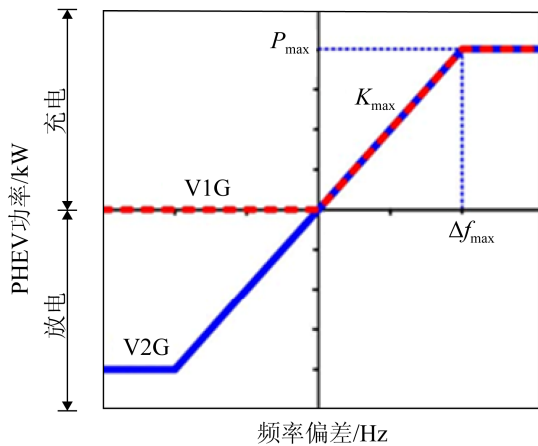


图 4 针对频率偏差的 PHEV 功率控制  
Fig. 4 PHEV power control against frequency deviation

## 2 MPC 控制器设计

### 2.1 MPC 控制

MPC 控制是一种特殊的预测控制, 即操纵输入变量, 使预测的响应以最佳方式达到设定点。MPC 控制可利用系统的现时刻的输入和过程的历史信息, 预测系统未来的输出。其基本原理如图 5 所示。

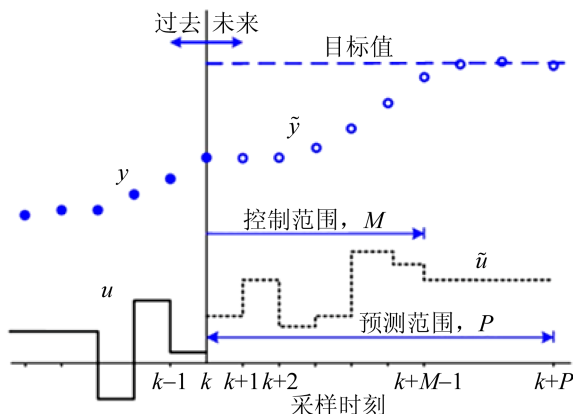


图 5 MPC 的基本概念  
Fig. 5 Basic concept of MPC

图 5 中,  $y$  为实际输出;  $\hat{y}$  为预测输出;  $u$  为控制输入;  $k$  为当前采样时刻;  $P$  为全局预测的控制输入序列;  $M$  为局部预测的控制输入序列, 且  $M$  的值由当前控制输入  $u(k)$  和未来控制输入  $u(k+i)$ , ( $i=1,2,3,\dots,M-1$ ) 组成。利用当前时刻和历史的控制输入, 计算未来控制输入序列, 采用优化解的第一部分, 即  $M$ , 作用于系统, 并在下一时刻重复这一过程, 可以使得预测输出以最佳方式到达设定点。

MPC 控制使用的动态模型, 通常是线性经验模型, 比如阶跃响应或差分方程模型的多变量版本、传递函数或状态-空间模型。MPC 控制解决了当前时间的有限和未来时间步长的优化问题。因此, 将该系统表示为有限脉冲响应:

$$y(k+1) = y(k) + A \sum_{i=0}^{n_T} \delta_i u(k-i), \quad (8)$$

式中:  $y(k)$  为  $k$  时刻的输出;  $u(k)$  为  $k$  时刻的输入;  $n_T$  为用于建模系统的脉冲响应系数;  $A$  为相互作用矩阵;  $\delta_i$  为系数, 其可以定义为

$$\delta_i = g_{i+1} - g_i, \quad \forall i = 0, \dots, n_T, \quad (9)$$

式中:  $g_i$  为标量。MPC 方法本质是计算  $u(k)$  作为二次规划的最优解, 其定义为

$$\min_{u(k) \in M} \sum_{j=1}^M [y(k+j) - r(k+j)]^T W_y [y(k+j) - r(k+j)] + [u(k) - u(k-1)]^T W_u [u(k) - u(k-1)], \quad (10)$$

受制于:

$$y(k+1) = y(k) + A \sum_{i=0}^{n_T} \delta_i u(k-i) - \Delta u_{\max} + u(k-1) \leq u(k) \leq \Delta u_{\max} + u(k-1), \quad (11)$$

式中:  $r(k+j)$  为所需条件;  $W_y$  和  $W_u$  为半正定加权矩阵。假设每个权重矩阵均一个常数乘以恒等式矩阵, 则该矩阵必须要适用于 WTG 桨距角控制和 PHEV 功率控制。其中  $W_u$  的值通常较大, 以满足速率约束。

虽然 MPC 可设计为交互式和多输入-多输出系统, 但桨距角和 PHEV 控制的特性是不同的。桨距角控制是以发电量和设定点为控制目标来平滑

WTG 的输出功率。而 PHEV 控制是以系统频率和参考频率作为控制目标来减小系统频率的波动。桨距角控制需要对风速变换做出快速响应, 而 PHEV 控制则需要对系统频率偏差做出快速响应。通常, PHEV 控制比桨距角控制更复杂, 需要更高的控制精度。此外, 桨距角的控制依赖于 WTG 的发电量和风速, 这与基于 MPC 的 PHEV 控制无关, 而且桨距角控制采用数学方程建模, 而 PHEV 采用具有时滞  $T_{PHEV}$  的一阶传递函数建模, 所以文中选择采用 2 个独立的 MPC 来分别控制桨距角和 PHEV 功率输出。

## 2.2 MPC 控制系统设计

用于 WTG 桨距角控制的 MPC1 控制回路, 与用于 PHEV 功率控制的 MPC2 控制回路如图 6 所示。

### 2.2.1 用于 WTG 桨距角控制的 MPC

如图 6 所示, MPC1 的输入由 WTG 输出功率  $P_{WTG}$  和参考功率  $P_{WTG,ref}$  之差组成, 桨距角由其输入进行控制。虽然发电机转矩可用作 WTG 输出功率的关键反馈控制信号, 但使用发电量作为反馈控

制信号更有利于平滑风能输出。在该系统中, MPC1 根据风速和 WTG 的反馈控制信号, 来调节桨叶的桨距角, 从而调节 WTG 的输出功率, 减小其波动, 降低系统的频率偏差。

由于桨距角是通过液压伺服系统控制的, 因此桨距角  $\beta$  有一定的约束条件, 其变化率  $d\beta/dt$  可以表示为

$$10[\text{deg}] \leq \beta \leq 30[\text{deg}], \quad (12)$$

$$|d\beta/dt| \leq 10[\text{deg/s}]. \quad (13)$$

对于 MPC 控制, WTG 的有限脉冲响应可以表示为

$$P_{WTG}(k+1) = P_{WTG}(k) + A_{WTG} \sum_{i=0}^{n_T} \delta_i \beta(k-i), \quad (14)$$

式中:  $\beta(k)$  为  $k$  时刻的桨距角;  $P_{WTG}(k)$  为  $k$  时刻的 WTG 发电量;  $n_T$  为用于建模系统的脉冲响应系数的数量;  $A_{WTG}$  为 WTG 的相互作用矩阵。假设输入到输出的映射在工作区域内是线性的, 由式(5)可知,  $A_{WTG}$  可以在 WTG 系统中定义为 1。

### 2.2.2 用于 PHEV 功率控制的 MPC

如图 6 所示, PHEV 功率控制回路的状态空间为

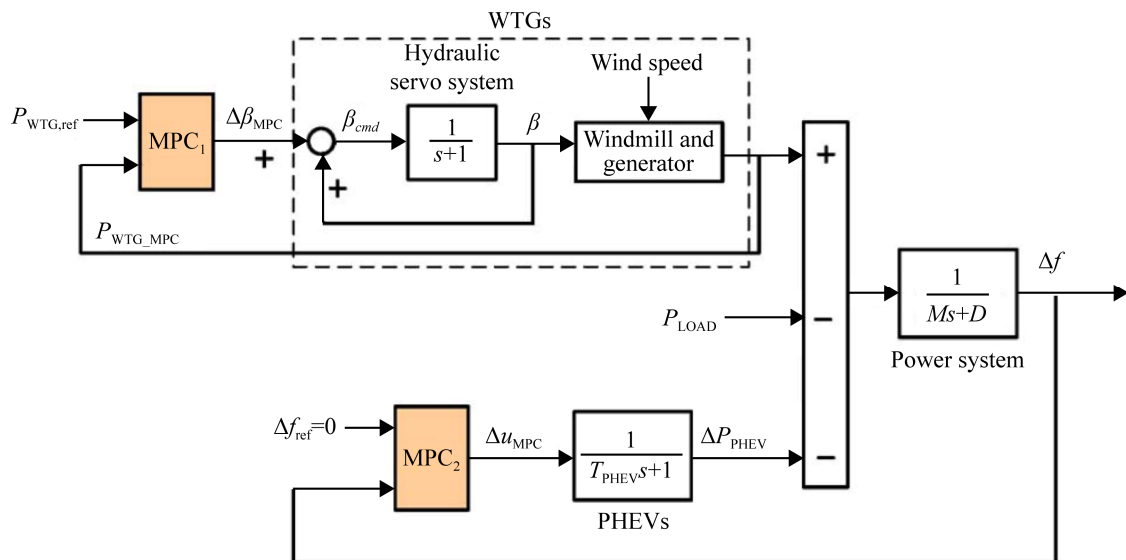


图 6 微电网系统的控制框图  
Fig.6 Control block diagram of microgrid system

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{P}_{\text{PHEV}} \\ \Delta f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T_{\text{PHEV}} & 0 \\ -1/M & -D/M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{\text{PHEV}} \\ \Delta f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/T_{\text{PHEV}} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta u_{\text{MPC}} \quad (15)$$

$$[\Delta y] = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} \Delta P_{\text{PHEV}} \\ \Delta f \end{bmatrix} + [0] \Delta U_{\text{MPC}} \quad (16)$$

式中： $\Delta P_{\text{PHEV}}$ 为PHEV的充电功率； $\Delta f$ 为系统频率偏差； $\Delta u_{\text{MPC}}$ 为MPC产生的控制信号的变化； $T_{\text{PHEV}}$ 为PHEV的时间常数； $M$ 和 $D$ 分别为微电网系统的惯性常数和阻尼系数。若此状态空间被用于MPC计算中，则应用于PHEV功率控制的MPC可以定义为

$$x(k+1) = A_{\text{PHEV}}x(k) + B_{\text{PHEV}}u(k) \quad (17)$$

$$y(k) = C_{\text{PHEV}}x(k) + D_{\text{PHEV}}u(k) \quad (18)$$

其中：

$$\begin{cases} A_{\text{PHEV}} = \begin{bmatrix} -1/T_{\text{PHEV}} & 0 \\ -1/M & -D/M \end{bmatrix}, \\ B_{\text{PHEV}} = \begin{bmatrix} 1/T_{\text{PHEV}} \\ 0 \end{bmatrix}, \\ C_{\text{PHEV}} = [0 \quad 1], \\ D = [0]. \end{cases} \quad (19)$$

### 2.2.3 PHEV与桨距角协调控制过程

如图7所示，为PHEV与桨距角协调控制流程图。当风速小于切入风速 $v_{wi}$ ，即风电机组运行在

区域1时，设定桨距角 $\beta=90^\circ$ ，WTG输出的有功功率为0，PHEV与桨距角控制都没有投入使用；当风速大于 $v_{wi}$ ，即风电机组运行在区域2时，风力机采用最佳叶尖速比控制，以实现最大风能转换，WTG输出的功率随着风速增大而增加，同时PHEV功率控制也投入运行，以减少系统频率波动；当风速达到额定风速 $v_{wr}$ ，即风电机组运行在区域3时，MPC被激活，基于MPC的PHEV与桨距角协调控制应用于系统中；当风速大于切出风速 $v_{wo}$ 时，为了安全起见，设定桨距角 $\beta=90^\circ$ ，此时WTG不输出功率，PHEV与桨距角协调控制也退出运行。

## 3 仿真分析

为了验证该方案的可行性，文中使用图6所示的系统作为研究系统，进行仿真分析。在MPC的设计中，用于WTG桨距角控制的MPC<sub>1</sub>控制器参数设置为：预测视界 $P=10$ ，控制视界 $M=3$ ，采样间隔 $S=0.1$  s；此外，用于PHEV功率控制的MPC<sub>2</sub>控制器参数设置为： $P=10$ ， $M=3$ ， $S=0.1$  s。经过MPC权重优化后，最优权重如下： $W_{y1}=0.678$  0， $W_{u1}=0.631$  2， $W_{y2}=0.085$  0， $W_{u2}=1.865$  3。

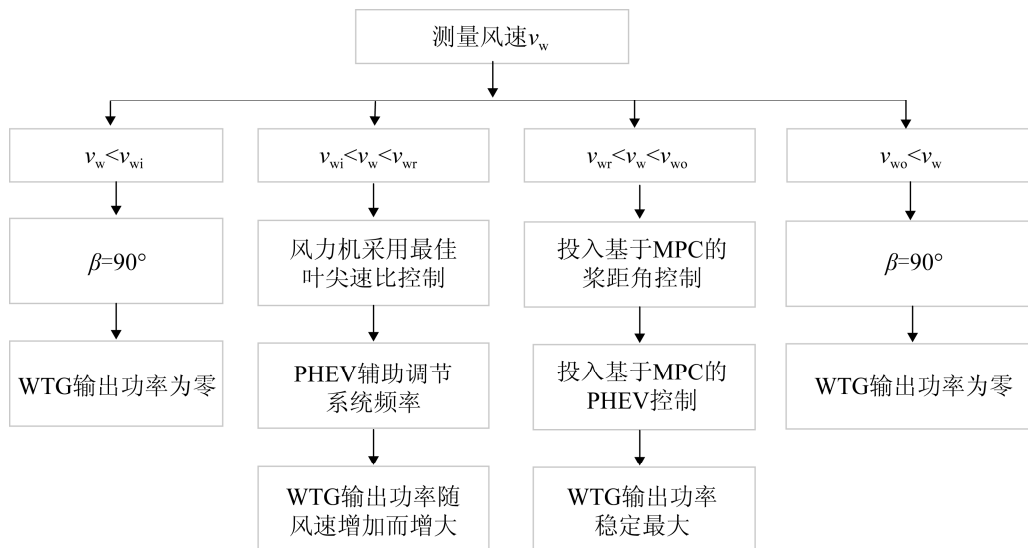


图7 PHEV与桨距角协调控制流程图

Fig. 7 PHEV and pitch angle coordinated control flow chart



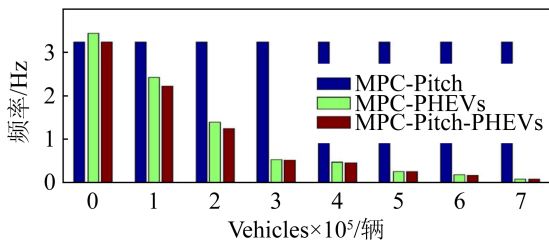
考虑到实际场景的复杂性, 仿真中设计了 2 个应用案例, 便于更好地分析 MPC 在不同条件下的控制性能。

案例 1: 风速设定为 0~24 m/s。如图 3 所示, WTG 可在区域 1~3 工作。在此案例中, WTG 主要在区域 2 内运行, 但 MPC 只有在区域 3 中才被激活, 因此, 此案例可以研究 MPC 的短期控制效果。

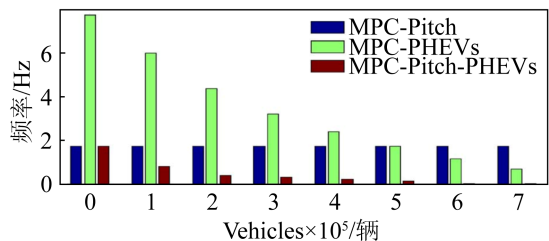
案例 2: 风速设定为 10~24 m/s, WTG 可在区域 2~3 工作。在此案例中, WTG 主要在区域 3 中运行, 因此, 此案例可以研究 MPC 的长期控制效果。

### 3.1 MPC-Pitch-PHEVs 的有效性

将文中所提的基于 MPC 的桨距角和 PHEV 的协调控制策略(MPC-Pitch-PHEVs), 与 MPC-Pitch 和 MPC-PHEVs 进行比较(MPC-Pitch 为有基于 MPC 的桨距角控制, 但没有 PHEV 功率控制的系统; MPC-PHEVs 为有基于 MPC 的 PHEV 功率控制, 但没有桨距角控制的系统)。分别改变案例 1~3 中 PHEV 的数目, 其产生的最大频率偏差如图 8 所示。



(a) 案例 1



(b) 案例 2

图 8 PHEV 数量变化时的绝对最大频率偏差

Fig. 8 Absolute maximum frequency deviation when the number of PHEVs changed

如图 8(a)所示, 案例 1 中 MPC-Pitch 的最大频率偏差是恒定的, 而 MPC-PHEVs 和 MPC-Pitch-PHEVs 能够在 PHEV 数目增加时减少最大频率偏差。其中当车辆数量为 0 时, 意味着微电网系统中不包含 PHEV。

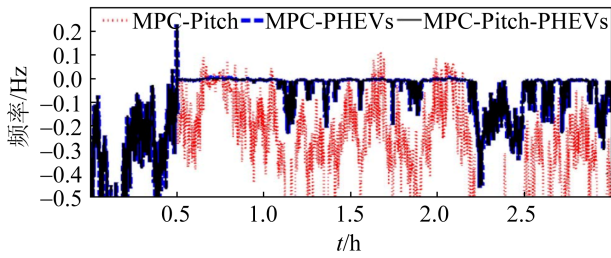
如图 8(b)所示, 当 PHEV 的数量很小时, MPC-PHEVs 的最大频率偏差高于 MPC-Pitch 和 MPC-Pitch-PHEVs 的最大频率偏差。当 PHEV 的数目增加时, MPC-PHEVs 的最大频率偏差减少, 且 MPC-Pitch-PHEVs 的最大频率偏差优于 MPC-Pitch。

### 3.2 MPC-Pitch-PHEVs 的稳定性

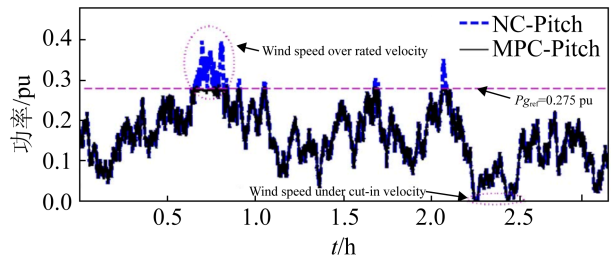
为了验证 MPC-Pitch-PHEVs 系统的稳定性, 对案例 1, 2 进行仿真。假设 2 个案例中 PHEV 的数量相同, 且在仿真开始断开 PHEV 的连接, 然后在 30 min 时连接 PHEV 以抑制频率波动。

案例 1 的仿真结果如图 9 所示, 其中 9(a)~9(c) 分别表示案例 1 中 WTG 和 PHEV 的频率偏差和功率输出。由图可知 MPC-PHEVs 和 MPC-Pitch-PHEVs 的频率偏差明显优于 MPC-Pitch。

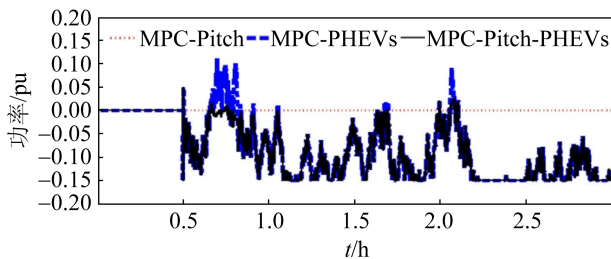
案例 2 的仿真结果如图 10 所示。由图 10(a) 可知, 在仿真开始时, 由于 MPC 的平滑风能输出的作用, MPC-Pitch-PHEVs 的频率偏差类似于 MPC-Pitch 且优于 MPC-PHEVs。在 PHEV 于 0.5 h 应用于系统之后, MPC-Pitch-PHEVs 能够有效地控制系统的频率波动, 但 MPC-Pitch 和 MPC-PHEVs 却不能, 且 MPC-PHEVs 不能很好地工作。这是因为 PHEV 的充放电功率值不足以维持功率波动。相反, MPC-Pitch-PHEV 由于使用了基于 MPC 的桨距角控制来平滑风能, 使得 PHEV 的充电/放电功率值足够响应系统功率变化, 降低频率的波动。此外, 结合图 10(a)~10(b)可知, 当风速低于额定风速时, MPC-Pitch-PHEVs 的系统频率可以保持在可接受的范围内。这一结果表明, MPC-Pitch-PHEVs 具有很好的稳定性。



(a) 频率偏差



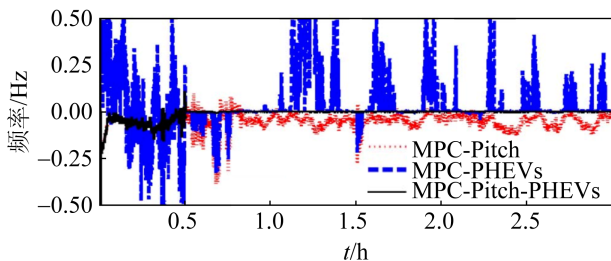
(b) WTG 功率输出



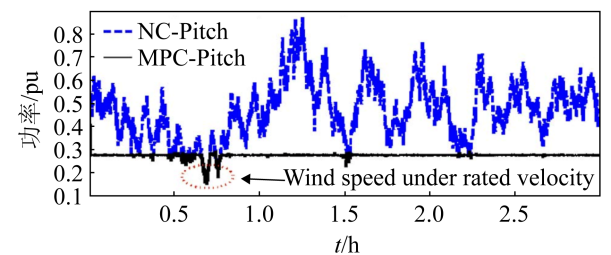
(c) PHEV 功率输出

图 9 案例 1 的仿真结果

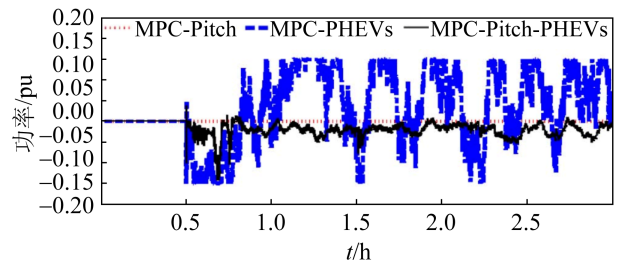
Fig. 9 Simulation results of case 1



(a) 频率偏差



(b) WTG 功率输出



(c) PHEV 功率输出

图 10 案例 2 的仿真结果  
Fig.10 Simulation results of case 2

### 3.3 MPC 与 PID 控制器的比较

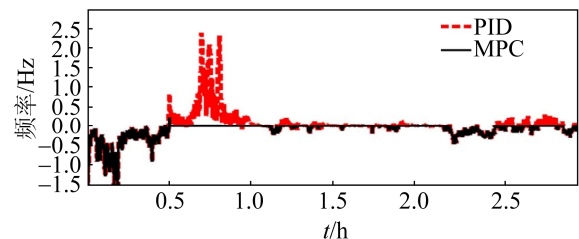
为了验证所提出的方法的先进性，还对 MPC 和 PID 控制器进行了比较研究。PID 参数由粒子群优化算法求得。以最小化频率偏差为目标函数，得到的最优 PID 控制器如下：

PID-WTG:  $K_p=0.5034$ ,  $K_i=0.0027$ ,  $K_d=0$ ,

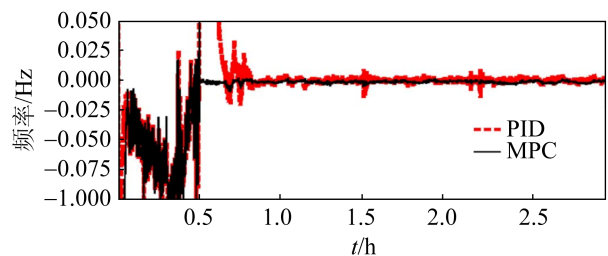
PID-PHEV:  $K_p=0.2644$ ,  $K_i=0.0065$ ,  $K_d=0$ ,

式中:  $K_p$ ,  $K_i$  和  $K_d$  分别为 PID 控制器的比例增益、积分增益和微分增益。

MPC 与 PID 之间的频率偏差的比较如图 11 所示。由图可知 MPC 能够产生比 PID 控制器更好的频率偏差。



(a) 案例 1



(b) 案例 2

图 11 PID 与 MPC 的频率偏差比较

Fig. 11 Comparison of frequency deviation between PID and MPC

综合所述, MPC-Pitch-PHEVs 协调控制策略明显优于 MPC-Pitch 和 MPC-PHEVs。MPC-Pitch-PHEVs 控制策略可以在降低系统频率波动的同时减少微电网中 PHEV 的数量, 同时系统具有较高的稳定性和抗干扰性。另外, 与 PID 控制器相比, 基于 MPC 的控制策略能有效降低最大频率偏差。

## 4 结论

针对大型微电网为减小其频率偏差而大量使用 PHEV 的问题, 本文提出了一种基于 MPC 的微电网频率协调控制策略, 实现控制频率波动的同时减少大型微电网中 PHEV 的用量, 并通过系统仿真验证了该策略的有效性, 得到的具体结论如下:

(1) MPC-Pitch-PHEVs 协调控制策略明显优于 MPC-PHEVs 和 MPC-Pitch。该策略由于在基于 MPC 的 PHEV 功率控制的基础上添加了基于 MPC 的桨距角控制, 使得当系统 PHEV 数量较小时, MPC-Pitch-PHEVs 仍可保证电网频率的稳定。

(2) MPC-Pitch-PHEVs 协调控制策略的抗干扰性和稳定性明显优于 MPC-PHEVs。如果发生瞬时的 PHEV 功率的缺失或者盈余, MPC-Pitch-PHEVs 系统能迅速地平稳功率的波动, 而 MPC-PHEVs 系统则会产生较大的功率波动。

(3) 基于 MPC 的控制器的频率控制性能明显优于传统的 PID 控制器。以最小化频率偏差为目标函数, MPC 控制器的最大频率偏差要明显小于 PID 控制器的最大频率偏差。

## 参考文献:

- [1] 沈珺, 柳伟, 李虎成, 等. 基于强化学习的多微电网分布式二次优化控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 198-206, 275-278.  
Shen Jun, Liu Wei, Li Hucheng, et al. Reinforcement Learning Based Distributed Secondary Optimal Control for Multiple Microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 198-206, 275-278.
- [2] 胡长斌, 王海鹏, 罗珊娜, 等. 基于鲁棒扰动观测器的直流微电网电压动态补偿控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 207-214, 259-261.  
Hu Changbin, Wang Haipeng, Luo Shanna, et al. Voltage

- Dynamic Compensation Control of DC Microgrid Based on Robust Disturbance Observer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 207-214, 259-261.
- [3] Alegria E, Brown T, Minear E, et al. CERTS Microgrid Demonstration with Large-scale Energy Storage and Renewable Generation[J]. IEEE Trans. Smart Grid (S1949-3053), 2014, 5(2): 937-943.
- [4] 王岳, 杨国华, 庄家懿, 等. 基于一致性算法的微电网无差调频控制策略[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 187-191.  
Wang Yue, Yang Guohua, Zhuang Jiayi, et al. Zero-Error Frequency Regulation Control Method for Microgrids Based on Consensus Algorithm[J]. Electric Power, 2020, 53(10): 187-191.
- [5] Lin B Q, Luan R R. Are Government Subsidies Effective in Improving Innovation Efficiency? Based on the research of China's Wind Power Industry[J]. Science of the Total Environment (S0048-9697), 2020, 710: 136339.
- [6] Han J, Solanki SK, Solanki J. Coordinated Predictive Control of a Wind/battery Microgrid System[J]. IEEE Emerging Sel. Topics Power Electron (S2168-6777), 2013, 1(4): 296-305.
- [7] Zhang Y, Yuan J, Zhao C, et al. Can Dispersed Wind Power Take off in China: A Technical & Institutional Economics Analysis[J]. Journal of Cleaner Production (S0959-6526), 2020, 256.
- [8] 毛安家, 马静, 蒯圣宇, 等. 高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2745-2755.  
Mao Anjia, Ma Jing, Kuai Shengyu, et al. Evolution Mechanism of Transient and Voltage Stability for Power System With High Renewable Penetration Level[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2745-2755.
- [9] Masuta T, Yokoyama A. Supplementary Load Frequency Control by Use of a Number of Both Electric Vehicles and Heat Pump Water Heaters[J]. IEEE Trans. Smart Grid (S1949-3053), 2012, 3(3): 1253-1262.
- [10] 李春, 卫志农, 孙国强, 等. 考虑风力发电波动引起频率偏差的电力系统状态估计[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1301-1306.  
Li Chun, Wei Zhinong, Sun Guoqiang, et al. State Estimation of Power System Considering Frequency Deviation Caused by Fluctuation of Wind Power Generation[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1301-1306.
- [11] 熊玮, 鄢发齐, 汪旸, 等. 实际电网频率概率分布特性演变及成因分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2):

- 222-227.  
Xiong Wei, Yan Faqi, Wang Yang, et al. Analysis on Variation of Frequency Probability Distribution and Causes in Actual Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 222-227.
- [12] 邓银秋, 汪震, 韩俊飞, 等. 适用于海上风电接入的多端柔直网内不平衡功率优化分配控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2406-2415.
- Deng Yinqiu, Wang Zhen, Han Junfei, et al. Control Strategy on Optimal Redistribution of Unbalanced Power for Offshore Wind Farms Integrated VSC-MTDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2406-2415.
- [13] 张道田, 杨文思, 张扬, 等. 影响风电一次调频能力的参数选取[J]. 江西电力, 2019, 43(12): 56-60, 66.
- Zhang Daotian, Yang Wensi, Zhang Yang, et al. Selection of Parameters Affecting Primary Frequency Regulation Capability of Wind Power [J]. Jiangxi Electric Power, 2019, 43(12): 56-60, 66.
- [14] 王岳, 杨国华, 庄家懿, 等. 基于一致性算法的微电网无差调频控制策略[J]. 中国电力, 2020, 53(10): 187-191.
- Wang Yue, Yang Guohua, Zhuang Jiayi, et al. Zero-Error Frequency Regulation Control Method for Microgrids Based on Consensus Algorithm[J]. Electric Power, 2020, 53(10): 187-191.
- [15] 许瑞庆. 高风电渗透率下双馈风机参与系统调频的控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- Xu Ruiqing. Research on Control Strategy of DFIG Participating in System Frequency Regulation Under High Wind Power Penetration[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [16] 刘柳, 王德林, 杨仁杰, 等. 基于桨距角控制的双馈风机参与电网二次调频控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(5): 10-16.
- Liu Liu, Wang Delin, Yang Renjie, et al. Research on Control Strategy of DFIG Participating in Secondary Frequency Regulation Based on Pitch[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(5): 10-16.
- [17] 刘其辉, 逯胜建. 参与微电网调频的电动汽车虚拟同步机充放电控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 171-179.
- Liu Qihui, Lu Shengjian. Charging and Discharging Control Strategy Based on Virtual Synchronous Machine for Electrical Vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 171-179.