

大规模空调负荷参与新能源电力系统调频的 无模型自适应控制方法

左 强, 李 波, 杨世海

(国网江苏省电力有限公司营销服务中心, 江苏 南京 211103)

摘 要:针对大规模空调负荷参与新能源电力系统的调频问题,提出了一种基于无模型自适应控制的频率调节方法。首先,建立了包含大规模风力发电的多区域互联电网模型,风力发电系统通过虚拟惯量控制参与电网调频;其次,采用等效热力学参数模型构建了定频和变频空调模型,通过大规模空调聚合建立了空调负荷调频模型;然后,利用无模型自适应控制算法完全数据驱动、无需模型参数、抗干扰能力强、适用于非线性时变系统的特点,设计了区域互联电网自动发电控制器以及空调控制器,实现了大规模空调负荷参与新能源电力系统的频率控制。算例仿真在三区域互联电力系统展开,在负荷扰动、风电波动和环境温度变化等条件下进行的仿真表明:提出的无模型自适应频率控制算法能够控制大规模空调负荷有效抑制风电接入和负荷扰动带来的频率波动。

关 键 词:空调负荷;风力发电;电力系统调频;无模型自适应控制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.025

中图分类号: TM464

文章编号: 1673-9140(2023)02-0224-08

Model-free adaptive frequency control of renewable energy power systems with participation of large-scale air conditioner loads

ZUO Qiang, LI Bo, YANG Shihai

(Marketing Service Center, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210036, China)

Abstract: Aiming at the problem of large-scale air conditioner loads participating in the frequency regulation of renewable energy power systems, a frequency regulation method based on model-free adaptive control (MFAC) is proposed. Firstly, a multiarea interconnected power grid model including large-scale wind power generation is established. The wind power generation system participates in power grid frequency regulation through virtual inertia control. Secondly, the equivalent thermodynamic parameter (ETP) model is used to build fixed-frequency and variable-frequency air conditioner models, and the frequency regulation model of air conditioner loads is established through large-scale air conditioner aggregation. Then, the automatic generation controller (AGC) and air conditioner controller (ACC) of multiarea interconnected power grid are designed based on the MFAC algorithm, of which the advantages are completely data-driven, no model parameters, strong anti-interference ability and suitable for nonlinear time-varying systems, thereby realizing the control of large-scale air conditioner loads participating in the frequency regulation of renewable energy power systems. Simulation studies are carried out in a three-area interconnected power system. The simulation results obtained under the conditions of load disturbance, wind power fluctuation and ambient temperature change show that the proposed MFAC frequency control algorithm can control large-scale air conditioner loads and effectively suppress the frequency fluctuation caused by wind powers and load disturbances.

Key words: air conditioner load, wind power generation, power system frequency regulation, model free adaptive control

收稿日期: 2022-01-17; 修回日期: 2022-06-21

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(J2021152)

通信作者: 杨世海(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事需求侧资源优化、电测量与系统分析技术研究; E-mail: ysh.young@163.com

随着风力、光伏等新能源的不断接入,电网的新能源占比不断增加,电网正在逐步转变成新能源电力系统^[1]。新能源的大规模接入使得电力系统的惯量不足,电网的频率问题日益突出。传统的发电侧资源占比不断下降,已经难以应对新能源发电的波动性和间歇性。为维持供需平衡,迫切需要挖掘需求侧的灵活资源,参与新能源电力系统的调频服务^[2-3]。

空调负荷是典型的需求侧可调节资源之一,在夏季负荷的高峰期占尖峰负荷比例可达 30%~50%,具有数量大、成本低、响应快的特点^[4]。研究人员对空调负荷参与电网调频展开了研究。文献[5]采用热力学模型建立了单台空调模型以及空调负荷聚合模型,引入了集中控制和分散控制两种模式,但缺少针对调频服务的建模。文献[6-7]建立了面向频率响应的空调负荷聚合模型,基于下垂控制提出了频率响应的空调负荷控制策略。文献[8]进一步考虑电气特性建立了空调负荷集群模型,根据频率偏差设计控制器调控空调负荷参与调频。

然而,文献[5-8]中的空调频率控制器都采用传统的比例-积分(proportional integral, PI)控制,控制器的设计依赖于系统模型,而电力系统和空调负荷的真实模型参数难以获取,且控制方法对模型的抗干扰能力不足。无模型自适应控制(model-free adaptive control, MFAC)^[9-10]是一种完全数据驱动方法,算法可以处理非线性时变系统,无需系统的模型参数,且具有较强的抗干扰能力。

针对目前研究存在的不足,提出一种基于无模型自适应控制 MFAC 的频率控制方法,应用于大规模空调负荷参与下的新能源电力系统调频。通过仿真测试与比较,验证频率控制方法的有效性和优越性。

1 新能源电力系统频率控制

1.1 电力系统调频模型

所研究的多区域电力系统由 m 个区域组成,第 $i(i=1, 2, \dots, m)$ 个控制区域模型如图 1 所示。频率是电力系统的一个重要稳定参数,电力系统的频率主要由一次调频(primary frequency regulation,

PFR)和二次调频(secondary frequency regulation, SFR)。从图 1 可以看出,PFR 由调速器实现,使电力系统频率保持在允许的范围内。然而,在负载扰动下,PFR 会产生稳态控制误差。因此,使用 SFR 消除稳态控制误差,调节系统频率到额定值。SFR 通过自动发电控制(automatic generation control, AGC)实现,控制发电机的功率输出,以维持负载扰动下的频率稳定性,此功能一般也被称为负荷频率控制。

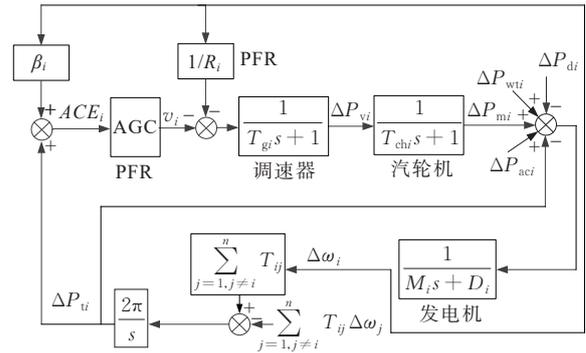


图 1 多区域互联电网模型

Figure 1 Model of multi-area interconnected power grids

考虑风电和空调负荷参与调频,由图 1 可得多区域互联电网^[11-12]的动态方程

$$M_i \frac{d\Delta\omega_i}{dt} = \Delta P_{mi} + \Delta P_{wti} + \Delta P_{aci} - \Delta P_{di} - \Delta P_{ti} - D_i \Delta\omega_i \quad (1)$$

$$T_{chi} \frac{d\Delta P_{mi}}{dt} = -\Delta P_{mi} + \Delta P_{vi} \quad (2)$$

$$T_{gi} \frac{d\Delta P_{vi}}{dt} = -\Delta P_{vi} - \frac{1}{R_i} \Delta\omega_i - v_i \quad (3)$$

式中, $\Delta\omega_i$ 、 ΔP_{di} 、 M_i 、 D_i 分别为频率偏差、负荷偏差、等效惯量常数、等效阻尼系数, $i=1, 2, \dots, m$; ΔP_{mi} 、 T_{chi} 、 ΔP_{vi} 、 T_{gi} 、 R_i 分别为机械功率偏差、汽轮时间常数、阀门位置偏差、调速器时间常数、速度下垂系数; ΔP_{ti} 为联络线功率偏差, 动态方程为

$$\frac{d\Delta P_{ti}}{dt} = 2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^m T_{ij} \Delta\omega_i - 2\pi \sum_{j=1, j \neq i}^m T_{ij} \Delta\omega_j \quad (4)$$

式中, 变量 T_{ij} 为控制区域 i 和区域 j 之间的同步因子; ΔP_{wti} 和 ΔP_{aci} 分别为风电机组和空调负荷产生的功率偏差, 将在后续章节进行详细介绍。

区域控制偏差 A_i 为

$$A_i = \beta_i \Delta\omega_i + \Delta P_{ti} \quad (5)$$

其中, β_i 为频率偏差因子。对于常规的比例-积分

控制方案, AGC输出的控制量为

$$v_i = K_{P_i} A_i + K_{I_i} \int A_i dt \quad (6)$$

式中, K_{P_i} 、 K_{I_i} 分别为比例与积分系数。

1.2 风力发电系统调频模型

风电场采用单个风机模型进行聚合等效^[13-14], 风机将风能转换为机械能量 P_m , 可表达为

$$P_m = 0.5 \rho_t \pi R_t^2 C_p (\lambda_t, \beta_t) v_w^3 \quad (7)$$

式中, ρ_t 、 R_t 、 $C_p(\cdot)$ 、 λ_t 、 β_t 、 v_w 分别为空气密度、风机叶片长度、风能转换系数、叶尖速比、桨距角、风速。

风机的叶尖速比定义为

$$\lambda_t = \frac{\omega_t R_t}{v_w} \quad (8)$$

式中, ω_t 为风机叶片转速。

风能转换系数 $C_p(\cdot)$ 描述风机空气动力学特征, 表达式为

$$C_p(\lambda_t, \beta_t) = \varphi_1 \left(\frac{\varphi_2}{\lambda_{ti}} - \varphi_3 \beta_t - \varphi_4 \right) e^{-\frac{\varphi_5}{\lambda_{ti}}} + \varphi_6 \lambda_t \quad (9)$$

$$\frac{1}{\lambda_{ti}} = \frac{1}{\lambda_t + \varphi_7 \beta_t} - \frac{\varphi_8}{\beta_t^3 + 1} \quad (10)$$

式(9)、(10)中, $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_8$ 为给定常数。

风机的机械传动系统采用单质量块模型

$$2H_{wt} \dot{\omega}_r = T_m - T_e - D_{wt} \omega_r \quad (11)$$

式中, ω_r 为风机转速并有 $\omega_r = \omega_t$; H_{wt} 为风机惯性时间常数; D_{wt} 为风机阻尼系数; T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩。

当电网频率受到扰动时, 基于电力电子控制的风电机组本身不能够提供惯性支撑, 但是可以通过快速调节风电机组有功功率, 控制机组释放或者存储旋转动能, 从而虚拟出比自身惯量更大的虚拟惯量, 提供对电网的惯量支撑, 这种控制策略称为虚拟惯量控制(virtual inertia control, VIC)。

采用VIC时, 通过在风电机组的有功功率控制环节附加与频率偏差 $\Delta\omega$ 相关的功率指令为

$$\Delta P_e = -k_{vic} \Delta\omega - H_{vic} \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (12)$$

式中, k_{vic} 、 H_{vic} 、 ΔP_e 分别为虚拟惯量控制的比例系数、微分系数、功率偏移量。

将附加功率 ΔP_e 增加在式(1)的右侧, 可得

$$(M + H_{vic}) \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P - (D_i + k_{vic}) \Delta\omega \quad (13)$$

其中, ΔP 为有功功率差, 则系统的等效惯量由 M 变为 $M + H_{vic}$, 系统的惯量值增加, 提升了电网的调频能力。基于式(7)~(13), 风机参与电网调频的小信号模型如图2所示, 其中, k_{max} 为最大功率跟踪系数。

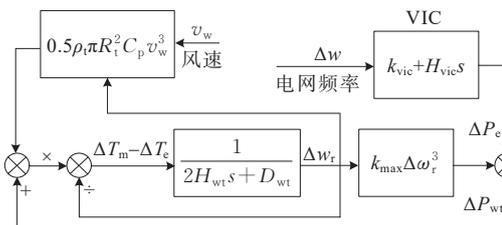


图2 风电机组参与电网调频模型

Figure 2 Frequency control model with participation of wind turbine

2 大规模空调负荷调频模型

2.1 空调物理模型

单台空调可采用二阶等效热力学参数(equivalent thermal parameter, ETP)模型^[5]进行建模, 其等效模型如图3所示, 其中, T_{in} 为室内气体温度, T_m 为室内固体温度, T_{out} 为室外温度, Q 为空调的制冷/制热量, C_a 为气体比热容, C_m 为固体比热容, R_a 为气体能量传递热阻, R_m 为固体能量传递热阻。

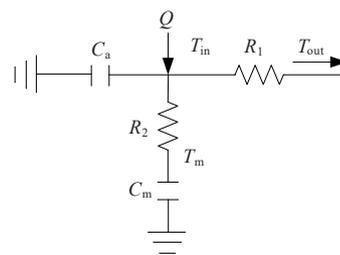


图3 空调等效热力学参数模型

Figure 3 ETP model of air conditioner

根据图3, 单台空调的二阶ETP模型可表达为如下状态空间形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{ac} = \mathbf{A}_{ac} \mathbf{x}_{ac} + \mathbf{B}_{ac} u_{ac} \\ \mathbf{y}_{ac} = \mathbf{C}_{ac} \mathbf{x}_{ac} + \mathbf{D}_{ac} u_{ac} \end{cases} \quad (14)$$

其中,

$$\dot{\mathbf{x}}_{ac} = \begin{bmatrix} \dot{T}_{in} \\ \dot{T}_m \end{bmatrix}, \mathbf{x}_{ac} = \begin{bmatrix} T_{in} \\ T_m \end{bmatrix}, u_{ac} = 1, \mathbf{y}_{ac} = \mathbf{x}_{ac} \quad (15)$$

$$\mathbf{A}_{ac} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{R_2 C_a} + \frac{1}{R_1 C_a}\right) & \frac{1}{R_2 C_a} \\ \frac{1}{R_2 C_m} & -\frac{1}{R_2 C_m} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$B_{ac} = \begin{bmatrix} \frac{T_{out}}{R_1 C_a} \pm \frac{Q}{C_a} \\ 0 \end{bmatrix}, C_{ac} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, D_{ac} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

二阶模型公式复杂、计算量大,在实际应用中难以进行大规模空调负荷的聚合计算。考虑空调制冷模型,假设房间内的气体温度和固定温度相等,将以上二阶模型简化为一阶实用模型^[15]

$$RC \frac{dT_{in}}{dt} = T_{out} - T_{in} - RQ \quad (18)$$

式中, R 为等效热阻; C 为等效热容。

空调有定频和变频 2 种类型,对于定频空调,其制冷/制热量可表达为 $Q = \eta Ps$,其中 η 为能效系数; P 为空调运行功率; s 为空调开关, $s = 1$ 表示空调启动制冷, $s = 0$ 表示空调关闭。定义 T_{ref} 为空调设定的参考值,考虑空调温度控制的死区 ϵ ,室内温度的上限 T_{max} 和下限 T_{min} 可表示为

$$T_{max} = T_{ref} + 0.5\epsilon \quad (19)$$

$$T_{min} = T_{ref} - 0.5\epsilon \quad (20)$$

则空调开关状态为

$$s_k = \begin{cases} 0, & (s_{k-1} = 1) \text{ and } (T_{in} \leq T_{max}) \\ 1, & (s_{k-1} = 0) \text{ and } (T_{in} \geq T_{min}) \\ s_{k-1}, & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

其中, k 为采样周期数。根据上述分析,单台空调制冷的运行特性如图 4 所示。

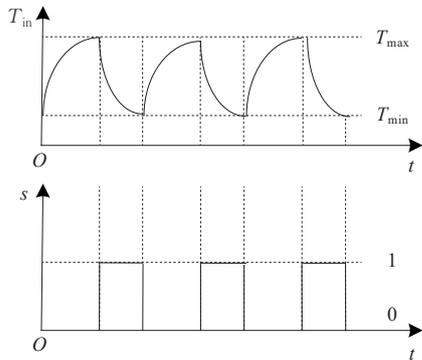


图 4 单台定频空调运行特性

Figure 4 Operation characteristics of one fixed-frequency air conditioner

对于变频空调^[16],其制冷/制热量与压缩机的频率 f_A 有关,可表达为

$$Q = h_Q(f_A) \quad (22)$$

变频空调的功率也可表示为压缩机频率 f_A 的函数,则有

$$P = h_P(f_A) \quad (23)$$

本文采用线性的变频空调模型,即

$$P = a_1 f_A + b_1 \quad (24)$$

$$Q = a_2 f_A + b_2 \quad (25)$$

其中, a_1, b_1, a_2, b_2 均为常数。基于上述关系,可以得到变频空调 Q 与功率 P 的关系式:

$$Q = (a_2 P - a_2 b_1) / a_1 + b_2 \quad (26)$$

2.2 空调聚合调频模型

假设有 N 台空调参与调频,则 N 台空调聚合成空调集群的基线负荷 P_{base} 为

$$P_{base} = \sum_{i=1}^N P_{Ai} \quad (27)$$

其中, P_A 为每台空调的实际功率,对于定频功率有 $P_A = Ps$,对于变频空调有 $P_A = P$ 。则空调集群参与电网调频的上调容量 P_{up} 和下调容量 P_{down} 分别为

$$P_{up} = P_{base} \quad (28)$$

$$P_{down} = P_{total} - P_{base} \quad (29)$$

其中, P_{total} 为参与调频的空调总的额定功率。空调负荷集群参与电网调频模型如图 5 所示,其中, T_{ac} 为空调负荷集群的调频时间常数, ΔP_{ac} 为空调负荷集群参与调频的功率偏差,使用空调控制器 (air conditioner controller, ACC) 控制空调集群参与电网调频,传统采用比例积分调节器。

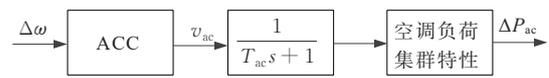


图 5 空调负荷参与电网调频模型

Figure 5 Frequency control model with participation of air conditioner loads

3 无模型自适应频率控制

针对一般的离散时间非线性系统,无模型自适应控制 (model-free adaptive control, MFAC) 算法^[9-10]的设计思路如图 6(a) 所示。MFAC 算法将被控系统在工作点进行线性化,通过等价的动态线性化模型来描述被控系统特性,进一步采用被控系统的输入数据和输出数据在线估计线性化模型中的伪偏导数,利用估计值实现自适应控制,该方法无需系统的模型参数。

考虑一般的单输入单输出离散的非线性系统如下:

$$y(k+1) = f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_y), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_u)] \quad (30)$$

式中, $y(k)$ 为第 k 个周期的输出; $u(k)$ 为第 k 个周期的输入; $f(\cdot)$ 为未知的非线性函数; n_y 、 n_u 分别为系统的输出、输入的未知阶次。

对于上述非线性系统, 当满足广义 Lipschitz 条件或 $|\Delta y(k+1)| \leq b |\Delta u(k)|$ ($b > 0$), 采用紧格式动态线性化方法转换为线性时变系统, 有

$$\Delta y(k+1) = \varphi(k) \Delta u(k) \quad (31)$$

式中, $\varphi(k)$ 是系统的伪偏导数。

基于紧格式动态线性化模型, 采用输入准则函数:

$$J[u(k)] = [y_{\text{ref}}(k+1) - y(k+1)]^2 + \lambda [u(k) - u(k-1)]^2 \quad (32)$$

式中, y_{ref} 为参考值; λ 为权重参数。

同时, 采用伪偏导数的估计准则函数:

$$J[\varphi(k)] = \{y^0(k) - \varphi(k) [\Delta u(k-1)]^2 - y(k-1)\} + \mu [\varphi(k) - \hat{\varphi}(k-1)]^2 \quad (33)$$

式中, y^0 为系统真实输出; $\hat{\varphi}$ 为估计值; μ 为权重参数。则无模型自适应控制 MFAC 算法为

$$\hat{\varphi}(k) = \hat{\varphi}(k-1) + \frac{\eta_{1k} \Delta u(k-1)}{\mu + [\Delta u(k-1)]^2} \cdot [\Delta y(k) - \hat{\varphi}(k-1) \Delta u(k-1)] \quad (34)$$

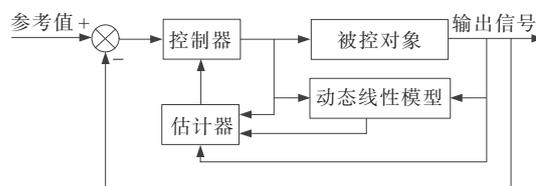
其中, 参数 $\eta_{1k} \in (0, 2)$ 为步长序列, $\hat{\varphi}(k) = \hat{\varphi}(1)$, 权重参数 μ 限制了 $\varphi(k)$ 的变化。

若 $|\hat{\varphi}(k)| \leq \delta$ 或 $|\Delta u(k-1)| \leq \delta$, 参数 δ 为一个很小的正数, 则有

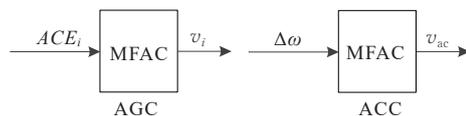
$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho_{1k} \hat{\varphi}(k)}{\lambda + \hat{\varphi}^2(k)} [y_{\text{ref}}(k+1) - y(k)] \quad (35)$$

式中, 参数 $\rho_{1k} \in (0, 2)$ 为步长序列。

基于图 6(a) 所示的无模型自适应控制器, 设计图 1 所示区域互联电网的 AGC, 以及图 5 所示的空调负荷集群参与电网调频的 ACC, 设计的结构如图 6(b) 所示。



(a) 算法框图



(b) 频率控制器

图 6 无模型自适应频率控制

Figure 6 Block diagram of MFAC-based frequency control

4 算例仿真

4.1 仿真设置

在 Matlab/Simulink 中搭建图 7 所示的三区域互联电网模型, 电网额定频率 $f_{\text{nom}} = 50$ Hz, 每个区域的额定容量 $P_{\text{nom}} = 300$ MW。额定容量为 45 MW 的风电场接入区域 1 电网, 风电场采用 30 个 1.5 MW 风机进行等效。同时, 将 $N = 10\,000$ 台的空调负荷集群接入区域 1 电网, 其中包括 5 000 台定频空调和 5 000 台变频空调。区域互联电网、风机、空调的模型参数如表 1 所示。为体现空调负荷参数的多样性, 设置空调参数 R 、 C 、 P 满足方差为 0.2 的正态分布。区域 1 电网的 AGC 和 ACC 都采用设计的 MFAC。作为对比, 传统的 AGC 和 ACC 都采用比例积分 PI 控制, MFAC 与比例积分 PI 控制器的参数如表 2 所示。

表 1 仿真模型参数

Table 1 Parameters of simulation model

M_1/s	D_2	T_{ch3}/s	T_{g1}/s	T_{13}	$R/(^\circ\text{C}/\text{kW}\cdot\text{h})$	T_{ref}	a_1
10	1.5	0.35	0.1	0.2148	2	22 $^\circ\text{C}$	0.1
M_2/s	D_3	R_1	T_{g2}/s	T_{23}	$C/(\text{kW}\cdot\text{h}/^\circ\text{C})$	$\epsilon/^\circ\text{C}$	b_1
12	1.8	0.05	0.17	0.1830	1.8	2.4	0.6
M_3/s	T_{ch1}/s	R_2	T_{g3}/s	H_{wt}/s	$P/(\text{kW}\cdot\text{h})$	K_{ac}	a_2
12	0.3	0.05	0.2	4.23	5.6	1	0.3
D_1	T_{ch2}/s	R_3	T_{12}	D_{wt}	η	T_{ac}/s	b_2
1	0.4	0.05	0.1986	1.5	2.5	0.2	1.8

表 2 控制器参数

Table 2 Control parameters

模式	ρ	λ	η	K_p	K_i
AGC	0.12	3.24	0.56	1.12	0.28
ACC	0.09	2.68	0.66	0.24	0.57

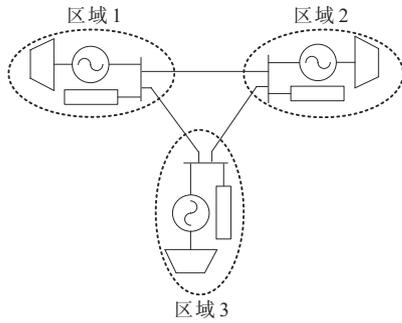


图 7 仿真模型

Figure 7 Simulation model

4.2 算例 1: 负荷扰动

在 $t=2\text{ s}$ 设置区域 1 电网发生 $\Delta P_d = 0.1\text{ p.u.}$ 的阶跃负荷扰动, 在 $t=40\text{ s}$ 风电场接入区域 1 电网, 风电场的风速维持在额定风速不变, 三区域电网频率偏差 $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \Delta\omega_3$ 的仿真结果如图 8 所示。由图 8 可见, 在负荷发生阶跃扰动后电网频率 $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \Delta\omega_3$ 均发生暂降后恢复到稳态值, 在风电场接入电网后频率 $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \Delta\omega_3$ 均发生暂升后逐渐恢复到稳定值, 外部扰动使得电网频率发生较大波动。使用传统的比例积分 PI 控制和本文提出的 MFAC, 通过调节同步发电机出力都能够减少负荷扰动和风电场接入下的三区域电网的频率偏差, 改善电网的频率动态响应特性。

PI 和 MFAC 这 2 种方法控制三区域电网频率 $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \Delta\omega_3$ 的性能指标如表 3 所示, 包括负荷扰动下频率暂降的峰谷值、风电场接入下频率暂升的尖峰值以及频率恢复到稳定值的调节时间。对比

可见, MFAC 方法和 PI 相比, 具有更小的频率控制偏差以及更快的调节速度。这是由于 PI 基于线性化模型进行参数设计, 控制性能依赖于精确模型, 导致对外部扰动的鲁棒性不足。而 MFAC 仅利用输入输出数据对系统进行估计与自适应控制, 无需系统的模型参数, 且通过参数在线调整使得控制器具有较快的跟踪速度以及较好的抗干扰能力。

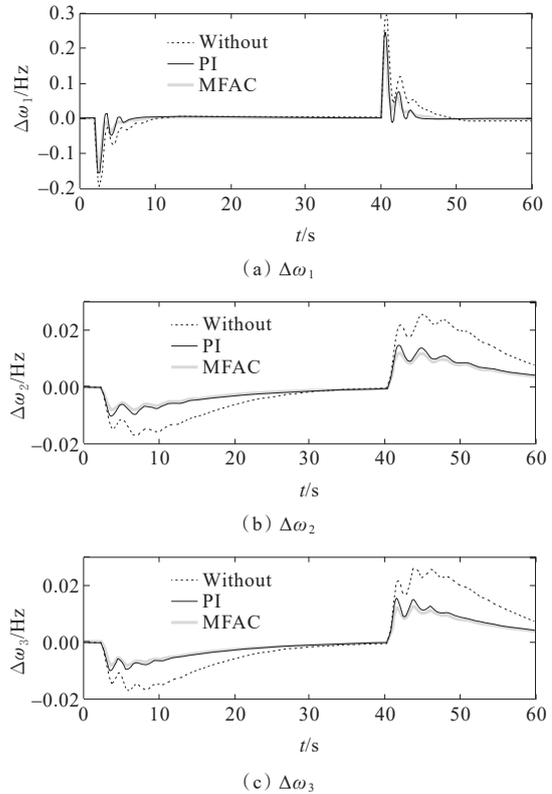


图 8 负荷扰动下仿真结果

Figure 8 Simulation results under load variations

表 3 控制性能对比

Table 3 Comparison results of controllers

方法	区域 1			区域 2			区域 3		
	峰谷值/p.u.	尖峰值/p.u.	调节时间/s	峰谷值/p.u.	尖峰值/p.u.	调节时间/s	峰谷值/p.u.	尖峰值/p.u.	调节时间/s
PI	-0.15	0.24	6.9	-0.011	0.014	23.3	-0.010	0.015	22.8
MFAC	-0.13	0.21	6.2	-0.008	0.011	23.1	-0.008	0.010	22.5

4.3 算例 2: 风电波动与环境温度变化

设置 24 h 的风速变化和室外环境温度变化, 仿真结果如图 9 所示。风电场的风速 v_w 采用某风电场一天的真实数据, 风速在 $4\sim 19\text{ m/s}$ 之间随机波动。室外环境温度 T_{out} 设定为夏天某日的温度数据, 温度在 $23\sim 35\text{ }^\circ\text{C}$ 变化, 0 时到 14 时温度呈上升趋势, 14 时开始温度逐渐下降。风电场在 $t=0\text{ h}$ 接入区域 1 电网, 5 000 台定频空调和 5 000 台变频空调组

成的空调负荷集群在 $t=4\text{ h}$ 开始参与电网调频。从图 9 中区域 1 电网的频率偏差 $\Delta\omega_1$ 可以看出, 随机波动的风电接入电网后, 导致电网频率产生了较大的偏差, 并在 $-0.05\sim 0.05\text{ Hz}$ 波动。当使用空调负荷参与调频后, 电网频率偏差快速下降到了 $-0.02\sim 0.02\text{ Hz}$ 的范围。同时, 从图 9(c) 中可对比传统比例积分 PI 控制和提出的 MFAC 方法的性能, 从 6.6 h 左右的放大图可以明显看出, MFAC 方法控制下的

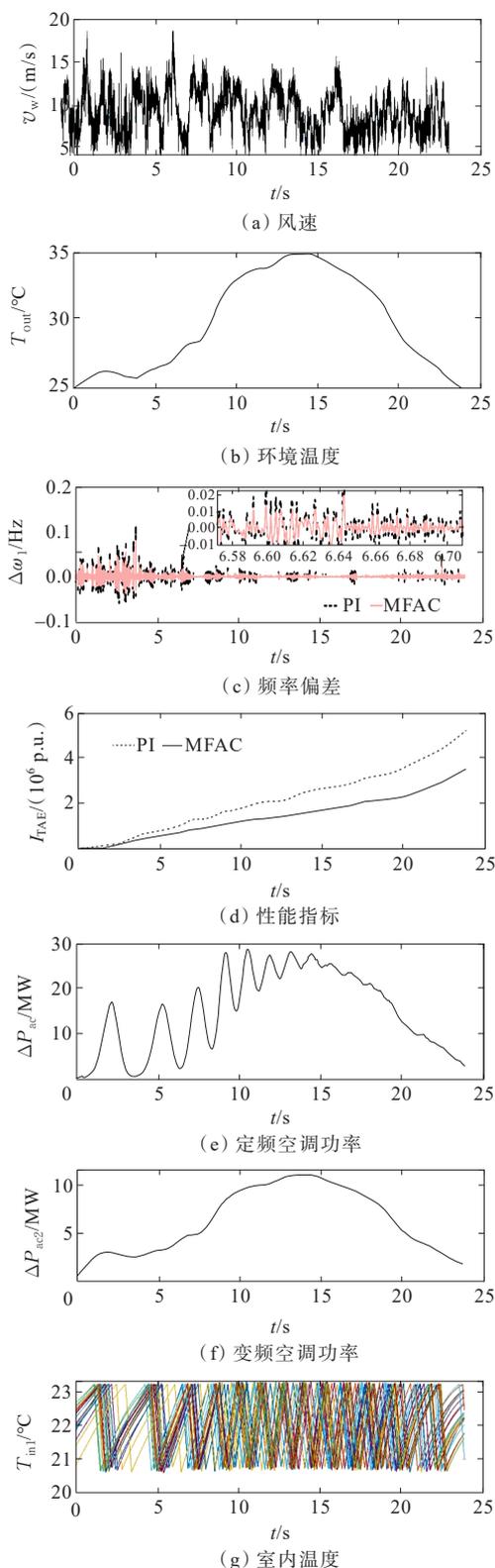


图9 风速和室内温度变化下仿真结果

Figure 9 Simulation results obtained under variations of wind speed and inlet temperatures

电网频率偏差 $\Delta\omega_1$ 比PI控制的频率偏差小。

进一步,引入时间误差绝对值积分指标(integral of time and absolute error, ITAE)定量分析,指标计

算公式为 $I_{TAE} = \int t |\Delta\omega_1| dt$ 。由图9可见,MFAC算法的ITAE值始终小于PI,表明风电波动和环境温度变化下MFAC算法具有更好的频率控制性能,这也归功于MFAC算法不依赖于模型参数、通过自适应参数调节提升对外部扰动的鲁棒性。此外,5 000台定频空调的聚合功率 ΔP_{ac1} 和5 000台变频空调的聚合功率 ΔP_{ac2} 随着环境温度变化和频率控制指令的变化进行调节,对电网频率调节提供支撑。定频空调设定的温度为 22°C ,空调控制的死区为 $\pm 1.2^\circ\text{C}$,故从5 000台定频空调中随机选取20台定频空调,通过不断启停,其室内温度 T_{in1} 随着频率控制指令相应地在 $20.8\sim 23.2^\circ\text{C}$ 变化,以抑制风电接入带来的频率波动。

5 结语

本文建立了风电和空调负荷接入下的多区域互联电力系统调频模型,基于MFAC提出了一种大规模空调负荷参与电力系统调频服务的频率控制方法,通过仿真研究可以得出以下结论:①负荷扰动和风电接入下电网频率产生较大偏差,控制空调负荷快速参与调频能够使得电网频率快速恢复;②风速的随机变化导致电网频率呈现较大波动,在室外环境不断变化条件下,控制空调负荷参与调频能够有效抑制频率波动;③文中所提出的MFAC频率控制方法与传统的比例积分频率控制方法相比,具有更强的抗干扰能力和更好的频率控制性能。

本文提出的MFAC频率控制方法性能较好,但在实际电网应用中,还存在着电力系统强非线性、强耦合特性以及空调控制权限受限、调控指令通信延时等问题。在未来的研究中,需要采用更多先进的采集、通信与控制装置,加强对空调负荷的调控能力、提升通信的可靠性、减少通信延时。此外,需要研究能够处理非线性、耦合、通信延时的MFAC控制方法,应用于含大规模空调负荷和风电的实际电网频率控制。

参考文献:

- [1] 温佳鑫,卜思齐,陈麒宇,等.基于数据学习的新能源高渗透电网频率风险评估[J].发电技术,2021,42(1):40-47.

- WEN Jiaxin, BU Siqi, CHEN Qiyu, et al. Data learning-based frequency risk assessment in a high-penetrated renewable power system[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1):40-47.
- [2] 徐贤,陆晓,周挺,等.华东电网一次调频能力量化评估及运行控制策略[J].电力工程技术,2021,40(2):205-211+219.
XU Xian, LU Xiao, ZHOU Ting, et al. Evaluation method and operation control strategy of primary frequency response for East China Grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2):205-211+219.
- [3] 周霞,刘懿诗,戴剑丰,等.考虑风一储一直参与调频的电力系统频率特征定量分析[J].电力系统保护与控制, 2023, 51(6):30-44.
ZHOU Xia, LIU Yishi, DAI Jianfeng, et al. Quantitative analysis of power system frequency characteristics considering wind power-energystorage-flexible HVDC transmission participation in frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6):30-44.
- [4] 谭鸣骢,王玲玲,蒋传文,等.考虑负荷聚合商调节潜力的需求响应双层优化模型[J].中国电力,2022,55(10):32-44.
TAN Mingcong, WANG Lingling, JIANG Chuanwen, et al. Bi-level optimization model of demand response considering regulation potential of load aggregator[J]. Electric Power, 2022, 55(10):32-44.
- [5] 宋梦,高赐威,苏卫华.面向需求响应应用的空调负荷建模及控制[J].电力系统自动化,2016,40(14):158-167.
SONG Meng, GAO Ciwei, SU Weihua. Modeling and controlling of air-conditioning load for demand response applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14):158-167.
- [6] 白东壮,田世明,邹毅豪,等.基于FDA的居民用户空调用电行为分类分析方法[J].智慧电力,2022,50(3):44-49.
BAI Dongzhuang, TIAN Shiming, ZOU Yihao, et al. Classification analysis method of residential air conditioning electricity consumption behavior based on functional data analysis model[J]. Smart Power, 2022, 50(3): 44-49+71.
- [7] 刘萌,张岩,王大鹏,等.电力系统大功率缺额下空调负荷群集的分散自律控制策略[J].电网技术,2017,41(9):3050-3057.
LIU Meng, ZHANG Yan, WANG Dapeng, et al. Decentralized self-discipline control strategy of air-conditioning load group after power system suffering from large power shortage[J]. Power System Technology, 2017, 41(9):3050-3057.
- [8] 刘志伟,苗世洪,杨炜晨,等.计及电气特性的空调负荷建模及集群控制策略[J].电力自动化设备,2022,42(1): 178-184+192.
LIU Zhiwei, MIAO Shihong, YANG Weichen, et al. Air conditioning load modeling and cluster control strategy considering electrical characteristic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1):178-184+192.
- [9] 曹荣敏,郑鑫鑫,侯忠生.基于改进多人多出无模型自适应控制的二维直线电机迭代学习控制[J].电工技术学报,2021,36(19):4025-4034.
CAO Rongmin, ZHENG Xinxin, HOU Zhongsheng. An iterative learning control based on improved multiple input and multiple output model free adaptive control for two-dimensional linear motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19):4025-4034.
- [10] 刘北阳,李志兵,赵子瑞,等.高压断路器电磁类型操动机构的位移跟踪技术研究[J].高压电器,2021,57(9):9-18.
LIU Beiyang, LI Zhibing, ZHAO Zirui, et al. Research on displacement tracking technology of electromagnetic type operating mechanism for high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9):9-18.
- [11] XIAHOU K S, LIU Y, WU Q H. Decentralized detection and mitigation of multiple false data injection attacks in multiarea power systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2022, 3(1): 101-112.
- [12] XIAHOU K S, LIU Y, WU Q H. Robust load frequency control of power systems against random time-delay attacks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 909-911.
- [13] 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.
FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27):4706-4716.
- [14] 张旭,查效兵,岳帅.基于转子动能控制的DFIG调频能力分析 & 调频方案[J].电力科学与技术学报,2020,35(3):141-147.
ZHANG Xu, ZHA Xiaobing, YUE Shuai. Frequency regulation capability analysis and regulation plan of doubly-fed induction generator based on the rotor kinetic energy control[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3):141-147.
- [15] 沈运帷.动态可控负荷参与电力系统调频辅助服务理论与市场化应用研究[D].南京:东南大学,2020.
SHEN Yunwei. Research on theory and market application of power system frequency regulation service considering dynamic controllable load[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [16] 姚姝,张沛超.大规模变频空调参与电力系统辅助服务的协调控制方法[J].电力系统自动化,2018,42(22):127-134.
YAO Yao, ZHANG Peichao. Coordinated control method for ancillary services of power system with participation of large-scale inverter air-conditioner[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22):127-134.