

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220460

考虑需求侧快速响应资源的数据驱动频率约束经济调度

姚宇¹, 叶承晋¹, 朱超², 丁一¹, 徐奕乐³, 王蕾²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310008;
3. 浙江大学能源工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 随着可再生能源渗透率的逐步提高, 电力系统惯性水平下降, 系统频率安全稳定面临挑战, 迫切需要配置需求侧快速响应资源参与系统频率调节服务。针对此问题, 分析了变频空调、储能和电动汽车提供电力系统调频备用的可行性, 建立考虑上述需求侧快速响应资源的频率安全约束联合经济调度模型, 以进行源荷双侧调频备用的统一优化。然后, 引入基于高维模型表达的数据驱动方法将调频备用与最大频率偏移量之间的高阶非线性、隐式关系转换为低阶、显式表达式, 从而实现频率安全约束经济调度模型的简化和求解。最后, 结合 IEEE 30 节点系统验证了所提调度模型和方法的有效性, 以及所提的数据驱动频率安全约束可确保系统在不平衡功率下的异常频率在约束范围内, 且需求侧快速响应资源对于提升系统频率韧性具有重要正向作用。

关键词: 需求侧快速响应资源; 频率动态模型; 频率安全约束联合经济调度; 调频备用; 高维模型表达

Data-driven frequency constrained economic dispatch considering fast demand resources

YAO Yu¹, YE Chengjin¹, ZHU Chao², DING Yi¹, XU Yile³, WANG Lei²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Economic Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310008, China;
3. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The frequency of the power system faces challenges with the growing share of renewable energy and the decreasing inertia. It's urgent to allocate fast demand response resources for frequency regulation. In this paper, the feasibility that inverter air conditions, energy storage and electric vehicles provide frequency regulation reserve is analyzed. A frequency constrained combined economic dispatching model (FCCED) considering the above fast demand response resources is established to uniformly allocate the frequency regulation reserve between generators and loads. Then, a data-driven method based on the high dimensional model representation (HDMR) is proposed to convert the above high-order, nonlinear and implicit frequency security constraint to a low-order and explicit constraint. As a result, the proposed FCCED model can be solved easily. Finally, the modified IEEE 30-bus system validates the effectiveness of the proposed method. It is explained that the proposed frequency security constraint ensures that the abnormal frequency of the system under unbalanced power is within the constraint. And fast demand response resources have an important positive effect on improving the frequency toughness of the system.

This work is supported by the National Science and Technology Innovation 2030 Project (No. 2021ZD0112700).

Key words: fast demand response resources; frequency dynamic model; frequency constrained combined economic dispatching model (FCCED); frequency regulation reserve; high dimensional model representation (HDMR)

0 引言

随着以新能源为主体的新型电力系统建设推进,

基金项目: 国家科技创新 2030 项目资助 (2021ZD0112700);
国网浙江省电力有限公司科技项目资助 (5211JY220001)

电力系统新能源渗透率逐步提高, 系统转动惯量出现明显下降^[1-2], 系统频率安全稳定面临风险。2021 年 2 月, 美国德克萨斯州遭遇暴风雪的袭击发生大停电事故, 事故发生前光伏和风电发电的比例约为 34.5%^[3], 系统频率备用严重不足, 频率最低下降到 59.3 Hz, 累计切除负荷约 20 000 MW, 400 多万人

口受到影响^[4]。2019年8月,英国发生大停电事故,事故发生前英国新能源出力占比约30%,事故发生过程中风电系统耐受异常频率的能力不足,脱网严重,频率最低下降到48.8 Hz^[5],导致系统低频减载而停电^[6]。

长久以来,电力系统依靠调频备用来保障系统功率失衡时的频率安全稳定。因此,为保证充足的调频备用,制定电力系统机组组合和经济调度方案时应考虑频率安全约束^[7-10]。然而,频率安全约束高度非线性化,含该约束的优化问题直接求解难度大。目前已有较多研究关注频率安全约束的转化方法:文献[7]将频率安全约束加入机组组合问题中,通过分段线性化的方法,将系统频率最低点的非线性化约束转化为线性化约束;文献[8]构建了包含多种可再生能源的频率最低点指标,将其加入机组组合模型中,使用分段线性化方法使该问题可解。分段线性化是一种简单直观的方法,但它在精度方面存在缺陷,导致经济调度方案在一定的系统功率波动时,可能会出现频率越限的情况。一些学者提出解析法,即通过数学推导将频率安全约束重新表达。文献[9]从频率动态模型中推导出频率最低点解析式,将频率最低点约束引入到考虑风电不确定性的随机机组组合模型中,分别提取决策变量的边界,使得频率最低点约束线性化。文献[10]将频率动态模型用解析方式表达,然而在解析式中引入了指数项、0-1变量相乘、min函数和max函数,过程较为繁琐。以上文献均将频率安全约束用解析的方法写成线性化的表达式,数学推导过程复杂,且会随机组数量的增加而愈发复杂。

随着新能源渗透率的逐步提高,发电侧调频资源稀缺问题进一步凸显,通过需求响应技术发掘负荷侧灵活资源的调频潜力成为研究热点^[11-12]。一些快速需求响应资源爬坡速度快于火电机组,可为电力系统提供快速调频备用。文献[13]提出了变频空调参与调频的电热模型,文献[14]分析了聚合空调的调频备用潜力,文献[15]分析了电池储能调频方面的优势,文献[16]分析了电动汽车参与调频的优势,并提出了考虑用户需求 and 车辆限制的电动汽车参与调频控制策略。考虑负荷侧资源后,有必要拓展电力系统机组组合和经济调度的建模框架,以实现源荷双侧调频备用的统筹优化配置。但由于负荷的频率动态特性与传统火电机组不同,导致系统频率响应特性发生改变,使得高阶非线性的频率安全约束变得更为复杂。另一方面,随着电力系统不确定性的增强,要求频率约束优化模型的刷新和求解速度进一步提高,因此本文考虑使用数据驱动方

法,对考虑需求侧资源的频率安全约束进行低阶转化,以实现经济调度问题的快速解算。

数据驱动方法作为一种黑箱算法,能够直接对模型的输入输出接口建模^[17],在复杂物理模型的转换方面具有优势,在频率安全约束的转换中已有一些基础应用。文献[18]从数据驱动视角,线性化频率安全约束,将频率安全转化为一个基于支持向量机的二分类问题,然而该模型只能判断频率是否越限,无法衡量越限的程度。此外,经济调度是一个实时滚动优化的过程,频率安全约束的强度随系统运行状态发生变化,甚至会随着调度员的风险偏好而改变,数据驱动的频率安全约束需要具备应对该种变化的能力。

针对以上问题,本文提出了考虑需求侧快速响应资源的数据驱动频率安全约束经济调度方法。首先,将变频空调、储能电池和电动汽车纳入系统调频框架。然后,构建考虑频率安全约束的源荷双侧联合经济调度模型,以实现调频备用的优化配置。最后,将高阶、非线性的频率安全约束通过高维模型表达转化为低阶约束,实现模型在线求解。

1 考虑需求侧快速响应资源的系统频率调节过程

电力系统运行过程中,不可避免会发生功率扰动而导致系统频率下跌,主要功率扰动源包括负荷激增、发电出力骤降和通道故障。功率扰动量与频率偏移量之间的关系,一般通过电力系统频率动态模型来表达。系统频率下降后,调频资源投入而将异常频率逐渐抬升,直至恢复工频。本文将需求侧资源纳入电力系统调频框架,图1为考虑需求侧快速响应的频率动态模型。

如图1所示,支撑系统频率安全的调节功率由火电机组和需求侧资源共同提供,系统的频率动态模型可表示为

$$2Hs\Delta f(s) + D\Delta f(s) = \Delta P_G(s) + \Delta P_{DR}(s) - \Delta P_D(s) \quad (1)$$

式中: H 和 D 分别表示系统惯性和负载阻尼; $\Delta f(s)$ 、 $\Delta P_D(s)$ 、 $\Delta P_G(s)$ 和 $\Delta P_{DR}(s)$ 分别表示系统频率偏移量、系统功率扰动量、发电出力变化量和需求侧提供的功率支撑量。发电机的出力变化来源于调速器的控制。在调频过程中,发电机的调速器对系统频率变化进行响应,调节发电机的转速从而改变发电出力,以平衡系统功率扰动来调节系统频率。本文采用典型的再热式汽轮机模型^[19-20],发电机的出力变化量可表示为

$$\Delta P_G(s) = -\frac{(1/R)(F_{HP}T_{RH}s + 1)}{(T_Gs + 1)(T_{CH}s + 1)(T_{RH}s + 1)} \quad (2)$$

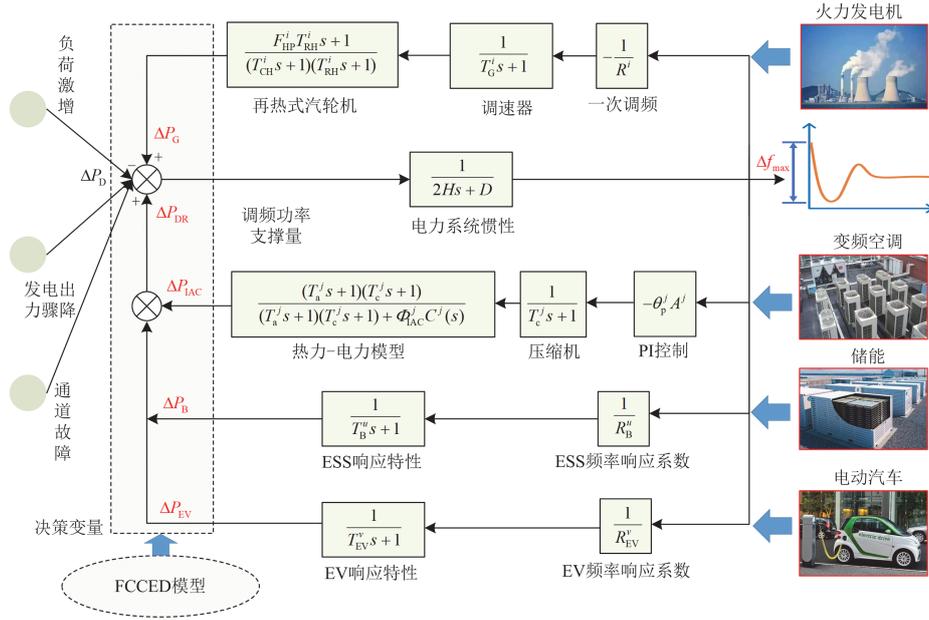


图 1 考虑需求侧快速响应资源的频率动态模型

Fig. 1 Frequency dynamic model considering fast demand response resources

式中： R 表示下垂控制系数； F_{HP} 表示高压涡轮段的功率比； T_G 、 T_{CH} 、 T_{RH} 分别表示调速器、涡轮和再热时间常数； $-1/R$ 表示一次调频环节； $1/(T_G s + 1)$ 表示调速器环节； $\frac{F_{HP} T_{RH} s + 1}{(T_{CH} s + 1)(T_{RH} s + 1)}$ 表示再热式汽轮机环节。

相比于定频空调，变频空调可以快速调节其用电功率从而参与系统频率调节，能在 10 s 内达到新稳态功率^[13]，且短时间内功率调节对用户的舒适度影响不大。本文采用空调的热力-动力模型^[14]，变频空调提供的功率变化量 $\Delta P_{LAC}(s)$ 可表示为

$$\Delta P_{LAC}(s) = -\frac{\theta_p A (T_a s + 1)}{(T_a s + 1)(T_c s + 1) + \Phi_{LAC} C(s)} \Delta f(s) \quad (3)$$

式中： θ_p 表示变频空调运行功率常系数； A 是等效调频控制参数； T_c 表示压缩机时间常数； $\Phi_{LAC} = \theta_Q / H_r$ ， θ_Q 、 H_r 分别表示变频空调制冷量常系数、房间和室外空气的等效热传递系数； $T_a = (C_{room} V_{room} \rho_A) / H_r$ ， C_{room} 、 V_{room} 和 ρ_A 分别表示房间比热容、房间体积和空气密度； $C(s)$ 表示变频空调的 PI 控制器， $C(s) = \alpha + \beta/s$ ， α 和 β 表示变频空调 PI 控制器的比例系数和积分系数。

电池储能也具备快速调节功率的能力，储能达到稳定出力的时间约 1 s^[15]，可参与电力系统调频。电池根据接收到的电力系统频率波动值，通过变流器控制，可实现模拟同步发电机的响应特性^[21-22]。

本文采用的储能频率动态模型含有并网变流器控制和运行状态两个环节，储能提供的功率变化量 $\Delta P_B(s)$ 可表示为

$$\Delta P_B(s) = \frac{1}{(1 + s T_B) R_B} \Delta f(s) \quad (4)$$

式中： T_B 表示储能的响应时间常数； R_B 表示储能调差系数。

电动汽车在短时间内可调节动态其充电功率，甚至通过 V2G 反向送电^[23]，待机状态下达到峰值功率的时间为毫秒级^[16]，是一种快速调频资源。本文采用的电动汽车模型，通过一阶惯性环节反映双向变流器和动力电池的响应，其频率动态特性可表示为

$$\Delta P_{EV}(s) = \frac{1}{(1 + s T_{EV})} K_{EV} \Delta f(s) \quad (5)$$

式中： T_{EV} 表示电动汽车的响应时间常数，双向变流器的响应时间一般为毫秒级，动力电池一般无响应延迟； K_{EV} 表示电动汽车的频率动态系数。

$\Delta P_G(s)$ 、 $\Delta P_{LAC}(s)$ 、 $\Delta P_B(s)$ 、 $\Delta P_{EV}(s)$ 是源荷双侧快速响应资源提供的功率调节量，也是机组、负荷需要预留的最少调频备用容量。在调度阶段，需建立含频率约束的联合经济调度模型 (frequency constrained combined economic dispatch, FCCED) 优化求解调频备用容量，建模和求解方法将在第 2 节介绍。

2 频率约束的源荷双侧联合经济调度模型

本节建立 FCCED 模型, 将变频空调、储能电池和电动汽车 3 种需求侧资源与常规电源纳入经济调度框架中, 统一配置其调频备用容量。配置的基本原则是在保障频率安全的前提下, 尽可能地使总备用方案成本最低, 实现电力系统安全经济运行。

2.1 需求侧快速响应资源的调度模式

配电网中空调、电动汽车、储能等资源单体容量小、电压等级低、分布散, 不适合直接参与大电网调频。因此考虑通过负荷聚合商(load aggregator, LA)和储能电站实现分散资源集总参与电力系统调度。本文的经济调度框架如图 2 所示, 负荷聚合商分别聚合配网侧零散的空调、电动汽车和储能电站聚合单体储能, 为系统运营商提供可调容量、报价和聚合体的频率动态模型参数。系统运营商(调度中心)对负荷聚合商和储能电站进行经济调度, 聚合商直接控制零散空调和电动汽车, 储能电站直接控制单体储能。其中, 聚合体的频率动态模型参数采用非参数核密度估计方法^[24]计算。

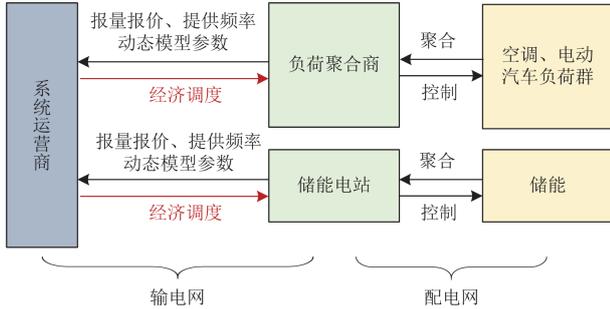


图 2 基于负荷聚合商的经济调度框架

Fig. 2 Framework of economic dispatch based on LA

以空调为例, 设 $T_{c1}, T_{c2}, \dots, T_{cn}$ 为 n 台空调单体的压缩机时间常数, 则 T_c 的估计概率密度可表示为

$$\hat{\rho}_h(T_c) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{T_c - T_{ci}}{h}\right) \quad (6)$$

式中: $K(\cdot)$ 表示核函数; h 表示核函数带宽。如图 3 红色虚线所示, 采用标准高斯函数作为核函数。

$$K(T_c) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \exp\left(-\frac{T_c^2}{2}\right) \quad (7)$$

图 3 中蓝色实线表示 T_c 的核密度估计:

$$\hat{\rho}_h(T_c) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n \frac{1}{(2\pi)^{n/2}} \exp\left(-\frac{(T_c - T_{ci})^2}{2h^2}\right) \quad (8)$$

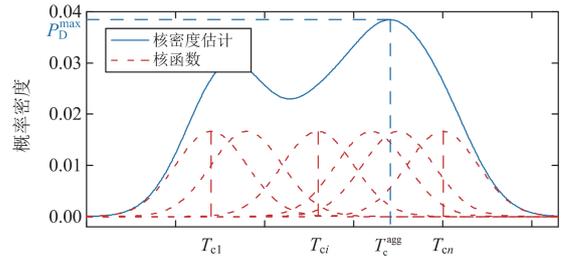


图 3 核概率密度估计过程

Fig. 3 Process of kernel probability density estimation

$\hat{\rho}_h(T_c)$ 核密度估计曲线中的极值点 (T_c^{ess} , P_D^{max}) 具有指标意义, 样本参数 T_{ci} 落在该点的概率最大, 因此选取 T_c^{ess} 作为空调聚合体的集总参数。同理可使用核密度估计得到空调聚合体的 T_a 、 θ_p 等参数。

2.2 目标函数

优化目标是全时段的运行成本最低, 发电侧成本包含发电机组运行成本和调频备用成本, 需求侧成本包含变频空调、储能电池、电动汽车提供调频备用的成本。因此, 该机组组合模型的目标函数为

$$\begin{cases} \min F = C_G + C_{IAC} + C_B + C_{EV} \\ C_G = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} [c_{Gi} P_{Gi}^t + c_{RESi} R_{Gi}^t] \\ C_{IAC} = \sum_{t=1}^T \sum_j^{N_{IAC}} c_{IACj} R_{IACj}^t \\ C_B = \sum_{t=1}^T \sum_w^{N_B} c_{Bw} R_{Bw}^t \\ C_{EV} = \sum_{t=1}^T \sum_v^{N_{EV}} c_{EVv} R_{EVv}^t \end{cases} \quad (9)$$

式中: F 为调度总成本; C_G 、 C_{IAC} 、 C_B 、 C_{EV} 分别为发电机、空调集群、储能、电动汽车集群的调度成本; T 为时段数; N_G 、 N_{IAC} 、 N_B 、 N_{EV} 分别为发电机、空调聚合体、储能聚合体、电动汽车聚合体的数量; P_{Gi}^t 和 R_{Gi}^t 分别为第 i 台发电机组在 t 时段的出力和备用; c_{Gi} 和 c_{RESi} 分别为第 i 台发电机的出力和备用成本系数; R_{IACj}^t 、 R_{Bw}^t 、 R_{EVv}^t 分别为 t 时刻第 j 个变频空调集群、第 w 个储能、第 v 个电动汽车集群的备用容量; c_{IACj} 、 c_{Bw} 、 c_{EVv} 分别为对应的备用成本系数。

发电机的出力成本 c_{Gi} 使用二次函数可描述为

$$c_{Gi} = a_i (P_{Gi}^t)^2 + b_i P_{Gi}^t + c_i \quad (10)$$

式中, a_i 、 b_i 、 c_i 分别为发电机组的运行成本系数。

各类需求侧快速响应资源的成本 c_{IACj} 、 c_{Bw} 、

c_{EV} 应由其对应负荷聚合商以报价的形式向系统运营商提供。

2.3 约束条件

1) 功率平衡约束

系统在所有时段都应当满足发电与负荷功率平衡约束。

$$P_D^t = \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi}^t \quad (11)$$

式中, P_D^t 表示 t 时段系统内所有负荷功率总和。

2) 传输容量约束

潮流传输过程中, 支路潮流不能超过该支路的传输容量上限。

$$\sum_{i=1}^{N_G} T_{li} P_{Gi}^t - \sum_{k=1}^K T_{lk} P_{Dk}^t \leq \overline{P}_l^t \quad (12)$$

式中: \overline{P}_l^t 为第 l 条线路的传输上限; T_{li} 为第 i 台机组所在节点对第 l 条线路的功率传输分配系数; T_{lk} 为第 k 个节点对第 l 条线路的功率传输分配系数; K 为系统节点数; P_{Dk}^t 为 t 时刻第 k 个节点的负荷。

3) 旋转备用约束

在运行过程中, 机组应预留一定的旋转备用容量, 以应对负荷波动。

$$\sum_{i=1}^{N_G} \overline{P}_{Gi}^t \geq (1 + k_r) P_D^t \quad (13)$$

式中: \overline{P}_{Gi}^t 为 t 时段第 i 台机组的出力上限; k_r 为系统的备用系数。

4) 出力约束

机组出力和机组备用还应满足容量约束。

$$\underline{P}_{Gi}^t \leq P_{Gi}^t \leq \overline{P}_{Gi}^t \quad (14)$$

$$\underline{P}_{Gi}^t \leq P_{Gi}^t + R_{Gi}^t \leq \overline{P}_{Gi}^t \quad (15)$$

式中: \overline{P}_{Gi}^t 和 \underline{P}_{Gi}^t 分别表示第 i 台机组出力上下限。

需求侧快速响应资源应同样满足其容量约束。

5) 爬坡约束

机组出力和需求响应资源都应满足爬坡约束, 相比于火电机组, 需求响应资源爬坡受限较少, 爬坡速度较快。

$$P_{Gi}^t - P_{Gi}^{t-1} \leq R_{u_i} \quad (16)$$

$$P_{Gi}^{t-1} - P_{Gi}^t \leq R_{d_i} \quad (17)$$

式中, R_{u_i} 和 R_{d_i} 分别表示第 i 台机组的向上、向下爬坡率。

6) 频率安全约束

电力系统运行过程中, 不可避免地发生功率扰动导致系统频率下跌。常见的系统频率动态过程如图 4 所示, 在 t_0 时刻系统发生功率扰动, 频率开始

下降, 在 t_{nadir} 时刻系统频率跌至 f_{nadir} , 在 t_{steady} 时刻系统频率达到新稳态值 f_{steady} 。系统频率变化过程中, 最大频率偏移量 Δf_{max} 定义为频率初始值 f_0 和频率最低点 f_{nadir} 之差。

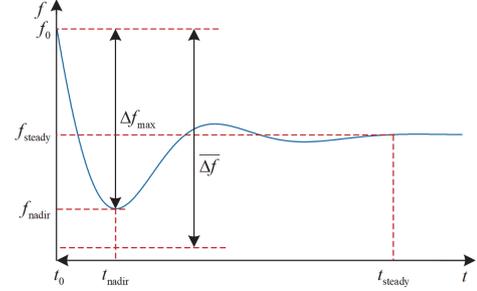


图 4 扰动后电力系统频率动态过程

Fig. 4 Power system frequency dynamics after contingency

根据图 4 所示的频率动态模型, 当系统在某时段发生 ΔP_D^t 的功率扰动时, 发电机、变频空调、储能、电动汽车分别提供功率支撑 ΔP_G^t 、 ΔP_{IAC}^t 、 ΔP_B^t 、 ΔP_{EV}^t , 这部分功率来源于其预留的调频备用。因此源荷双侧预留的调频备用应保证 Δf_{max} 在允许的频率偏移上限 $\overline{\Delta f}$ 范围内, 该频率安全约束可用式(18)表示。

$$\Delta f_{max} = F_R(\mathbf{x}) \leq \overline{\Delta f} \quad (18)$$

$$\mathbf{x} = \{-\Delta P_D^t, \dots, R_{Gi}^t, \dots, R_{IACj}^t, \dots, R_{Bw}^t, \dots, R_{EVv}^t, \dots\}$$

若最大频率偏移量 Δf_{max} 超过 $\overline{\Delta f}$, 会触发系统低频减载, 引起大停电^[25]。我国装机容量在 300 万 kW 及以上的电力系统, $\overline{\Delta f}$ 为 0.2 Hz; 装机容量在 300 万 kW 以下的电力系统, $\overline{\Delta f}$ 为 0.5 Hz^[26]。英国和澳大利亚的 $\overline{\Delta f}$ 一般设定为 0.2 Hz^[27-28]。

式(18)中, 源荷双侧提供的调节功率与系统最大频率偏移量 Δf_{max} 之间的映射关系 $F_R(\mathbf{x})$ 由图 1 所示的系统频率动态响应模型决定, 是高阶非线性的隐关联式。

3 数据驱动的频率安全约束转化

为应对式(18)高阶非线性的功率-频率隐关联约束, 本节引入数据驱动的 HDMR 方法将其降阶显式转化, 从而使 FCCED 转为常规优化问题。

3.1 高维模型表达方法

高维模型表达 (high dimension model representation, HDMR) 方法可将多输入-单输出的非线性系统表达成一种简单的映射关系^[29]。式(18)包含了高阶非线性化的复杂频率动态模型, 无法直接

求解。本文选择 HDMR 的数据驱动方法对频率安全约束进行刻画, 有两方面原因。一方面, 频率安全约束所包含的频率动态模型是一个典型的非线性多输入—单输出系统, 适合使用 HDMR 模型简化; 另一方面, HDMR 方法精度较高、计算速度快^[30], 可满足电力系统经济调度的精度需求和计算速度需求。HDMR 方法原理如下所述。

对于一个高维非线性物理系统, 设其输入特征向量为 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, 输出特征向量为 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 。HDMR 方法的定义域是 n 维单位向量超立方体 $[0, 1]^n$, 因此输入变量需要按照式(19)进行归一化处理。

$$x_i^* = \frac{x_i - \underline{x}_i}{\overline{x}_i - \underline{x}_i} \quad (19)$$

式中: x_i^* 为输入变量 i 的归一化值; \overline{x}_i 和 \underline{x}_i 分别为输入变量 i 的上限值和下限值。

HDMR 可将该高维非线性物理系统降阶为多个低维问题之和, 即分解为每个变量各自对输出值 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 的作用以及不同变量之间的耦合关系对 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 的作用, $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 可表示为

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{g}_0 + \sum_{i=1}^n \mathbf{g}_i(x_i) + \sum_{i < j} \mathbf{g}_{ij}(x_i, x_j) + \dots + \mathbf{g}_{1,2,\dots,n}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (20)$$

式中: n 表示输入变量个数; \mathbf{g}_0 表示 0 阶分量, 即常数项; $\mathbf{g}_i(x_i)$ 表示变量 x_i 对输出的影响; $\mathbf{g}_{ij}(x_i, x_j)$ 表示二阶分量, 即变量 x_i 和 x_j 的耦合作用对输出的影响; $\mathbf{g}_{1,2,\dots,n}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示 n 阶分量, 即变量 x_1, x_2, \dots, x_n 的耦合作用对输出的影响。

高阶分量对输出的影响很小, 可忽略不计。因此, 保留到二阶分量, 如式(21)所示。

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{g}_0 + \sum_{i=1}^n \mathbf{g}_i(x_i) + \sum_{i < j} \mathbf{g}_{ij}(x_i, x_j) \quad (21)$$

用正交多项式对式(21)进行逼近。

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{g}_0 + \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^k \alpha_r^i \varphi_r(x_i) + \sum_{i < j} \sum_{p=1}^l \sum_{q=1}^m \beta_{pq}^{ij} \varphi_p(x_i) \varphi_q(x_j) \quad (22)$$

式中: k 、 l 、 m 表示正交多项式的最高阶数; $\varphi_r(x_i)$ 表示变量 x_i 的第 r 个正交多项式; $\varphi_p(x_i) \varphi_q(x_j)$ 表示变量 x_i 和 x_j 的耦合正交多项式; α_r^i 和 β_{pq}^{ij} 分别表示 HDMR 模型一阶分量和二阶分量的系数。

3.2 基于 HDMR 生成数据驱动的频率安全约束

基于 HDMR 方法生成数据驱动的频率安全约束

的过程如图 5 所示, 包括数据层、驱动层和优化层。

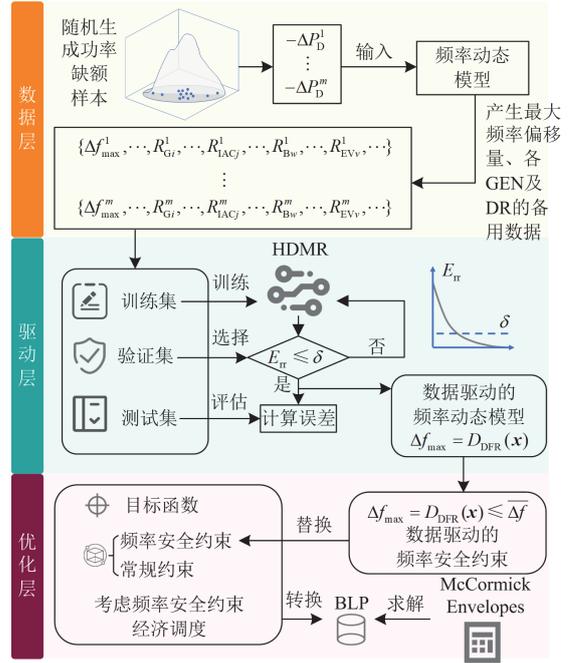


图 5 基于 HDMR 生成数据驱动频率安全约束的流程

Fig. 5 Process of generating DDFC based on HDMR

在数据层, 首先随机生成大量功率扰动 ΔP_D 数据样本。基于第 1 节 Δf 的传递函数模型在 Simulink 中搭建仿真模型, 将功率扰动 ΔP_D 数据样本输入仿真模型, 得到系统频率动态的仿真曲线, 取频率初始值 f_0 (本文设定为 50 Hz) 与频率最低点 f_{nadir} 的差值, 即为最大频率偏移量 Δf_{max} 。

然后记录对应的源荷双侧备用方案, 即 R_G^i 、 R_{IAC}^i 、 R_B^i 、 R_{EV}^i , 得到带标签数据集 $\{\mathbf{x}, \mathbf{y}\}$, 其中:

$$\begin{cases} x_i = (-\Delta P_D^i, \dots, R_{G_i}^i, \dots, R_{\text{IAC}_j}^i, \dots, R_{B_w}^i, \dots, R_{\text{EV}_v}^i, \dots) \\ y_i = \Delta f_{\text{max}}^i \end{cases} \quad (23)$$

在实际系统运行中, ΔP_D 可能来源于负荷激增、发电出力骤降、通道故障等方面, 是强不确定的随机量。为充分模拟覆盖真实情况, 随机生成 10 000 个 ΔP_D 的数据。

在驱动层, 通过频率动态仿真模型生成的数据作为输入数据集, 基于交叉验证的思想将该数据集划分为训练集、验证集和测试集^[31]。在训练集上训练模型, 在验证集上测试模型误差并选择误差低的模型参数, 该过程不断迭代, 直到模型在验证集上的误差降到 δ 内。用测试集评估模型误差。经过训练后, 输出最大频率偏移量 Δf_{max} 与调频备用 R_{G_i} 、 R_{IAC_j} 、 R_{B_w} 、 R_{EV_v} 之间的简单映射关系, 如式(24)所示。

$$\Delta f_{\max} = D_{\text{DFR}}(\mathbf{x}) = g_0 + g_1(\mathbf{x}) + g_{21}(\mathbf{x}) + g_{22}^G(\mathbf{x}) + g_{22}^{\text{DR}}(\mathbf{x}) \quad (24)$$

式中: g_0 、 $g_1(\mathbf{x})$ 分别表示 $D_{\text{DFR}}(\mathbf{x})$ 的 0 阶、一阶分量; $g_{21}(\mathbf{x})$ 表示 $-\Delta P_D^t$ 与其他变量耦合的二阶分量; $g_{22}^G(\mathbf{x})$ 表示 R_{Gi} 与 $R_{\text{IAC}j}$ 、 R_{Bw} 、 $R_{\text{EV}v}$ 耦合的二阶分量; $g_{22}^{\text{DR}}(\mathbf{x})$ 表示 $R_{\text{IAC}j}$ 、 R_{Bw} 、 $R_{\text{EV}v}$ 耦合的二阶分量。

$$g_1(\mathbf{x}) = \sum_{r=1}^k \alpha_r \varphi_r(-\Delta P_D^t) + \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{r=1}^k \alpha_{ri}^G \varphi_r(R_{Gi}) + \sum_{i=1}^{N_{\text{IAC}}} \sum_{r=1}^k \alpha_{ij}^{\text{IAC}} \varphi_r(R_{\text{IAC}j}) + \sum_{i=1}^{N_{\text{B}}} \sum_{r=1}^k \alpha_{iw}^{\text{B}} \varphi_r(R_{\text{Bw}}) + \sum_{i=1}^{N_{\text{B}}} \sum_{r=1}^k \alpha_{iv}^{\text{EV}} \varphi_r(R_{\text{EV}v}) \quad (25)$$

$$g_{21}(\mathbf{x}) = \sum_{p=1}^l \sum_{q=1}^m \beta_{pq}^G \varphi_p(-\Delta P_D^t) \varphi_q(R_{Gi}^t) + \sum_{p=1}^l \sum_{q=1}^m \beta_{pq}^{\text{IAC}} \varphi_p(-\Delta P_D^t) \varphi_q(R_{\text{IAC}j}^t) + \sum_{p=1}^l \sum_{q=1}^m \beta_{pq}^{\text{B}} \varphi_p(-\Delta P_D^t) \varphi_q(R_{\text{Bw}}^t) + \sum_{p=1}^l \sum_{q=1}^m \beta_{pq}^{\text{EV}} \varphi_p(-\Delta P_D^t) \varphi_q(R_{\text{EV}v}^t) \quad (26)$$

$$g_{22}^G(\mathbf{x}) = \sum_{i<j}^l \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m \beta_{ijpq}^{\text{GI}} \varphi_p(R_{Gi}) \varphi_q(R_{\text{IAC}j}) + \sum_{i<w}^l \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m \beta_{iwpq}^{\text{GB}} \varphi_p(R_{Gi}) \varphi_q(R_{\text{Bw}}) + \sum_{i<v}^l \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m \beta_{ivpq}^{\text{GE}} \varphi_p(R_{Gi}) \varphi_q(R_{\text{EV}v}) \quad (27)$$

$$g_{22}^{\text{DR}}(\mathbf{x}) = \sum_{j<w}^l \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m \beta_{jwpq}^{\text{IB}} \varphi_p(R_{\text{IAC}j}) \varphi_q(R_{\text{Bw}}) + \sum_{j<v}^l \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m \beta_{jvpq}^{\text{IE}} \varphi_p(R_{\text{IAC}j}) \varphi_q(R_{\text{EV}v}) + \sum_{w<v}^l \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^m \beta_{wvpq}^{\text{BE}} \varphi_p(R_{\text{Bw}}) \varphi_q(R_{\text{EV}v}) \quad (28)$$

式(25)一式(28)中: $\varphi_r(\cdot)$ 表示一阶分量的正交函数; $\varphi_p(\cdot)$ 和 $\varphi_q(\cdot)$ 表示二阶分量的正交函数; α_r 、 α_{ri}^G 、 α_{ij}^{IAC} 、 α_{iw}^{B} 、 α_{iv}^{EV} 表示 $g_1(\mathbf{x})$ 中一阶分量的系数; β_{pq}^G 、 β_{pq}^{IAC} 、 β_{pq}^{B} 、 β_{pq}^{EV} 表示 $g_{21}(\mathbf{x})$ 中二阶分量的系数; β_{ijpq}^{GI} 、 β_{iwpq}^{GB} 、 β_{ivpq}^{GE} 表示 $g_{22}^G(\mathbf{x})$ 中二阶分量的系数; β_{jwpq}^{IB} 、 β_{jvpq}^{IE} 、 β_{wvpq}^{BE} 表示 $g_{22}^{\text{DR}}(\mathbf{x})$ 中二阶分量的系数。

在优化层, 基于驱动层所得数据驱动的映射关系 $\Delta f_{\max} = D_{\text{DFR}}(\mathbf{x})$, 将频率安全约束转化为

$$\Delta f_{\max} = D_{\text{DFR}}(\mathbf{x}) \leq \overline{\Delta f} \quad (29)$$

$$\mathbf{x} = \{-\Delta P_D^t, \dots, R_{Gi}, \dots, R_{\text{IAC}j}, \dots, R_{\text{Bw}}, \dots, R_{\text{EV}v}, \dots\}$$

接着, 使用式(29)替换式(18), 从而将原隐式的高阶非线性频率安全约束经济调度问题转化为 BLP(bilinear programming)问题, 使用 McCormick Envelopes^[32]求解。

本文提出的基于 HDMR 方法生成数据驱动的频率安全约束, 满足以下条件:

1) 输入向量的维数不变, 即发电机组启停状态、需求侧快速响应资源的响应状态(是否参与调频)都不变。当输入向量的维数发生改变时, 重新训练 HDMR 模型以得到新的表达式。

2) 系统频率不崩溃。若系统发生频率崩溃事故, 系统频率会一直下跌, 那么不存在频率最低点, 此时频率动态模型以及 HDMR 方法不适用于调频备用与最大频率偏移量之间关系的建模。

本文所研究对象为经济调度问题, 即只对发电机组和需求侧快速响应资源的调频备用作优化分配, 不改变其启停状态, 输入向量的维数不变; 本文提出的频率安全约束使经济调度分配足够的调频备用, 系统频率在可承受范围内波动, 确保不发生频率崩溃, 因此满足以上条件, 可适合采用 HDMR 进行模型转化。

4 算例分析

4.1 系统参数

为验证本文所提模型的有效性, 采用文献[33]中改进的 IEEE30 节点系统进行测试, 其中 7 节点负荷改造为储能电站, 12 节点负荷改造为变频空调集群, 21 节点负荷改造为电动汽车集群。系统总容量为 335 MW, 该系统包含 6 台火电机组。机组参数见表 1, 负荷数据见表 2。

表 1 发电机组的参数

Table 1 Parameters of generator unit

参数	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6
$\overline{P_G}/\text{MW}$	191	191	119	131	71	96
P_G/MW	134	134	84	92	50	67
$a/(\text{美元}/\text{MW}^2)$	0.0200	0.0175	0.0625	0.0083	0.0250	0.0250
$b/(\text{美元}/\text{MW})$	2.00	1.75	1.00	3.25	3.00	3.00
$c/\text{美元}$	0	0	0	0	0	0
T_{CH}/s	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
T_{RH}/s	5	5	5	5	5	5
T_G/s	0.3	0.4	0.5	0.3	0.4	0.5
$R/(\text{Hz}/\text{MW})$	0.04	0.05	0.06	0.04	0.05	0.06
F_{HP}	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

表 2 各时段总负荷数据

Table 2 Total electricity load in each time unit

时段	1	2	3	4	5	6	7	8
负荷/MW	571	583	594	602	610	625	636	649
时段	9	10	11	12	13	14	15	16
负荷/MW	653	659	665	673	665	659	643	636
时段	17	18	19	20	21	22	23	24
负荷/MW	625	619	610	605	597	586	583	576

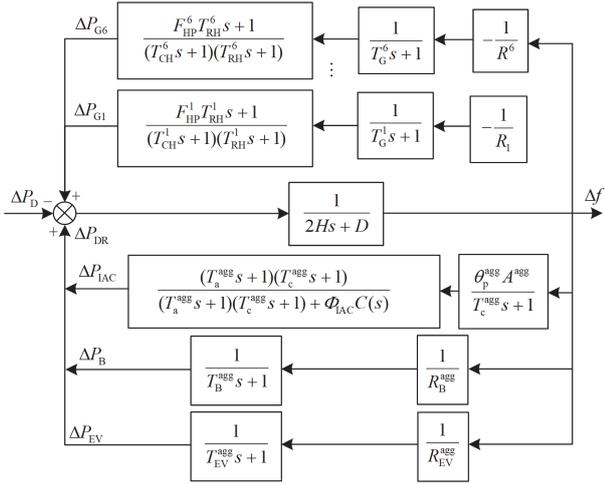


图 6 修改 IEEE 30 节点对应的频率动态模型示意图

Fig. 6 Frequency dynamic model of modified IEEE 30-bus system

IEEE 30 节点系统对应的频率动态模型如图 6 所示。空调、电动汽车由负荷聚合商进行聚合, 储能由储能电站聚合。聚合参数通过 2.1 节中的非参数核密度估计方法得到。以变频空调为例, 基于文献[18]中变频空调负荷群数据, 核密度估计得到空调聚合体的参数。同理, 其他聚合调频参数见表 3。变频空调、储能电站、电动汽车的调频备用成本分别取 4.2 美元/MW、4.0 美元/MW、4.1 美元/MW^[34]。

表 3 需求侧资源的参数

Table 3 Parameter of demand side resources

参数	数值	参数	数值
θ_p^{res} /(Hz/°C)	0.54	T_B^{res} /s	0.021
A^{res} /(MW/Hz)	8.2	R_B^{res} /(Hz/MW)	0.045
T_a^{res} /s	882.1241	T_{EV}^{res} /s	1.22
T_c^{res} /s	0.01	K_{EV}^{res} /(MW/Hz)	10.57
ϕ_{TAC}^{res} /(MW/°C)	0.0791	—	—

4.2 基于 HDMR 生成频率安全约束的精度分析

为验证本文数据驱动方法的效果, 本部分算例对比了 HDMR 和频率仿真方法的计算结果。基于泊松、均匀、指数、正态分布分别生成 2500 个功率扰动事件, 组成 10 000 个 ΔP_D 数据样本, 然后使用 3.2

节的数据生成方法, 生成完整数据集。将该数据集按 8:2 的比例划分为训练集和测试集, 其中训练集由 k 折交叉验证^[35]进一步划分出验证集, 本文 k 取 10。使用 HDMR 方法基于该数据集得到对应逼近模型。使用测试集对该模型进行误差计算, 相对误差 (relative error, RE) 可表示为

$$R_E = \frac{\Delta f_{\text{HDMR}} - \Delta f_{\text{test}}}{\Delta f_{\text{test}}} \times 100\% \quad (30)$$

式中: Δf_{HDMR} 表示 HDMR 模型计算所得频率偏移量; Δf_{test} 表示测试集中的频率偏移量。

所有测试点的误差散点结果见图 7。可见, HDMR 方法与图 1 所示的传统的频率仿真方法相比, 最大相对误差不超过 17.52%, 平均相对误差 (mean relative error, MRE) 是 3.71%, 整体精度表现优异, 完全满足实际调度应用的需要。

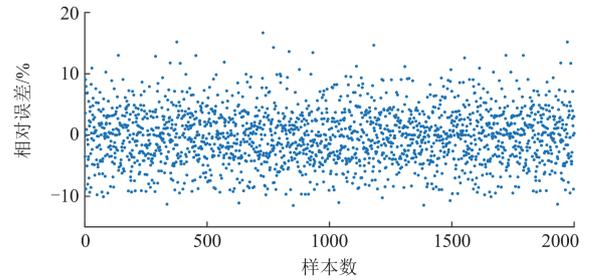


图 7 HDMR 在测试集的相对误差

Fig. 7 Relative error of HDMR in test set

为验证 HDMR 在不同数据集上的精度, 本文针对多组样本数据进行了实验。

1) 基于泊松分布产生 10 000 个功率缺额数据, 频率数据、备用数据采用图 1 所示的频率动态模型计算;

2) 基于均匀分布生成 10 000 个功率缺额数据, 其他步骤同 1);

3) 基于指数分布生成 10 000 个功率缺额数据, 其他步骤同 1);

4) 基于正态分布生成 10000 个功率缺额数据, 其他步骤同 1);

5) 分别基于泊松分布、均匀分布、指数分布、正态分布生成 2500 个功率缺额数据, 组成 10 000 个功率缺额样本, 其他步骤同 1)。

5 组样本都按照 8:2 的比例划分训练集和测试集, 训练集由 10 折交叉验证划分出验证集。重复 10 次实验, 获得平均相对误差和最大相对误差。实验结果如图 8 所示, 在 5 个数据集的 10 次实验结果中, 平均相对误差均不超过 4%, 最大相对误差不超过 17.8%。说明 HDMR 方法在不同样本数据集上

均能体现出较好的拟合效果。

4.3 含频率约束的联合经济调度结果

本节对比了两种场景的经济调度结果。

场景 1：在不考虑频率约束的情况下，系统按照各时段总负荷的 10%预留调频备用容量，按成本最低准则，分配源荷双侧的调频备用容量。

场景 2：在考虑频率安全约束情况下，系统按成本最低原则，分配源荷双侧的调频备用容量。

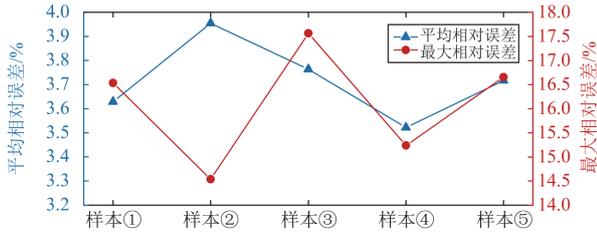
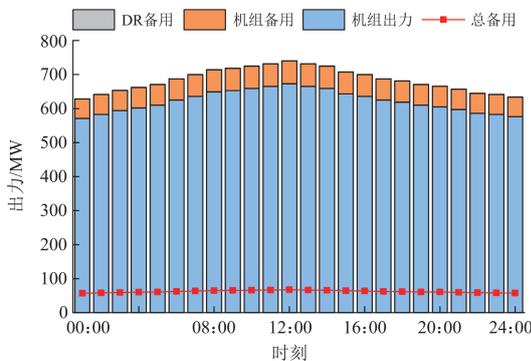


图 8 HDMR 方法在不同样本上的相对误差

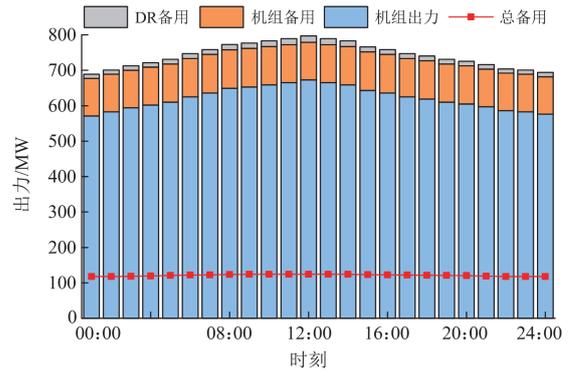
Fig. 8 Relative error of HDMR on different samples

场景 1 的调度结果如图 9(a)所示，总备用容量约为 60 MW，全部由火电机组承担，成本 72 914.53 美元。场景 2 调度结果如图 9(b)所示，总备用容量约为 120 MW，需求侧资源也参与了调频，总成本 77 931.54 美元。增加频率安全约束后，系统预留备用容量提高了 1 倍，经济调度方案成本增加。

在以上两种经济调度方案下，仿真系统分别在每个时段经历 30 MW 功率扰动后的频率变化。结果如图 10 所示，场景 1 频率最低点均在 49.5 Hz 以下，在 01:00—03:00 和 20:00—24:00 时段，频率甚至降至 48.3 Hz 以下，远低于系统允许的最低频率 49.5 Hz。场景 1 中，12:00 频率下跌最少，然而频率最低点是 49.21 Hz，也低于 49.5 Hz。场景 1 的调度方案承受功率扰动的能力差，无法保障频率安全。场景 2 中，系统在经受相同的功率扰动后，频率最低点均维持在 49.6 Hz 以上，满足频率安全要求。因此，采用 HDMR 转化后的 FCCED 模型能够应对系统功率扰动，保障系统安全稳定运行。



(a) 场景 1: ED



(b) 场景 2: FCCED

图 9 ED 与 FCCED 的调度结果对比

Fig. 9 Dispatch results comparison of ED and FCCED

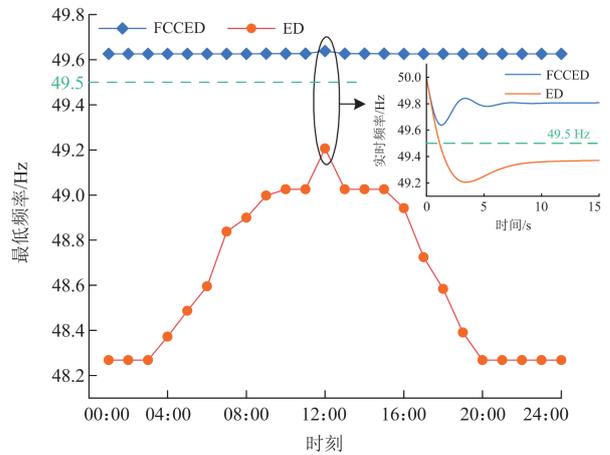


图 10 FCCED 与 ED 的频率最低点对比

Fig. 10 Frequency nadir comparison of FCCED and ED

4.4 需求侧快速响应资源对系统频率安全的作用

为验证需求侧资源对系统频率安全的作用，取负荷水平最高的时刻 12:00，设定系统的功率扰动从 0 MW 逐渐增加到 50 MW，步长 5 MW， Δf_{max} 的仿真结果如图 11 所示。可见，有 DR 的情况下，当

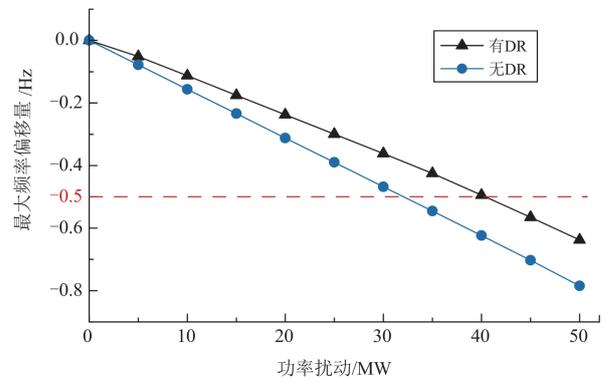


图 11 有无 DR 的最大频率偏移量对比

Fig. 11 Comparison of max frequency offset with/without DR

系统的功率扰动达到 40 MW 时, 系统频率偏移量触及上限-0.5 Hz; 无 DR 情况下, 当功率扰动达到 35 MW 时, 频率偏移量就已超出其上限。说明利用需求侧快速调频资源的电力系统, 可承受相对更大的功率扰动。

4.5 不同数据驱动方法转化频率安全约束的效果

本节对比了 HDMR 与文献[18]中的支持向量机 SVM 在转换频率安全约束上的表现。两种算法均采用 4.2 节的数据集, 并在 Gen Intel(R) Core(TM) i5-1135G7@2.40 GHz、16.0 GB RAM 的硬件环境下测试。比较维度包括计算时间、频率最低点均值和成本, 对比结果见表 4。

在时间方面, 本文基于 HDMR 的频率动态模型转换方法的平均用时 3.46 s, SVM 方法平均用时 5.62 s, HDMR 方法效率比 SVM 高 38.46%。这是由于 HDMR 时间复杂度为 $O(N^2)$ ^[36], 而 SVM 时间复杂度达到 $O(N^3)$ ^[37]。

表 4 HDMR 与 SVM 对比

Table 4 Comparison of HDMR and SVM

数据驱动方法	平均计算时间/s	频率最低点均值/Hz	成本/美元
HDMR	3.46	49.63	77 931.54
SVM	5.62	49.52	77 753.17

在频率最低点和调度成本方面, HDMR 方法调度成本是 77 931.54 美元, 平均频率最低点为 49.63 Hz; SVM 方法调度成本为 77 753.17 美元, 平均频率最低点为 49.52 Hz。相比之下, HDMR 转换后的频率安全约束更加保守, 可充分保证功率扰动后系统频率能够维持在安全范围内。

系统允许频率偏移上限 $\overline{\Delta f}$ 体现了调度员的风险接受程度。实际调度决策过程中, 很可能发生调度员风险偏好改变的情况。因此, 当 $\overline{\Delta f}$ 改变时, 需要重新求解经济调度模型。分别记录 $\overline{\Delta f}$ 改变情况下基于 HDMR 和 SVM 的调度模型优化决策时间, 结果见表 5。当 $\overline{\Delta f}$ 改变 1、2、3 次时, 基于 HDMR 的调度模型优化求解时间几乎不变, 均在 5 s 内, 但基于 SVM 的模型优化求解时间不断增长。从原理上进行分析, 如图 12 所示, HDMR 转换的是频率安全约束式中的 $\Delta f_{\max} = F_R(\mathbf{x})$, $\overline{\Delta f}$ 改变时无须重新训练模型; 而 SVM 是对整个频率安全约束式 $\Delta f_{\max} = F_R(\mathbf{x}) \leq \overline{\Delta f}$ 的整体转化, $\overline{\Delta f}$ 改变时须重新适应性训练和建模。

表 5 $\overline{\Delta f}$ 改变时 HDMR 与 SVM 方法求解时间对比

Table 5 Solution time of HDMR and SVM in terms of different $\overline{\Delta f}$

改变次数	1	2	3
HDMR	3.76	3.78	3.71
SVM	10.93	16.38	21.85

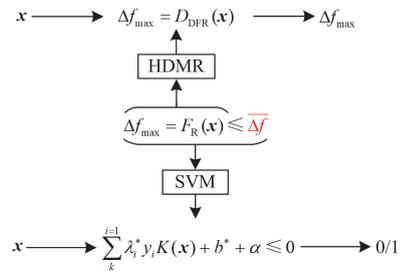


图 12 HDMR 与 SVM 转换原理比较

Fig. 12 Conversion principle comparison of HDMR and SVM

5 结论

新能源占比的不断提高使电力系统惯性下降, 满足频率安全约束的最优调度成为新型电力系统亟待考虑的问题。本文提出了考虑需求侧快速响应资源的数据驱动频率约束经济调度方法。首先, 将变频空调、储能、电动汽车的频率动态模型纳入系统调频框架。然后, 构建考虑频率安全约束的源荷双侧联合经济调度模型。最后, 使用基于 HDMR 的数据驱动方法将复杂高阶非线性约束转化为低阶线性约束并求解。算例结果表明: 1) HDMR 的计算精度满足调度需求, 基于 HDMR 的数据驱动频率安全约束能够保证经济调度方案在频率指标上的安全性, 需求侧快速响应资源参与调频后可以显著提升系统频率韧性; 2) HDMR 相较于 SVM 分类器方法, 计算效率提升 32.36%, 转化后的频率安全约束更保守。此外, 风险偏好改变时, HDMR 方法无须重新训练, 适应性更好。

本文所提的数据驱动频率安全约束经济调度方法, 为需求侧资源参与新型电力系统的运行支撑提供了安全经济的资源配置工具, 也为复杂电力调度优化问题的高效解算提供了一种降阶转化的新思路。

与发电侧调频资源相比, 需求侧资源具有强不确定性。在实时性、精准度要求极高的电力系统频率控制过程中, 如何通过数据驱动的方法对需求侧资源的不确定性进行建模和处理是下一步需要研究的问题。

参考文献

- [1] 张子扬, 张宁, 杜尔顺, 等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 1-25.
ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 1-25.
- [2] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [3] 安学民, 孙华东, 张晓涵, 等. 美国得州“2.15”停电事件分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3407-3415, 3666.
AN Xuemin, SUN Huadong, ZHANG Xiaohan, et al. Analysis and lessons of Texas power outage event on February 15, 2021[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3407-3415, 3666.
- [4] 王伟胜, 林伟芳, 何国庆, 等. 美国得州 2021 年大停电事故对我国新能源发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4033-4043.
WANG Weisheng, LIN Weifang, HE Guoqing, et al. Enlightenment of 2021 Texas blackout to the renewable energy development in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4033-4043.
- [5] National Grid ESO. Interim report into the low frequency demand disconnection (LFDD) following generator trips and frequency excursion on 9 Aug 2019[R]. Great Britain, 2019.
- [6] PEARMINE R, SONG Y H, CHEBBO A. Influence of wind turbine behaviour on the primary frequency control of the British transmission grid[J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(2): 142-150.
- [7] AHMADI H, GHASEMI H. Security-constrained unit commitment with linearized system frequency limit constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1536-1545.
- [8] PATURET M, MARKOVIC U, DELIKARAOGLU S, et al. Stochastic unit commitment in low-inertia grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3448-3458.
- [9] ZHANG Ziyang, DU Ershun, TENG Fei, et al. Modeling frequency dynamics in unit commitment with a high share of renewable energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4383-4395.
- [10] 林恒先, 侯凯元, 陈磊, 等. 高比例风电电力系统考虑频率安全约束的机组组合[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 1-13.
LIN Hengxian, HOU Kaiyuan, CHEN Lei, et al. Unit commitment of power system with high proportion of wind power considering frequency safety constraints[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 1-13.
- [11] 罗金满, 刘丽媛, 刘飘, 等. 考虑源网荷储协调的主动配电网优化调度方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 167-173.
LUO Jinman, LIU Liyuan, LIU Piao, et al. An optimal scheduling method for active distribution network considering source network load storage coordination[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 167-173.
- [12] YANG Hejun, ZHANG Xinyu, MA Yinghao, et al. Critical peak rebate strategy and application to demand response[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(3): 357-370.
- [13] HUI Hongxun, DING Yi, ZHENG Menglian. Equivalent modeling of inverter air conditioners for providing frequency regulation service[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1413-1423.
- [14] HUI Hongxun, DING Yi, LIU Weidong, et al. Operating reserve evaluation of aggregated air conditioners[J]. Applied Energy, 2017, 196: 218-228.
- [15] 王凯丰, 谢丽蓉, 乔颖, 等. 电池储能提高电力系统调频性能分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(1): 174-181.
WANG Kaifeng, XIE Lirong, QIAO Ying, et al. Analysis on frequency modulation performance of power system improved by battery energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 174-181.
- [16] 鲍彦, 贾利民, 姜久春, 等. 电动汽车移动储能辅助频率控制策略的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 115-126.
BAO Yan, JIA Limin, JIANG Jiuchun, et al. Research on the control strategy of electric vehicle mobile energy storage in ancillary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 115-126.
- [17] 薛禹胜, 赖业宁. 大能源思维与大数据思维的融合(一) 大数据与电力大数据[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 1-8.
XUE Yusheng, LAI Yening. Integration of macro energy thinking and big data thinking part one big data and power big data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 1-8.
- [18] ZHUANG Xinran, YE Chengjin, DING Yi, et al. Data-driven reserve allocation with frequency security constraint considering inverter air conditioners[J]. IEEE

- Access, 2019, 7: 120014-120022.
- [19] NANDA J, MISHRA S, SAIKIA L. Maiden application of bacterial foraging-based optimization technique in multiarea automatic generation control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(2): 602-609.
- [20] BAO Yuqing, LI Yang, WANG Beibei, et al. Demand response for frequency control of multi-area power system[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2017, 5(1): 20-29.
- [21] 陈长青, 李欣然, 张冰玉, 等. 基于多时间尺度的储能调峰调频协同控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(5): 94-105.
- CHEN Changqing, LI Xinran, ZHANG Bingyu, et al. Energy storage peak and frequency modulation cooperative control strategy based on multi-time-scale[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(5): 94-105.
- [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] HU Jindi, YE Chengjin, DING Yi, et al. A distributed MPC to exploit reactive power V2G for real-time voltage regulation in distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(1): 576-588.
- [24] XIE Dunjian, HUI Hongxun, DING Yi, et al. Operating reserve capacity evaluation of aggregated heterogeneous TCLs with price signals[J]. *Applied Energy*, 2018, 216: 338-347.
- [25] 赵强, 刘肇旭, 张丽. 对中国低频减载方案制定中若干问题的探讨[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(11): 48-53.
- ZHAO Qiang, LIU Zhaoxu, ZHANG Li. Discussions on the several problems of under-frequency load shedding scheme in China[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(11): 48-53.
- [26] 电能质量—电力系统频率偏差: GB/T 15945—2008[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- Power quality—frequency deviation for power system: GB/T 15945—2008[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [27] 方勇杰. 英国“8·9”停电事故对频率稳定控制技术的启示[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(24): 1-7.
- FANG Yongjie. Reflections on frequency stability control technology based on the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(24): 1-7.
- [28] Australian Energy Market Operator. Preliminary report-black system event in South Australia on 28 September 2016[R]. Melbourne, Australia: Australian Energy Market Operation Limited, 2016.
- [29] 宋梦, 于继来, 李碧君, 等. 高维模型表达技术在 N-1 有功响应静态安全域中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(1): 164-170.
- SONG Meng, YU Jilai, LI Bijun, et al. Application of high dimensional model representation in N-1 active power response steady-state security domain[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(1): 164-170.
- [30] SONG Meng, GAO Ciwei, SHAHIDEHPOUR M, et al. Impact of uncertain parameters on TCL power capacity calculation via HDMR for generating power pulses[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(3): 3112-3124.
- [31] GOODFELLOW I, BENGI Y, COURVILLE A, et al. Deep learning[M]. London, UK: MIT Press, 2016.
- [32] SHERALI H D, ADAMS W P. A reformulation-linearization technique for solving discrete and continuous nonconvex problems[M]. Berlin: Springer, 1998.
- [33] 曹鹏, 刘敏. 基于改进的整数规划法结合零注入节点的 PMU 优化配置方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(16): 143-150.
- CAO Peng, LIU Min. PMU placement method based on improved integer programming method combined with zero injection buses[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(16): 143-150.
- [34] ALVARADO D, MOREIRA A, MORENO R, et al. Transmission network investment with distributed energy resources and distributionally robust security[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(6): 5157-5168.
- [35] RIPLEY B D. Pattern recognition and neural networks[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [36] RABITZ H, ALIŞ Ö F. General foundations of high-dimensional model representations[J]. *Journal of Mathematical Chemistry*, 1999, 25(2): 197-233.
- [37] BURGESS C J C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 1998, 2(2): 121-167.

收稿日期: 2022-03-31; 修回日期: 2022-07-11

作者简介:

姚宇(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力需求侧管理、数据驱动等; E-mail: zjuyaoyu@zju.edu.cn

叶承晋(1987—), 男, 通信作者, 博士, 研究员, 研究方向为电力系统规划运行、电力需求侧管理; E-mail: yechenjing@zju.edu.cn

丁一(1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能电网、电力系统可靠性. E-mail: yiding@zju.edu.cn

(编辑 姜新丽)