

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.02.004

基于 VMD 和 MPC 的电动汽车-火电机组联合调频控制

余洋¹, 王紫阳¹, 张瑞丰¹, 温波¹, 余宗哲¹, 蔡新雷²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003;

2. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600)

摘要:合理的调频指令分配策略以及有效的指令跟踪控制方法是利用集群电动汽车(aggregate electric vehicle, AEV)联合火电机组开展调频控制、改善调频质量、提高调频经济性的关键。基于此,文中提出基于变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)和双层模型预测控制(model predictive control, MPC)的 AEV 参与系统调频控制策略。首先,设计 AEV 联合传统火电机组的频率协调优化控制结构,建立火电机组及负荷频率控制模型,同时将 AEV 转化为虚拟调频单元,构建在 AEV 参与下系统单区域多机组负荷频率控制模型;然后,利用 VMD 将电网调频指令信号分解为含不同频率成分的本征模态函数,整合高频分量作为 AEV 的调频指令,低频分量作为火电机组群的调频指令,并通过双层 MPC 分别在 AEV 和火电机组群内部实现调频指令的优化再分配及跟踪控制;最后,对所提控制策略进行仿真验证。结果表明所提控制策略可实现对系统频率的有效调节,且兼顾了调频的经济性和动态性能。

关键词:分配策略;指令跟踪控制;集群电动汽车(AEV);变分模态分解(VMD);双层模型预测控制(MPC);负荷频率控制

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)02-0029-11

0 引言

双碳背景下,风电、光伏等间歇式新能源大规模并网,极易引起电网频率频繁波动,这就要求系统预留更多的调频备用容量,不利于电网经济运行^[1-4]。传统火电机组调频存在调节速度慢、精度低、设备易磨损等缺点,难以应对新型电力系统的频率稳定问题^[5]。随着储能技术的发展,储能成为向电网提供调频辅助服务的重要补充手段^[6-7]。储能系统参与调频控制具有响应迅速、跟踪准确等优势,但也有前期投资大、后期维护困难等困扰^[8]。

近年来,集群电动汽车(aggregate electric vehicles, AEV)作为一种需求侧资源,因方便灵活、可调潜力大、响应速度快等特点,成为缓解电力系统调频压力的新途径^[9]。目前,已有一些 AEV 参与电网调频服务的相关研究,如文献[10]构建了一种基于马尔科夫链的 AEV 聚合模型,设计了充电、放电和闲置 3 种状态的切换模式,提出了 AEV 多模式调频控制策略;文献[11]构建了基于改进时间延迟环节的 AEV 参与电网调频的动态模型,研究了不同时间延迟参数对调频动态特性的影响。但这些研究均利用 AEV 直接响应调度中心下发的自动发电控制(automatic generation control, AGC)调频指令,并未考虑调频需求在 AEV 和其他调频单元之间的协调分

配,无法充分发挥 AEV 参与电网调频的优势。文献[12]先将火电机组按常规流程响应 AGC 指令,然后采用经验模态分解对调频功率偏差进行高、中、低频分解,以此作为超级电容器、蓄电池、AEV 的参考出力。可见,协调分配调频指令,并采用不同类型资源进行响应,能显著提升调频控制的效果,因而研究合理的调频指令分配策略至关重要。

合理的控制方法是 AEV 参与频率调控的另一个关键点。传统电力系统负荷频率控制(load frequency control, LFC)大都采用比例积分微分(proportional integral derivative, PID)控制,但由于控制参数多、系统状态约束多且动态变化, PID 控制的过渡时间较长、控制性能较弱^[13]。模型预测控制(model predictive control, MPC)是一种能综合考虑系统变量约束、处理复杂多变量系统的优化控制算法,具有较好的鲁棒性^[14-17],已被广泛应用于电力系统控制领域。文献[18]提出了大规模电池储能和火电机组协调响应 AGC 指令的双层控制策略,基于 MPC 实现了下层频率分布式优化控制;文献[19]将风电和储能相结合,提出了基于 MPC 的风储联合调频策略。当前研究主要将 MPC 应用于储能系统或风储联合系统,鲜少用于 AEV 频率控制,且大都使用常规 MPC,而常规 MPC 重点关注跟踪性能,往往忽略了调频的经济成本问题。

基于此,针对电动汽车资源丰富且可作为独立调频主体的区域,文中提出了基于变分模态分解

收稿日期:2022-10-03;修回日期:2022-12-24

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFE0122200)

(variational mode decomposition, VMD) 和双层 MPC 的 AEV 参与系统调频控制策略。首先,建立火电机组及 LFC 模型,将 AEV 转化为虚拟调频单元,建立系统单区域多机组 LFC 模型;然后,通过 VMD 将原始调频指令分解为低频与高频分量,将其分别作为传统机组和 AEV 调频主体的响应指令;接着,利用双层 MPC 算法,上层通过经济模型预测控制(economic model predictive control, EMPC)对高、低频指令进行再分配,下层利用 MPC 完成频率的动态调节;最后,仿真验证了该控制策略既可优化系统运行的经济性,又可改善系统频率的动态调节性能。

1 单区域多机组 LFC 系统建模

以典型单区域多机组系统为研究对象,建立 AEV 联合传统火电机组的频率协调优化控制结构,如图 1 所示。该区域包括 v 台传统火电调频机组和 n 个 AEV 调频单元,每个 AEV 调频单元是由充电功率、充电效率、电池容量等特性参数相近的电动汽车集群聚合形成的^[10]。图 1 中, Δu_g 、 Δu_{ev} 分别为传统火电机组群和 AEV 调频主体的总调频指令; $\Delta u_{g,i}$ 、 $\Delta u_{ev,j}$ 分别为火电机组 i 和 AEV 调频单元 j 的调频指令($i=1,2,\dots,v;j=1,2,\dots,n$); $T_{g,i}$ 、 R_i 分别为机组 i 调速器时间常数和调差系数; $\Delta P_{g,i}$ 、 $\Delta P_{m,i}$ 、 ΔP_m 分别为机组 i 调速器阀门偏差量、机组 i 出力偏差量和所有火电机组出力偏差量; $T_{m,i}$ 为机组 i 汽轮机时间常数; $\Delta P_{ev,j}$ 、 ΔP_{ev} 分别为调频单元 j 和整个 AEV 调频主体的出力偏差量; ΔP_L 、 Δf 分别为负荷扰动和频率偏差; D_L 、 M_L 分别为负荷阻尼系数和系统惯性常数; B_L 为系统频率偏差系数。

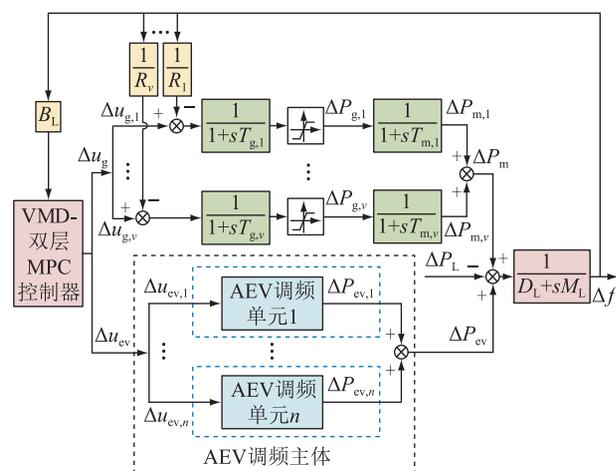


图 1 单区域多机组调频系统控制结构

Fig.1 Control structure of single area multi-unit frequency modulation system

1.1 火电机组模型及 LFC 模型

调速器的动态响应模型如式(1)所示。

$$\Delta \dot{P}_{g,i} = -\frac{1}{T_{g,i}} \Delta P_{g,i} + \frac{1}{T_{g,i}} \left(\Delta u_{g,i} - \frac{\Delta f}{R_i} \right) \quad (1)$$

汽轮机的动态响应模型为:

$$\Delta \dot{P}_{m,i} = -\frac{1}{T_{m,i}} \Delta P_{m,i} + \frac{1}{T_{m,i}} \Delta P_{g,i} \quad (2)$$

AEV 参与下的区域负荷频率偏差动态特性为:

$$\Delta \dot{f} = -\frac{D_L}{M_L} \Delta f + \left(\sum_i \Delta P_{m,i} + \sum_j \Delta P_{ev,j} - \Delta P_L \right) / M_L \quad (3)$$

1.2 AEV 调频单元模型

作为一种虚拟调频机组,AEV 应及时、准确地跟踪调频指令。因此,文中基于文献[10]提出的 AEV 多状态切换聚合模型和 MPC 底层控制器来构建 AEV 调频单元模型。

1.2.1 AEV 多状态切换聚合模型

根据电动汽车是否接入电源系统,可将其运行状态分为不可控的行驶状态和连接状态,连接状态又可进一步划分为 5 种状态,即可控充电状态、可控放电状态、可控闲置状态、不可控充电状态和充电完成状态。

采用荷电状态(state of charging, SOC)来表示电池的剩余电量,将其记为状态 S ,可控状态判别指标 ζ_c 可定义为:

$$\zeta_c = T_e - [(S_e - S_i)C_{ev}] / (P_{ch}\eta_{ch}) \quad (4)$$

式中: T_e 为用户预期充电时长; S_e 、 S_i 分别为用户期望充电完成时的 SOC 和当前 SOC; C_{ev} 为电动汽车的电池容量; P_{ch} 、 η_{ch} 分别为充电功率与充电效率。当 $\zeta_c > 0$ 时,该电动汽车充电时间充足,处于可控状态;当 $\zeta_c = 0$ 时,电动汽车必须强制充电,否则无法在预期时长内满足充电需求。

聚合模型通过切换处于可控状态的电动汽车运行状态来调节聚合功率,为电网提供辅助服务。AEV 的充电过程是指负荷从低 SOC 区间向高 SOC 区间动态转移的过程,其离散时间下的递推公式可表示为:

$$S(k+1) = S(k) + P_{ch}(k)\eta_{ch}\Delta t / C_p \quad (5)$$

式中: $S(k)$ 、 $S(k+1)$ 分别为 k 时刻、 $k+1$ 时刻的 SOC; Δt 为离散时间间隔; C_p 为实际电池容量。由式(5)可知,SOC 是一个关于时间的随机过程,且满足如下性质: $S(k+1)$ 的概率分布与电动汽车的历史充电状态无关,仅取决于 k 时刻电动汽车的状态,即满足马尔科夫性。因此,文中将电动汽车的 SOC 离散化为数个状态空间,通过马尔科夫链表示各状态区间内负荷的动态转移过程。

将电动汽车充电过程的 SOC 离散为 N 个状态

区间,并用各状态间的动态转移概率表征 AEV 的负荷动态转移过程,相邻 SOC 区间负荷的概率转移过程以及转移概率计算方法详见文献[10]。充电负荷动态转移过程的状态空间表达式为:

$$\mathbf{x}_c(k+1) = \mathbf{A}_1 \mathbf{x}_c(k) + \mathbf{P}_c \mathbf{x}_c(k) + \boldsymbol{\psi}_c(k) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x}_c(k) = [x_c(k,1) \ x_c(k,2) \ \cdots \ x_c(k,N)]^T$, 为各 SOC 区间 AEV 充电负荷组成的 N 维列向量; $\boldsymbol{\psi}_c(k) = [\varphi_c(k,1) \ \varphi_c(k,2) \ \cdots \ \varphi_c(k,N)]^T$, 为各区间充电负荷的干扰量组成的 N 维列向量。当未对 AEV 施加任何充电功率时,各 SOC 区间的负荷量不发生任何变化,该过程为闲置状态,可由闲置转移矩阵 \mathbf{A}_1 进行描述, \mathbf{A}_1 为 N 维单位矩阵。当对 AEV 施加充电功率时,各 SOC 区间的负荷会发生强制转移,该过程可由充电强制转移矩阵 \mathbf{P}_c 来进行描述。AEV 充电过程中,状态转移矩阵 $\mathbf{A}_c = \mathbf{A}_1 + \mathbf{P}_c$ 。

经过进一步整理,可推导出 N 维 AEV 充电负荷聚合模型为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_c(k+1) = \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c(k) + \boldsymbol{\psi}_c(k) \\ y_c(k) = \mathbf{P}_{ch} \mathbf{C}_c \mathbf{x}_c(k) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $y_c(k)$ 为 k 时刻 AEV 的聚合输出功率; \mathbf{C}_c 为输出矩阵,为 N 维单位行向量。

闲置和放电状态的聚合建模过程与充电状态类似,因此具体过程不再赘述。

多状态切换聚合模型的本质是通过切换电动汽车的运行状态,有序协调充电、放电、闲置 3 种运行状态下的负荷数量,以达到调节聚合功率的目的。3 种状态的自由演化部分由状态转移矩阵 \mathbf{A}_{ev} 来描述;状态间的切换部分可作为控制量,由控制矩阵 \mathbf{B}_{ev} 来描述;聚合功率输出部分由输出行向量 \mathbf{C}_{ev} 来描述;干扰量部分由干扰列向量 $\boldsymbol{\psi}_{ev}(k)$ 来描述。结合电动汽车各状态聚合模型,可得多状态切换聚合模型为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_c(k+1) \\ \mathbf{x}_1(k+1) \\ \mathbf{x}_d(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{ev} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_c(k) \\ \mathbf{x}_1(k) \\ \mathbf{x}_d(k) \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{ev} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1(k) \\ \mathbf{u}_2(k) \\ \mathbf{u}_3(k) \end{bmatrix} + \boldsymbol{\psi}_{ev}(k) \\ Y_{ev}(k) = \mathbf{C}_{ev} [\mathbf{x}_c(k) \ \mathbf{x}_1(k) \ \mathbf{x}_d(k)]^T \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{x}_1(k)$ 、 $\mathbf{x}_d(k)$ 分别为闲置和放电状态下 k 时刻的负荷量,均为 N 维列向量; $\mathbf{u}_1(k)$ 、 $\mathbf{u}_2(k)$ 、 $\mathbf{u}_3(k)$ 分别为 3 种运行状态下 k 时刻的控制变量; $Y_{ev}(k)$ 为聚合输出功率。

1.2.2 MPC 底层控制器

利用 MPC 设计 AEV 的底层控制器。设 MPC 预测时域为 p ,控制时域为 m ,则模型预测输出可表示为:

$$\mathbf{Y}_p(k) = \mathbf{L}_x \mathbf{x}_{ev}(k) + \mathbf{L}_u \mathbf{U}_{ev}(k) + \mathbf{L}_\psi \boldsymbol{\psi}_{ev}(k) \quad (9)$$

式中: $\mathbf{Y}_p(k)$ 为 k 时刻系统的预测输出序列; \mathbf{L}_x 、 \mathbf{L}_u 、 \mathbf{L}_ψ 分别为状态预测矩阵、控制预测矩阵和扰动预测矩阵; $\mathbf{x}_{ev}(k) = [\mathbf{x}_c(k) \ \mathbf{x}_1(k) \ \mathbf{x}_d(k)]^T$, 为 3 种运行状态的复合状态变量; $\mathbf{U}_{ev}(k)$ 为 k 时刻模型的预测控制序列。

$$\mathbf{Y}_p(k) = [y(k+1|k) \ \cdots \ y(k+p|k)]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{U}_{ev}(k) = [\mathbf{u}_{ev}(k|k) \ \cdots \ \mathbf{u}_{ev}(k+m-1|k)]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{L}_x = [\mathbf{C}_{ev} \mathbf{A}_{ev} \ \mathbf{C}_{ev} \mathbf{A}_{ev}^2 \ \cdots \ \mathbf{C}_{ev} \mathbf{A}_{ev}^p]^T \quad (12)$$

$$\mathbf{L}_\psi = [\mathbf{C}_{ev} \ \mathbf{C}_{ev} \mathbf{A}_{ev} \ \cdots \ \mathbf{C}_{ev} \mathbf{A}_{ev}^{p-1}]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{L}_u = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ev} \mathbf{B}_{ev} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{ev} \mathbf{A}_{ev} \mathbf{B}_{ev} & \mathbf{C}_{ev} \mathbf{B}_{ev} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}_{ev} \mathbf{A}_{ev}^{m-1} \mathbf{B}_{ev} & \mathbf{C}_{ev} \mathbf{A}_{ev}^{m-2} \mathbf{B}_{ev} & \cdots & \mathbf{C}_{ev} \mathbf{B}_{ev} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: $y(k+p|k)$ 为预测时域 p 下的输出功率; $\mathbf{u}_{ev}(k+m-1|k)$ 为控制时域 m 下的输出变量。

寻找 MPC 中最优控制变量可描述为求解满足一定约束的最优规划问题,然后取第一组控制变量作用于系统进行反馈校正,如此循环滚动,即可实现 AEV 的输出功率调整^[10]。

结合 AEV 多状态切换聚合模型和 MPC 底层控制器构成 AEV 调频单元模块,其结构如图 2 所示。其中 $T_{ev,j}$ 为调频单元 j 的响应时间常数。

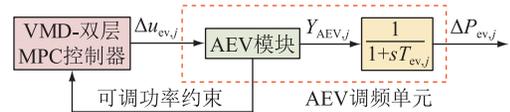


图 2 AEV 调频单元结构

Fig.2 AEV frequency regulation unit structure

VMD-双层 MPC 控制器输出 AEV 调频单元 j 的控制指令 $\Delta u_{ev,j}$, AEV 模块接收到调频指令后,经底层控制器调节聚合模型输出功率 $Y_{AEV,j}$ 来跟踪指令。与此同时,聚合模型更新各状态变量,计算下个时刻 AEV 的可调功率范围,并以此作为约束条件反馈给 VMD-双层 MPC 控制器。为了便于分析控制策略的有效性,不考虑调频指令的通信延时,并用一阶惯性环节来描述电动汽车电池的动态响应特性^[20]。须指出的是,上述过程均为 AEV 的内部控制过程,对调度而言,AEV 可被看作为虚拟调频机组,则在调频控制过程中,AEV 调频单元 j 的模型可描述为:

$$\Delta \dot{P}_{ev,j} = -\frac{1}{T_{ev,j}} \Delta P_{ev,j} + \frac{1}{T_{ev,j}} \Delta u_{ev,j} \quad (15)$$

1.3 单区域多机组 LFC 系统模型

基于前文所建 LFC 系统各模块模型,可得该系统的状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{D}\mathbf{w}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{x}(k) = [\Delta P_{g,1} \ \Delta P_{m,1} \ \dots \ \Delta P_{g,v} \ \Delta P_{m,v} \ \Delta P_{ev,1} \ \dots \ \Delta P_{ev,n} \ \Delta f]^T$, 为状态变量; $\mathbf{u}(k) = [\Delta u_{g,1} \ \dots \ \Delta u_{g,v} \ \Delta u_{ev,1} \ \dots \ \Delta u_{ev,n}]^T$, 为系统控制变量; $\mathbf{w}(k)$ 为扰动变量, 文中表示负荷扰动; $\mathbf{y}(k)$ 为输出向量; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 分别为系统状态矩阵、控制矩阵、输出矩阵和扰动矩阵, 具体元素表达式如式(17)一式(20)所示。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{g,1}} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{1}{T_{g,1}R_1} \\ \frac{1}{T_{m,1}} & -\frac{1}{T_{m,1}} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -\frac{1}{T_{g,v}} & 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{1}{T_{g,2}R_2} \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{T_{m,v}} & -\frac{1}{T_{m,v}} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \frac{1}{T_{ev,1}} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{T_{ev,n}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_L} & \dots & 0 & \frac{1}{M_L} & \frac{1}{M_L} & \dots & \frac{1}{M_L} & -\frac{D_L}{M_L} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1/T_{g,1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1/T_{g,v} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1/T_{ev,1} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1/T_{ev,n} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & B_L \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{D} = \left[0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ -\frac{1}{M_L} \right]^T \quad (20)$$

2 基于 VMD-双层 MPC 的调频控制策略

2.1 基于 VMD 的调频指令初级分配

传统火电机组受蒸汽压力、爬坡率等限制,难以满足调频的高精度与高实时性要求。而电动汽车采用电池储能技术,可充分利用其快速响应特性缓解传统机组的调频压力。因此,文中通过 VMD 将原始调频信号分解并整合为不同频率成分的信号,低频部分由火电机组响应,高频部分则由 AEV 响应。

VMD 是一种自适应、完全非递归的信号处理方法^[21],其核心思想是构建和求解变分问题。若将调频信号分解为 Z 个频率不同的子分量,且各个子分量的估计带宽之和最小,约束条件为各分量之和等于原始调频指令,则相应约束变分问题构造如下:

$$\begin{cases} \min_{\{h_z\}, \{\varphi_z\}} \left\{ \sum_z \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * h_z(t) \right] e^{-j\varphi_z t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \quad \sum_{z=1}^Z h_z = f \end{cases} \quad (21)$$

式中: ∂_t 为梯度运算; $\delta(t)$ 为单位脉冲函数; h_z 、 φ_z 分别为第 z 个模态分量和其中心频率; Z 为分解出的本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)个数; f 为调频指令信号。

为求解式(21)所示的约束型变分问题,可引入 Lagrange 乘法法将其转化为非约束型变分问题,形成增广 Lagrange 函数如下:

$$\begin{aligned} L(\{h_z\}, \{\varphi_z\}, \lambda) = & \alpha \sum_z \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * h_z(t) \right] e^{-j\varphi_z t} \right\|_2^2 + \\ & \left\| f(t) - \sum_z h_z(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_z h_z(t) \right\rangle \end{aligned} \quad (22)$$

式中: λ 为 Lagrange 乘子; α 为惩罚因子。

利用交替方向乘子迭代算法交替更新 $h_{z,r+1}$ 、 $\varphi_{z,r+1}$ 和 $\lambda_{z,r+1}$ (r 为迭代次数),搜寻增广 Lagrange 函数的鞍点。第 $r+1$ 次迭代时第 z 个模态分量 $h_{z,r+1}$ 的表达如下:

$$\begin{aligned} h_{z,r+1} = & \operatorname{argmin} \left\{ \alpha \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * h_z(t) \right] e^{-j\varphi_z t} \right\|_2^2 + \right. \\ & \left. \left\| f(t) - \sum_b h_b(t) + \lambda(t)/2 \right\|_2^2 \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

式中: $\sum_b h_b(t) = \sum_{b \neq z} h_{b,r+1}(t)$, $h_{b,r+1}$ 为第 $r+1$ 次迭

代时第 b 个模态分量。

更新各子分量及其中心频率的频域:

$$\hat{h}_{z,r+1}(\varphi) = \frac{\hat{f}(\varphi) - \sum_{b \neq z} \hat{h}_b(\varphi) + \hat{\lambda}(\varphi)/2}{1 + 2\alpha(\varphi - \varphi_z)^2} \quad (24)$$

$$\varphi_{z,r+1} = \int_0^\infty \varphi |\hat{h}_z(\varphi)|^2 d\varphi / \int_0^\infty |\hat{h}_z(\varphi)|^2 d\varphi \quad (25)$$

式中: $\hat{h}_{z,r+1}(\varphi)$ 、 $\hat{f}(\varphi)$ 、 $\hat{h}_b(\varphi)$ 、 $\hat{\lambda}(\varphi)$ 分别为 $h_{z,r+1}(t)$ 、 $f(t)$ 、 $h_b(t)$ 、 $\lambda(t)$ 的傅里叶变换; $\varphi_{z,r+1}$ 为当前模态分量的中心频率。对 $\hat{h}_z(\varphi)$ 进行傅里叶逆变换, 其实部即为 $h_z(t)$ 。

λ 的更新公式如式(26)所示, 其中 τ 为常数。

$$\hat{\lambda}_{r+1}(\varphi) \leftarrow \hat{\lambda}_r(\varphi) + \tau \left(\hat{f}(\varphi) - \sum_z \hat{h}_{z,r+1}(\varphi) \right) \quad (26)$$

对于精度收敛判据 $e > 0$, 当满足条件 $\sum_z \|\hat{h}_{z,r+1}(\varphi) - \hat{h}_{z,r}(\varphi)\|_2^2 / \|\hat{h}_{z,r}(\varphi)\|_2^2 < e$ 时, 停止迭代。

经 VMD 处理, 原始调频指令信号被分解为 Z 个频率不同的 IMF 分量, 整合其中的低频分量作为火电机组的响应指令 P_g^L , 高频分量作为 AEV 的响应指令 P_{ev}^H :

$$\begin{cases} P_g^L(t) = \sum_{z=1}^{z_1} h_z(t) \\ P_{ev}^H(t) = \sum_{z=z_1+1}^Z h_z(t) \end{cases} \quad (27)$$

式中: z_1 为高、低频分量的临界值, 选取原则即在 AEV 的总可调功率范围内, 承担尽可能多的高频分量。

定义 $\Delta P_g^{\max}(t)$ 、 $\Delta P_g^{\min}(t)$ 分别为 t 时刻火电机组可调功率上限和下限, $P_g^L(t) \in [\Delta P_g^{\min}(t), \Delta P_g^{\max}(t)]$; $\Delta P_{ev}^{\max}(t)$ 、 $\Delta P_{ev}^{\min}(t)$ 分别为 t 时刻 AEV 可调功率上限和下限, $P_{ev}^H(t) \in [\Delta P_{ev}^{\min}(t), \Delta P_{ev}^{\max}(t)]$ 。当火电机组、AEV 的可调功率满足各自的调频需求时, 火电机组与 AEV 跟踪各自的调频信号。但当其中一者调频能力不足时, 则由另一调频资源承担相应欠调部分。若当火电机组和 AEV 的总可调功率无法满足调频需求时, 由于无法实现就地功率平衡, 则该区域须通过联络线与其他区域进行能量交互以完成调频。因此, 文中将重点研究可调功率范围充足时的出力分配问题。

2.2 基于双层 MPC 的协同控制策略

2.2.1 双层 MPC 框架

随着 MPC 技术的不断发展, MPC 已从集中式 MPC、分散式 MPC、分布式 MPC 等传统单层控制结

构逐步扩展为双层 MPC 结构^[22], 如图 3 所示。上层结合各资源经济性指标及相关约束, 通过 EMPC 将调频指令分解为各机组的最优跟踪指令 ΔP_i , 实现稳态经济设定值的优化; 下层则通过 MPC 实现动态频率优化控制, 使区域频率波动恢复稳定并驱使各机组完成指令跟踪。双层 MPC 实现了经济优化与动态控制的逐级递进, 有效兼顾了频率调节过程的经济性和良好的跟踪性能。

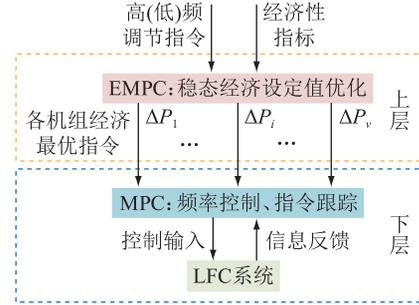


图 3 双层 MPC 框架

Fig.3 Double-layer MPC framework

2.2.2 上层 EMPC 设计——指令再分配层

上层通过 EMPC 进行指令再分配是为了协调区域内多机组出力, 实现经济优化和功率平衡目标。2.1 节中已通过 VMD 将原始调频指令信号分解为高、低频信号 P_{ev}^H 、 P_g^L , 指令再分配层则是对 P_{ev}^H 、 P_g^L 进一步分配得到每个调频机组和 AEV 调频单元的最优跟踪指令。为此, 可构建如下离散模型:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_s(k+1) = \mathbf{A}_s \mathbf{x}_s(k) + \mathbf{B}_s \mathbf{u}_s(k) \\ \mathbf{y}_s(k) = \left[\sum_{i=1}^v \Delta P_{g,i}(k) \quad \sum_{j=1}^n \Delta P_{ev,j}(k) \right]^T \end{cases} \quad (28)$$

式中: $\mathbf{x}_s(k) = [P_{g,1}(k) \cdots P_{g,v}(k) P_{ev,1}(k) \cdots P_{ev,n}(k)]^T$, 为由多个调频资源的出力构成的状态向量; $\mathbf{u}_s(k) = [\Delta P_{g,1}(k) \cdots \Delta P_{g,v}(k) \Delta P_{ev,1}(k) \cdots \Delta P_{ev,n}(k)]^T$, 为由调频资源出力偏差量构成的控制向量; $\mathbf{y}_s(k)$ 为输出向量, 由火电机组和 AEV 的出力偏差总和构成; \mathbf{A}_s 、 \mathbf{B}_s 分别为状态矩阵和控制矩阵, 均为适维单位矩阵。

以离散模型为控制对象, 设预测时域为 p_s , 控制时域为 m_s , 可得系统 p_s 个步长后的预测状态变量 $\mathbf{x}_s(k+p_s | k)$ 和输出变量 $\mathbf{y}_s(k+p_s | k)$ 。

对于火电机组而言, 其发电成本主要来源于煤耗量和 CO_2 排放量, 其成本函数 $\lambda_{g,i}$ 可由二次函数描述, 如式(29)所示。

$$\lambda_{g,i}(P_{g,i}(k)) = (s_e + s_f)(a_{g,i} P_{g,i}^2(k) + b_{g,i} P_{g,i}(k) + c_{g,i}) \quad (29)$$

式中: $P_{g,i}(k)$ 为火电机组 i 的初始功率值 $\bar{P}_{g,i}(k)$

与稳态功率偏差 $\Delta P_{g,i}(k)$ 之和; s_e 、 s_f 分别为燃料成本和 CO_2 排放成本系数; $a_{g,i}$ 、 $b_{g,i}$ 、 $c_{g,i}$ 为机组 i 的煤耗特性系数。

AEV 作为可调负荷,其调节成本主要来源于电池损耗以及与电网互动的电费成本,则 AEV 的调节成本 $\lambda_{ev,j}$ 也可描述为二次函数^[23]:

$$\lambda_{ev,j}(P_{ev,j}(k)) = a_{ev,j}P_{ev,j}^2(k) + b_{ev,j}P_{ev,j}(k) \quad (30)$$

式中: $P_{ev,j}(k)$ 为调频单元 j 的初始功率值 $\bar{P}_{ev,j}(k)$ 与稳态功率偏差 $\Delta P_{ev,j}(k)$ 之和; $a_{ev,j}$ 、 $b_{ev,j}$ 分别为 AEV 调频单元 j 的电池损耗与电价成本系数。

由此可得 k 时刻系统的经济性指标 $\sigma(k)$ 为:

$$\sigma(k) = \sum_{i=1}^v \lambda_{g,i}(P_{g,i}(k)) + \sum_{j=1}^n \lambda_{ev,j}(P_{ev,j}(k)) \quad (31)$$

则 k 时刻系统的总优化目标函数 $J(k)$ 为:

$$J(k) = \sigma(k) + \left(\sum_{i=1}^v \Delta P_{g,i}(k) - P_g^L(k) \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^n \Delta P_{ev,j}(k) - P_{ev}^H(k) \right)^2 + \tau_g^{\max} \quad (32)$$

式中:第一项为成本项,目的是减少调节成本;2 个平方项为误差项,目的是保证火电机组与 AEV 可以较好地跟踪各自的调频指令; τ_g^{\max} 为机组最大爬坡时间,目的是加快系统整体调节速度。

由此,形成了上层 EMPC 设计的指令再分配层,其目标函数和约束条件如式(33)所示。其中,等式约束为功率平衡方程;不等式约束则为防止机组或 AEV 调节功率越限。

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{u}_s(k+w|k)} \sum_{l=1}^{p_s} J(k+l|k) \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^v \Delta P_{g,i}(k+l|k) + \sum_{j=1}^n \Delta P_{ev,j}(k+l|k) = \\ \quad P_g^L(k) + P_{ev}^H(k) \\ \Delta P_{g,i}^{\min}(k) \leq \Delta P_{g,i}(k+l|k) \leq \Delta P_{g,i}^{\max}(k) \\ \Delta P_{ev,j}^{\min}(k) \leq \Delta P_{ev,j}(k+l|k) \leq \Delta P_{ev,j}^{\max}(k) \\ l = 1, 2, \dots, p_s \end{cases} \quad (33)$$

式中: $w=1, 2, \dots, m_s$; $J(k+l|k)$ 、 $\Delta P_{g,i}(k+l|k)$ 、 $\Delta P_{ev,j}(k+l|k)$ 分别为未来 l 个时刻的目标函数、机组出力增量、AEV 调频单元出力增量; $\Delta P_{g,i}^{\max}$ 、 $\Delta P_{g,i}^{\min}$ 分别为火电机组 i 的可调功率上限和下限; $\Delta P_{ev,j}^{\max}$ 、 $\Delta P_{ev,j}^{\min}$ 分别为 AEV 调频单元 j 的可调功率上限和下限。

基于上述分析, k 时刻指令分配问题可描述为

式(32)所示最优规划问题。求解该规划问题即可得到最优控制序列 $\mathbf{u}_s(k)$,将其作为控制指令代入系统反馈校正,如此循环滚动优化,最终实现多机组间高、低频信号分量的优化再分配。

2.2.3 下层 MPC 设计——动态控制层

双层 MPC 的频率动态控制层是根据上层所得功率分配结果对各机组进行控制,实现有功功率平衡与频率稳定。上层所得控制向量 $\mathbf{u}_s(k)$ 即为下层控制中各机组和 AEV 调频单元最优出力参考值向量 $\Delta \mathbf{P}^{\text{ref}} = [\Delta P_{g,1}^{\text{ref}}(k) \ \dots \ \Delta P_{g,v}^{\text{ref}}(k) \ \Delta P_{ev,1}^{\text{ref}}(k) \ \dots \ \Delta P_{ev,n}^{\text{ref}}(k)]^T$ 。

首先,将式(16)所示模型进行离散化:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{D}\mathbf{w}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (34)$$

设预测时域为 p_b ,控制时域为 m_b ,根据 k 时刻状态信息以及式(34)所示的离散模型可得模型预测输出序列 $\mathbf{Y}_{p_b}(k)$ 和控制序列 $\mathbf{U}_b(k)$:

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_{p_b}(k) = \mathbf{F}_x \mathbf{x}(k) + \mathbf{F}_u \mathbf{U}_b(k) + \mathbf{F}_w \mathbf{w}(k) \\ \mathbf{Y}_{p_b}(k) = \\ \quad [\mathbf{y}(k+1|k) \ \mathbf{y}(k+2|k) \ \dots \ \mathbf{y}(k+p_b|k)]^T \\ \mathbf{U}_b(k) = \\ \quad [\mathbf{u}(k|k) \ \mathbf{u}(k+1|k) \ \dots \ \mathbf{u}(k+m_b-1|k)]^T \end{cases} \quad (35)$$

式中: \mathbf{F}_x 、 \mathbf{F}_u 、 \mathbf{F}_w 为预测矩阵; $\mathbf{y}(k+p_b|k)$ 为预测时域 p_b 下的输出变量; $\mathbf{u}(k+m_b-1|k)$ 为控制时域 m_b 下的控制变量。

频率控制层的目标为控制各调频资源跟踪最优设定值,且使系统稳态时区域控制偏差 (area control error, ACE) 为 0,由此可构造参考输出向量 $\mathbf{Y}^{\text{ref}} = [\Delta \mathbf{P}^{\text{ref}} \ 0]^T$ 。因此, k 时刻频率控制层的最优规划问题可由式(36)描述。

$$\begin{cases} \min J = \\ \quad Q_b \|\mathbf{Y}_{p_b}(k) - \mathbf{Y}^{\text{ref}}(k)\|_2 + \mathbf{U}_b^T(k) \mathbf{R}_b \mathbf{U}_b(k) \\ \text{s.t.} \Delta P_{g,i}^{\min}(k) \leq \Delta P_{g,i}(k+l|k) \leq \Delta P_{g,i}^{\max}(k) \\ \quad \Delta P_{ev,j}^{\min}(k) \leq \Delta P_{ev,j}(k+l|k) \leq \Delta P_{ev,j}^{\max}(k) \\ \quad l = 1, 2, \dots, p_b \end{cases} \quad (36)$$

式中: Q_b 、 R_b 分别为误差项与控制项的加权因子;约束条件为各调频资源可调功率范围。求解式(36),在滚动优化机制下可得到最优控制量 $\mathbf{U}_b(k)$,将其作用于系统反馈校正,最终达到各调频资源跟踪出力设定值以及频率稳定的目标。

文中提出的基于 VMD-双层 MPC 的调频控制

策略流程如图 4 所示。

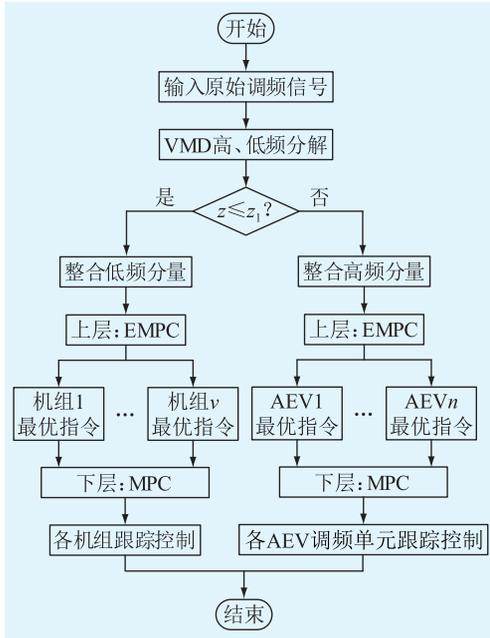


图 4 基于 VMD-双层 MPC 的调频控制策略流程
Fig.4 Flow chart of frequency regulation control strategy based on VMD and double-layer MPC

3 算例仿真及分析

3.1 算例参数设置

文中以单区域多机组系统为研究对象,假设该区域配有 3 台传统机组 (P_{G1} 、 P_{G2} 、 P_{G3}) 和 3 个 AEV 调频单元 (P_{EV1} 、 P_{EV2} 、 P_{EV3})。文中传统机组和电动汽车参数数据分别参见文献[24]和文献[10];火电机组燃料成本 s_e 和 CO_2 排放成本系数 s_f 分别为 420.1 元/t 和 201 元/t。传统机组模型参数及煤耗特性参数见表 1,其中 τ_g 为机组爬坡率。表 2 则给出了 AEV 相关参数。以上参数均已转化为以 100 MW 为基准的标么值。

表 1 传统机组模型及煤耗特性参数
Table 1 Traditional unit model and coal consumption characteristic parameters

参数	P_{G1}	P_{G2}	P_{G3}
T_g/s	0.10	0.08	0.06
T_m/s	0.20	0.32	0.30
$R/(Hz/p.u.)$	0.08	0.07	0.07
$\tau_g/(p.u./min)$	0.10	0.14	0.20
$a_g/(t^2/p.u.)$	3.10	4.20	3.60
$b_g/(t/p.u.)$	110	150	94
c_g/t	5.16	6.52	7.26

文中算例仿真在 Intel Core i5-6200U CPU @ 2.30 GHz 和 8 GB 的 RAM 计算平台上运行,并通过 Matlab 2017b 调用 Gurobi 工具箱对控制问题进行求

表 2 AEV 相关参数

Table 2 AEV parameters

参数	P_{EV1}	P_{EV2}	P_{EV3}
数量	1 000	800	1 000
P_{ch}/kW	14	7	7
T_{ev}/s	0.05	0.03	0.05
a_{ev}	80	65	88
b_{ev}	100	110	95
初始 SOC	$N(0.55,0.15)$	$N(0.50,0.10)$	$N(0.55,0.25)$
期望 SOC	$N(0.90,0.05)$	$N(0.90,0.10)$	$N(0.90,0.05)$

解。双层 MPC 控制器参数设置如下:上层功率分配层,仿真步长取 1 min,预测时域和控制时域分别取 10 和 5;下层动态控制层,为保证控制性能,仿真步长取 0.1 s,预测时域和控制时域分别取 15 和 10,误差项加权因子 Q_b 和控制项加权因子 R_b 分别取 1 和 0.1。

3.2 原始调频信号的 VMD

采用如图 5 所示国内某地区电网调频指令信号进行仿真分析^[25],该信号时长为 2 h,采样间隔为 1 min。

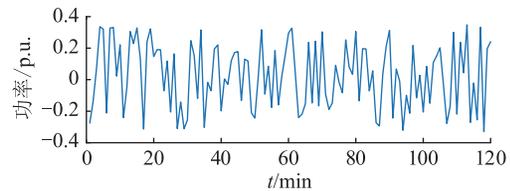


图 5 某区域电网调频指令时序

Fig.5 Sequence of frequency regulation command of a power grid

为使 VMD 后各 IMF 分量的中心频率不重叠,且 Z 值尽可能小^[21],经多次试验,最终选取 VMD 算法分解参数 $Z = 8$ 。分解后各子分量如图 6 所示。可见,经 VMD 后,原始调频指令被分解为 8 个频率由低到高的 IMF 分量。在本系统中,根据传统机组以及 AEV 调频主体的可调功率范围,将前 4 个分量 IMF1—IMF4 重构形成低频火电机组响应指令,后 4 个分量 IMF5—IMF8 重构形成高频 AEV 调频主体响应指令。

3.3 VMD-双层 MPC 控制策略仿真分析

3.3.1 调频信号断面仿真及分析

为更直观地反映文中所提 VMD-双层 MPC 控制器的调控细节,选取分解后信号的某断面进行仿真分析。所选断面原始调频信号为 0.32 p.u.,经分解后火电机组群与 AEV 应分别承担 0.19 p.u. 和 0.13 p.u. 的调频任务。

为体现文中所提双层 MPC 策略在指令再分配与调节过程中的经济性与动态性能,将其与文献

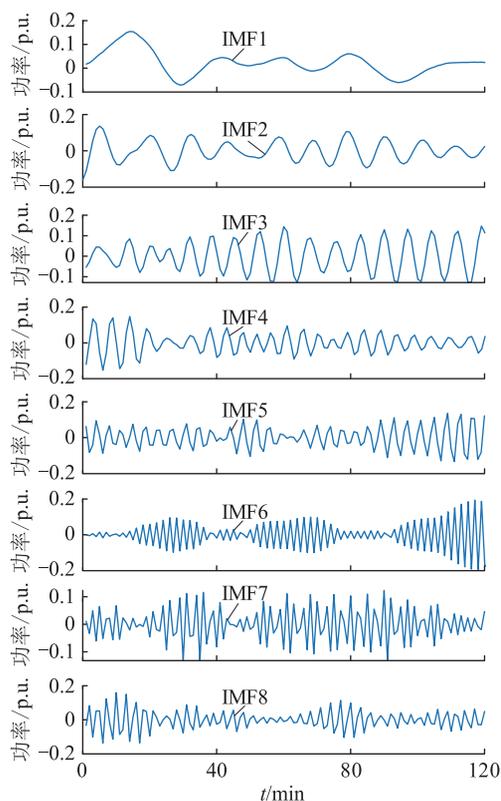


图6 VMD后各IMF分量

Fig.6 IMF components after VMD

[26]中按可调容量比例分配的控制策略进行对比分析。图7给出了不同控制策略下传统机组与AEV调频单元出力的对比结果。分析结果可知,所提控制策略与对比策略均可准确响应传统机组0.19 p.u.与AEV调频主体0.13 p.u.的调频指令,但各机组出力情况差异较大。这是因为对比策略仅依靠可调功率比例分配,而文中策略在指令再分配层中考虑了各资源调节的经济性以及传统机组的爬坡率,并在约束条件中限制了可调功率范围,使各资源在不超出可调范围的前提下获得更优的调频指令。在调节成本上,文中策略和对比策略分别为22 014.9元和22 883.2元;在最大爬坡时间上,文中策略和对比策略分别为30.0 s和48.6 s。由此可见,文中策略减少了整个频率调节过程的成本,缩短了传统机组最大爬坡时间。

图8和表3给出了不同策略下频率的动态调节过程和对比结果。可以看出,相较于对比策略,文中策略通过优化协调各机组出力,使得最大频率偏差、绝对偏差积分、调节时间指标分别减小了9.55%、24.39%、26.15%,提升了频率调节过程的动态性能。

3.3.2 连续调频信号仿真及分析

为研究中提出的VMD-双层MPC控制策略

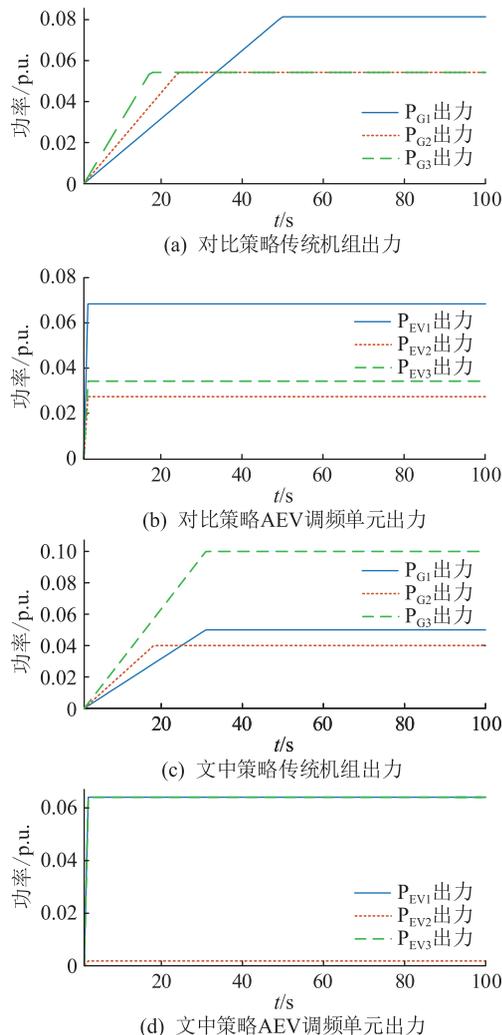


图7 不同控制策略下各调频资源出力对比结果

Fig.7 Comparison of resource output under different control strategies

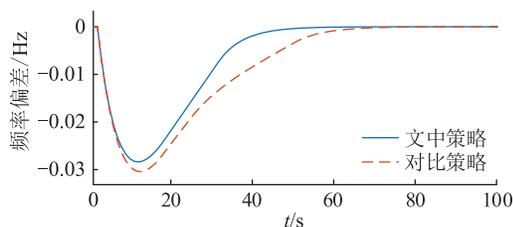


图8 不同控制策略下频率动态调节过程

Fig.8 Dynamic frequency regulation process under different control strategies

表3 不同控制策略下频率调节结果对比

Table 3 Comparison of frequency regulation results under different control strategies

控制策略	最大频率偏差/Hz	绝对偏差积分/Hz	调节时间/s
文中策略	0.028 4	1.24	48
对比策略	0.031 4	1.64	65

对频率调节动态特性的影响以及对传统机组出力的优化,根据图5所示的连续调频指令进行仿真,取

参数 $z_1 = 4$, 并与传统的比例积分 (proportional integral, PI) 控制策略进行对比分析。

图 9 给出了不同策略下传统机组出力对比结果。对比策略中机组出力变化剧烈, 且变化幅度大、频率高, 出现多次超调, 不能维持机组出力平稳。而文中策略通过 VMD 重构低频分量, 将其作为传统机组出力参考值, 并采用双层 MPC 实现指令跟踪, 使得传统机组出力更加平稳, 变化趋势更加平缓, 有利于传统机组在调频过程中的安全运行。

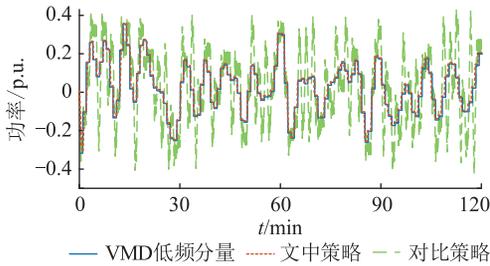


图 9 传统机组出力对比

Fig.9 Comparison of traditional unit output

连续信号的频率动态调节结果如图 10 和表 4 所示。分析可得, 对比策略中系统频率动态性能指标偏差更大, 这是由于对比策略不能充分利用电动汽车储能的快速响应特性。而文中策略将高频分量作为 AEV 调频主体的响应指令, 使得 AEV 快速为系统提供功率支撑, 弥补功率缺额, 大幅提升了系统在连续扰动下的频率动态调节性能。

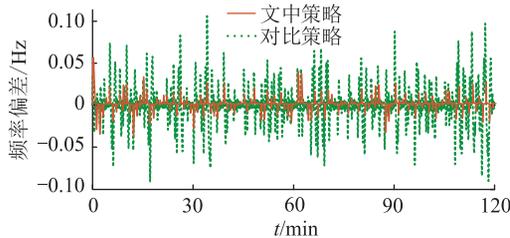


图 10 连续调频信号下频率动态调节过程

Fig.10 Dynamic frequency regulation process under FM signal

表 4 连续调频信号下频率调节结果对比

Table 4 Comparison of frequency adjustment results under FM signal Hz

控制策略	最大频率偏差	频率偏差均方根
文中策略	0.056 8	0.003 7
对比策略	0.106 2	0.010 5

4 结论

针对电动汽车资源丰富的单区域多机组系统, 提出了基于 VMD-双层 MPC 的 AEV 联合火电机组调频控制策略, 并得到以下结论:

(1) 利用 VMD 将原始调频信号分解为不同频率成分的信号, 基于提出的控制策略, AEV 和火电机组能分别准确响应高频分量和低频分量。通过对 AEV 和火电机组的差异化控制, 充分发挥了 AEV 的快速响应和调节优势, 实现了不同调频主体的优化利用。

(2) 文中提出了基于双层 MPC 的协同控制策略, 上层通过 EMPC 实现稳态经济设定值的优化, 下层通过 MPC 实现动态频率优化控制, 实现了经济优化与动态控制的逐级递进。算例分析表明, 在调频信号断面和连续调频信号 2 种情形下, 文中策略均表现出了良好的经济性和动态调节性能。

后续将考虑火电机组参与调频的响应时滞, 对含电动汽车的多区域电网调频控制策略展开进一步研究。

参考文献:

- [1] 郭嘉庆, 乔颖, 鲁宗相, 等. 考虑频率安全约束的储能-电网联合规划[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(4): 323-333.
GUO Jiaqing, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Energy storage-grid joint planning considering frequency safety constraints[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 323-333.
- [2] 文云峰, 杨伟峰, 林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 211-222.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 211-222.
- [3] 王中, 黎丽丽, 李振华, 等. 考虑新能源渗透的电网频率概率分布研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 65-73.
WANG Zhong, LI Lili, LI Zhenhua, et al. The evolution characteristics of power grid frequency probability distribution[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 65-73.
- [4] 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.
- [5] SCHÄFER B, BECK C, AIHARA K, et al. Non-Gaussian power grid frequency fluctuations characterized by Lévy-stable laws and superstatistics[J]. Nature Energy, 2018, 3(2): 119-126.
- [6] 英培, 田仕杰, 梁海平, 等. 考虑 SOC 的电池储能系统一次调频策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 107-118.
LIU Yingpei, TIAN Shijie, LIANG Haiping, et al. Control strategy of a battery energy storage system considering SOC in primary frequency regulation of power grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 107-118.

- [7] 陈雪梅,陆超,刘杰,等. 考虑调频性能考核的储能-机组联合调频控制策略[J]. 中国电机工程学报,2021,41(10):3383-3391,3664.
CHEN Xuemei,LU Chao,LIU Jie,et al. Control strategy considering AGC performance assessment for BESS coordinated with thermal power unit in AGC[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(10):3383-3391,3664.
- [8] 罗耀东,田立军,王垚,等. 飞轮储能参与电网一次调频协调控制策略与容量优化配置[J]. 电力系统自动化,2022,46(9):71-82.
LUO Yaodong,TIAN Lijun,WANG Yao,et al. Coordinated control strategy and optimal capacity configuration for flywheel energy storage participating in primary frequency regulation of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(9):71-82.
- [9] DAS H S,RAHMAN M M,LI S,et al. Electric vehicles standards,charging infrastructure,and impact on grid integration;a technological review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2020,120:109618.
- [10] 董锴,蔡新雷,崔艳林,等. 基于马尔科夫链的电动汽车聚合建模及多模式调频控制策略[J]. 电网技术,2022,46(2):622-634.
DONG Kai,CAI Xinlei,CUI Yanlin,et al. Aggregation modeling based on Markov chain and multi-mode control strategies of aggregated electric vehicles for frequency regulation[J]. Power System Technology,2022,46(2):622-634.
- [11] 孙杰,赵国瑾,刘顺桂,等. 基于改进时间延迟环节的集群电动汽车参与电网调频的动态特性研究[J]. 电网技术,2019,43(2):470-480.
SUN Jie,ZHAO Guojin,LIU Shungui,et al. Research on dynamic characteristics of electric vehicles participating in frequency regulation of power system based on improved time delay[J]. Power System Technology,2019,43(2):470-480.
- [12] 袁桂丽,苏伟芳. 计及电动汽车不确定性的虚拟电厂参与AGC调频服务研究[J]. 电网技术,2020,44(7):2538-2548.
YUAN Guili,SU Weifang. Virtual power plants providing AGC FM service considering uncertainty of electric vehicles[J]. Power System Technology,2020,44(7):2538-2548.
- [13] OSINSKI C,VILLAR LEANDRO G,DA COSTA OLIVEIRA G H. Fuzzy PID controller design for LFC in electric power systems[J]. IEEE Latin America Transactions,2019,17(1):147-154.
- [14] YU Y,LI J L,CHEN D Y. Optimal dispatching method for integrated energy system based on robust economic model predictive control considering source-load power interval prediction[J]. Global Energy Interconnection,2022,5(5):564-578.
- [15] ADEMOLA-IDOWU A,ZHANG B S. Frequency stability using MPC-based inverter power control in low-inertia power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2021,36(2):1628-1637.
- [16] ZHAI J Y,ZHOU M,DONG S X,et al. MPC-based two-stage rolling power dispatch approach for wind-integrated power system[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology,2018,13(2):648-658.
- [17] 汪洋叶,赵力航,常伟光,等. 基于模型预测控制的虚拟电厂储能系统能量协同优化调控方法[J]. 智慧电力,2021,49(7):16-22.
WANG Yangye,ZHAO Lihang,CHANG Weiguang,et al. Model predictive control based energy collaborative optimization control method for energy storage system of virtual power plant[J]. Smart Power,2021,49(7):16-22.
- [18] 张舒鹏,董树锋,徐成司,等. 大规模储能参与电网调频的双层控制策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(19):55-62.
ZHANG Shupeng,DONG Shufeng,XU Chengsi,et al. Bi-level control strategy for power grid frequency regulation with participation of large-scale energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(19):55-62.
- [19] 虞临波,寇鹏,冯玉涛,等. 风储联合发电系统参与频率响应的模型预测控制策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(12):36-43.
YU Linbo,KOU Peng,FENG Yutao,et al. Model predictive control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(12):36-43.
- [20] 黄际元,李欣然,曹一家,等. 面向电网调频应用的电池储能电源仿真模型[J]. 电力系统自动化,2015,39(18):20-24,74.
HUANG Jiyuan,LI Xinran,CAO Yijia,et al. Battery energy storage power supply simulation model for power grid frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(18):20-24,74.
- [21] 刘云凯,彭显刚,袁浩亮,等. 基于VMD与改进QRGRU的超短期风电功率概率预测[J]. 电力工程技术,2021,40(3):72-77.
LIU Yunkai,PENG Xian'gang,YUAN Haoliang,et al. Ultra-short-term wind power probability prediction based on VMD and improved QRGRU[J]. Electric Power Engineering Technology,2021,40(3):72-77.
- [22] PAN H G,ZHONG W M,WANG Z Y. Economic optimization and control based on multi priority rank RTO and double layered MPC[J]. Asian Journal of Control,2018,20(6):2271-2280.
- [23] 李清,张孝顺,余涛,等. 电动汽车充换电站参与电网AGC功率分配的成本一致性算法[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):80-87,95.
LI Qing,ZHANG Xiaoshun,YU Tao,et al. Cost consensus algorithm of electric vehicle charging station participating in AGC power allocation of grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(3):80-87,95.
- [24] 廖小兵,刘开培,乐健,等. 基于双层模型预测结构的跨区域AGC机组协同控制策略[J]. 中国电机工程学报,2019,39(16):4674-4685,4970.
LIAO Xiaobing,LIU Kaipei,LE Jian,et al. Coordinated control strategy for AGC units across areas based on bi-level model

- predictive control [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (16):4674-4685,4970.
- [25] 李卫国,焦盘龙,刘新宇,等. 基于变分模态分解的储能辅助传统机组调频的容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(6):43-52.
- LI Weiguo, JIAO Panlong, LIU Xinyu, et al. Capacity optimization configuration of energy storage auxiliary traditional unit frequency modulation based on variational mode decomposition [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48 (6): 43-52.
- [26] LIU H, HU Z C, SONG Y H, et al. Vehicle-to-grid control for supplementary frequency regulation considering charging demands [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30 (6):3110-3119.

作者简介:



余洋

余洋(1982),男,博士,副教授,研究方向为电力储能技术、柔性负荷建模与调度(E-mail:yym0401@163.com);

王紫阳(1997),男,硕士在读,研究方向为智能电网;

张瑞丰(1997),男,硕士,研究方向为主动配电网、车网互动。

Combined frequency regulation control of electric vehicles and thermal power units based on VMD and MPC

YU Yang¹, WANG Ziyang¹, ZHANG Ruifeng¹, WEN Bo¹, YU Zongzhe¹, CAI Xinlei²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 2. Electric Power Dispatching Control Center of Guangdong Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: Reasonable signal allocation strategy and effective signal tracking control method are the keys to using aggregate electric vehicles (AEVs) combined with thermal power units to perform the control, improve the quality, and enhance the economy in frequency regulation. Therefore, a frequency regulation control strategy with the participation of AEVs is proposed based on variational mode decomposition (VMD) and double-layer model predictive control (MPC). Firstly, the coordinated optimization control structure of AEVs combined with traditional thermal power units is designed for frequency regulation. The models for thermal power units and load frequency control are established. The AEVs are converted into virtual frequency regulation units, and the load frequency control model of single-area multi-unit with the participation of AEV is constructed. Then, the frequency regulation signal is decomposed into intrinsic mode functions with different frequency components using VMD. The high-frequency components and the low-frequency components are integrated as the frequency regulation signals of AEVs and thermal power units respectively. Optimal redistribution and tracking control of frequency regulation signals within AEVs and thermal power units are realized by double-layer MPC, respectively. Finally, the proposed control strategy is verified by the simulations, and the results show that it can adjust the system frequency effectively and keep a balance between the economy and dynamic performance in frequency regulation.

Keywords: allocation strategy; signal tracking control; aggregate electric vehicle (AEV); variational mode decomposition (VMD); double-layer model predictive control (MPC); load frequency control

(编辑 陆海霞)