

含广域混合储能互联电力系统的负荷频率控制

鲁志远, 刘世林, 范保程, 孙 波

(高端装备先进感知与智能控制教育部重点实验室(安徽工程大学), 安徽 芜湖 241000)

摘 要:为解决电力系统调频存在的灵活性资源不足和调节特性欠佳问题, 针对抽水蓄能和电池储能广域接入情况下的互联电力系统, 提出一种基于分布式模型预测控制的负荷频率协调优化控制方法。首先, 根据互联电力系统中各主要元件的频率响应特性, 建立互联电力系统频率响应的状态空间模型; 然后, 充分考虑系统受到的各种约束, 确定优化控制目标, 分别对各区域的控制器进行设计; 最后, 对所提负荷频率协调优化控制方法的可行性和有效性进行仿真验证。结果显示该方法不仅对广域混合储能互联电力系统的频率响应特性有很好的改善, 而且当系统频率发生变化时, 能够使不同储能形式进行合理的响应。

关 键 词:广域混合储能; 互联电力系统; 负荷频率控制; 分布式模型预测控制; 状态空间模型

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.06.010 中图分类号: TM76 文章编号: 1673-9140(2023)06-0096-09

Load frequency control of interconnected power system with wide-area hybrid energy storage

LU Zhiyuan, LIU Shilin, FAN Baocheng, SUN Bo

(Key Laboratory of Advanced Perception and Intelligent Control of High-end Equipment, Ministry of Education

(Anhui Polytechnic University), Wuhu 241000, China)

Abstract: In order to solve the problems of insufficient flexible resources and poor regulation characteristics of power system frequency regulation, a load frequency coordination optimization control method based on distributed model predictive control is proposed for the interconnected power system with the wide-area access of pumped storage and battery energy storage. Firstly, according to the frequency response characteristics of the main components in the interconnected power system, the state space model of the frequency response of the interconnected power system is established. Then, taking into account the constraints on the system, the optimal control targets are determined, and the controllers are designed in each area, respectively. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed load frequency coordinated optimization control method are verified in simulation. The results show that the method not only improves the frequency response characteristics of the wide-area hybrid energy storage interconnected power system, but also enables different energy storage forms to respond reasonably when the system frequency changes.

Key words: wide-area hybrid energy storage; interconnected power system; load frequency control; distributed model predictive control; state space model

收稿日期: 2022-09-26; 修回日期: 2023-04-27

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目(202004a05020014)

通信作者: 刘世林(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事智能电网运行与控制、储能技术等研究; E-mail: sl.liu@ahpu.edu.cn

随着可再生能源的规模化接入,电力系统的调频资源不足和调节特性欠佳问题日益突出。在未来电力系统调频过程中,如何加入更多的清洁能源是一大难点,储能具有功率双向调节、配置灵活等优点,在电力系统负荷频率控制领域中受到广泛关注^[1-2]。目前,应用于电力系统调频的储能形式包括抽水蓄能、电池储能及超级电容等^[3-5],其中抽水蓄能技术成熟、运行安全、低碳绿色且能为系统提供惯量支撑,是新型电力系统构建最可靠的灵活调节资源,但是,抽水蓄能电站具有选址困难、响应速度较慢^[6]等不足。因此,将抽水蓄能电站和电池储能(battery energy storage, BES)等快速储能联合运行,构成广域混合储能系统,这是解决上述不足的重要途径之一,同时也提供一种将多种储能类型应用于电力系统调频的思路。

近年来,国内外学者围绕储能技术在电力系统负荷频率控制方面的应用,开展了大量的研究工作。文献[7]针对多区域互联电力系统中负荷扰动引起的频率波动问题,提出了一种由电池和超级电容组成混合储能系统的滑模控制策略;文献[8]针对多区域互联电力网输出电能质量差、系统整体不够稳定等问题,提出一种含混合储能的互联电力系统拓扑结构,其能够提高多区域互联系统的稳定性;文献[9]提出了抽水蓄能机组与电池储能的频率协调控制策略,当电网频率变化大时,该策略能够协助传统发电机组确保电网的频率处于安全范围;文献[10]设计了一种包含荷电状态修正和通信延迟的储能电站负荷频率鲁棒控制方法,对可再生能源功率扰动进行抑制,并实现系统频率的快速恢复与偏差调节。

分布式模型预测控制(distributed model predictive control, DMPC)能够应用于大规模系统优化控制当中,其将系统划分为多个耦合关联且拥有独立局部控制器的子系统,这些子系统既需要考虑自身的状态及控制量,也需要考虑耦合子系统的关联作用,通过协调算法实现系统的优化目标^[11-13]。文献[14]提出了一种基于DMPC的协调电压控制方法,以确保混合能源系统的电压安全和信息隐私不被泄露;文献[15-16]设计了一种根据不同风速条件,在不同区域能够优化不同控制目标的DMPC控制器,该算法能最大限度平抑风电输出波动,实现频

率稳定;文献[17]提出了一种鲁棒DMPC算法,研究表明,该算法在负荷扰动、系统参数不确定和结构不确定性情况下具有较好的鲁棒性。

综上所述,本文针对抽水蓄能和电池储能分别接入不同区域的互联电力系统调频问题,提出一种基于DMPC的负荷频率协调优化控制方法。利用DMPC理论,建立基于DMPC的两区域互联电力系统负荷频率模型,结合系统中的各种约束条件,通过Matlab优化工具箱将问题转化为一个约束非线性规划问题从而进行求解。仿真结果表明,在满足多约束条件下,能够实现广域混合储能与传统机组的协同优化运行。

1 含广域混合储能的互联电力系统调频模型

本文所研究的含广域混合储能的两区域互联电力系统调频模型如图1所示,区域1含有火电机组和电池储能,区域2含有抽水蓄能机组,2个区域通过高压联络线连接。针对不同区域设计了控制器1、2,2个子控制器通过通信实现信息交互,同时对各个区域进行负荷频率控制。系统中各环节的传递函数如下。

1) 负荷频率。区域1、2互联电力系统的频率偏差动态特性分别表示为

$$\Delta \dot{f}_1 = -\frac{1}{T_{p1}} \Delta f_1 + \frac{K_{p1}}{T_{p1}} \Delta P_{g1} + \frac{K_{p1}}{T_{p1}} \Delta P_b - \frac{K_{p1}}{T_{p1}} \Delta P_{L1} - \frac{K_{p1}}{T_{p1}} \Delta P_{tie,1} \quad (1)$$

$$\Delta \dot{f}_2 = -\frac{1}{T_{p2}} \Delta f_2 + \frac{K_{p2}}{T_{p2}} \Delta P_{g2} - \frac{K_{p2}}{T_{p2}} \Delta P_{L2} - \frac{K_{p2}}{T_{p2}} \Delta P_{tie,2} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, Δf_1 、 Δf_2 分别为区域1、2的系统频率变化量; K_{p1} 、 K_{p2} 分别为区域1、2的电力系统增益系数; T_{p1} 、 T_{p2} 分别为区域1、2的电力系统时间常数; ΔP_{g1} 、 ΔP_{g2} 分别为区域1、2的发电机输出功率变化量; ΔP_{L1} 、 ΔP_{L2} 分别为区域1、2的负荷扰动变化量; $\Delta P_{tie,1}$ 、 $\Delta P_{tie,2}$ 分别为区域1、2的联络线有功功率变化量; ΔP_b 为BES的输出功率。

2) 电池储能。BES的输出功率 ΔP_b 的动态特性可表示为

$$\Delta \dot{P}_b = -\frac{1}{T_b} \Delta P_b + \frac{K_b}{T_b} \Delta u_b \quad (3)$$

式中, K_b 为储能电池单位调节系数; Δu_b 为BES控制信号; T_b 为储能电池时间常数。

3) 火电机组。阀门调节值、控制量及频率三者之间的动态特性可表示为

$$\Delta \dot{X}_{g1} = -\frac{1}{T_{g1}} \Delta X_{g1} - \frac{1}{T_{g1} R_1} \Delta f_1 + \frac{1}{T_{g1}} \Delta P_{c1} \quad (4)$$

式中, ΔX_{g1} 为区域1调速器阀门位置的变化量; ΔP_{c1} 为区域1系统控制信号; T_{g1} 为区域1调速器时间常数; R_1 为区域1调速器速度调节系数。

汽轮机的传递函数可表示为

$$\Delta \dot{P}_{g1} = -\frac{1}{T_{T1}} \Delta P_{g1} + \frac{1}{T_{T1}} \Delta X_{g1} \quad (5)$$

式中, T_{T1} 为区域1汽轮机时间常数。

4) 抽水蓄能机组。调速器的动态特性可表示为

$$\Delta \dot{X}_{gh2} = -\frac{1}{T_{g2}} \Delta X_{gh2} - \frac{1}{T_{g2} R_2} \Delta f_2 + \frac{1}{T_{g2}} \Delta P_{c2} \quad (6)$$

式中, ΔX_{gh2} 为区域2伺服电机调节阀位置的变化量; T_{g2} 区域2水电机组时间常数; R_2 为区域2调速器速度调节系数; ΔP_{c2} 为区域2系统控制信号。

水轮机的动态特性可表示为

$$\Delta \dot{X}_{g2} = -\frac{1}{T_{22}} \Delta X_{g2} - \frac{1}{T_{22} T_{g2} R_2} \Delta f_2 + \frac{T_{g2} - T_{12}}{T_{22} T_{g2}} \Delta X_{gh2} + \frac{T_{12}}{T_{22} T_{g2}} \Delta P_{c2} \quad (7)$$

$$\Delta \dot{P}_w = -\frac{2}{T_{w1}} \Delta P_{w2} + \frac{2T_{12}}{T_{22} T_{g2} R_2} \Delta f_2 +$$

$$\frac{2(T_{w1} + T_{22})}{T_{w1} T_{22}} \Delta X_{g2} + \frac{2(T_{12} - T_{g2})}{T_{22} T_{g2}} -$$

$$\frac{2T_{12}}{T_{22} T_{g2}} \Delta P_{c2} \quad (8)$$

式(7)、(8)中, T_{12} 、 T_{22} 均为区域2水电机组时间常数; T_{w1} 为区域2供水起始时间; ΔP_{w2} 为抽水蓄能机组的输出功率; ΔX_{g2} 为区域2调节阀位置变化量。

抽水蓄能机组储能环节动态特性可表示为

$$\Delta \dot{P}_{g2} = \frac{1}{T_{12}} \Delta P_{w2} - \frac{2}{T_{12}} \Delta P_{g2} \quad (9)$$

式中, T_{12} 为抽水蓄能储能时间常数。

5) 联络线功率。2个区域联络线功率偏差的动态特性可表示为

$$\Delta \dot{P}_{tie,i} = K_{sij} (\Delta f_i - \Delta f_j) \quad (10)$$

式中, $i, j = 1$ 或 2 ,且 $i \neq j$; K_{sij} 为区域间互联增益系数。

6) 区域控制误差(area control error, ACE)。ACE区域控制误差信号表达式为

$$P_{ACE,i} = K_{Bi} \Delta f_i + P_{tie,i} \quad (11)$$

式中, $i = 1$ 或 2 ; K_{Bi} 为区域频率偏差因子。

通过上述分析可得广域混合储能互联电力系统的状态空间模型如下:

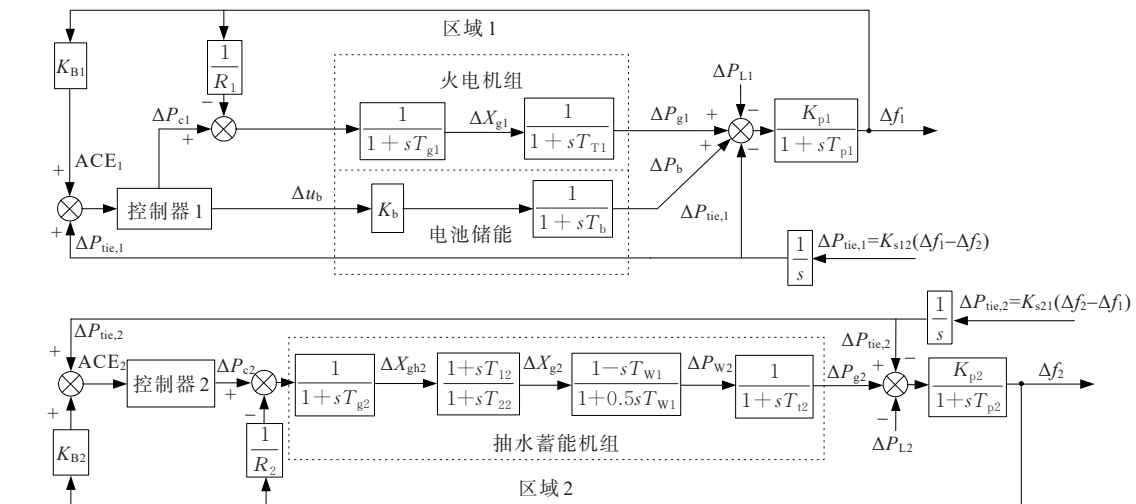


图1 含广域混合储能互联电力系统负荷频率控制模型

Figure 1 Load frequency control model of interconnected power system with wide-area hybrid energy storage

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = \bar{A}_i x_i(t) + \bar{B}_i u_i(t) + \bar{F}_i w_i(t) + \\ \sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}} (\bar{A}_{ij} x_j(t) + \bar{B}_{ij} u_j(t) + \bar{F}_{ij} w_j(t)) \\ y_i(t) = \bar{C}_i x_i(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中, $x_i \in \mathbb{N}^{n_i}$, $u_i \in \mathbb{R}^{m_i}$, $w_i \in \mathbb{R}^{z_i}$, $y_i \in \mathbb{R}^{v_i}$ 分别为第 i 个区域状态、控制输入、扰动输入和输出向量, $i, j = 1$ 或 2 , 且 $i \neq j$, n_i, v_i, m_i, z_i 分别为输入、输出、状态、干扰变量数量; $x_j \in \mathbb{R}^{n_j}$, $u_j \in \mathbb{R}^{m_j}$, $w_j \in \mathbb{R}^{z_j}$ 分别为相邻区域 j 的状态、控制输入和扰动输入向量; $\bar{A}_i \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$, $\bar{B}_i \in \mathbb{R}^{n_i \times m_i}$, $\bar{F}_i \in \mathbb{R}^{n_i \times z_i}$, $\bar{C}_i \in \mathbb{R}^{v_i \times n_i}$, $\bar{A}_{ij} \in \mathbb{R}^{n_i \times n_j}$, $\bar{B}_{ij} \in \mathbb{R}^{n_i \times m_j}$, $\bar{F}_{ij} \in \mathbb{R}^{n_i \times z_j}$ 均为系数矩阵, 其定义如下:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= [\Delta f_1(t) \quad \Delta P_{\text{tie},1}(t) \quad \Delta P_{g1} \quad \Delta X_{g1} \quad \Delta P_b]^T \\ x_2(t) &= [\Delta f_2 \quad \Delta P_{\text{tie},2} \quad \Delta P_{g2} \quad \Delta P_{w2} \quad \Delta X_{g2} \quad \Delta X_{gh2}]^T \\ u_1(t) &= [\Delta P_{c1} \quad \Delta u_b]^T, u_2(t) = \Delta P_{c2}, w_1(t) = \Delta P_{L1} \\ w_2(t) &= \Delta P_{L2}, y_2 = [\Delta f_2 \quad P_{ACE_2} \quad \Delta P_{\text{tie},2}]^T \\ y_1 &= [\Delta f_1 \quad P_{ACE1} \quad \Delta P_{\text{tie},1}]^T \end{aligned}$$

2 DMPC 控制器设计

2.1 总体结构与工作原理

互联电力系统各子区域的负荷频率 DMPC 控制器结构如图 2 所示。控制系统的基本工作原理:

1) 在采样时刻 k 时, 系统会分别对 2 个区域的频率偏差 Δf_i 、状态变化变量 Δx_i 以及负荷扰动变化量 ΔP_{L_i} 等信息进行收集, 把收集到的信息传到搭建好的预测模型中, 再通过计算得到输出 $y_{pi}(k)$;

2) 利用 DMPC 算法求解未来 P 个时刻火电机组、抽水蓄能机组以及 BES 的最优控制序列 Δu_{pi} ;

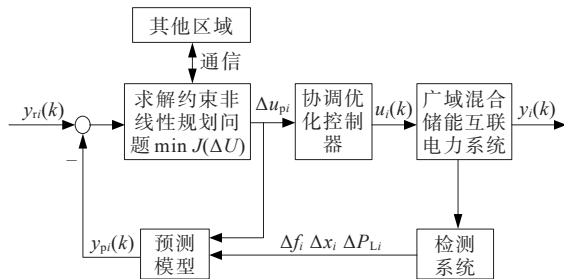


图 2 广域混合储能互联电力系统负荷频率控制原理

Figure 2 Schematic diagram of load frequency control of wide-area hybrid energy storage interconnected power system

3) 得到的值经过协调优化控制器处理得到控制信号 $u_i(k)$, 并作用于广域混合储能互联电力系统中得到输出 $y_i(k)$; 当采样时刻为 $k+1$ 时, 其控制变量为上一时刻求解得到的第 1 组数据, 其他步骤与上述一致, 如此系统可以在有限时间内进行循环滚动优化。

2.2 DMPC 建模过程

将整个系统划分为 2 个子控制系统, 并设计其控制器。对线性时不变状态空间模型式 (12) 进行离散化处理, 得到系统的离散化模型:

$$\begin{cases} x_i(k+1) = \bar{A}_i x_i(k) + \bar{B}_i u_i(k) + \bar{F}_i w_i(k) + \\ \sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}} (\bar{A}_{ij} x_j(k) + \bar{B}_{ij} u_j(k) + \bar{F}_{ij} w_j(k)) \\ y_i(k) = \bar{C}_i x_i(k) \end{cases} \quad (13)$$

现假设系统的控制时域为 N_c , 预测时域为 N_p , 对式 (13) 进行迭代处理, 定义:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_i &= [x_i(k+1|k)^T \quad x_i(k+2|k)^T \quad \cdots \quad x_i(k+N_p|k)^T]^T \\ \tilde{y}_i &= [y_i(k+1|k)^T \quad y_i(k+2|k)^T \quad \cdots \quad y_i(k+N_p|k)^T]^T \\ \tilde{u}_i &= [u_i(k|k)^T \quad u_i(k+1|k)^T \quad \cdots \quad u_i(k+N_c-1|k)^T]^T \\ \tilde{w}_i &= [w_i(k+1|k)^T \quad w_i(k+2|k)^T \quad \cdots \quad w_i(k+N_p|k)^T]^T \end{aligned}$$

得出预测时域内的状态空间表达式为

$$\tilde{x}_i = \mu_i x_i(k) + \nu_i \tilde{u}_i + \xi_i \tilde{w}_i + \sum_{j \neq i} (\mu_{ij} x_j(k) + \sigma_{ij} \tilde{x}_j + \nu_{ij} \tilde{u}_j + \xi_{ij} \tilde{w}_{ij}) \quad (14)$$

简化式 (14) 后得到新的表达式:

$$\Delta X = \mu X(k) + \nu U + \xi W \quad (15)$$

式中, $X = [\tilde{x}_1 \quad \tilde{x}_2]^T$, $X(k) = [x_1(k) \quad x_2(k)]^T$, $U = [\tilde{u}_1 \quad \tilde{u}_2]^T$, $W = [\tilde{w}_1 \quad \tilde{w}_2]^T$ 。

对式 (15) 进行变换, 其两侧同时乘以可逆矩阵 Λ^{-1} , 得到:

$$X = EX(k) + VU + FW \quad (16)$$

式中, $E = \Lambda^{-1} \mu$, $V = \Lambda^{-1} \nu$, $F = \Lambda^{-1} \xi$ 。

把整个系统分配成 2 个子系统, 子系统 i 的状态空间模型可以表示为

$$\begin{cases} \tilde{x}_i(t) = E_{xi} x_i(t) + V_{xi} u_i(t) + F_{xi} w_i(t) + \\ \sum_{\substack{j \neq i \\ j=1}} (E_{xij} x_j(t) + V_{xij} u_j(t) + F_{xij} w_j(t)) \\ y_i(t) = C_{xi} \tilde{x}_i(t) \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{式中, } C_{xi} = \begin{bmatrix} \bar{C}_i & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \bar{C}_i & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \bar{C}_i \end{bmatrix}, E_{xi}, E_{xij}, V_{xi}, V_{xij},$$

F_{xi}, F_{xij} 分别由矩阵 E, V, F 分块所得。

2.3 优化目标函数

负荷频率控制通过调节每个区域的每台发电机的输出功率,使系统的频率达到额定值,同时维持每个区域的联络线交换功率为计划值^[18]。考虑系统的稳定性,设计目标函数如下:

$$\min J = \|\boldsymbol{\gamma}_i - \boldsymbol{y}_i\|_{\boldsymbol{Q}_i}^2 + \|\tilde{\boldsymbol{u}}_i\|_{\boldsymbol{R}_i}^2 \quad (18)$$

其中, $\boldsymbol{Q}_i, \boldsymbol{R}_i$ 这2个矩阵中每个向量都对应系统中的某个状态变量, $\boldsymbol{Q}_i, \boldsymbol{R}_i$ 值代表系统状态受不同系统状态变量影响的权重,调整 $\boldsymbol{Q}_i, \boldsymbol{R}_i$ 中的向量值,系统状态也会随之改变。当子系统受到负荷扰动时,需要快速回到稳定运行状态,因此,需调节每个子系统的 ACE、频率偏差以及联络线功率快速回归为0,故参考轨迹值 $\boldsymbol{\gamma}_i$ 通常取0^[19]。

2.4 系统约束处理

1) 发电机功率约束。

在实际电力系统中,温度、压力等参数对设备的安全具有一定的影响,如图3所示。因此,对于火电蒸汽发电机的发电功率变化率需要进行约束(典型值为0.0017 p.u.MW,水电厂典型值为0.045 p.u.MW),超过规定的约束值会有一些的安全隐患。由此可知,发电机的发电功率是有限制的,其表达方式为

$$n_i = (\Delta \dot{P}_{gi}(k))_{\min} \leq \Delta \dot{P}_{gi}(k) \leq (\Delta \dot{P}_{gi}(k))_{\max} = m_i \quad (19)$$

式中, $i=1,2$; $\Delta \dot{P}_{gi}(k) = [\Delta P_{gi}(k) - \Delta P_{gi}(k-1)]/T$, 即 $\Delta P_{gi}(k) = T\Delta \dot{P}_{gi}(k) + \Delta P_{gi}(k-1)$ 。

计 $x_{i,j}(k) = \Delta P_{gi}(k)$, $\Delta P_{gi}(k)$ 是区域 i 的第 j 个状态变量,得到新的关系式为

$$x_{i,j}(k|k) = x_{i,j}(k-1) + \Delta x_{i,j}(k) \quad (20)$$

式中, $\Delta x_{i,j}(k) = T\Delta \dot{P}_{gi}(k)$ 。

通过式(20)可以推导出 $k + N_p$ 时刻的关系式:

$$x_{i,j}(k + N_p|k) = x_{i,j}(k-1) + \Delta x_{i,j}(k|k) + \cdots + \Delta x_{i,j}(k + N_p|k) \quad (21)$$

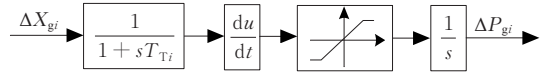


图3 发电机功率约束

Figure 3 Constraint of generator power

定义:

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{i,j} = [x_{i,j}(k|k) \quad x_{i,j}(k+1|k) \quad \cdots \quad x_{i,j}(k+N_p|k)]^T$$

在预测时域内有

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{i,j} = \boldsymbol{Z}_i \Delta \tilde{\boldsymbol{x}}_{i,j} + \boldsymbol{H}_i x_{i,j}(k-1) \quad (22)$$

$$\Delta \tilde{\boldsymbol{x}}_{i,j} = \boldsymbol{Z}_i' (\tilde{\boldsymbol{x}}_{i,j} - \boldsymbol{H}_i x_{i,j}(k-1)) \quad (23)$$

$$\text{式(22)中, } \boldsymbol{Z}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \boldsymbol{H}_i = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}。$$

同时, $\Delta P_{gi}(k)$ 的约束也要进行 N_p 次的叠加, 得到:

$$\boldsymbol{M}_i = \underbrace{[m_i \quad m_i \quad \cdots \quad m_i]}_{N_p}^T, \boldsymbol{N}_i = \underbrace{[n_i \quad n_i \quad \cdots \quad n_i]}_{N_p}^T$$

$$TN_i \leq \Delta \tilde{\boldsymbol{x}}_{i,j} \leq TM_i \quad (24)$$

因为 $\Delta P_{gi} = x_{i3}$, 所以

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{i,j} = \boldsymbol{J}_i \tilde{\boldsymbol{x}}_i \quad (25)$$

以区域1为例, $\boldsymbol{J}_{i1} = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$, $\boldsymbol{J}_i = \text{diag}(\underbrace{\boldsymbol{J}_{i1} \quad \boldsymbol{J}_{i2} \quad \cdots \quad \boldsymbol{J}_{iN_p}}_{N_p})$ 。根据式(23)~(25)可得新的约束方程:

$$\boldsymbol{Z}' T x_{i,j}(k-1) + TN_i \leq \boldsymbol{Z}' \boldsymbol{J}_i \tilde{\boldsymbol{x}}_i \leq TM_i + \boldsymbol{Z}' \boldsymbol{H}_i x_{i,j}(k-1) \quad (26)$$

将式(17)代入式(26)可得:

$$\boldsymbol{\psi}_{1i} \boldsymbol{u}_i \leq \boldsymbol{\omega}_{1i} \quad (27)$$

其中,

$$\boldsymbol{\psi}_{1i} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Z}' \boldsymbol{J}_i \boldsymbol{V}_{xi} \\ -\boldsymbol{Z}' \boldsymbol{J}_i \boldsymbol{V}_{xi} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\omega}_{1i} =$$

$$\begin{bmatrix} TM_i + \boldsymbol{Z}' \boldsymbol{H}_i x_{i,j}(k-1) - \boldsymbol{Z}' \boldsymbol{J}_i \left(\begin{array}{c} \boldsymbol{E}_{xi} \boldsymbol{x}_i(t) + \boldsymbol{F}_{xi} \boldsymbol{w}_i(t) + \\ \sum_{j \neq i} \left(\begin{array}{c} \boldsymbol{E}_{xij} \boldsymbol{x}_j(t) + \\ \boldsymbol{V}_{xij} \boldsymbol{u}_j(t) + \\ \boldsymbol{F}_{xij} \boldsymbol{w}_j(t) \end{array} \right) \end{array} \right) \\ -\boldsymbol{Z}' T x_{i,j}(k-1) - TN_i + \boldsymbol{Z}' \boldsymbol{J}_i \left(\begin{array}{c} \boldsymbol{E}_{xi} \boldsymbol{x}_i(t) + \boldsymbol{F}_{xi} \boldsymbol{w}_i(t) + \\ \sum_{j \neq i} \left(\begin{array}{c} \boldsymbol{E}_{xij} \boldsymbol{x}_j(t) + \\ \boldsymbol{V}_{xij} \boldsymbol{u}_j(t) + \\ \boldsymbol{F}_{xij} \boldsymbol{w}_j(t) \end{array} \right) \end{array} \right) \end{bmatrix}$$

2) BES输出功率约束。

$$P_{b\min} \leq \Delta P_b(k) \leq P_{b\max} \quad (28)$$

定义:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_b &= [\Delta P_b(k) \quad \Delta P_b(k+1) \quad \cdots \quad \Delta P_b(k+N_p)]^T \\ M_b &= \underbrace{\begin{bmatrix} P_{bmax} & P_{bmax} & \cdots & P_{bmax} \end{bmatrix}}_{N_p} \\ N_b &= \underbrace{\begin{bmatrix} P_{bmin} & P_{bmin} & \cdots & P_{bmin} \end{bmatrix}}_{N_p} \\ J_b &= \text{diag}(J_{bb} \quad J_{bb} \quad \cdots \quad J_{bb}) \\ J_{bb} &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \end{aligned}$$

因为 $\Delta P_b(k) = x_{15}$, 所以

$$\tilde{P}_b = J_b \tilde{x}_1 \quad (29)$$

由式(28)、(29)可得关于 $\Delta P_b(k)$ 的约束方程为

$$N_b \leq J_b \tilde{x}_i \leq M_b \quad (30)$$

将式(17)代入式(30)可得:

$$\psi_b u_i \leq \omega_b \quad (31)$$

其中,

$$\begin{aligned} \psi_b &= \begin{bmatrix} J_b V_{xi} \\ -J_b V_{xi} \end{bmatrix} \\ \omega_b &= \begin{bmatrix} M_b - J_b \left(\sum_{j=1}^{j \neq i} \begin{pmatrix} E_{xij} x_j(t) + V_{xij} u_j(t) + \\ F_{xij} w_j(t) \end{pmatrix} \right) \\ -N_b + J_b \left(\sum_{j=1}^{j \neq i} \begin{pmatrix} E_{xij} x_j(t) + V_{xij} u_j(t) + \\ F_{xij} w_j(t) \end{pmatrix} \right) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

根据式(19)~(31),最终可以得到含约束的非线性规划问题,区域1、2的约束分别如下:

$$\begin{cases} \min J_1 = \| \gamma_1 - y_1 \|_{Q_1}^2 + \| \tilde{u}_1 \|_{R_1}^2 \\ A_{eq1} \tilde{u}_1 \leq b_1 \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} \min J_2 = \| \gamma_2 - y_2 \|_{Q_2}^2 + \| \tilde{u}_2 \|_{R_2}^2 \\ A_{eq2} \tilde{u}_2 \leq b_2 \end{cases} \quad (33)$$

其中, $A_{eq1} = [\psi_{11} \quad \psi_b]^T$, $b_1 = [\omega_{11} \quad \omega_b]^T$, $A_{eq2} = [\psi_{12}]$, $b_2 = [\omega_{12}]$.

3 仿真分析

3.1 基本参数

按照图1的系统模型在Matlab平台进行仿真实验,验证所设计的DMPC控制器对系统频率的改善作用,相关参数如表1所示。现设定系统的采样时

间 $T_s = 0.5$ s, 预测步长 $N_p = 10$, 控制步长 $N_c = 5$, BES功率约束为0.15 p.u.MW。为了更好地突显本文所采用的控制策略优点,采用集中式MPC控制策略^[20]和传统PI控制策略^[21]与之对比。

表 1 广域混合储能互联电力系统参数

Table 1 Parameter table of wide-area hybrid energy storage interconnected power system

$K_{p1}/(\text{Hz}/\text{p.u.MW})$	T_{b1}/s	$R_1/(\text{Hz}/\text{p.u.MW})$	$K_{B1}/(\text{p.u.MW}/\text{Hz})$	T_{g1}/s	T_{11}/s	
75	15	3	0.35	0.2	0.3	
$K_{p2}/(\text{Hz}/\text{p.u.MW})$	T_{b2}/s	$R_2/(\text{Hz}/\text{p.u.MW})$	$K_{B2}/(\text{p.u.MW}/\text{Hz})$	T_{g2}/s	T_{12}/s	
20	6	1	0.32	0.08	1	
$K_{s12}/\text{p.u.MW}$	$K_{s21}/\text{p.u.MW}$	K_b	T_b/s	T_{W1}/s	T_{12}/s	T_{22}/s
0.55	0.55	10	1	2	0.51	10

3.2 系统负载突变

当 $t=20$ s 时,分别在区域1、2加入10%的负荷扰动。在Matlab中进行模拟仿真,其动态时域响应曲线如图4所示。

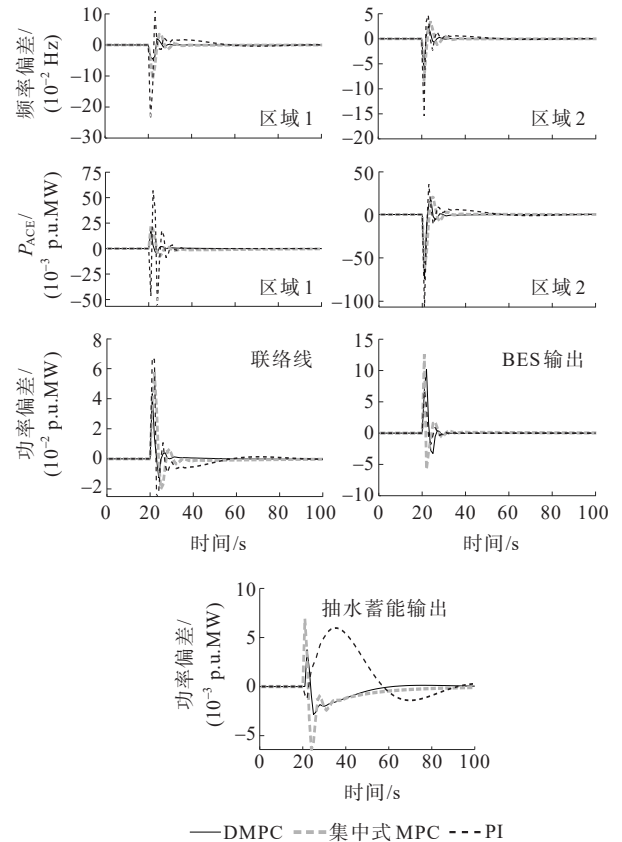


图 4 负载突变下的响应曲线

Figure 4 Response curve under sudden change of system load

由图4可以看出,在所提控制方法的作用下,系统的各项数据都控制在安全的范围之内。当扰动发生9 s后,系统能够达到稳定状态;与之对比的集中式MPC和PI控制,在其控制下9 s后系统并未达到稳定状态,3种方法的对比如表2所示,在DMPC策略控制下,系统完成负荷频率控制所需要的调节时间更短,并且抑制频率波动能力更强。

表2 系统负载突变下2种控制方法的对比

Table 2 Comparison of two control methods under the sudden change of system load

比较对象	控制方法	调节时间/s	最大偏差/Hz
Δf_1	DMPC	9.0	0.066 3
	集中式MPC	19.1	0.143 9
	PI	58.0	0.347 9
Δf_2	DMPC	8.0	0.089 1
	集中式MPC	16.5	0.119 1
	PI	55.0	0.201 3

3.3 系数参数发生扰动

为了验证所提方法的有效性,需要考虑系统参数发生扰动的情况。现假定系统的调速器和汽轮机时间参数发生50%扰动幅度,即 T_{g1} 、 T_{T1} 分别减小50%和增大50%,系统其他参数保持不变,且依旧加入10%的负荷扰动。系统参数扰动下3种控制方法的效果如表3所示;在Matlab中进行仿真,系统响应曲线如图5、6所示。由图5、6及表3数据可以看出,当系统参数发生扰动时,所提方法能够协调各个区域电源出力,使系统的频率偏差快速恢复稳定,具有良好的鲁棒性,并且控制效果优于集中式MPC和PI控制策略。

表3 系统参数扰动下2种控制方法的对比

Table 3 Comparison of two control methods under system load parameter disturbance

比较对象	控制方法	参数减小50%		参数增大50%	
		调节时间/s	最大偏差/Hz	调节时间/s	最大偏差/Hz
Δf_1	DMPC	9	0.039 8	17	0.091 2
	集中式MPC	19	0.140 6	19	0.147 6
	PI	57	0.327 4	56	0.366 5
Δf_2	DMPC	8	0.114 3	12	0.105 3
	集中式MPC	17	0.181 4	17	0.117 6
	PI	55	0.187 7	55	0.212 8

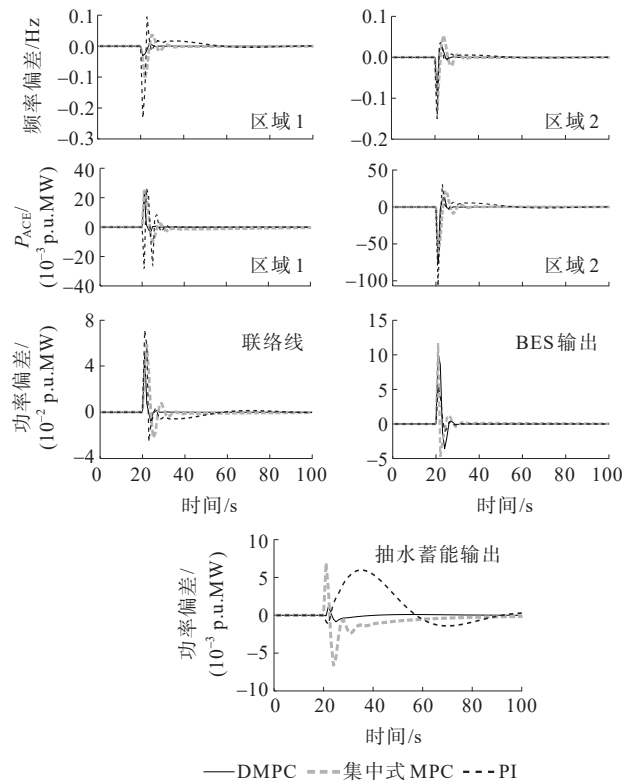


图5 系统参数减少50%时系统响应曲线

Figure 5 System response curves when system parameters reduce by 50%

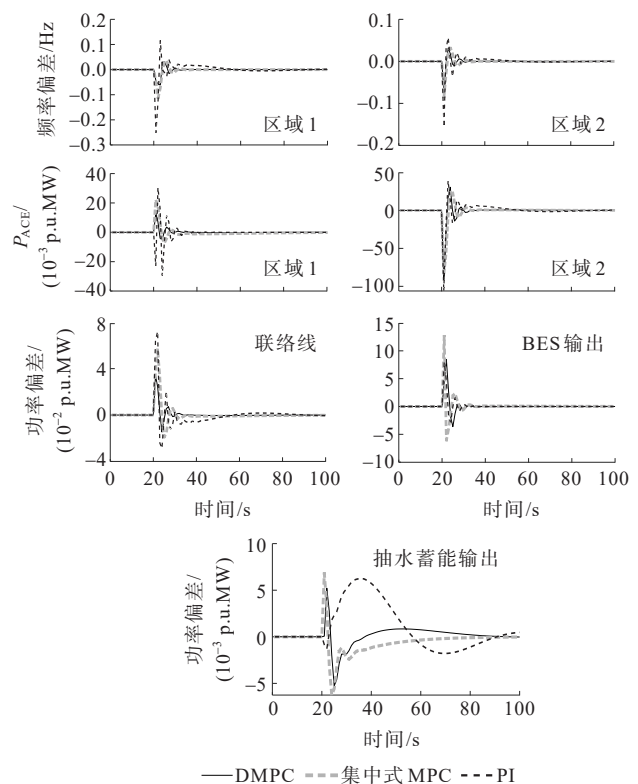


图6 系统参数增加50%时系统响应曲线

Figure 6 System response curves when system parameters increase by 50%

4 结语

本文针对含广域混合储能的互联电力系统,提出一种基于DMPC的负荷频率协调优化控制方法。研究表明,相较于集中式MPC和传统PI控制,本文所提出的控制方法能够更好地改善电力系统频率响应特性,提高系统的稳定性;同时,在发电系统参数出现扰动时,具有较强的鲁棒性。随着新型电力系统的发展,随机电源的扰动进一步加剧,电网结构变化可能成为常态,在一定程度上能够满足“即插即用”需求的DMPC控制器具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 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 of frequency regulation performance of power system improved by battery energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 174-181.
- [2] MENG L, ZAFAR J, KHADEM S K, et al. Fast frequency response from energy storage systems—a review of grid standards, projects and technical issues[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1566-1581.
- [3] 耿安琪,胡海涛,张育维,等. 基于阶梯能量管理的电气化铁路混合储能系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23): 4916-4925.
GENG Anqi, HU Haitao, ZHANG Yuwei, et al. Control strategy of hybrid energy storage system for electrified railway based on increment energy management[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(23): 4916-4925.
- [4] 严干贵,刘莹,段双明,等. 电池储能单元群参与电力系统二次调频的功率分配策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 26-34.
YAN Gangui, LIU Ying, DUAN Shuangming, et al. Power distribution strategy for battery energy storage unit group participating in secondary frequency regulation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 26-34.
- [5] 刘海涛,李蕊,孙丽敬,等. 含多分布式超级电容的直流微电网功率平滑协调控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(6): 134-142.
LIU Haitao, LI Rui, SUN Lijing, et al. Coordinated control method for power smoothing of dc microgrid with multiple distributed supercapacitors[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(6): 134-142.
- [6] 杨一凡,项雷军,郭新华,等. 含抽水蓄能电站的互联电网负荷频率自抗扰优化控制研究[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 276-283.
YANG Yifan, XIANG Leijun, GUO Xinhua, et al. Active disturbance rejection controller optimization of load frequency in interconnected power grid with pumped storage power station[J]. Power System Technology, 2021, 45(01): 276-283.
- [7] ZHU F, ZHOU X, ZHANG Y, et al. A load frequency control strategy based on disturbance reconstruction for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system[J]. Energy Reports, 2021, 7: 8849-8857.
- [8] YAN W, SHENG L, XU D, et al. H_{∞} robust load frequency control for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system[J]. Applied Sciences, 2018; 8(10): 1748.
- [9] LIU Y, YIN Y, SUN B et al. Coordinated Frequency regulation strategy of pumped storage units and battery energy storage system[C]//IEEE Sustainable Power and Energy Conference (ISPEC): Energy Transition for Carbon Neutrality, Nanjing, China, 2021.
- [10] 吕永青,窦晓波,杨冬梅,等. 含荷电状态修正和通信延迟的储能电站负荷频率鲁棒控制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 59-67.
LÜ Yongqing, DOU Xiaobo, YANG Dongmei, et al. Load-frequency robust control for energy storage power station considering correction of state of charge and communication delay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 59-67.
- [11] 崔挺,李雪萍,颜畅,等. 基于模型预测控制的风电场故障穿越有功无功优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 12-20.
CUI Ting, LI Xueping, YAN Chang, et al. Active and reactive power optimization control strategy for wind farm fault ride-through based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 12-20.
- [12] 王锐,张彦,王冬,等. 基于随机模型预测控制的含大规模

- 模风电接入的电力系统优化调度[J].控制与决策,2019,34(8):1616-1625.
- WANG Rui,ZHANG Yan,WANG Dong,et al.Optimization and scheduling of power system stochastic model predictive control based optimization and scheduling for power system with large scale wind integrated[J].Control and Decision,2019,34(8):1616-1625.
- [13] 何瑞,谢振刚,程昱舒.具有主动故障穿越能力的光伏逆变器自治控制方法研究[J].高压电器,2022,58(7):101-110.
- HE Rui, XIE Zhengang, CHENG Yushu. Research on autonomous control method of photovoltaic inverter with active fault ride-through capability[J]. High Voltage Apparatus, 2022,58(7):101-110.
- [14] ZHANG Z, YUE D, DOU C, DMPC-based coordinated voltage control for integrated hybrid energy system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021,17(10):6786-6797.
- [15] 屈滨,杨鹏,张怡.含风电场的协同分布式模型预测负荷频率控制[J].控制工程,2020,27(7):1238-1246.
- QU Bin, YANG Peng, ZHANG Yi. Coordinated distributed MPC for load frequency control of power system with wind farms[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(7): 1238-1246.
- [16] LIU X, ZHANG Y, LEE K Y. Coordinated distributed mpc for load frequency control of power system with wind farms [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64 (6):5140-5150.
- [17] SHALMANI R A, RAHMANI M, BIGDELI N. Nash-based robust distributed model predictive control for large-scale systems[J]. Journal of Process Control, 2020, 88:43-53.
- [18] 赵良德,梁晓伟,庄磊,等.电力市场下的分布式模型预测负荷频率控制[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):109-115.
- ZHAO Liangde, LIANG Xiaowei, ZHUANG Lei, et al. Distributed model predictive load frequency control in electricity market[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021,36(4):109-115.
- [19] 汪荣华,胥威汀,杨伟峰,等.纯清洁能源下水电高占比送端电网频率稳定协调控制策略研究[J].智慧电力,2021,49(9):87-94.
- WANG Ronghua, XU Weiting, YANG Weifeng, et al. Coordinated frequency stability control strategy of sending-end power grid with high hydro generation proportion in 100% clean energy generation[J]. Smart Power, 2021,49(9):87-94.
- [20] 廖小兵,刘开培,汪宁渤,等.含风电的交直流互联电网AGC两级分层模型预测控制[J].电力系统自动化,2018,42(8):45-50+73.
- LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, WANG Ningbo, et al. Two-level hierarchical model predictive control for AGC of AC/DC interconnected power grid with integration of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(8):45-50+73.
- [21] 孟祥萍,薛昌飞,张化光.多区域互联电力系统的PI滑模负荷频率控制[J].中国电机工程学报,2001,21(3):7-12.
- MENG Xiangping, XUE Changfei, ZHANG Huaguang. PI sliding mode load frequency control of multi-area power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2001,21(3):7-12.