

# 计及动态安全的源网荷储三阶段 协同调度方法

宋杉<sup>1</sup>, 王鹏<sup>2</sup>, 田方媛<sup>1</sup>, 黄明宇<sup>2</sup>, 孙文涛<sup>1</sup>, 葛毅<sup>1</sup>, 康重庆<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 南京市 210008;

2. 清华四川能源互联网研究院, 成都市 610213)

**摘要:**【目的】随着电力系统中高比例分布式光伏、风电的接入, 系统的安全稳定运行面临挑战。传统的优化调度方案在满足小时级功率平衡的基础上追求经济最优, 忽略了动态频率与短路电流安全。为弥补这一空白, 本文提出一种内嵌动态安全约束的源网荷储协同调度方法以保障电力系统的动态安全。【方法】提出一种基于再调度方法的三阶段迭代求解方法, 首先求解传统的源网荷储协同优化模型, 随后基于实时仿真对调度方案进行动态安全校验, 包括频率安全校验和短路电流安全校验。若不满足动态安全约束, 将基于灵敏度分析获取提升动态安全的增补约束并将其添加到调度模型中重新求解, 该过程迭代至所有动态安全约束均得到满足。【结果】在 HRP-38 测试系统上进行算例分析, 结果表明所提方法能够高效收敛于满足动态安全约束的调度方案。【结论】所提基于再调度的源网荷储协同调度方法为高可再生能源渗透的电力系统安全稳定运行提供了可行的解决方案。

**关键词:**源网荷储协同调度; 动态安全; 再调度; 频率安全; 短路电流

中图分类号: TM73; TM74

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)08-0001-13

DOI: 10. 12204/j. issn. 1000-7229. 2026. 08. 001

## Three-Stage Dynamic Security-Constrained Coordinated Scheduling of Power Systems

SONG Shan<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>2</sup>, TIAN Fangyuan<sup>1</sup>, HUANG Mingyu<sup>2</sup>, SUN Wentao<sup>1</sup>,  
GE Yi<sup>1</sup>, KANG Chongqing<sup>2</sup>

(1. Economic and Technical Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, China;

2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China)

**ABSTRACT:** [Objective] High renewable energy penetration exacerbates power-system stability challenges, particularly concerning frequency security and short-circuit current adequacy. Conventional cost-driven scheduling methods may violate these dynamic security limits. However, directly embedding detailed nonlinear security models into scheduling model is computationally prohibitive. This study addresses this gap by proposing a practical and tractable solution framework to ensure the dynamic security of power systems with high renewable energy penetration. [Methods] A rescheduling-based iterative framework is proposed that enforces dynamic security through simulation-guided constraint generation. This method first solves a conventional scheduling model. Subsequently, high-fidelity dynamic security assessments—including frequency-response analysis and short-circuit analysis—are performed on the resulting schedule. Upon detection of security violations, sensitivity-based linear security constraints are generated and incorporated into the scheduling optimization formulation. This process iterates until all dynamic security criteria are satisfied. [Results] Simulations on the HRP-38 test system demonstrate that the proposed approach converges efficiently to schedules that are both secure and economically competitive. It effectively eliminates dynamic security violations while incurring only a modest increase in operational cost, thereby validating its capability to maintain system security while preserving economic efficiency. [Conclusions] The framework presented in this study offers a practical and tractable pathway to reliability-aware scheduling in systems with high renewable penetration.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. (No.

J2024156).

**KEYWORDS:** source-grid-load-storage coordinated scheduling; dynamic security; re-scheduling; frequency security; short-circuit current

## 0 引言

随着全球能源低碳转型,可再生能源在电力系统中的渗透率快速上升<sup>[1-4]</sup>。这一转变深刻改变了系统的动态特性,削弱了故障条件下的电力系统维持安全稳定的能力<sup>[5-6]</sup>。传统电网依赖同步发电机的旋转惯量提供固有惯性,在故障时能提供较大短路电流,有助于抑制频率偏差并保障继电保护的可靠性<sup>[7-10]</sup>。然而,随着常规同步机组被可再生能源大量替代,系统惯量下降、短路电流减少,系统应对实时功率不平衡和设备故障的能力被削弱,以稳态经济调度为主的传统调度范式在实时安全保障方面显现不足,进而引发频率越限、短路电流不足等问题。因此,电力系统调度需引入新的动态安全约束,而非仅依赖事后分析或传统的“N-1”稳态校核<sup>[11-13]</sup>。

针对高比例可再生能源并网所带来的动态安全挑战,已有研究聚焦于频率安全与短路电流安全2类问题<sup>[14-16]</sup>。

在频率安全方面,现有研究通常以系统惯量中心动态为出发点,通过频率变化速率、频率最低点及稳态频率偏差等指标评估扰动后的系统动态性能<sup>[17-19]</sup>。例如,文献[20]将同步发电机与构网型逆变器动态响应特性进行联合建模,推导频率安全约束,并在电力系统调度中引入频率安全约束以确保频率安全。文献[21]聚焦于虚拟同步机等先进控制器设计,以提高可再生能源的频率支撑能力,进而支撑频率安全。此外,文献[22]通过降低出力等方式使可再生资源提供调频支撑,并将其应用于电力系统实时调度中。

在短路电流安全方面,短路比及其扩展指标被广泛应用于衡量换流设备并网后的小信号稳定性<sup>[23-24]</sup>。例如,广义短路比建立了静态电压稳定性与电网强度之间的联系<sup>[25]</sup>。此外,文献[26]通过引入电网阻抗比定义了临界短路比,为区分弱电力系统提供了临界阈值。为实现短路比指标的实时应用,文献[27]提出利用相量测量单元数据在线识别广义短路比的方法,从而支持动态稳定性监测。

随着可再生能源渗透率的不断提高,频率与短路电流的动态安全逐渐被纳入电力系统调度框架中,现有的研究方法可分为模型驱动与数据驱动两类<sup>[28-31]</sup>。模型驱动方法试图从物理模型出发解析并

推导出动态安全约束,并将其整合进协同调度模型中。在频率安全方面,文献[32]通过解析推导将频率安全约束重构为二阶锥约束,基于此提出了频率安全约束的微电网调度模型。在短路电流安全方面,文献[33]将短路电流计算中与决策变量相关的矩阵求逆过程重构为保守的线性形式,进而将其内嵌入优化调度中。数据驱动方法则利用机器学习或统计方法替代难以解析的复杂关系。例如,文献[34]将系统频率响应模型与极限学习机相结合,用于频率稳定性在线评估。文献[35]提出通过数据驱动方法表征短路电流约束。

尽管当前研究已在调度模型中考虑频率与短路电流安全,但在动态安全约束刻画准确度与优化调度问题求解效率之间仍存在矛盾。因此,亟需在保证动态安全性可信的前提下,设计可工程化部署的高效调度算法。

基于此,本文提出一种兼顾动态安全约束刻画可信度与求解效率的三阶段启发式源网荷储协同调度方法。该方法的核心是基于再调度技术的迭代框架。与传统迭代优化方法(例如,直接在优化模型中嵌入详细的非线性动态方程,导致“维数灾难”和计算复杂度提升的问题)不同,所提再调度方法通过“优化求解—仿真校验—模型修正”的闭环迭代,将非线性动态安全校验与调度优化有效解耦。具体而言,在每一轮迭代中,首先求解不包含复杂动态约束的源网荷储协同调度问题;然后通过时域仿真对所得调度方案进行频率安全与短路电流安全校验;最后基于校验结果和灵敏度分析,引入新的线性约束修正下一轮优化调度边界。这一机制避免了在优化问题中直接嵌入非线性动态模型,同时通过动态安全校验保证了动态安全约束完全满足。本文的主要创新点包括:

1)提出一种基于再调度技术的三阶段源网荷储协同调度方法。通过“优化求解—仿真校验—模型修正”的闭环迭代,不断修正调度方案,确保所有安全稳定约束得到满足。该方法将非线性动态仿真与优化调度解耦,避免了传统方法因内嵌复杂动态模型而导致的求解困难。

2)提出一种基于灵敏度分析的安全稳定约束重构方法。根据频率与短路电流安全指标对各调度决策变量的灵敏度,定向生成线性动态安全约束,从机

理上保证迭代寻优的收敛性。

3)通过充分的算例分析验证所提方法的有效性与工程可行性。在高比例可再生能源场景中,全面评估所提方法在安全稳定运行、算法收敛与计算复杂度等方面的综合性能,验证其工程可行性。

## 1 动态安全稳定约束的电力系统优化调度

电力系统多类型资源协同调度示意如图1所示。电力系统中的可调度资源主要包括火电机组、风电机组、光伏和储能系统。源网荷储各类资源协同运行,以共同满足系统的供需平衡。在日前调度阶段,系统通过求解优化调度问题来确定各火电机组的开机状态与出力以及各类资源的调度出力。

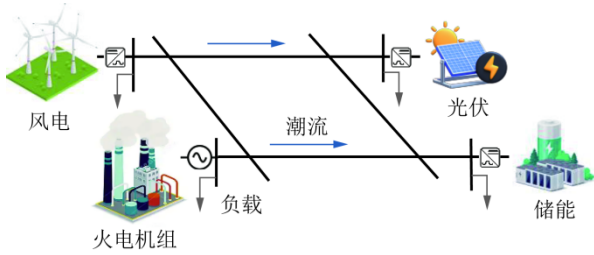


图1 电力系统多类型资源协同调度示意

Fig. 1 Diagram of the power system scheduling of different kinds of resources

### 1.1 传统优化调度问题

电力系统的传统优化调度问题一般以经济最优为目标,考虑系统在小时级的稳态运行约束<sup>[36]</sup>:

$$\begin{cases} \min \sum_{t \in T} \sum_{g \in G} (C_g^{\text{SU}} u_{g,t} + C_g^{\text{SD}} d_{g,t} + C_g^{\text{G}} P_{g,t}) \\ \text{s.t. } P_{g,t}, R_{g,t}, P_{w,t}^{\text{wind}}, R_{w,t}^{\text{wind}}, P_{v,t}^{\text{pv}}, R_{v,t}^{\text{pv}}, P_{s,t}^{\text{stor}}, R_{s,t}^{\text{stor}}, E_{s,t} \geq 0 \\ x_{g,t}, u_{g,t}, d_{g,t} \in \{0, 1\} \\ P_{s,t}^{\text{stor}}, F_{l,t}, \theta_{b,t} \in \mathbb{R}, g \in G, w \in W, v \in V \\ s \in S, t \in T, b \in B, l \in L, \text{式(2)—(6)} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $C_g^{\text{SU}}$ 、 $C_g^{\text{SD}}$ 、 $C_g^{\text{G}}$  分别为火电机组的开机成本、停机成本、可变运行成本;  $P_{g,t}$ 、 $P_{w,t}^{\text{wind}}$ 、 $P_{v,t}^{\text{pv}}$ 、 $P_{s,t}^{\text{stor}}$  分别为火电机组、风电机组、光伏和储能系统的出力;  $R_{g,t}$ 、 $R_{w,t}^{\text{wind}}$ 、 $R_{v,t}^{\text{pv}}$ 、 $R_{s,t}^{\text{stor}}$  分别为火电机组、风电机组、光伏和储能系统的调频备用容量;  $x_{g,t}$ 、 $u_{g,t}$ 、 $d_{g,t}$  分别为火电机组的启停状态、开机变量、停机变量;  $E_{s,t}$  为储能系统的荷电状态;  $F_{l,t}$  为线路潮流;  $\theta_{b,t}$  为节点的相角;  $g/G$ 、 $w/W$ 、 $v/V$ 、 $s/S$ 、 $t/T$ 、 $b/B$ 、 $l/L$  分别为火电机组、风电机组、光伏、储能系统、时间点、节点和线路的索引/集合。

优化调度模型式(1)确定了火电机组的启停状态与各类资源的调度方案。后续约束式(2)—(6)给出了各类资源与电力网络的精细化运行模型。

#### 1) 风电机组。

$$\begin{cases} P_{w,t}^{\text{wind}} + R_{w,t}^{\text{wind}} \leq \lambda_{w,t}^{\text{wind}} \bar{P}_w^{\text{wind}} \\ P_{w,t}^{\text{wind}} - R_{w,t}^{\text{wind}} \geq 0 \\ R_{w,t}^{\text{wind}} \leq r_w^{\text{max}} \lambda_{w,t}^{\text{wind}} \bar{P}_w^{\text{wind}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\lambda_{w,t}^{\text{wind}}$  为风电机组  $w$  在  $t$  时刻的可用出力占比;  $\bar{P}_w^{\text{wind}}$  为风电机组  $w$  的装机容量;  $r_w^{\text{max}}$  为风电机组  $w$  的最大备用比例。

#### 2) 光伏。

$$\begin{cases} P_{v,t}^{\text{pv}} + R_{v,t}^{\text{pv}} \leq \lambda_{v,t}^{\text{pv}} \bar{P}_v^{\text{pv}} \\ P_{v,t}^{\text{pv}} - R_{v,t}^{\text{pv}} \geq 0 \\ R_{v,t}^{\text{pv}} \leq r_v^{\text{max}} \lambda_{v,t}^{\text{pv}} \bar{P}_v^{\text{pv}} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\lambda_{v,t}^{\text{pv}}$  为  $t$  时刻光伏  $v$  的可用出力占比;  $\bar{P}_v^{\text{pv}}$  为光伏  $v$  的装机容量;  $r_v^{\text{max}}$  为光伏  $v$  的最大备用比例。

#### 3) 火电机组。

$$\begin{cases} P_{g,t} + R_{g,t} \leq \bar{P}_g x_{g,t} \\ P_{g,t} - R_{g,t} \geq \underline{P}_g x_{g,t} \\ R_{g,t} \leq r_g^{\text{max}} \bar{P}_g x_{g,t} \\ P_{g,t} - P_{g,t-1} \leq x_{g,t-1} \alpha_g^{\text{up}} + u_{g,t} \underline{P}_g \\ P_{g,t-1} - P_{g,t} \leq x_{g,t-1} \alpha_g^{\text{down}} + d_{g,t} \underline{P}_g \\ u_{g,t} - d_{g,t} = x_{g,t} - x_{g,t-1} \\ \sum_{\tau=t-T_g^{\text{G,on}}}^{t-1} x_{g,\tau} \geq d_{g,t} T_g^{\text{G,on}} \\ \sum_{\tau=t-T_g^{\text{G,off}}}^{t-1} (1 - x_{g,\tau}) \geq u_{g,t} T_g^{\text{G,off}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\bar{P}_g$ 、 $\underline{P}_g$  分别为火电机组  $g$  的最大、最小出力;  $r_g^{\text{max}}$  为火电机组的最大备用比例;  $\alpha_g^{\text{up}}$ 、 $\alpha_g^{\text{down}}$  分别为火电机组的上、下坡速率;  $T_g^{\text{G,on}}$ 、 $T_g^{\text{G,off}}$  分别为火电机组的最小启、停时间。

#### 4) 储能系统。

$$\begin{cases} P_{s,t}^{\text{stor}} + R_{s,t}^{\text{stor}} \leq \bar{P}_s^{\text{stor}} \\ P_{s,t}^{\text{stor}} - R_{s,t}^{\text{stor}} \geq -\bar{P}_s^{\text{stor}} \\ E_{s,t} = \begin{cases} E_s^{\text{ini}}, t = 0 \\ E_{s,t-1} - P_{s,t-1}^{\text{stor}} \eta_s, t > 0 \end{cases} \\ 0 \leq E_{s,t} \leq \bar{E}_s \\ R_{s,t}^{\text{stor}} \leq r_s^{\text{max}} \bar{P}_s^{\text{stor}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\bar{P}_s^{\text{stor}}$  为储能  $s$  的功率容量;  $E_s^{\text{ini}}$  为初始荷电状态;  $\bar{E}_s$  为最大荷电状态;  $r_s^{\text{max}}$  为储能  $s$  的最大备用比例。

#### 5) 网络约束。

$$\begin{cases} -\pi \leq \theta_{b,t} \leq \pi \\ F_{l,t} = B_l (\theta_{l(+),t} - \theta_{l(-),t}) \\ \sum_{g \in \Omega_l^{\text{G}}} P_{g,t} + \sum_{w \in \Omega_l^{\text{W}}} P_{w,t}^{\text{wind}} + \sum_{v \in \Omega_l^{\text{V}}} P_{v,t}^{\text{pv}} + \sum_{s \in \Omega_l^{\text{S}}} P_{s,t}^{\text{stor}} - \\ \sum_{l \in \Omega_l^{\text{LS}}} F_{l,t} + \sum_{l \in \Omega_l^{\text{LX}}} F_{l,t} - P_{b,t}^{\text{D}} = 0 \\ -\bar{F}_l \leq F_{l,t} \leq \bar{F}_l \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $B_l$  为线路  $l$  的导纳;  $\theta_{l(+),t}$ 、 $\theta_{l(-),t}$  分别为线路  $l$  首端、末端节点的相角;  $\Omega_b^g$ 、 $\Omega_b^w$ 、 $\Omega_b^v$ 、 $\Omega_b^s$  分别为连接到节点  $b$  的火电机组、风电机组、光伏、储能系统的集合;  $\Omega_b^{ls}$ 、 $\Omega_b^{le}$  分别为节点  $b$  作为首端节点的线路集合、节点  $b$  作为末端节点的线路集合;  $P_{b,t}^D$  为节点  $b$  处的负荷需求;  $\bar{F}_l$  为线路  $l$  的容量。

## 1.2 动态安全分析

传统优化调度模型式(1)侧重于最小化电力系统整体运行成本。然而,在高比例可再生能源渗透场景下,该模型得到的火电机组的调度出力将显著减少。这种转变可能导致系统出现 2 类动态安全问题,如图 2 所示。

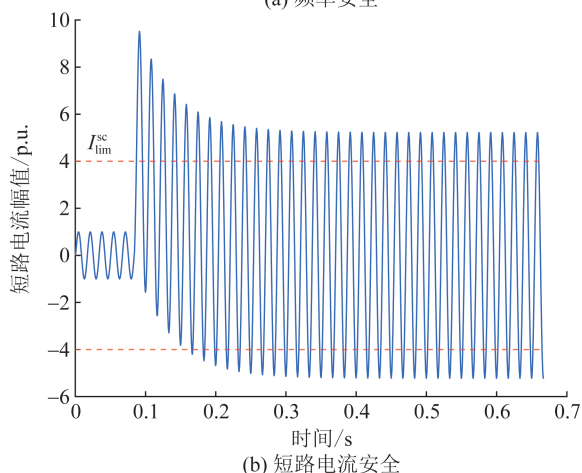
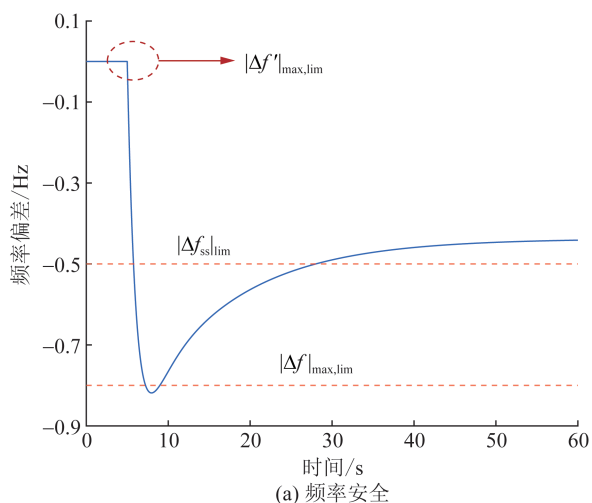


图 2 电力系统动态安全挑战

Fig. 2 Dynamic security issues of the power system

1) 频率安全。可再生能源发电和负荷的波动性可能导致电力系统供需瞬时失衡,进而引发频率偏差。衡量频率安全的指标包括频率变化速率、频率最低点和稳态频率偏差,这些指标均与系统实时的惯量和调频备用容量密切相关。

2) 短路电流安全。当系统发生故障时,需要足够的短路电流来确保保护装置的可靠动作。故障电

流的大小受在线同步发电机组数量及其运行状态的影响。如果在线同步发电机组不足,可能会危及故障期间的系统稳定性。

## 1.3 基于再调度技术的三阶段迭代求解框架

为保证电力系统的安全稳定运行,在调度中引入动态安全约束至关重要。然而,由于频率暂态和故障电流的高阶非线性特性,难以将其解析地表征并内嵌入优化调度模型中。为应对这一挑战,本文提出了基于再调度技术的三阶段迭代求解框架,如图 3 所示。

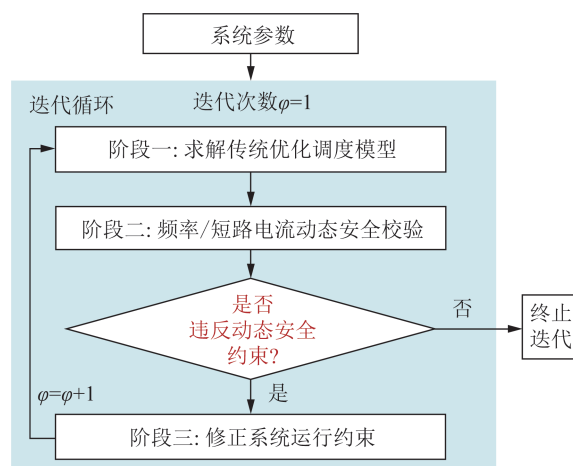


图 3 基于再调度技术的调度方案

Fig. 3 Re-scheduling-based scheduling framework

所提基于再调度技术的源网荷储协同调度方案具体包含计及动态安全约束的优化问题求解流程中的 3 个阶段:

**阶段一:** 求解传统的优化调度模型。

**阶段二:** 对所得调度方案进行动态安全校验,基于实时动态仿真得到故障下的系统频率响应和短路电流水平。根据系统动态安全稳定要求判断当前调度方案是否存在动态安全风险,若不存在动态安全风险,则采用当前调度方案,否则进入阶段三。

**阶段三:** 基于灵敏度分析定向生成提升系统动态安全稳定的增补约束,并将其添加到优化调度模型中。随后返回阶段一求解优化调度模型并持续迭代,直到获得满足动态安全约束的调度方案。

## 2 频率安全分析与约束重构

本章首先建立扰动后的频率动态模型,随后分析影响频率安全指标的主要因素,最后,对频率动态安全约束进行重构并将其添加到优化调度模型中,以保证频率安全。

### 2.1 频率动态模型

对于给定的小时级时刻  $t$ , 扰动后的频率动态通

常由一阶动态方程描述:

$$2H_i \frac{d\Delta f(\tau)}{d\tau} + D\Delta f(\tau) = \Delta P_{m,i}(\tau) - \Delta P_e(\tau) \quad (7)$$

式中:  $H_i$  为系统惯量;  $\tau$  为秒级尺度的时间;  $\Delta f(\tau)$  为系统在秒级时间尺度的频率偏差;  $D$  为系统阻尼;  $\Delta P_{m,i}(\tau)$  为所有资源为应对频率偏差的功率调整量(一般由下垂控制系数决定);  $\Delta P_e(\tau)$  为触发频率波动的瞬时不平衡功率。

对于式(7)中各类资源为应对频率偏差的功率调整量  $\Delta P_{m,i}(\tau)$ , 同步发电机、并网逆变器等各类发电机资源的频率响应均采用基于下垂控制的方式进行建模。基于此, 系统在功率波动  $\Delta P_e$  下的频率动态如图4所示。传递函数模型  $G_i(s)$  为:

$$G_i(s) = \frac{\Delta f}{\Delta P_e} = \left[ (sH_i + D) + \sum_{g \in \mathcal{G}} \frac{K_{g,t}^G (1 + sF^G T^G)}{1 + sT^G} + \sum_{w \in \mathcal{W}} \frac{K_{w,t}^{\text{wind}}}{1 + sT^{\text{wind}}} + \sum_{v \in \mathcal{V}} \frac{K_{v,t}^{\text{pv}}}{1 + sT^{\text{pv}}} + \sum_{s \in \mathcal{S}} \frac{K_{s,t}^{\text{stor}}}{1 + sT^{\text{stor}}} \right]^{-1} \quad (8)$$

式中:  $K_{g,t}^G$ 、 $K_{w,t}^{\text{wind}}$ 、 $K_{v,t}^{\text{pv}}$ 、 $K_{s,t}^{\text{stor}}$  分别为火电机组、风电机组、光伏、储能系统的下垂增益;  $T^G$ 、 $T^{\text{wind}}$ 、 $T^{\text{pv}}$ 、 $T^{\text{stor}}$  分别为火电机组、风电机组、光伏、储能系统的时间常数;  $F^G$  为火电机组的再热比。

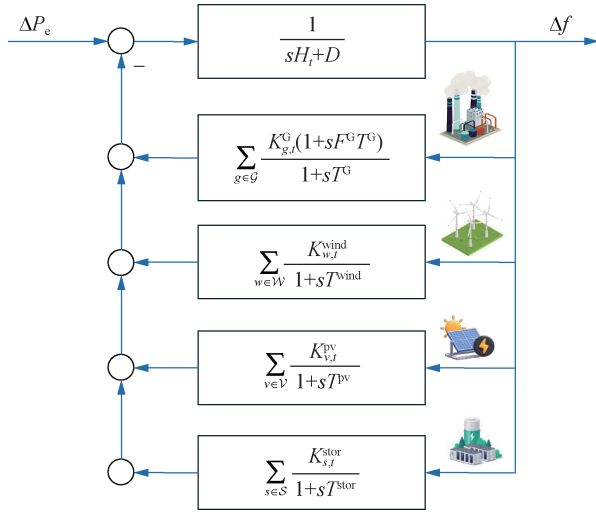


图4 系统传递函数模型

Fig. 4 System transfer function model

系统频率动态模型式(8)中的参数取决于系统的调度决策, 具体来说:

1) 系统惯量。系统惯量  $H_i$  由所有在线的火电机组的转动惯量提供。

$$H_i = \sum_{g \in \mathcal{G}} H_g^G x_{g,t} \bar{P}_g / f_0 \quad (9)$$

式中:  $H_g^G$  为火电机组的固有惯量;  $f_0$  为标称频率。

2) 下垂增益。不同类型资源的下垂增益由资源的频率调节备用决定。

$$K_{i,t}^\kappa = \sum R_i^\kappa / \left| \Delta f \right|_{\max, \lim} \quad (10)$$

式中: 上标  $\kappa$  表示不同类型的资源, 包括火电机组、风电机组、光伏和储能系统;  $\left| \Delta f \right|_{\max, \lim}$  为频率最低点限制。

## 2.2 频率动态安全分析

频率动态安全通常由以下3个关键指标表征:

1) 频率最大下降速率。

$$\left| \Delta f' \right|_{\max} = \left| -\Delta P_e / 2H_i \right| \leq \left| \Delta f' \right|_{\max, \lim} \quad (11)$$

式中:  $\left| \Delta f' \right|_{\max}$  为功率不平衡后的最大瞬时频率变化率;  $\left| \Delta f' \right|_{\max, \lim}$  为频率变化率最大限制。

2) 稳态频率偏差。

$$\left| \Delta f_{ss} \right| = \left| \frac{\Delta P_e}{D + K_{g,t}^G + K_{w,t}^{\text{wind}} + K_{v,t}^{\text{pv}} + K_{s,t}^{\text{stor}}} \right| \leq \left| \Delta f_{ss} \right|_{\lim} \quad (12)$$

式中:  $\left| \Delta f_{ss} \right|$  为系统在功率不平衡后达到新的平衡状态时持续存在的稳态频率偏差;  $\left| \Delta f_{ss} \right|_{\lim}$  为稳态频率偏差限制。

3) 频率最低点。

$$\left| \Delta f \right|_{\max} \leq \left| \Delta f \right|_{\max, \lim} \quad (13)$$

式中:  $\left| \Delta f \right|_{\max}$  为在扰动后的暂态期间达到的最大频率偏差(频率最低点)。频率响应是通过传递函数的拉普拉斯逆变换获得的, 因此频率最低点通常由一个隐式表达式决定:

$$\Delta f(\tau) = \mathcal{L}^{-1} [G_i(s) \cdot \Delta P_e(s)] \quad (14)$$

式中:  $\mathcal{L}^{-1}$  表示拉普拉斯逆变换。

## 2.3 频率动态安全约束重构

基于上述频率动态分析, 频率安全指标取决于系统当前的惯量和各类资源的调频备用容量。针对每个频率安全指标, 其对应的动态安全约束如下。

1) 频率最大下降速率。式(11)表明频率最大下降速率仅由总系统惯量决定。因此, 若频率最大下降速率违反安全限制, 代入式(9)可以增加如下惯量约束:

$$2 \sum_{g \in \mathcal{G}} H_g^G x_{g,t} \bar{P}_g / f_0 \geq \left| -\frac{\Delta P_e}{\left| \Delta f' \right|_{\max, \lim}} \right| \quad (15)$$

2) 稳态频率偏差。式(12)表明稳态频率偏差由系统总的下垂增益决定。因此, 将其代入(10), 稳态频率偏差约束可以重构不同类型资源的调频备用约束。

$$D + \sum \frac{R_i^\kappa}{\left| \Delta f \right|_{\max, \lim}} \geq \left| \frac{\Delta P_e}{\left| \Delta f_{ss} \right|_{\lim}} \right| \quad (16)$$

3) 频率最低点。由于频率最低点式(13)无法解

析表征,采用基于动态仿真的灵敏度分析方法以识别频率最低点的主要影响因素<sup>[37]</sup>。考虑到影响系统动态安全的决策变量包括不同类型资源参与调频的下垂系数,在固定其他变量的前提下,依次对某一类资源的下垂系数(如火电机组下垂系数 $K^G$ )在其可行范围内进行采样,基于式(13)在 MATLAB 环境中开展动态仿真,得到对应的频率最低点数据 $|\Delta f|_{\max}$ 。对每类资源均完成 1000 组仿真测算后,以频率最低点为因变量、以下垂系数为自变量,通过最小二乘线性回归计算线性灵敏度,结果如表 1 所示。

表 1 频率最低点灵敏度分析  
Table 1 Sensitivity analysis of frequency nadir

| 自变量                        | 灵敏度 $ \Delta f _{\max} / \Delta \theta$ |
|----------------------------|-----------------------------------------|
| 火电机组下垂系数 $K^G$             | -0.017                                  |
| 风电机组下垂系数 $K^{\text{wind}}$ | -0.068                                  |
| 光伏下垂系数 $K^{\text{pv}}$     | -0.073                                  |
| 储能系统下垂系数 $K^{\text{stor}}$ | -0.077                                  |

根据表 1 中的灵敏度分析结果,频率最低点的主导影响因素包括风电、光伏、储能这些通过逆变器并网资源的调频备用容量。通过测算不同外部扰动 $\Delta P_e$ 取值的情景发现,灵敏度系数的绝对幅值会随之成比例变化,但不同资源下垂系数灵敏度之间的相对大小保持稳定,风电、光伏、储能的灵敏度仍然显著高于其他资源,因此这些逆变器并网资源的调频备用容量始终是频率最低点的主导影响因素。原因在于其功率调节速率快,能够在毫秒级响应下迅速遏制频率跌落。

因此,为提升频率最低点,可以增补风电、光伏、储能等逆变器并网资源的调频备用容量。

$$\left[ \sum R^{\tilde{\kappa}} \right]_{\varphi+1} \geq (1 + \beta) \left[ \sum R^{\tilde{\kappa}} \right]_{\varphi}, \tilde{\kappa} \in \{W, V, S\} \quad (17)$$

式中: $\tilde{\kappa}$ 表示资源类型,包括风电机组、光伏和储能系统; $\varphi$ 表示迭代次数; $\beta$ 为由系统运营商确定的迭代参数。式(17)表示在当前的基础上增加逆变器并网资源的调频备用容量。

式(15)一(17)构成了频率安全再调度的增补约束。

### 3 短路电流安全分析与约束重构

本章首先建立短路电流的计算模型,随后开展短路电流安全评估,最后对短路电流安全进行约束重构。

#### 3.1 短路电流安全分析

短路电流计算模型如图 5 所示。考虑故障节点

$F$ ,短路电流通过叠加原理推导<sup>[33]</sup>。

$$I_F^{\text{sc}} = \frac{-\sum_{g \in \mathcal{G}} Z_{F\Psi(g)} I_g x_{g,t} - \sum_{i \in \mathcal{I}} Z_{F\Phi(i)} I_i \lambda_i}{Z_{FF}} \quad (18)$$

式中: $I_F^{\text{sc}}$ 为故障节点 $F$ 的短路电流; $Z$ 为系统阻抗矩阵; $\Psi(g)$ 、 $\Phi(i)$ 分别为将某个发电机、逆变器映射到对应的节点索引; $I_g$ 为火电机组 $g$ 的短路电流; $\lambda_i$ 为风机和光伏的在线容量百分比; $I_i$ 为逆变器节点在故障前的电流注入。

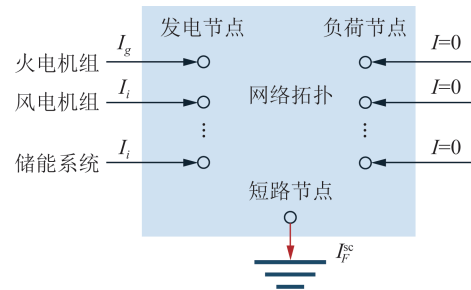


图 5 短路电流计算模型

Fig. 5 Short circuit current calculation model

系统阻抗矩阵为 $Z = Y^{-1}$ ,其中 $Y$ 表示导纳矩阵,定义为:

$$Y = Y^0 + Y^g \quad (19)$$

式中: $Y^0$ 为电网的导纳矩阵; $Y^g$ 为由火电机组的亚暂态电抗 $X_g''$ 引入的增量导纳矩阵。

矩阵 $Y^g$ 的元素 $Y_{kj}^g$ 取决于火电机组的开机状态:

$$Y_{kj}^g = \begin{cases} \frac{1}{X_g''} x_{g,t}, k = j \wedge \exists g \in \mathcal{G}, \text{ s.t. } k = \Psi(g) \\ 0, \text{ 其他} \end{cases} \quad (20)$$

系统短路电流安全约束为:

$$I_F^{\text{sc}} \geq I_{\text{lim}}^{\text{sc}} \quad (21)$$

式中: $I_{\text{lim}}^{\text{sc}}$ 为短路电流安全限制。

#### 3.2 灵敏度分析与安全约束重构

从式(18)一(21)可以看出,短路电流由同步发电机的在线状态决定。因此,当短路电流不满足动态安全约束时可以通过增加火电机组开机来补偿。

首先,对每个火电机组投运状态对节点短路电流的影响进行灵敏度分析。节点 $F$ 处短路电流相对于机组 $g$ 在线状态的贡献可近似表示为:

$$\Delta I_{g \rightarrow F} \approx \left| E_{g''} / X_{g''} \right| \cdot \left| Z_{F\Psi(g)} / Z_{FF} \right| \quad (22)$$

式中: $\Delta I_{g \rightarrow F}$ 与火电机组 $g$ 的内部电压 $E_{g''}$ 、其亚暂态电抗 $X_{g''}$ 以及发电机节点与故障节点之间的互阻抗相关。因此,可基于式(22)对火电机组 $g$ 对故障节点 $F$ 的短路电流贡献进行排序,进而强制贡献最大的火电机组开机以满足短路电流安全约束。

基于此,短路电流安全约束重构流程为:

1) 不满足短路电流安全的故障节点辨识。在当前调度策略下,在所有时刻 $t$ ,基于式(18)计算系统中所有节点的短路电流,得到违背短路电流安全 $I_F^{sc} < I_{lim}^{sc}$ 的故障节点集合 $F_{viol}$ 。

2) 针对 $t$ 时刻未开机的发电机组,计算其对故障节点短路电流的贡献并进行排序。对于每一个故障节点 $F \in F_{viol}$ ,计算 $t$ 时刻未开机的发电机组对短路电流贡献的灵敏度指标 $\Delta I_{g \rightarrow F}$ ,基于在所有故障节点上的短路电流综合贡献对机组进行排序,即:

$$S_g = \sum_{F \in F_{viol}} \Delta I_{g \rightarrow F} \quad (23)$$

3) 短路电流安全约束重构。对于 $t$ 时刻,根据排序结果,从贡献最高的机组开始校核其启停可行性,若因最小停机时间不足等原因无法在 $t$ 时刻开机,则顺次选择贡献次高的机组,向机组组合模型增补该机组开机约束,强制该机组上线。

$$\begin{cases} x_{g^*} = 1 \\ \text{s.t. } S_{g^*} = \max S_g \end{cases} \quad (24)$$

与此同时,在 $t$ 时刻已开机的火电机组仍保持开机。

#### 4 基于再调度技术的三阶段优化调度方法

本章将第2章、第3章建立的频率与短路电流动态安全约束整合入再调度框架中,进而得到考虑动态安全约束的三阶段优化调度方法,具体流程如下:

初始化:初始化迭代步长 $\varphi = 1$ ,给定频率安全阈值 $\varepsilon_f = \left\{ \left| \Delta f' \right|_{\max, \lim}, \left| \Delta f_{ss} \right|_{\lim}, \left| \Delta f \right|_{\max, \lim} \right\}$ 和短路电流阈值 $\varepsilon_I = I_{lim}^{sc}$ 。

阶段一:求解传统机组组合模型式(1),得到调度方案 $Q(\varphi)$ ,进入循环。

阶段二:基于调度方案 $Q(\varphi)$ 进行动态仿真,对频率和短路电流动态安全进行校验。

1) 频率安全校验:基于式(8)开展动态仿真得到频率最大下降速率 $\left| \Delta f' \right|_{\max}$ 、稳态频率偏差 $\left| \Delta f_{ss} \right|$ 、频率最低点 $\left| \Delta f \right|_{\max}$ ,得到所有违背约束的时刻集合 $\mathcal{V}_f^{(\varphi)}$ 。

2) 短路电流安全校验:计算故障节点 $F$ 处的短路电流 $I_F^{sc}$ ,辨识所有违背约束的时刻集合 $\mathcal{V}_I^{(\varphi)}$ 。

若 $\mathcal{V}_f^{(\varphi)} = \emptyset$ 且 $\mathcal{V}_I^{(\varphi)} = \emptyset$ ,表明系统满足动态安全约束,循环结束,得到满足动态安全的调度方案 $Q(\varphi)$ ;否则,进入阶段三。

阶段三:

1) 对于频率安全,按照第2章进行动态约束重构;

2) 对于短路电流安全,按照第3章进行动态约束重构。

将生成的重构约束式(15)~(17)、式(24)嵌入传统优化调度模型式(1)中,更新迭代步长 $\varphi = \varphi + 1$ ,并重新求解阶段一中的优化调度问题,得到新的调度方案 $Q(\varphi)$ 。

通过三阶段迭代,算法最终将输出同时满足经济性、稳态与动态约束的调度方案。

收敛性分析:在每次迭代的阶段三中,针对频率和短路电流越限所重构的约束均为决策变量的线性不等式,本质上是对可行域沿越限指标下降方向的一次切割。该过程具备以下性质:1) 单调性,越限程度在迭代中严格递减;2) 有限步终止,机组启停状态属于有限离散变量,连续备用容量的调节范围受各类资源最大备用容量限制,因此切割次数存在上界,算法将在有限次迭代内收敛至满足动态安全的调度方案,或因不可行而终止。

针对不同类型的有功不平衡场景,例如可再生能源出力下降、线路开断、负荷突增以及机组掉线等,频率最低点的主导因素表现出较强的一致性,主要取决于逆变器并网资源下垂增益、火电机组下垂增益及系统惯量等关键参数。其影响机理在于,逆变器资源具备秒级甚至亚秒级的快速调节能力,能够在各类扰动下率先提供功率支撑,从而成为抑制频率深度跌落的主导因素。因此,基于逆变器资源下垂增益的约束重构可有效覆盖绝大多数运行方式的安全需求。类似地,基于火电机组开机的约束重构可满足短路电流的安全需求。在下文5.2节将给出不同功率不平衡场景下的算例分析,均可在有限步长内收敛。

计算复杂度分析:所提的三阶段迭代框架中加入的所有动态安全约束均为线性约束,确保了每次求解的问题均为混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)问题,可由商业求解器高效求解。

#### 5 算例分析

本章通过算例分析验证所提考虑动态安全约束的三阶段优化调度方法的性能。算例分析基于改进的HRP-38网络系统<sup>[38]</sup>展开,系统拓扑如图6所示,网络拓扑结构和负荷需求曲线沿用文献[38]中的数据。

##### 5.1 传统优化调度方案决策分析

本文首先对阶段一的传统优化调度模型进行求解,得到日内小时级供需平衡情况,如图7所示。结

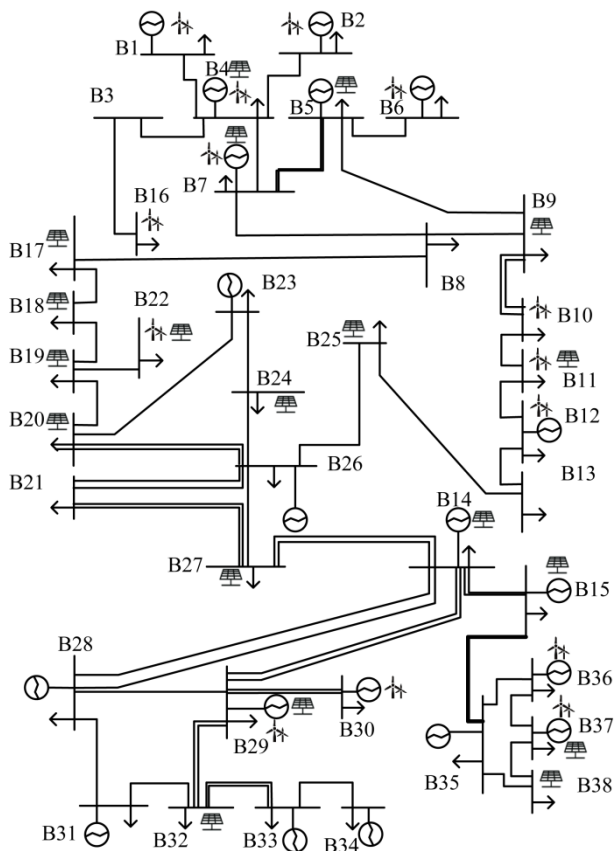


图 6 HRP-38 系统示意图

Fig. 6 Diagram of the HRP-38 system

果显示,火电作为系统的基础支撑电源,其出力在可再生能源大发的时段出现明显下降。这导致火电机组的总在线容量始终低于系统负荷,从而给系统运行带来了潜在的稳定性风险。与此同时,储能系统通过灵活地充放电为系统提供了日内调节支撑。系统全天可再生能源的渗透率达到了 28.77%,在 14:00 达到峰值 57.10%。

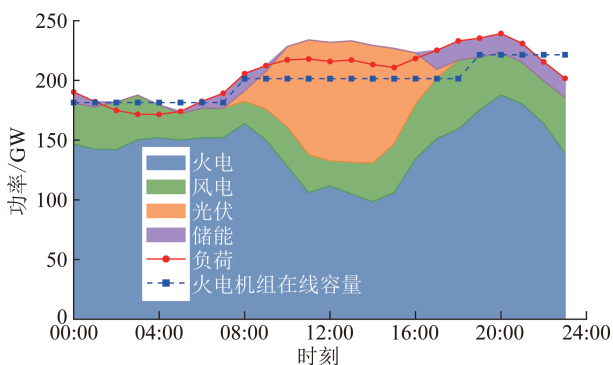


图 7 系统调度曲线与供需平衡

Fig. 7 System dispatch profiles and supply-demand balance

## 5.2 再调度决策分析

基于传统优化调度的调度曲线,对系统的频率与短路电流进行动态安全校验。对于频率安全,瞬时功率不平衡扰动的来源可能是可再生能源出力的

骤降(如风功率快速跌落)、线路开断、负荷突增以及机组意外掉线等,已有文献中的可再生能源、负荷不确定性一般取 5%~10%,算例中单个火电机组的容量约为 20 GW(10% 的负荷水平),综合考虑系统最大故障功率、可再生能源与负荷不确定性的范围,选取 10% 的负荷突增作为基础算例<sup>[39]</sup>。频率动态仿真曲线如图 8 所示。

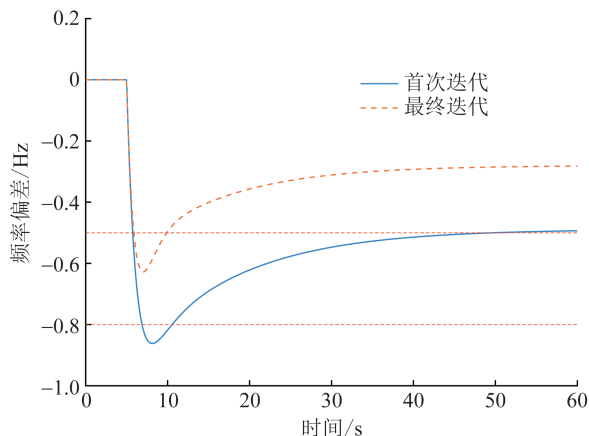


图 8 系统频率动态响应

Fig. 8 System frequency dynamic response

从图 8 中可以看出,传统机组组合方案(首次迭代)下系统的频率最低点越限。系统频率响应与不同类型资源提供的调频备用容量相关。图 9 给出了不同调度决策下系统的备用容量曲线。从图 9 中可以看出,在首次迭代中(传统优化调度方案),系统调频备用容量主要由火电机组贡献,但其备用容量与响应速率不足以满足系统的频率安全要求。通过第 2 章的再调度方案,系统在每一步迭代中增补了逆变器资源(包括风电、光伏、储能)的调频备用容量,从而为系统提供快速调频支撑,在最终迭代中,逆变器资源的调频备用容量显著上升,图 8 的结果也表明其显著改善了系统的频率性能,满足安全稳定要求。

对于短路电流安全校验,多个故障节点在 24 h

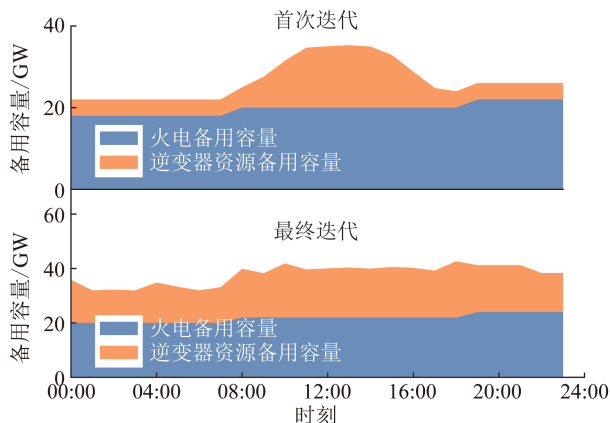


图 9 不同类型资源的调频备用曲线

Fig. 9 Frequency reserve of different resources

中均未能满足所需的短路电流安全限值。火电机组的开机状态如图 10 所示。

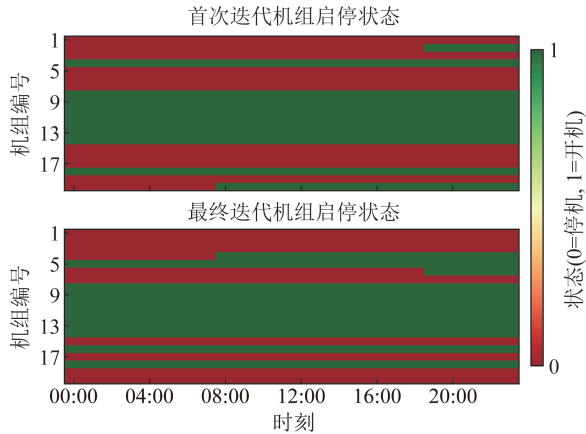


图 10 火电机组开机状态

Fig. 10 Online status of thermal generators

从图 10 中可以看出,传统优化调度方案(首次迭代)下,在线的火电机组数量不足,导致系统的短路电流无法满足要求。通过第 3 章的再调度方案,系统在每一步迭代中增补了火电机组的开机限制,从而为系统提供了短路电流支撑,满足了短路电流的安全稳定要求。

此外,图 11 给出了随着算法迭代过程,系统违反频率安全与短路电流安全约束的个数。从图 11 中可以看出,随着迭代流程的推进,系统动态安全风险逐步降低。在第 3 次迭代中系统短路电流安全已满足要求,在第 5 次迭代中系统的频率安全也满足要求。这表明所提方案保证了计算效率。

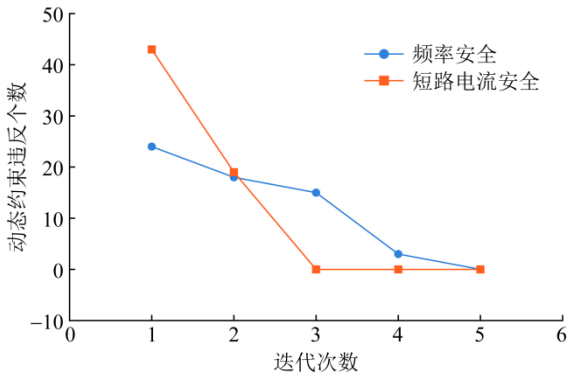


图 11 算法迭代过程动态安全越限情况

Fig. 11 The dynamic security risks during the iteration process

图 12 给出了频率最低点随算法迭代次数的变化,从图 12 中可以看出,随着每一步迭代,逆变器并网资源的调频备用容量(全天每小时的平均值)不断提升,从而使得频率最低点逐渐减小,在第 5 次迭代后所有时刻的频率最低点都满足要求。

类似地,图 13 给出了节点 33 的短路电流随算法

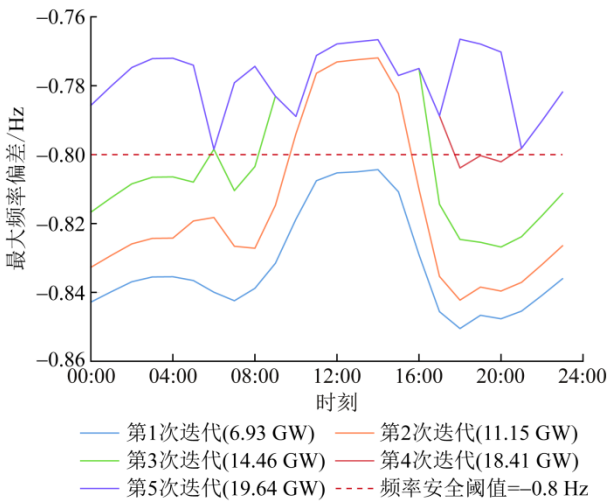


图 12 频率最低点随算法迭代的变化

Fig. 12 Frequency nadir changes with algorithm iterations

迭代的变化。从图 13 中可以看出,随着每一步迭代,火电机组的在线容量(全天每小时的平均值)不断提升,表明有新的火电机组开机用于支撑短路电流,从而使得短路电流不断提升,在第 3 次迭代后所有时刻的短路电流都满足要求。

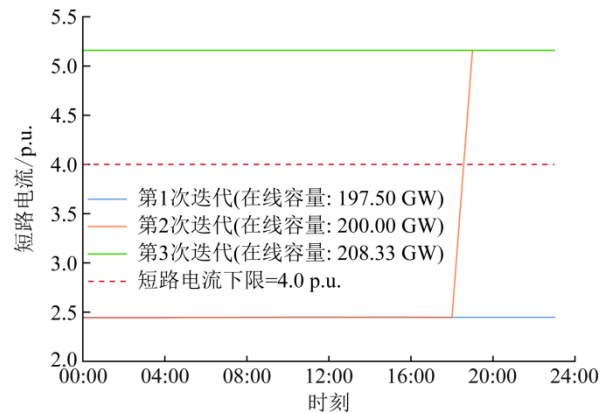


图 13 节点 33 的短路电流随算法迭代的变化

Fig. 13 Short circuit current changes of Bus 33 with algorithm iterations

此外,表 2 给出了算法迭代过程中的运行成本。可以看出随着迭代的进行,系统对备用容量和火电机组开机容量的需求逐步增大,运行成本不断升高,这是为确保系统动态安全而付出的额外成本。

表 2 算法迭代过程中的运行成本  
Table 2 Operational cost during the iterative process

| 迭代次数 | 成本/亿元 |
|------|-------|
| 1    | 10.71 |
| 2    | 10.76 |
| 3    | 10.81 |
| 4    | 11.05 |
| 5    | 11.13 |

算法的迭代过程依赖于式(17)中的经验参数 $\beta$ 。表3给出了不同经验参数 $\beta$ 下算法的效果。当 $\beta$ 取值较小时,迭代次数较多,但所得成本相对最低,相当于“精调”模式;而随着 $\beta$ 取值增大,迭代次数减少,计算时间缩短,但系统总成本随之升高。这是因为算法倾向于大幅增加调频备用容量来满足动态安全约束,虽能快速获得可行解,但成本处于次优水平。

表3 不同经验参数 $\beta$ 下算法的性能  
Table 3 Performance of the algorithm under different empirical parameter  $\beta$

| $\beta$ | 迭代次数 | 计算时间/s | 成本/亿元 |
|---------|------|--------|-------|
| 0.2     | 10   | 367.4  | 11.04 |
| 0.4     | 6    | 135.8  | 11.09 |
| 0.6     | 5    | 91.0   | 11.13 |
| 0.8     | 4    | 73.7   | 11.23 |

考虑到系统功率不平衡扰动的来源可能是可再生能源出力的骤降、线路开断、负荷突增以及机组意外掉线等,本节进一步选取7.5%、10.0%、12.5%、15.0%的负荷扰动作为多类型场景进行算法性能测试,结果如表4所示。

表4 不同功率扰动下算法的性能  
Table 4 Performance of the algorithm under different power disturbances

| 负荷扰动/% | 迭代次数 | 计算时间/s | 火电在线容量/GW | 逆变器资源备用/GW | 成本/亿元 |
|--------|------|--------|-----------|------------|-------|
| 7.5    | 3    | 85.7   | 204.17    | 7.00       | 10.77 |
| 10.0   | 5    | 91.0   | 208.33    | 19.64      | 11.13 |
| 12.5   | 7    | 104.3  | 220.00    | 26.50      | 11.57 |
| 15.0   | 9    | 205.9  | 224.17    | 29.75      | 11.87 |

通过表4可以看出,功率扰动的提升将导致迭代次数、计算时间的增加,而算法通过更多次的迭代确保了更多的火电机组在线容量与逆变器资源的备用容量,从而保证了在更高功率扰动下的动态安全。此外,由于所提三阶段迭代框架中加入的所有动态安全约束均为线性约束,算法的计算效率得到了保证,可以在5 min内完成计算。

### 5.3 方案对比分析

本节将基于“再调度”技术的方法与已有的动态安全约束内嵌的优化调度方法进行对比分析。考虑到频率最低点约束与短路电流约束的非线性、非解析特性,已有文献多采用数据驱动的方法拟合动态安全约束,进而将其内嵌入优化调度问题中<sup>[20,34]</sup>。数据驱动方法首先通过仿真得到给定调度决策所对应的动态安全指标数据,而后通过数据分析方法将动

态安全指标转化为调度决策的可解析函数。以频率安全为例,通过动态仿真可以得到给定系统惯量 $H_t=5.0$  p. u. 下,火电机组下垂增益 $K_t^G$ 和逆变器资源下垂增益 $K_t^K$ 对应的频率最低点,如图14所示。

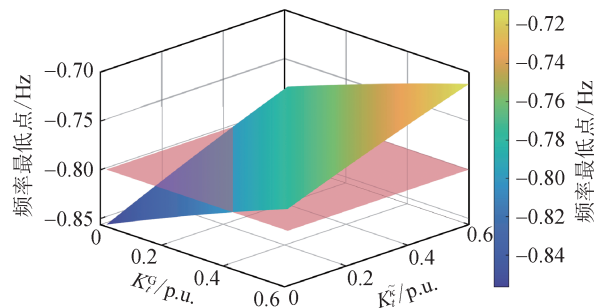


图14 给定调度决策下的频率最低点  
(系统惯量 $H_t=5.0$  p. u.)

Fig. 14 Frequency nadir under given dispatch decisions  
(system inertia  $H_t=5.0$  p. u.)

在频率安全相关参数的取值范围内进行采样,通过动态仿真获取对应的频率最低点,由此生成1000组频率动态响应输入 $X=(H_t, K_t^G, K_t^K)$ -频率动态响应输出 $Y=|\Delta f|_{\max}$ 数据点。基于这些输入-输出数据考虑以下2种数据驱动的动态安全约束内嵌优化方案作为对比分析。

**方案1:**基于仿真数据提取能够保证系统频率安全的参数边界,并将其作为约束条件嵌入优化调度模型中。

$$\begin{cases} H_t \geq H_{\lim} \\ K_t^G \geq K_{\lim}^G \\ K_t^K \geq K_{\lim}^K \end{cases} \quad (25)$$

式中: $H_{\lim}$ 、 $K_{\lim}^G$ 、 $K_{\lim}^K$ 分别为通过频率动态仿真数据确定的系统惯量下限、火电机组下垂增益下限和逆变器并网资源下垂增益下限。具体而言,将仿真得到的频率最低点数据 $Y$ 向参数空间(如 $H_t$ )进行投影,从频率最低点对参数的映射关系中提取满足 $|\Delta f|_{\max} \leq |\Delta f|_{\max, \lim}$ 要求的参数范围,最终得到相应的参数边界为 $H_{\lim}=6.0$ ,  $K_{\lim}^G=0.35$  p. u.,  $K_{\lim}^K=0.30$  p. u.。同理,短路电流安全约束可以通过数据驱动方法表征为最小火电机组开机容量约束。

**方案2:**将频率最低点直接映射为调度决策变量的函数,并采用分段线性化方法进行拟合。

$$|\Delta f|_{\max} = h(H_t, K_t^G, K_t^K) \leq |\Delta f|_{\max, \lim} \quad (26)$$

式中: $h(\cdot)$ 为分段线性化函数。具体而言,利用仿真生成的输入数据 $X$ 和对应的频率最低点数据 $Y$ ,通过凸分段线性化方法对 $h(\cdot)$ 进行拟合,得到相应的分段线性化参数。以两段线性拟合为例,有:

$$h(X) = \max \{a_1^T X + b_1, a_2^T X + b_2\} \quad (27)$$

式中: $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 为拟合所得参数。各段参数通过求解以下优化问题确定:

$$\min_{a_1, a_2, b_1, b_2} \left\| \max \{a_1^T X + b_1, a_2^T X + b_2\} - Y \right\|_2^2 \quad (28)$$

计算所得分段线性化参数矩阵 $a$ 、 $b$ 分别为:

$$a = \begin{bmatrix} -0.0575 & -0.0484 & 0.0778 \\ -0.0006 & -0.0312 & -0.0718 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$b = \begin{bmatrix} 0.0588 \\ 0.4994 \end{bmatrix} \quad (30)$$

最后,将得到的参数代入式(27),即可得到频率最低点的映射,进而将频率最低点约束式(26)嵌入优化调度模型,形成易于求解的混合整数线性约束。

同理,短路电流安全约束可以通过数据驱动方法表征为火电机组开机状态的函数。不同方案的优化调度结果对比如表5所示。

表5 不同方案优化调度结果

Table 5 Comparison of scheduling results of different methods

| 方案     | 频率安全 | 火电机组备用/GW | 逆变器备用/GW | 短路电流安全 | 火电机组开机容量/GW | 计算时间/s | 成本/亿元 |
|--------|------|-----------|----------|--------|-------------|--------|-------|
| 1      | √    | 24.67     | 24.79    | √      | 246.7       | 5.6    | 11.53 |
| 2      | 部分越限 | 23.42     | 19.59    | √      | 234.2       | >900   | 11.11 |
| 本文所提方案 | √    | 20.83     | 19.64    | √      | 208.3       | 91.0   | 11.13 |

从表5可以看出,方案1的决策较为保守,其提供的火电开机容量与各类资源备用水平都较高,从而导致成本较高。与方案1相比,所提方案的成本降低了约3.5%。方案2由分段线性化引入了大量0-1变量与约束条件,累计入全天24 h,优化问题的维度指数上升,计算效率无法保证。且分段线性化依赖数据做近似,实际运行中仍存在无法完全满足安全约束的情况。相比之下,所提方案很好地兼容了经济性与计算效率,且确保了动态安全。

## 6 结论

本文针对高可再生能源并网下电力系统调度运行中的动态安全风险,提出了一种基于再调度技术的源网荷储三阶段协同调度方法。所提方法将复杂非线性的动态安全约束转化为基于灵敏度分析的线性约束,在保障动态安全的同时兼顾了求解效率。结果表明所提方法能以较少的迭代次数,高效地找到兼顾系统动态安全与经济性的优化调度策略。本研究框架在未来研究中可进一步扩展至包含电压稳

定性和小信号稳定性在内的更全面动态安全评估,以更好地应对实时运行中的不确定性。

### 利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

### 作者贡献声明(Authors' Contributions):

宋杉提出三阶段再调度基本框架;王鹏设计论文框架;田方媛设计研究方案,并对研究方案进行可行性调查分析;黄明宇实施研究过程;孙文涛设置算例并提供数据;葛毅起草论文并修订论文;康重庆指导研究思路并修订论文。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

## 7 参考文献

- [1] Bistline J E T, Blanford G J. Impact of carbon dioxide removal technologies on deep decarbonization of the electric power sector[J]. Nature Communications, 2021, 12: 3732.
- [2] Kroposki B, Johnson B, Zhang Y C, et al. Achieving a 100% renewable grid: operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(2): 61-73.
- [3] 马强,尹纯亚,秦艳辉,等.考虑暂态过电压约束的直流闭锁故障下送端风电调切策略[J].电力建设,2025,46(12):159-169. Ma Qiang, Yin Chunya, Qin Yanhui, et al. Considering the switching strategy of the transmitting wind power to deal with the DC blocking fault under the constraint of transient overvoltage [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(12): 159-169.
- [4] 陈郑平,李文忠,陈飞雄,等.分布式资源助力新型电力系统灵活性提升研究综述[J].电力工程技术,2025,44(2):145-159. Chen Zhengping, Li Wenzhong, Chen Feixiong, et al. Summary of research on improving the flexibility of new power systems with distributed resources [J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(2): 145-159.
- [5] 黎博,陈民铀,钟海旺,等.高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J].中国电机工程学报,2023,43(2):555-581. Li Bo, Chen Minyou, Zhong Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.
- [6] 苏舟,钟鸣睿,王喆,等.基于全生命周期的广义源网荷储一体化的电力系统协调优化配置研究[J].电网与清洁能源,2024,40(8):74-84. Su Zhou, Zhong Mingrui, Wang Zhe, et al. Research on the coordinated and optimized configuration of power systems based on the integration of generalized source network, load and storage over the whole life cycle [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(8): 74-84.
- [7] Heuberger C F, Mac Dowell N. Real-world challenges with a rapid transition to 100% renewable power systems [J]. Joule, 2018, 2(3): 367-370.
- [8] O'Malley M. Editorial: towards 100% renewable energy system [J].

- IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 3187-3189.
- [9] Delkhosh H, Seifi H. Power system frequency security index considering all aspects of frequency profile [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1656-1659.
- [10] 王绪利, 潘东, 施天成, 等. 新型电力系统背景下源网荷储一体化项目友好性评估方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 72-82.
- Wang Xuli, Pan Dong, Shi Tiancheng, et al. A friendliness evaluation method for the source-network-load-storage integration project under the background of new power system [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 72-82.
- [11] 肖祥辉, 林颖, 林子铭, 等. 多样化并网场景下新能源基地稳定控制规划配置技术发展展望[J]. 电力建设, 2026, 47(3): 64-79.
- Xiao Xianghui, Lin Ying, Lin Ziming, et al. Development and prospect of stability control planning and configuration technology for renewable energy bases under diversified grid-connection scenarios [J]. Electric Power Construction, 2026, 47(3): 64-79.
- [12] 李璐, 王一, 韩美至, 等. 考虑新能源占比优化的配电网源网荷储协调控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(1): 123-129.
- Li Lu, Wang Yi, Han Meizhi, et al. A study on the coordinated control of source-grid-load-storage of distribution networks considering new energy proportion optimization [J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(1): 123-129.
- [13] 杨政校, 张鑫, 杜刃刃, 等. 基于信息间隙决策理论的源网荷储协调优化规划方法[J]. 浙江电力, 2025, 44(7): 113-125.
- Yang Zhengxiao, Zhang Xin, Du Renren, et al. A coordinated optimal planning method for generation-grid-load-storage systems based on info-gap decision theory [J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(7): 113-125.
- [14] Milano F, Dörfler F, Hug G, et al. Foundations and challenges of low-inertia systems [C]//2018 Power Systems Computation Conference (PSCC). IEEE, 2018: 1-25.
- [15] Wu D, Javadi M, Jiang J N. A preliminary study of impact of reduced system inertia in a low-carbon power system [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(1): 82-92.
- [16] Chen Y H, Casto A, Wang F Y, et al. Improving large scale day-ahead security constrained unit commitment performance [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4732-4743.
- [17] He C, Wu L, Liu T Q, et al. Robust co-optimization planning of interdependent electricity and natural gas systems with a joint  $N-1$  and probabilistic reliability criterion [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 2140-2154.
- [18] Chu Z D, Cui G X, Teng F. Scheduling of software-defined microgrids for optimal frequency regulation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(3): 1715-1728.
- [19] Pathak P K, Yadav A K, Abbassi R, et al. Design of optimal intelligent frequency control approach for autonomous microgrid: a step towards sustainable future [J]. International Journal of Sustainable Energy, 2025, 44(1): 2547700.
- [20] Paturet M, Markovic U, Delikaraoglou S, et al. Stochastic unit commitment in low-inertia grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3448-3458.
- [21] 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.
- [22] Qi X, Zhao T Y, Liu X, et al. Three-stage stochastic unit commitment for microgrids toward frequency security via renewable energy deloading [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4256-4267.
- [23] Liu C X, Xin H H, Wu D, et al. Generalized operational short-circuit ratio for grid strength assessment in power systems with high renewable penetration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(4): 5479-5494.
- [24] Zhang F, Xin H H, Wu D, et al. Assessing strength of multi-infeed LCC-HVDC systems using generalized short-circuit ratio [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 467-480.
- [25] Yuan H, Xin H H, Wu D, et al. Small-signal stability assessment of multi-converter-based-renewable systems with STATCOMs based on generalized short-circuit ratio [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2889-2902.
- [26] Huang L B, Xin H H, Li Z Y, et al. Identification of generalized short-circuit ratio for on-line stability monitoring of wind farms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3282-3285.
- [27] 刘彬, 张昊然, 黄宝莹, 等. 含电网型储能系统临界短路比指标构建及影响因素[J]. 电力建设, 2026, 47(3): 135-145.
- Liu Bin, Zhang Haoran, Huang Baoying, et al. Construction of a critical short-circuit ratio index for systems with grid-forming energy storage and influencing factors [J]. Electric Power Construction, 2026, 47(3): 135-145.
- [28] Zhang Z Y, Du E S, Teng F, 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.
- [29] Badesa L, Teng F, Strbac G. Simultaneous scheduling of multiple frequency services in stochastic unit commitment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3858-3868.
- [30] 郭嘉雨, 杨祺铭, 丁苒苒, 等. 高比例可再生能源配电网两阶段自适应鲁棒弹性提升策略[J]. 电力工程技术, 2025, 44(6): 174-182.
- Wu Jiayu, Yang Qiming, Ding Ranran, et al. Two stage adaptive robust resilience enhancement strategy for distribution network with high penetration of renewable energy [J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(6): 174-182.
- [31] 苗秋愿, 邢海军. 基于机会约束的风光荷储热灵活性资源优化调度[J]. 浙江电力, 2025, 44(8): 54-65.
- Miao Qiuyuan, Xing Haijun. Optimal scheduling of WPLSH flexibility resources based on chance constraints [J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(8): 54-65.
- [32] Chu Z D, Zhang N, Teng F. Frequency-constrained resilient scheduling of microgrid: a distributionally robust approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4914-4925.
- [33] Chu Z D, Teng F. Short circuit current constrained UC in high IBG-penetrated power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3776-3785.

- [34] Wang Q, Li F, Tang Y, et al. Integrating model-driven and data-driven methods for power system frequency stability assessment and control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4557-4568.
- [35] Finegan D P, Zhu J E, Feng X N, et al. The application of data-driven methods and physics-based learning for improving battery safety[J]. Joule, 2021, 5(2): 316-329.
- [36] 张磊, 宋坤泽, 叶婧, 等. 计及惯量和风电双重不确定性的两阶段分布鲁棒机组组合[J]. 电力建设, 2026, 47(2): 147-160.  
Zhang Lei, Song Kunze, Ye Jing, et al. Two-stage distributionally robust unit commitment considering dual uncertainties of inertia and wind power [J]. Electric Power Construction, 2026, 47(2): 147-160.
- [37] Huang M Y, Cui X Y, Zhang N, et al. Optimal planning of standalone net-zero energy systems with small modular reactors[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(4): 3751-3767.
- [38] Zhuo Z Y, Zhang N, Yang J W, et al. Transmission expansion planning test system for AC/DC hybrid grid with high variable renewable energy penetration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2597-2608.
- [39] Qin C, Hu X, Zeng Y, et al. Multi-area frequency dynamic

constrained unit commitment based on Bernstein polynomial approximation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2026, 41(4): 2717-2729.

收稿日期: 2026-04-14 修回日期: 2026-05-18



宋杉

作者简介:

宋杉(1993),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为输电网规划、新能源送出与并网;

王鹏(1992),男,博士,助理研究员,主要研究方向为电力系统规划;

田方媛(1992),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统规划、储能规划;

黄明宇(1997),女,博士,助理研究员,通信作者,主要研究方向为电力系统规划, E-mail: myhuang@mail.tsinghua.edu.cn;

孙文涛(1986),男,博士,高级工程师,主要研究方向为大电网规划与仿真技术;

葛毅(1987),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统规划;

康重庆(1969),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统规划与优化运行。

(编辑 景贺峰)