

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241510

计及智能电动机负荷动态频率响应的频率安全校核优化

李佩杰¹, 韩佩卓¹, 赵晓慧²

(1. 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室(广西大学), 广西 南宁 530004;

2. 广西民族大学物理与电子信息学院, 广西 南宁 530006)

摘要: 为确保频率安全校核对发电机出力计划调整的公平性和经济性, 提出考虑智能电动机负荷动态频率响应的频率安全校核优化模型。该模型使用优化方法对发电机出力计划进行频率安全校核, 并给出最优调整方案。为准确表达系统频率稳定约束, 该模型引入全动态频率响应模型, 建立事故前发电机出力与频率动态特性之间的联系, 并跟踪调频过程中各发电机组频率的动态变化来限制频率最低点。同时, 建立智能电动机负荷动态频率响应模型, 模拟一次调频期间智能电动机负荷的动态频率特性。相较于传统负荷模型仅考虑普通电动机负荷的静态频率特性, 该模型能解决负荷侧动态频率响应被忽略而导致的频率安全校核结果过于保守的问题。WSCC 3机9节点系统和新英格兰10机39节点系统的仿真结果表明, 所提频率安全校核优化模型能同时兼顾安全性和经济性, 且能够利用智能电动机负荷的动态频率响应有效缓解发电侧的调频负担。

关键词: 频率安全校核; 智能电动机负荷; 一次调频; 动态频率响应

Frequency security assessment and optimization considering dynamic frequency response of motor smart loads

LI Peijie¹, HAN Peizhuo¹, ZHAO Xiaohui²

(1. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology (Guangxi University), Nanning 530004, China;

2. School of Physics and Electronic Information, Guangxi Minzu University, Nanning 530006, China)

Abstract: To ensure fairness and economic efficiency in generator output schedule adjustments during frequency security assessment, a frequency security assessment and optimization model considering the dynamic frequency response of motor smart loads is proposed in this paper. The model employs an optimization-based approach to assess the frequency security of generator output schedules and provides the optimal adjustment scheme. To accurately represent the frequency stability constraints, a full dynamic frequency response model is introduced to establish the relationship between the pre-contingency generator outputs and frequency dynamic characteristics, while tracking the dynamic frequency response of each unit during the frequency regulation process to limit the frequency nadir. At the same time, a dynamic frequency response model of motor smart loads is established to capture their dynamic characteristics during primary frequency regulation. Compared with the traditional static load models that only consider the static frequency characteristics of conventional motor loads, the proposed model mitigates the overly conservative results caused by neglecting load-side dynamic frequency response. Simulation results based on the WSCC 3-machine 9-bus system and the New England 10-machine 39-bus system show that the proposed frequency security assessment and optimization model achieves a balance between security and economy while effectively alleviating the frequency regulation burden on the generation side by leveraging the dynamic frequency response of motor smart loads.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52267006).

Key words: frequency security assessment; motor smart load; primary frequency regulation; dynamic frequency response

0 引言

维持电力系统频率稳定是保障电网安全、可靠

运行的重要基础。在电力现货市场中, 调频辅助服务市场与电能市场的有效配合有序引导了调频资源积极地响应系统的预估调频容量需求^[1-4]。然而, 为方便出清模型的计算, 调频容量需求的评估往往需要进行大量的模型简化, 在一些欧美国家, 这一值常与负荷成简单的比例关系, 国内某些省份更是

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52267006); 广西创新驱动发展专项资金项目资助(桂科 AA19254034)

简单地按照新能源场站预测出力的固定占比计算该值^[5]。因此,在正式市场出清计算完成后,常需要一个频率安全校核的过程来修正出清值,保证发电机的计划出力满足频率稳定要求^[6-7]。

频率安全校核对电力市场的公平性和经济性有着重要的影响,如何经济、合理地修正发电计划是频率安全校核的关键。虽然已有学者从优化的角度对电力市场安全校核模型开展了研究^[8-12],但很少直接考虑系统频率稳定问题。在优化模型中考虑系统频率稳定性约束时,通常需重点关注在调频期间系统频率最低点是否会触发低频减载保护装置,从而引起大面积的负荷损失。理论上,系统一次调频期间频率的动态变化过程与预想事故发生前的系统运行状态、设备特性、故障位置和类型等因素都存在紧密联系。为方便计算,文献[13]通过假设恒定的调速变化率来简化发电机在一次调频过程中的机械功率动态变化,最终将调频响应需求简化表达为线性约束。文献[14-16]基于系统整体动态频率响应模型,推导出最大频率偏差的解析表达式并对其加以约束。文献[17]使用动态频率模型和线性近似方法,使得频率最低点约束被有效地考虑到机组组合模型中。上述文献均基于频率响应简化模型,无法建立扰动前同步发电机出力与频率动态特性之间严格的数学关系,忽略了扰动前同步发电机出力对频率动态特性的直接影响。因此,在频率安全校核优化模型中使用这些方法均无法充分反映机组出力计划及调频备用安排与事故后频率动态变化过程之间的关联。

此外,在以往的考虑频率稳定约束的优化模型中,一般只关注电源侧的调频响应,然而随着可再生能源的比例不断增加,单靠电源侧的调频手段已无法满足系统频率响应需求,未来负荷侧丰富的调频资源应得到充分的开发与利用^[18-23]。文献[24]中利用配备低频继电器的负荷提供快速频率响应,与同步发电机提供的一次频率响应协同作用,以满足预估频率响应需求。文献[25]将可中断负荷和可转移负荷作为快速频率响应资源,提高系统的频率响应能力。在频率安全校核优化模型中考虑负荷侧频率响应能够避免对发电出力计划的调整偏保守而影响市场出清的经济性。

然而,在现有的负荷侧频率稳定研究中,负荷多采用恒功率或与频率线性相关的静态模型,无法考虑负荷侧的主动频率响应,智能负荷的出现使得负荷侧主动响应系统频率变化成为可能^[26]。电动机负荷由于其低成本和坚固的结构在各个行业得到广泛应用^[27-28],其中通风系统的风机、冷却水泵、传

送带、搅拌机等大量电动机负荷均能在不影响生产质量的情况下允许短时间降低转速,改变功耗。电动机负荷可通过调速驱动器进行控制,从而能以简单、低成本的方式实现智能化改造,成为具备主动频率响应能力的智能电动机负荷(motor smart load, MSL)^[29-31]。这些改造后的MSL可以通过负荷聚合商代理或直接补偿等市场机制参与到电力市场中,成为负荷侧提供动态频率响应的重要组成部分。

为在频率安全校核中考虑负荷侧动态频率响应,需在频率安全校核优化模型中引入负荷动态频率响应约束,考虑其在系统频率调节动态过程中的作用。文献[32]建立了一个动态安全约束经济调度模型,该模型同时考虑了系统频率稳定性约束与MSL的需求弹性,然而其在相关约束中仅考虑了MSL提供频率响应时的时间延迟和储备容量限制,不能准确模拟MSL随系统频率变化改变其功耗的动态过程。因此,在计及频率稳定的频率安全校核优化模型的相关研究中考虑负荷侧动态频率响应的研究还是空白。

本文提出考虑MSL动态频率响应的频率安全校核优化模型,以出清发电计划调整量最少为目标,在保证系统频率稳定的同时,实现了发电机出力调整的公平性和最优性。首先,同步发电机动态调频响应被表示为一组微分代数方程(differential algebraic equations, DAEs),准确表达预想事故发生前同步发电机出力、故障位置及类型、相关设备参数等影响因素与频率动态特性之间严格的数学关系,并通过跟踪调频过程中各发电机组频率的动态变化来限制频率最低点,以准确地校核系统的频率稳定性。其次,为在优化模型中考虑MSL的动态频率响应,建立MSL动态频率响应模型,模拟MSL主动响应系统频率变化的特性,能有效解决忽略负荷侧主动动态频率响应而引起的频率安全校核结果过于保守的问题。仿真分析结果表明,本文提出的模型能够给出兼顾安全性和经济性的频率安全校核结果,构建的MSL动态频率响应模型能有效缓解发电侧的调频压力和提高系统频率稳定性。

1 全动态频率响应模型

系统全动态频率响应模型由一组描述扰动后系统动态特性的DAEs构成,主要包括发电机摇摆方程、扰动后节点功率平衡方程和同步发电机调速系统响应方程。该模型综合考虑了发电机组的动态特性、负荷的动态变化、网络结构及故障的实时影响,能够准确地描述频率安全校核过程中预想事故和发电出力计划与事故后频率动态特性之间的数学关

系。故障位置及类型体现在扰动后节点功率平衡方程中，而扰动发生前发电机出力则决定了 DAEs 中各状态变量的初值，进而影响其动态轨迹。

发电机摇摆方程直接反映了发电机频率和功角的动态变化特性。

$$\dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_{\text{ref}} \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{\omega_{\text{ref}}}{2H_i}(P_{m,i} - P_{e,i}) \quad (2)$$

式中： i 为节点编号； δ_i 为接入节点 i 的发电机功角； ω_i 为接入节点 i 的发电机转子角速度； ω_{ref} 为接入节点 i 的发电机额定同步转速； H_i 为接入节点 i 的发电机惯性时间常数； $P_{m,i}$ 为接入节点 i 的发电机原动机机械功率； $P_{e,i}$ 为接入节点 i 的发电机电磁功率。

发电机采用经典模型，则 $P_{e,i}$ 表达式为

$$P_{e,i} = \frac{E_i V_i \sin(\delta_i - \theta_i)}{x'_{d,i}}, i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式中： $x'_{d,i}$ 为接入节点 i 的发电机暂态电抗； E_i 为接入节点 i 的发电机暂态电抗后的电势； V_i 为接入节点 i 的发电机电压幅值； θ_i 为接入节点 i 的发电机电压相角； m 为发电机总台数。

扰动后节点功率平衡方程可表示为

$$\sum_{j=1}^{n+m} V_i V_j Y_{aj} \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{aj}) + P_{d,i} + \Delta P_{d,i} = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{n+m} V_i V_j Y_{aj} \sin(\theta_i - \theta_j - \alpha_{aj}) + Q_{d,i} = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中： $Y_{aj} \angle \alpha_{aj}$ 为基于发电机经典模型(暂态电抗后电势恒定)的扩展网络的导纳矩阵中元素，扩展网络如图 1 所示；当 $j = n+1, n+2, \dots, n+m$ 时， $V_j = E_{j-n}$ ， $\theta_j = \delta_{j-n}$ ； $P_{d,i}$ 、 $Q_{d,i}$ 分别为扰动后节点 i 有功、无功负荷； $\Delta P_{d,i}$ 为节点 i 发生扰动时损失的有功功率； n 为系统总节点数。

同步发电机调频系统根据频率变化调节相应阀门，增加发电机机械功率，由此实现发电机的动态频率响应过程。以再热蒸汽轮机^[33]为例，建立同步发电机调速系统响应方程如下。

$$\dot{z}_{g1,i} = \frac{1}{T_{G,i}} [K_{G,i}(\omega_i - \omega_{\text{ref}}) - z_{g1,i}], i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$\dot{z}_{g2,i} = \frac{1}{T_{\text{CH},i}} [P_{m0,i} - z_{g1,i} - z_{g2,i}], i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$\dot{z}_{g3,i} = \frac{1}{T_{\text{RH},i}} [z_{g2,i} - z_{g3,i}], i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$P_{m,i} = F_{\text{HP},i} z_{g2,i} + (1 + F_{\text{HP},i}) z_{g3,i}, i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

式中： $z_{g1,i}$ 、 $z_{g2,i}$ 、 $z_{g3,i}$ 均为接入节点 i 的发电机调速系统各控制环节中间变量； $T_{G,i}$ 、 $T_{\text{CH},i}$ 、 $T_{\text{RH},i}$ 均为接入节点 i 的发电机调速系统各环节的时间常数； $K_{G,i}$ 为接入节点 i 的发电机的单位调节功率； $P_{m0,i}$ 为扰动发生前接入节点 i 的发电机机械功率； $F_{\text{HP},i}$ 是接入节点 i 的发电机高压汽缸蒸汽占比。

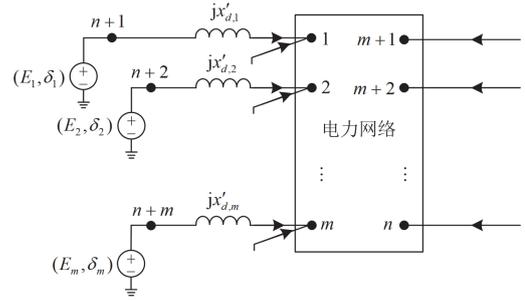


图 1 基于发电机经典模型的扩展网络

Fig. 1 Augmented network based on generator classical model

2 考虑智能电动机负荷动态频率响应的频率安全校核优化模型

本节将建立 MSL 动态频率响应模型，模拟 MSL 在调频过程中的动态特性。同时，基于系统全动态频率响应模型并引入 MSL 动态频率响应约束，建立考虑 MSL 动态频率响应的频率安全校核优化模型(frequency security correction optimization model considering MSL dynamic frequency response, MSL-FSCO)。

2.1 智能电动机负荷

直接接入电网的感应电动机为系统提供固有的惯性响应，而与系统解耦的驱动控制电动机，利用可调速驱动器控制电动机的速度，以提高电动机性能。对于那些允许短时间减速的非关键电动机负荷，智能负荷技术通过修改电动机的驱动控制器，使其能够根据测得的电网频率控制电动机的功耗，从而在有调频需求时主动提供动态的频率响应^[31]。以文献[31]中的 MSL 为例，其智能驱动器的结构如图 2 所示。

无调频需求时，标准的调速驱动器考虑电动机性能要求确定电动机的驱动频率设定值 f_{mot} ，此时智能控制环节不参与电动机的驱动控制。智能控制环节由主控制器、惯性模拟器和速度控制器组成。当电网遭受扰动而频率下降时，智能控制环节利用锁相环测得电网频率 f ，并根据电网频率偏差 Δf 修改电动机的驱动频率设定值，调整电动机的工作

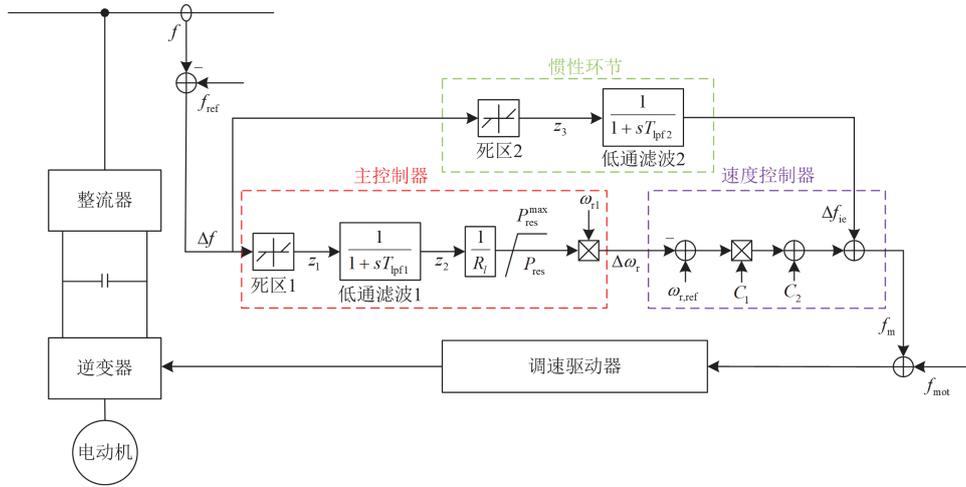


图2 智能驱动器结构图

Fig. 2 Structure of smart driver

点, 降低其消耗的有功功率。

测得的频率偏差 Δf 在主控制器中首先通过死区环节, 然后通过低通滤波器滤波。所得信号除以下垂增益 R_l , 得到功率系数 P_{res} , 该功率系数经限幅器限制其最大值不超过 P_{res}^{max} , 再将其转换成速度信号 $\Delta\omega_r$ 输出。

惯性环节用来模拟与电网直连电动机的惯性响应, 包含一个死区环节和一个低通滤波器, 将频率变化从整流器端传递到逆变器端, 使电动机的惯性功率与电网频率耦合。速度控制器将主控制器和惯性环节的输出量整合, 并最终确定电动机在调频状态下的驱动频率设定值 f_m 。

由上述分析可见: 智能驱动器控制逻辑并不复杂, 只需对电动机进行简单地改造, 辅以相应的控制算法就可以实现。

2.2 MSL 动态频率响应模型

2.2.1 MSL 智能控制环节的数学模型

MSL 智能控制环节的主控制器包括死区、低通滤波器、下垂增益、限幅等环节。主控制器的数学表达式如式(10)和式(11)所示。式(10)为主控制器死区环节的数学表达式, 式(11)是低通滤波环节的时域表达式。

$$z_1 = \begin{cases} \Delta f, & \Delta f \leq -D_1, \Delta f \geq D_1 \\ 0, & -D_1 < \Delta f < D_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: z_1 为主控制器死区环节的输出量; D_1 为主控制器的预设死区值; 系统频率偏差 Δf 为死区环节的输入量, 且满足 $\Delta f = f_{ref} - f$, f_{ref} 为系统参考频率。

$$\dot{z}_2 = \frac{1}{T_{lpf1}}(z_1 - z_2) \quad (11)$$

式中: z_2 为低通滤波环节的输出量, 其经过下垂增益环节后作为限幅环节的输入量; T_{lpf1} 为主控制器低通滤波环节的时间常数。

$$P_{res} = \begin{cases} \frac{z_2}{R_l}, & \frac{z_2}{R_l} \leq P_{res}^{max} \\ P_{res}^{max}, & \frac{z_2}{R_l} > P_{res}^{max} \end{cases} \quad (12)$$

$$\Delta\omega_r = \omega_{r1} P_{res} \quad (13)$$

式(12)为下垂增益环节和限幅环节的数学表达式; R_l 为下垂增益; P_{res}^{max} 为功率系数 P_{res} 的最大允许值。式(13)将限幅环节得到的功率系数转换为速度信号 $\Delta\omega_r$ 输出, ω_{r1} 为电动机的初始转速, 若电动机减速前工作在额定状态, 则 ω_{r1} 为电动机的额定转子转速。

惯性环节的死区和低通滤波器的数学表达式为

$$z_3 = \begin{cases} \Delta f, & \Delta f \leq -D_2, \Delta f \geq D_2 \\ 0, & -D_2 < \Delta f < D_2 \end{cases} \quad (14)$$

$$\dot{\Delta f_{ie}} = \frac{1}{T_{lpf2}}(z_3 - \Delta f_{ie}) \quad (15)$$

式中: z_3 为惯性环节死区的输出量; D_2 为惯性环节的预设死区值; T_{lpf2} 为惯性环节低通滤波器的时间常数; Δf_{ie} 为传递到逆变器端的频率变化。

主控制器和惯性环节的输出量均作为速度控制器的输入量, 经速度控制器得到电动机驱动频率 f_m , 表达式为

$$f_m = C_1(\omega_{r,ref} - \Delta\omega_r) + C_2 + \Delta f_{ie} \quad (16)$$

式中: C_1 、 C_2 为根据电动机参数确定的常数; $\omega_{r,ref}$ 为电动机参考转子转速。

2.2.2 MSL 频率响应的数学表达式

智能电动机负荷通过减少有功功率来响应系统频率变化,下面推导智能电动机负荷减少的有功功率 ΔP_{sl} 关于 MSL 智能控制环节输出量(即施加到电动机定子侧的驱动频率 f_m)的数学表达式。

由驱动控制器驱动的感应电动机与系统解耦,调速过程并不改变系统的电力参数,仅因转子转速改变而改变电动机的功耗,电动机有功功耗 P 与转速 ω_r 的关系式为

$$P = T\omega_r \quad (17)$$

式中: T 为电动机转矩。

感应电动机的调速驱动器使用恒压频比调速^[31],定子侧频率的变化使得电动机机械特性改变,进而实现对电动机的调速,且在调速过程中保持恒转矩。电动机转子转速与定子频率关系式为

$$\omega_r = (1-s)\frac{2\pi f_m}{p} \quad (18)$$

式中: s 为转差率; p 为极对数。

将式(18)代入式(17)中,可得电动机有功功耗与定子频率的关系式为

$$P = T(1-s)\frac{2\pi f_m}{p} \quad (19)$$

令 $K = (1-s)\frac{2\pi}{p}$, 可得

$$P = TKf_m \quad (20)$$

在恒压频比调速过程中,电动机的转矩和转差率均不变^[34],所以 T 、 K 均为不变参数,故随定子侧频率的降低而减少的功耗 ΔP_{sl} 为

$$\Delta P_{sl} = TK(f_1 - f_m) \quad (21)$$

式中: f_1 为扰动发生前电动机定子侧频率。

若扰动发生前电动机工作在额定状态,则在标么值下,电动机有功功率减少量为 $\Delta P_{sl} = TK(1 - f_m)$ 。

此外,电动机定子侧频率为系统额定频率 f_N 时,由式(20)可得电动机额定有功 $P_N = TKf_N$,因此在标么值下 $f_N = 1$, TK 取值就是电动机额定有功值。

2.2.3 MSL 频率响应模型的光滑化

建立的 MSL 动态频率响应模型中,存在死区、限幅等非线性环节,由于无法对其进行求导而不能直接将其引入优化模型中,需要使用光滑化方法将其表示成光滑可导的函数。其中式(10)、式(12)、式(14)经光滑化处理后可分别由式(22)一式(24)表示。

$$z_1 = \frac{\Delta f}{1 + e^{\sigma_1(\Delta f + D_1)}} \quad (22)$$

$$P_{res} = \frac{z_2}{R_l} + [(P_{res}^{max} - \eta) - \frac{z_2}{R_l}] \frac{e^{\mu[\frac{z_2}{R_l} - (P_{res}^{max} - \eta)]}}{1 + e^{\mu[\frac{z_2}{R_l} - (P_{res}^{max} - \eta)]}} \quad (23)$$

$$z_3 = \frac{\Delta f}{1 + e^{\sigma_2(\Delta f + D_2)}} \quad (24)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 μ 、 η 均为可调参数。

2.2.4 MSL-FSCO 模型中 MSL 频率响应约束

根据光滑化后的 MSL 动态频率响应模型,可建立 MSL-FSCO 模型中 MSL 频率响应约束的数学模型如下。

$$\Delta f_t = f_{ref} - f_t \quad (25)$$

$$z_{1,i,t} = \frac{\Delta f_t}{1 + e^{\sigma_{1,i}(\Delta f_t + D_{1,i})}} \quad (26)$$

$$\dot{z}_{2,i,t} = \frac{1}{T_{lpf1,i}}(z_{1,i,t} - z_{2,i,t}) \quad (27)$$

$$P_{res,i,t} = \frac{z_{2,i,t}}{R_{l,i}} + [(P_{res,i}^{max} - \eta_i) - \frac{z_{2,i,t}}{R_{l,i}}] \frac{e^{\mu_i[\frac{z_{2,i,t}}{R_{l,i}} - (P_{res,i}^{max} - \eta_i)]}}{1 + e^{\mu_i[\frac{z_{2,i,t}}{R_{l,i}} - (P_{res,i}^{max} - \eta_i)]}} \quad (28)$$

$$\Delta \omega_{r,i,t} = \omega_{r1,i} P_{res,i,t} \quad (29)$$

$$z_{3,i,t} = \frac{\Delta f_t}{1 + e^{\sigma_{2,i}(\Delta f_t + D_{2,i})}} \quad (30)$$

$$\dot{\Delta f}_{ie,i,t} = \frac{1}{T_{lpf2,i}}(z_{3,i,t} - \Delta f_{ie,i,t}) \quad (31)$$

$$f_{m,i,t} = C_{1,i}(\omega_{r,ref} - \Delta \omega_{r,i,t}) + C_{2,i} + \Delta f_{ie,i,t} \quad (32)$$

$$\Delta P_{sl,i,t} = T_i K_i (1 - f_{m,i,t}) \quad (33)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n$; f_t 为 t 时刻的系统频率; Δf_t 为 t 时刻的系统频率偏差; MSL 通过负荷聚合商接入系统各节点, $\sigma_{1,i}$ 、 $D_{1,i}$ 、 $T_{lpf1,i}$ 、 $R_{l,i}$ 、 $P_{res,i}^{max}$ 、 η_i 、 μ_i 、 $\sigma_{2,i}$ 、 $D_{2,i}$ 、 $T_{lpf2,i}$ 、 $C_{1,i}$ 、 $C_{2,i}$ 均为节点 i 上的 MSL 智能驱动器参数; $\omega_{r1,i}$ 为节点 i 上的智能电动机负荷在减速前的初始转速,若电动机减速前工作在额定状态,则标么值下其取值为 1; $z_{1,i,t}$ 、 $z_{2,i,t}$ 、 $P_{res,i,t}$ 、 $\Delta \omega_{r,i,t}$ 、 $z_{3,i,t}$ 、 $\Delta f_{ie,i,t}$ 、 $f_{m,i,t}$ 为节点 i 上的 MSL 智能控制环节的中间变量在 t 时刻的值; $T_i K_i$ 在标么值下取值为节点 i 上的智能电动机负荷额定有功值; $\Delta P_{sl,i,t}$ 为节点 i 上的智能负荷在 t 时刻的有功功率减少量。

2.3 MSL-FSCO 的数学模型

电力市场出清计算得到发电机的有功出力计划后,频率安全校核发电机的有功出力的调整应满足频率稳定要求且确保经济性。故 MSL-FSCO 模型以发电机有功出力调整费用最低为目标,并使用全

动态频率响应模型跟踪各发电机组在一次调频中的频率动态变化, 无需显示表达频率最低点约束, 通过对频率的整个动态变化过程进行约束, 使得频率的最小值不低于频率稳定下限值。同时, 引入 MSL 频率响应约束, 借此考虑 MSL 在调频过程中提供的动态频率响应。借助 MSL-FSCO 优化模型, 对发电机出清计划进行最优调整, 以满足系统频率稳定要求。

1) 目标函数

以发电机有功出力调整费用最低为目标, 如式(34)所示。

$$\min \sum_{i=1}^m c_{g,i}^{\text{up}} \Delta P_{g,i}^{\text{up}} + \sum_{i=1}^m c_{g,i}^{\text{down}} \Delta P_{g,i}^{\text{down}} \quad (34)$$

式中: $c_{g,i}^{\text{up}}$ 为接入节点 i 的发电机增加有功出力的单位成本; $c_{g,i}^{\text{down}}$ 为接入节点 i 的发电机减少有功出力的单位成本; $\Delta P_{g,i}^{\text{up}}$ 为接入节点 i 的发电机增加有功功率; $\Delta P_{g,i}^{\text{down}}$ 为接入节点 i 的发电机减少有功功率。

2) 扰动前节点功率平衡方程

$$\sum_{j=1}^n V_i^0 V_j^0 Y_{ij} \cos(\theta_i^0 - \theta_j^0 - \alpha_{ij}) - P_{g,i}^0 + P_{d,i}^0 = 0, i=1,2,\dots,n \quad (35)$$

$$\sum_{j=1}^n V_i^0 V_j^0 Y_{ij} \sin(\theta_i^0 - \theta_j^0 - \alpha_{ij}) - Q_{g,i}^0 + Q_{d,i}^0 = 0, i=1,2,\dots,n \quad (36)$$

式中: V_i^0 为扰动前节点 i 的电压幅值; $Y_{ij} \angle \alpha_{ij}$ 为网络节点导纳矩阵中的元素; θ_i^0 为扰动前节点 i 的电压相角; $P_{d,i}^0$ 、 $Q_{d,i}^0$ 分别为系统稳态运行时节点 i 的总有功、无功负荷; $P_{g,i}^0$ 、 $Q_{g,i}^0$ 分别为频率安全校核调整发电出力计划后的发电机有功、无功功率, 且 $P_{g,i}^0$ 满足式(37)。

$$\begin{cases} P_{g,i}^0 = P_{g,i}^0 + \Delta P_{g,i}^{\text{up}} - \Delta P_{g,i}^{\text{down}} \\ \Delta P_{g,i}^{\text{up}} \geq 0, \Delta P_{g,i}^{\text{down}} \geq 0, i=1,2,\dots,m \end{cases} \quad (37)$$

式中: $P_{g,i}^0$ 为频率安全校核前电力市场出清结果给出的发电机有功出力计划值。

3) 同步发电机摇摆方程

$$\dot{\delta}_{i,t} = \omega_{i,t} - \omega_{\text{ref}}, i=1,2,\dots,m \quad (38)$$

$$\dot{\omega}_{i,t} = \frac{\omega_{\text{ref}}}{2H_i} (P_{m,i,t} - P_{e,i,t}), i=1,2,\dots,m \quad (39)$$

$$P_{e,i,t} = \frac{E_i V_{i,t} \sin(\delta_{i,t} - \theta_{i,t})}{x'_{d,i}}, i=1,2,\dots,m \quad (40)$$

式中: $\delta_{i,t}$ 为扰动后 t 时刻接入节点 i 的发电机功角;

$\omega_{i,t}$ 为扰动后 t 时刻接入节点 i 的发电机转子角速度; $P_{m,i,t}$ 为 t 时刻接入节点 i 的发电机原动机机械功率; $P_{e,i,t}$ 为扰动后 t 时刻接入节点 i 的发电机电磁功率; $V_{i,t}$ 和 $\theta_{i,t}$ 分别为扰动后 t 时刻节点 i 的电压幅值和相角。

4) 扰动后节点功率平衡方程

$$\sum_{j=1}^{n+m} V_{i,t} V_{j,t} Y_{aj} \cos(\theta_{i,t} - \theta_{j,t} - \alpha_{aj}) + P_{d,i,t} + \Delta P_{d,i} = 0, i=1,2,\dots,n \quad (41)$$

$$\sum_{j=1}^{n+m} V_{i,t} V_{j,t} Y_{aj} \sin(\theta_{i,t} - \theta_{j,t} - \alpha_{aj}) + Q_{d,i,t} = 0, i=1,2,\dots,n \quad (42)$$

式中: 当 $j = n+1, n+2, \dots, n+m$ 时, $V_{j,t} = E_{j-n}$, $\theta_{j,t} = \delta_{j-n,t}$; $P_{d,i,t}$ 、 $Q_{d,i,t}$ 分别为扰动后 t 时刻节点 i 的有功、无功负荷; $\Delta P_{d,i}$ 为扰动后节点 i 的有功功率缺额。

电力系统中的负荷依据其有功功率与频率的关系可分为与频率变化无关(与频率的零次方成正比)的负荷、与频率的一次方成正比的负荷、与频率的更高次方成正比的负荷等几种类型^[35]。输电系统中变电站母线上的负荷通常由上述各类负荷组合而成, 以与频率零次方、一次方成正比的负荷为主, 尤其是在系统中占比最大的普通电动机负荷通常跟频率一次方成正比关系, 传统静态负荷频率特性表达式中考虑了普通电动机负荷的频率响应, 如式(43)所示。

$$P_{d,i,t} = a_1 P_{d,i}^0 + a_2 P_{d,i}^0 \cdot \frac{f_t}{f_0} \quad (43)$$

式中: a_1 、 a_2 分别为与频率变化不相关的负荷和与频率一次方成正比关系的电动机负荷在总负荷中的占比, 忽略那些与频率的更高次方成正比的负荷, 则有 $a_1 + a_2 = 1$; f_0 为系统稳态运行时的额定频率。 f_t 取惯性平均频率, 即

$$f_t = \frac{\sum_{i=1}^m H_i \omega_{i,t}}{\sum_{i=1}^m H_i} \quad (44)$$

若将节点 i 上总容量为 $P_{sl,i}$ 的普通电动机负荷改造为 MSL, 则 t 时刻节点 i 的有功负荷 $P_{d,i,t}$ 为

$$P_{d,i,t} = a_1 P_{d,i}^0 + (a_2 P_{d,i}^0 - P_{sl,i}) \cdot \frac{f_t}{f_0} + (P_{sl,i} - \Delta P_{sl,i,t}) \quad (45)$$

由于在异步电动机附近一般都进行无功补偿, 因此可忽略调频过程中它对系统无功功率的影响。

5) MSL 频率响应约束: 式(25)一式(33)。

6) 发电机调速控制系统的动态频率响应方程

发电机调速控制系统的动态频率响应可以用一组微分代数方程表示。

$$\dot{\mathbf{u}}_{\text{tg},i} = \mathbf{H}_{\text{tg},d,i}(\mathbf{u}_{\text{tg},i}, \mathbf{y}_{\text{tg},i}) \quad (46)$$

$$0 = \mathbf{H}_{\text{tg},a,i}(\mathbf{u}_{\text{tg},i}, \mathbf{y}_{\text{tg},i}) \quad (47)$$

式中: $\mathbf{u}_{\text{tg},i}$ 为调速控制系统的微分变量向量; $\mathbf{y}_{\text{tg},i}$ 为调速控制系统的代数变量向量; $\mathbf{H}_{\text{tg},d,i}$ 为调速控制系统的微分方程向量; $\mathbf{H}_{\text{tg},a,i}$ 为调速控制系统的代数方程向量。

7) 初值方程

通过初值方程获得转子角度的初始值和其他状态变量初值。

$$\omega_i^0 = 1, i = 1, 2, \dots, m \quad (48)$$

$$E_i V_i^0 \sin(\delta_i^0 - \theta_i^0) - P_{g,i} x'_{d,i} = 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (49)$$

$$V_i^0 V_i^0 - E_i V_i^0 \cos(\delta_i^0 - \theta_i^0) + Q_{g,i} x'_{d,i} = 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (50)$$

式中: ω_i^0 、 δ_i^0 分别为 $\omega_{i,t}$ 、 $\delta_{i,t}$ 的初值。

8) 运行技术约束

$$V_{\min,i} \leq V_{i,t} \leq V_{\max,i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (51)$$

$$P_{g,\min,i} \leq P_{g,i} \leq P_{g,\max,i}, i = 1, 2, \dots, m \quad (52)$$

$$Q_{g,\min,i} \leq Q_{g,i} \leq Q_{g,\max,i}, i = 1, 2, \dots, m \quad (53)$$

$$P_{g,i} \leq P_{m,i,t}, i = 1, 2, \dots, m \quad (54)$$

$$P_{m,i,t} - P_{g,i} \leq P_{r,\max,i}, i = 1, 2, \dots, m \quad (55)$$

式中: $V_{\max,i}$ 、 $V_{\min,i}$ 分别为节点 i 的电压幅值上、下限; $P_{g,\max,i}$ 、 $P_{g,\min,i}$ 分别为接入节点 i 的发电机有功出力上、下限; $Q_{g,\max,i}$ 、 $Q_{g,\min,i}$ 分别为接入节点 i 的

发电机无功出力上、下限; $P_{r,\max,i}$ 为接入节点 i 的发电机备用容量上限。

9) 频率最低点约束

$$\frac{\omega_{i,t}}{2\pi} \geq f_{\lim}, i = 1, 2, \dots, m \quad (56)$$

式中: f_{\lim} 为频率稳定性要求允许的最小频率, 系统频率低于该值将会触发低频减载而引发大面积负荷损失。

至此, 式(34)一式(42)、式(44)一式(56)建立了 MSL-FSCO 的数学模型, 求解该优化模型, 可得每台发电机的原动机机械功率 $P_{m,i,t}$ 在扰动后的变化轨迹, 据此能求解每台发电机的实际调频备用量 $P_{r,i}$ 为

$$P_{r,i} = \max(P_{m,i,t}) - P_{g,i} \quad (57)$$

式中: $\max(P_{m,i,t})$ 为一次调频过程中接入节点 i 的发电机机械功率最大值。电源侧调频备用总量 P_r 为

$$P_r = \sum_{i=1}^m P_{r,i} \quad (58)$$

MSL-FSCO 模型通过对扰动前同步发电机有功出力 $P_{g,i}$ 、无功出力 $Q_{g,i}$ 等控制变量进行调整, 改变 $\omega_{i,t}$ 、 $\delta_{i,t}$ 等状态变量的初值, 进而影响其随时间的动态变化轨迹, 使系统频率在扰动后动态变化过程中始终满足频率稳定要求。发电机有功出力调整量 $\Delta P_{g,i}^{\text{up}}$ 、 $\Delta P_{g,i}^{\text{down}}$ 能够反映安全校核后发电机有功出力 $P_{g,i}$ 相比待校核出清结果 $P_{g,i}^0$ 的调整情况。图 3 给出了 MSL-FSCO 的模型结构图, 清晰地展示了其输入、输出以及前后互动情况, 直观地呈现了其对于电力市场出清结果的调整作用, 同时明确地体现了其在负荷模型中对 MSL 动态频率响应的考虑。

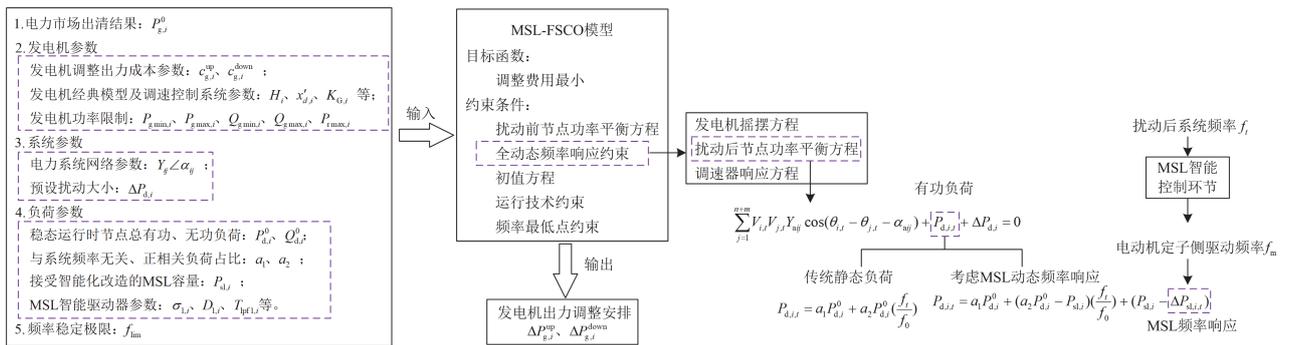


图 3 MSL-FSCO 模型结构图

Fig. 3 Structure of MSL-FSCO model

如果不考虑 MSL 在调频过程中提供的主动频率响应, 只借助传统静态负荷频率特性考虑普通电动机负荷的频率响应, 便可得到考虑静态负荷频率

响应的频率安全校核优化模型(frequency security correction optimization model considering static load frequency response, SL-FSCO)如下。

目标函数: 式(34);

扰动前节点功率平衡方程: 式(35)一式(37);

同步发电机摇摆方程: 式(38)一式(40);

扰动后节点功率平衡方程: 式(41)一式(44);

发电机调速控制系统的动态频率响应方程: 式(46)和式(47);

初值方程: 式(48)一式(50);

运行技术约束: 式(51)一式(55);

频率最低点约束: 式(56)。

SL-FSCO 模型中同样使用全动态频率响应模型跟踪各发电机组在一次调频中的频率动态变化, 并根据频率稳定要求对发电机出清计划进行最优调整, 但是没有考虑负荷侧由 MSL 提供的主动频率响应。将 SL-FSCO 与 MSL-FSCO 的安全校核结果进行对比, 可以反映出 MSL 动态频率响应对系统频率稳定性的影响, 及其在频率安全校核中被考虑的必要性。

2.4 MSL-FSCO 模型的离散化

MSL-FSCO 模型中的式(27)、式(31)、式(38)、式(39)、式(46)均为微分方程, 如果直接作为优化模型的约束, 会给优化模型的求解带来极大的困难。含微分方程约束的优化模型求解往往需要特殊的方法和技巧, 处理起来相当复杂, 目前还没有成熟的优化算法能直接求解这样的模型。而只含有代数方程约束的非线性规划问题有许多成熟的求解算法和工具, 如内点法等, 可以直接应用于这类问题的求解。因此, 可采用差分法将 DAEs 转换为数值等效的代数方程, 进而将 MSL-FSCO 模型转换为便于求解的非线性规划问题。

微分-代数方程系统可表示为

$$\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{H}_d(\mathbf{u}, \mathbf{y}) \quad (59)$$

$$0 = \mathbf{H}_a(\mathbf{u}, \mathbf{y}) \quad (60)$$

式中: \mathbf{u} 为状态变量向量; \mathbf{y} 为代数变量向量; \mathbf{H}_d 为微分方程组向量; \mathbf{H}_a 为代数方程组向量。

对式(59)和式(60)应用隐式梯形积分方法, 可得

$$\mathbf{u}^k - \mathbf{u}^{k-1} = \frac{h}{2} [\mathbf{H}_d(\mathbf{u}^k, \mathbf{y}^k) + \mathbf{H}_d(\mathbf{u}^{k-1}, \mathbf{y}^{k-1})] \quad (61)$$

$$0 = \mathbf{H}_a(\mathbf{u}^k, \mathbf{y}^k) \quad (62)$$

式中: $k=1, 2, \dots, nt$ 为积分计数器; nt 为积分步数; h 为积分步长。

利用式(61)和式(62)可以将模型中的 DAEs 在时间序列上离散为一系列代数方程, 离散化后的 MSL-FSCO 模型如下。

目标函数: 式(34);

扰动前节点功率平衡方程: 式(35)一式(37);

同步发电机摇摆方程:

$$\delta_i^k - \delta_i^{k-1} = \frac{h}{2} (\omega_i^k + \omega_i^{k-1} - 2\omega_{\text{ref}}), i=1, 2, \dots, m \quad (63)$$

$$\omega_i^k - \omega_i^{k-1} = \frac{h\omega_{\text{ref}}}{4H_i} (P_{m,i}^k + P_{m,i}^{k-1} - P_{e,i}^k - P_{e,i}^{k-1}), i=1, 2, \dots, m \quad (64)$$

$$P_{e,i}^k = \frac{E_i V_i^k \sin(\delta_i^k - \theta_i^k)}{x'_{d,i}}, i=1, 2, \dots, m \quad (65)$$

扰动后节点功率平衡方程:

$$\sum_{j=1}^{n+m} V_i^k V_j^k Y_{aj} \cos(\theta_i^k - \theta_j^k - \alpha_{aj}) + P_{d,i}^k + \Delta P_{d,i} = 0, i=1, 2, \dots, n \quad (66)$$

$$\sum_{j=1}^{n+m} V_i^k V_j^k Y_{aj} \sin(\theta_i^k - \theta_j^k - \alpha_{aj}) + Q_{d,i}^k = 0, i=1, 2, \dots, n \quad (67)$$

$$P_{d,i}^k = a_1 P_{d,i}^0 + (a_2 P_{d,i}^0 - P_{sl,i}) \left(\frac{f^k}{f_0} \right) + (P_{sl,i} - \Delta P_{sl,i}^k) \quad (68)$$

$$f^k = \frac{\sum_{i=1}^m H_i \omega_i^k}{\sum_{i=1}^m H_i} \quad (69)$$

发电机调速控制系统的动态频率响应方程:

$$\mathbf{u}_{\text{tg},i}^k - \mathbf{u}_{\text{tg},i}^{k-1} = \frac{h}{2} [\mathbf{H}_{\text{tg},d,i}(\mathbf{u}_{\text{tg},i}^k, \mathbf{y}_{\text{tg},i}^k) + \mathbf{H}_{\text{tg},d,i}(\mathbf{u}_{\text{tg},i}^{k-1}, \mathbf{y}_{\text{tg},i}^{k-1})] \quad (70)$$

$$0 = \mathbf{H}_{\text{tg},a,i}(\mathbf{u}_{\text{tg},i}^k, \mathbf{y}_{\text{tg},i}^k) \quad (71)$$

MSL 频率响应约束:

$$\Delta f^k = f_{\text{ref}} - f^k \quad (72)$$

$$z_{1,i}^k = \frac{\Delta f^k}{1 + e^{\sigma_{1,i}(\Delta f^k + D_{1,i})}} \quad (73)$$

$$z_{2,i}^k - z_{2,i}^{k-1} = \frac{h}{2T_{\text{lpf}1,i}} (z_{1,i}^k - z_{2,i}^k + z_{1,i}^{k-1} - z_{2,i}^{k-1}) \quad (74)$$

$$P_{\text{res},i}^k = \frac{z_{2,i}^k}{R_{l,i}} + [(P_{\text{res},i}^{\text{max}} - \eta_i) - \frac{z_{2,i}^k}{R_{l,i}}] \frac{e^{\mu_i [\frac{z_{2,i}^k}{R_{l,i}} - (P_{\text{res},i}^{\text{max}} - \eta_i)]}}{1 + e^{\mu_i [\frac{z_{2,i}^k}{R_{l,i}} - (P_{\text{res},i}^{\text{max}} - \eta_i)]}} \quad (75)$$

$$\Delta \omega_{r,i}^k = \omega_{r,\text{ref}} P_{\text{res},i}^k \quad (76)$$

$$z_{3,i}^k = \frac{\Delta f^k}{1 + e^{\sigma_{2,i}(\Delta f^k + D_{2,i})}} \quad (77)$$

$$\Delta f_{\text{ie},i}^k - \Delta f_{\text{ie},i}^{k-1} = \frac{h}{2T_{\text{lpf}2,i}} (z_{3,i}^k - \Delta f_{\text{ie},i}^k + z_{3,i}^{k-1} - \Delta f_{\text{ie},i}^{k-1}) \quad (78)$$

$$f_{m,i}^k = C_{1,i}(\omega_{r,\text{ref}} - \Delta \omega_{r,i}^k) + C_{2,i} + \Delta f_{\text{ie},i}^k \quad (79)$$

$$\Delta P_{sl,i}^k = T_i K_i (1 - f_{m,i}^k) \quad (80)$$

初值方程: 式(48)一式(50);

运行技术约束: 式(51)一式(55);
频率最低点约束:

$$\frac{\omega_i^k}{2\pi} \geq f_{\text{lim}}, i=1,2,\dots,m \quad (81)$$

综上, 本节建立 MSL-FSCO 优化模型, 且采用差分方法离散化后, 模型中的每个随时间变化的变量都被离散为 nt 个变量, 模型中的每个微分方程约束均转化为 nt 个代数方程约束, 如离散化前模型中的同步发电机摇摆方程约束式(38)一式(40), 经离散化后转换为式(63)一式(65); MSL 频率响应约束式(25)一式(33), 经离散化后转换为式(72)一式(80)。模型转化为只含有代数方程的一般非线性规划问题, 使用内点法等非线性规划算法即可解得每个随时间变化的变量在时间序列上的 nt 个离散量, 在一定的积分步长下, 这些离散量可以近似表示这些变量随时间的动态变化情况。

3 仿真分析

利用 Pyomo 软件和 IPOPT 求解器对本文提出的 SL-FSCO 模型和 MSL-FSCO 模型进行建模与仿真分析, 并利用 WSCC 3 机 9 节点系统和新英格兰 10 机 39 节点系统验证所提模型的有效性。设普通电动机负荷在总负荷中的占比 $a_2 = 60\%$ 。假设同步发电机增加和减少出力的单位成本相同, 满足 $c_{g,i}^{\text{up}} = c_{g,i}^{\text{down}} = 1$ 美元/MW。

3.1 WSCC 3 机 9 节点系统

以常规最优潮流计算结果模拟电力市场出清后的发电机出力计划, 具体包括功率平衡方程, 电压约束, 发电机有功、无功出力约束等运行约束, 不含同步发电机频率动态响应模型的相关约束, 这与电力现货市场中的安全约束经济调度模型是一致的。发电出力计划如表 1 所示, 使用频率安全校核模型对该出力计划进行安全校核及调整。

表 1 WSCC 3 机 9 节点系统电力市场出清结果

Table 1 Electricity market clearing results of WSCC 3-generator 9-bus system

	G1	G2	G3
P_g^0/MW	60	150	105

假设节点 5 有多个风电场接入, 但节点 5 的净负荷保持不变。频率安全校核要求发电机出力计划能够应对风机脱网等有功缺额扰动引起的频率稳定性问题, 使得系统频率在扰动后能够始终满足频率稳定要求。设频率稳定极限值 $f_{\text{lim}} = 59.2 \text{ Hz}$, 针对不同程度的预设风机脱网扰动, 设置积分步长 $h = 0.02 \text{ s}$, SL-FSCO 模型的频率安全校核结果如表 2 所示。

表 2 WSCC 3 机 9 节点系统 SL-FSCO 模型的频率安全校核结果

Table 2 Frequency security correction results of the SL-FSCO model for WSCC 3-generator 9-bus system

预设脱网风机容量大小/MW		$\Delta P_g^{\text{up}}/\text{MW}$	$\Delta P_g^{\text{down}}/\text{MW}$	发电机有功出力调整费用/美元
34	G1	0	0	
	G2	0	0	0
	G3	0	0	
36	G1	0	0	
	G2	0	1.2	2.4
	G3	1.2	0	
38	G1	0	0	
	G2	0	6.7	13.4
	G3	6.7	0	
39	G1	0	0	
	G2	0	15.9	31.8
	G3	15.9	0	
40	G1	0	0	
	G2	0	16.7	33.4
	G3	16.7	0	

从 SL-FSCO 模型的频率安全校核结果中可以看出, 对于 34 MW 风机脱网扰动, 原出力计划经频率安全校核可以满足频率稳定要求, 无需对发电机出力计划进行调整。而脱网风机容量达到 36 MW 后, 原出力计划已经不能满足频率稳定要求, 需要对发电机出力计划进行调整, 且预设扰动越严重所需调整费用越多。这说明所提 SL-FSCO 模型能够兼顾系统的安全性和经济性, 针对不同程度的预设扰动给出调整费用最低的发电机出力计划调整方案。

进一步分析表 2 所呈现的频率安全校核结果, 可以注意到节点 3 上的发电机被优先调整并增加其有功出力, 这很可能归因于该发电机具有相对较大的惯性时间常数特性。较大的惯性时间常数意味着发电机在响应系统有功功率变化或进行频率调节时, 其动态响应过程较为平缓, 这在一定程度上有利于系统面对扰动时的稳定性。而频率安全校核调整发电机出力正是为了优化扰动后频率的动态轨迹, 因此优先增加此类发电机的出力是合理的。

将模型求解结果中变量 $\omega_{i,t}$ 在时间序列上的 nt 个离散量连接起来, 可以反映扰动后发电机动态频率响应过程, 且这些离散量中的最小值即为发电机频率最低点的值。若系统按照表 1 中的原出力计划运行, 发生 33 MW 风机脱网扰动后, 所有发电机频率最低点的最小值为 59.21 Hz, 如果该值低于系统触发低频减载的门槛值, 就会引发大面积的负荷

损失。按照不同的系统频率稳定极限要求 (f_{lim}), SL-FSCO 模型调整发电出力计划后, 将所有发电机中频率最低点最小且刚好等于 f_{lim} 的发电机称为 f_{lim} 起作用的发电机, 该台发电机的动态频率响应过程如图 4 所示。频率曲线图表明, SL-FSCO 模型可以追踪频率动态变化过程, 并且确保经频率安全校核后的系统在遭受预设扰动时, 频率始终在最低极限要求之上, 从而可靠地避免低频减载引起的大面积负荷损失。

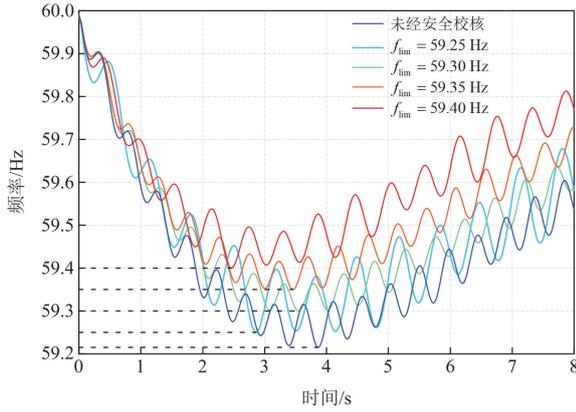


图 4 WSCC 3 机 9 节点系统不同 f_{lim} 下 SL-FSCO 模型调整发电出力计划后 f_{lim} 起作用的发电机频率曲线

Fig. 4 Frequency response of the unit with the minimum frequency nadir under different f_{lim} for WSCC 3-generator 9-bus system after the SL-FSCO model adjusts the generator output plan

以上均为 SL-FSCO 模型的仿真计算结果, 未考虑负荷侧智能负荷提供的动态频率响应。若将节点 5 上的 9 MW 非关键电动机负荷改造为 MSL, 并且假设它们在扰动前均运行在额定状态, 其智能驱动器参数设置如表 3 所示。针对表 2 中的风机脱网扰动, MSL-FSCO 模型对发电机出力计划的频率安全校核结果如表 4 所示。

与表 2 中 SL-FSCO 模型的频率安全校核结果对比后可以看出, 负荷侧动态频率响应对系统频率稳定性的影响相当明显。未考虑 MSL 动态频率响应时, 发生 38 MW 风机脱网扰动, 原出力计划就已经不能满足频率稳定要求, 而考虑 MSL 动态频率响应后, 38 MW 风机脱网时, 原出力计划依然能满足频率稳定要求, 而无需对发电机出力计划进行调整。且对于同样的扰动, 考虑 MSL 动态频率响应后发电出力调整费用大大减少。需指出的是, 所提模型所能处理的系统扰动存在一定的极限, 当发生扰动造成的有功缺额大于某一限值时, 单靠调整发电出力是一次备用是无法满足频率稳定要求

的。多次尝试设置更大的脱机容量进行仿真可得, SL-FSCO 和 MSL-FSCO 的有功缺额极限值分别为 41.75 MW 和 44.15 MW。以上结果均表明, 未考虑负荷侧动态频率响应时的频率安全校核结果是相当保守的, 不符合系统运行的经济性原则。

表 3 WSCC 3 机 9 节点系统 MSL 智能驱动器参数

$P_{res}^{max}/p.u.$	R_l	T_{lpf1}	T_{lpf2}	C_1
0.75	0.015	1	0.1	0.9937
(σ_1, D_1)	(σ_2, D_2)	η	μ	C_2
(700,0.001)	(700,0.001)	0.05	6	0.0199

表 4 WSCC 3 机 9 节点系统 MSL-FSCO 模型的频率安全校核结果

Table 4 Frequency security correction results of the MSL-FSCO model for WSCC 3-generator 9-bus system

预设脱网风机容量大小/MW		$\Delta P_g^{up}/MW$	$\Delta P_g^{down}/MW$	发电机有功出力调整费用/美元
38	G1	0	0	
	G2	0	0	0
	G3	0	0	
39	G1	0	0	
	G2	0	1.7	3.4
	G3	1.7	0	
40	G1	0	0	
	G2	0	5.6	11.2
	G3	5.6	0	

3.2 新英格兰 10 机 39 节点系统

以常规最优潮流计算结果模拟市场出清后的发电出力计划, 具体结果如表 5 所示。利用 MSL-FSCO 模型对该出力计划进行频率安全校核, 设置仿真积分步长 $h = 0.1 s$ 。

表 5 新英格兰 10 机 39 节点系统电力市场出清结果

	G1	G2	G3	G4	G5
P_g^0/MW	332	582	700	564	480
	G6	G7	G8	G9	G10
P_g^0/MW	350	530	579	880	1100

假设新英格兰 10 机 39 节点系统的节点 26 有多个风电场接入, 且节点 26 的净负荷仍保持不变。设预想扰动为节点 26 发生风机脱网, 损失风电功率 111 MW。将节点 10 上的 100 MW 电动机负荷改造为 MSL, 并假设它们在扰动前均运行在额定状态, 其智能驱动器参数如表 6 所示。

表 6 新英格兰 10 机 39 节点系统 MSL 智能驱动器参数

Table 6 Smart driver parameters of MSL for New England

10-generator 39-bus system				
$P_{res}^{max}/p.u.$	R_l	T_{lpr1}	T_{lpr2}	C_1
0.75	0.05	1	0.1	0.9937
(σ_1, D_1)	(σ_2, D_2)	η	μ	C_2
(700,0.001)	(700,0.001)	0.05	6	0.0199

按照不同的频率稳定极限要求 (f_{lim}), MSL-FSCO 模型调整发电出力计划后的每台发电机频率变化特性如图 5 所示。可以看出, MSL-FSCO 模型调整发电出力计划后, 在频率稳定极限约束的作用下, 所有发电机的频率均有所提高。图 6 给出了其中 f_{lim} 起作用的发电机频率曲线, 更清楚地展示了系统频率的最小值。以上结果充分表明了 MSL-FSCO 模型中的频率最低点约束很好地抑制了频率的下降趋势, 保证其不低于设定的频率稳定极限。

假设系统触发低频减载的频率稳定极限要求 f_{lim} 为 59.3 Hz, 改变节点 10 上接受改造的 MSL 容量, 图 7 展示了接受智能化改造的 MSL 容量大小对频率安全校核结果的影响, 包括对系统中 G1—G10 共 10 台发电机原出力计划的调整量和相应的总调整费用。可以看出, 随着接受智能化改造的 MSL 容量从 0 MW 增加到 150 MW, 系统为满足频率稳定要求而调整出力计划的发电机台数减少, 总调整量也减小, 同时相应的总调整费用也降低。这表明负荷侧 MSL 提供的动态频率响应越多, 发电机出力计划越容易满足频率稳定性要求, 缓解了发电侧的调频压力, 同时提高了系统的频率稳定性和经济性。表 7 中的发电侧调频备用总量根据 2.3 节

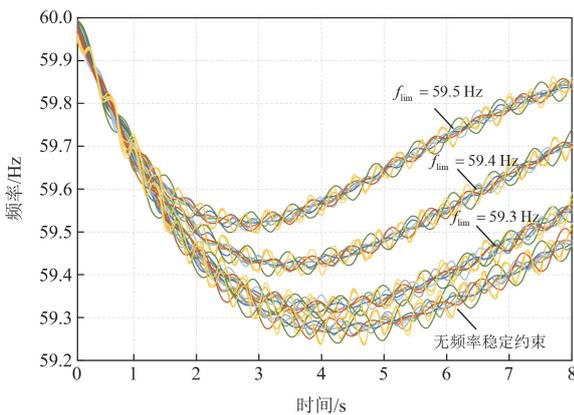


图 5 新英格兰 10 机 39 节点系统不同 f_{lim} 下 MSL-FSCO 模型调整发电出力计划后的发电机频率曲线

Fig. 5 Unit frequency response under different f_{lim} for New England 10-generator 39-bus system after the MSL-FSCO model adjusts the generator output plan

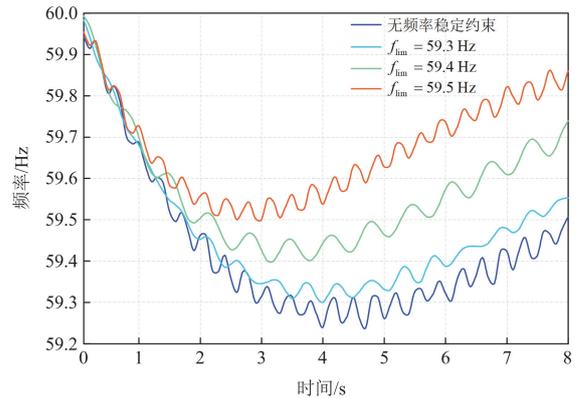


图 6 新英格兰 10 机 39 节点系统不同 f_{lim} 下 MSL-FSCO 模型调整发电出力计划后 f_{lim} 起作用的发电机频率曲线

Fig. 6 Frequency response of the unit with the minimum frequency nadir under different f_{lim} for New England 10-generator 39-bus system using MSL-FSCO

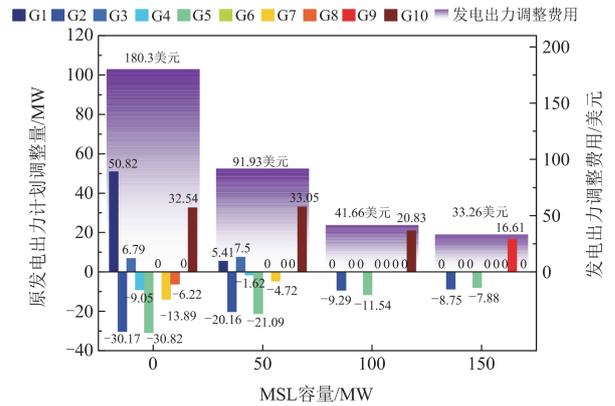


图 7 新英格兰 10 机 39 节点系统改造不同 MSL 容量时的频率安全校核结果

Fig. 7 Frequency security correction results of New England 10-generator 39-bus system with different MSL capacity

表 7 新英格兰 10 机 39 节点系统改造不同 MSL 容量时的发电侧总调频备用量

Table 7 Frequency regulation reserve on generation side of New England system with different MSL capacity

	MW			
MSL 容量	0	50	100	150
发电侧总调频备用量	341.43	115.29	105.73	97.11

中的式(58)计算得出, 结果表明, 随着 MSL 容量的增大, 发电侧总调频备用量随之减小。这也更加充分地说明负荷侧 MSL 提供的动态频率响应对发电侧调频压力的缓解作用。因此, 对系统中更多电动机负荷进行智能化改造, 从而使得负荷侧能够提供更多的动态频率响应, 是提高系统频率稳定性的有效手段。

电动机负荷在调频过程中有功减少量的最大值就是其提供的最大调频功率, 能够反映其提供频率响应的能力。表 8 展示了节点 10 上的 100 MW 普通电动机负荷在调频过程中提供的最大调频功率, 以及将其改造为 MSL 后, 智能驱动器设置不同下垂增益参数 R_i 时, MSL 在调频过程中提供的最大调频功率。对比表中结果可以看出, 与普通电动机负荷相比, MSL 提供的最大调频功率明显更多, 且 R_i 参数值越小, MSL 提供的最大调频功率越多。这表明, 相比同容量的普通电动机负荷, MSL 能够在允许范围内更大程度地降低负荷侧有功消耗, 为系统提供更多的有功支撑, 进一步说明了电动机负荷接受智能化改造对系统频率稳定性的积极作用, 以及频率安全校核优化模型中考虑 MSL 动态频率响应的必要性。改变智能驱动器 R_i 参数值, 能够在有限的 MSL 容量下获得更多的调频功率。

表 8 普通电动机负荷和同容量 MSL 提供的最大调频功率
Table 8 Maximum frequency-regulation power provided by ordinary motor loads and the same capacity MSL

	普通电动机 负荷	MSL			
		$R_i = 0.09$	$R_i = 0.07$	$R_i = 0.05$	$R_i = 0.03$
最大调频 功率/MW	1.17	9.22	11.54	14.91	18.55

若 R_i 值为 0.05, 改变智能驱动器主控制器环节中的低通滤波器时间常数 T_{ipf1} 值, 不同 T_{ipf1} 值对应的 MSL 有功变化曲线如图 8 所示。可以看出, 随着 T_{ipf1} 值减小, MSL 提供的最大调频功率稍有增加, 但 MSL 有功下降到最小值的速度加快, 即能够为系统提供更快速的频率响应。同时, 表 9 中的结果表明, 相应的发电出力调整费用也更少, 即系统更容易满足频率稳定要求。说明所建立的 MSL 频率响应模型

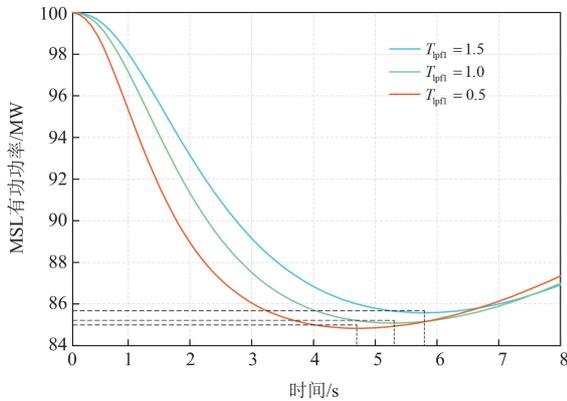


图 8 不同 T_{ipf1} 对应的 MSL 有功曲线

Fig. 8 MSL active power curves corresponding to different T_{ipf1}

表 9 不同 T_{ipf1} 对应的发电机有功出力调整费用
Table 9 Adjustment cost of generator active power output corresponding to different T_{ipf1}

T_{ipf1} 值	1.5	1.0	0.5
发电机有功出力调整费用/美元	52.82	41.66	34.49

能够有效地模拟 MSL 的动态特性, 且在系统中 MSL 容量有限的情况下, 通过合理地调整 MSL 智能驱动器参数来改变 MSL 的频率响应特性, 能够提高 MSL 的调频能力, 进而提高系统的频率稳定性。

为了进一步讨论 MSL-FSCO 模型对不同扰动场景的普适性, 假设新英格兰 10 机 39 节点系统分别有多个风电场、光伏电场接入, 且各节点的净负荷仍保持不变, 针对以下几种扰动场景进行频率安全校核。

场景 1: 节点 26 发生风机脱网扰动, 损失有功功率 110 MW;

场景 2: 节点 18 上的光伏电场欠发, 损失有功功率 110 MW;

场景 3: 节点 18 上的光伏电场欠发, 损失有功功率 120 MW;

场景 4: 发电机 G1 突然跳闸, 跳闸前出力 120 MW。

在同样的频率稳定极限要求 ($f_{lim} = 59.3$ Hz) 下, 发生几种扰动后的 f_{lim} 起作用的发电机频率曲线和系统平均频率曲线如图 9 所示。从图 9 可以看出, 不同位置、不同类型的扰动下 MSL-FSCO 均能确保发电机频率不低于频率稳定极限要求。同时, f_{lim} 起作用的发电机频率最小值均低于平均频率的最小值, 因此, 相比使用平均频率判断系统频率稳定性

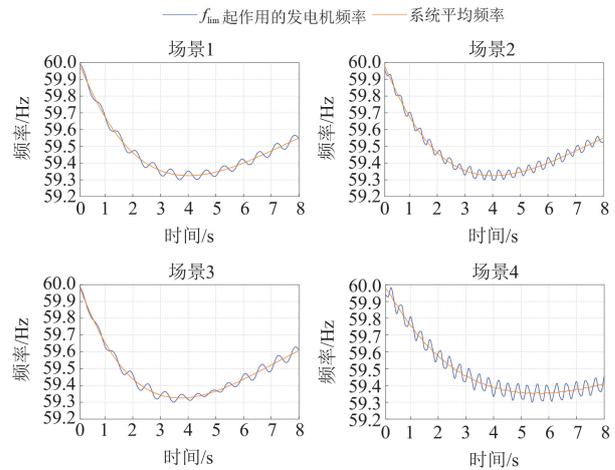


图 9 不同扰动场景下的频率动态特性

Fig. 9 Frequency dynamic characteristics under different disturbance scenarios

的方法，利用发电机频率捕捉系统频率最低点，并以此判断系统频率稳定性的方法更加严谨可靠。

3.3 计算效率

MSL-FSCO 模型使用差分化方法进行离散化处理，不同的积分步长下变量数和约束数不同，完成仿真所需计算时长亦不同。表 10 给出了不同积分步长下不同规模电力系统的仿真计算时长对比。其中，WSCC 3 机 9 节点系统预设脱网风机容量为 38 MW，频率稳定极限为 59.2 Hz，接受智能化改造的 MSL 容量为 9 MW，仿真时长为 8 s；新英格兰 10 机 39 节点系统预设脱网风机容量为 111 MW，频率稳定极限为 59.3 Hz，接受智能化改造的 MSL 容量为 100 MW，仿真时长为 8 s；IEEE118 节点系统预设脱网风机容量为 100 MW，频率稳定极限为 59.3 Hz，接受智能化改造的 MSL 容量为 100 MW，仿真时长为 8 s。不同的积分步长对应不同的积分步数，以确保能够反映优化变量在相同仿真时长内的动态特性。从表 10 中结果可以看出，更小的积分步长需要更长的仿真计算时间。且系统的微分方程数量随着发电机数量增加而成倍增加，微分方程数量的增加也会使得差分化后的代数方程数量显著增多，这导致了其计算时长的大幅增长。图 10 中展示

表 10 不同积分步长下的计算时间

Table 10 Calculation time under different integral step length

	积分步长/s	积分步数	计算时间/s
WSCC 3 机 9 节点系统	0.02	400	35.3
	0.04	200	16.9
	0.06	133	9.7
新英格兰 10 机 39 节点系统	0.02	400	7276.6
	0.04	200	1757.9
	0.06	133	755.4
	0.1	80	403.2
IEEE118 节点系统	0.15	53	119.1
	0.15	53	79 534.8

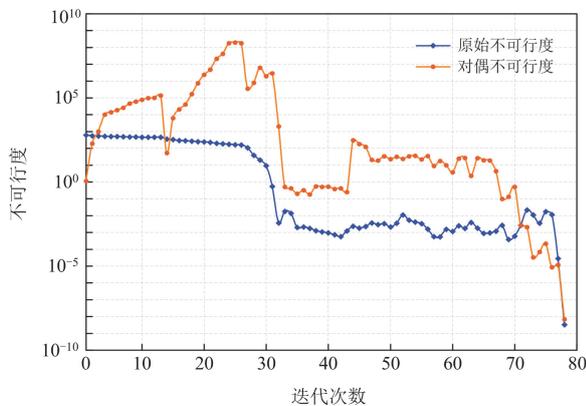


图 10 IEEE118 节点系统的不可行度收敛曲线

Fig. 10 Infeasible convergence curve of IEEE118-bus system

了 IEEE118 节点系统下模型求解时的不可行度收敛曲线。从图中可以看出，原始不可行度和对偶不可行度均能在有限的迭代次数内趋于 0，这说明本文提出的安全校核优化模型能够适应 IEEE118 节点系统的规模，对其进行安全校核并得到满足要求的最优的安全校核结果，但是其仿真计算仍需要耗费大量的时间，这也是本文研究的局限性所在。不过计算速度可借助其他数值积分方法、解耦策略及并行计算等技术提升。

4 结论和展望

为确保频率安全校核对发电机出力计划调整的公平性和经济性，本文所提 MSL-FSCO 优化模型使用优化方法对发电机出力计划进行频率安全校核，并给出最优调整方案。同时，该模型中引入了全动态频率响应模型，建立了机组出力计划与事故后频率动态特性之间严格的数学关系，并通过跟踪调频过程中各发电机组频率的动态变化来约束频率最低点，保证系统的频率稳定性。此外，该模型考虑了智能电动机负荷提供的动态频率响应，避免了负荷静态频率特性模型忽略负荷侧主动动态频率响应而引起的频率安全校核结果过于保守的问题。经仿真验证，所提出的 MSL 动态频率响应模型有效模拟了 MSL 的频率响应特性，其在事故后提供的频率响应提高了系统的频率稳定性，缓解了发电侧的调频压力。

本文所探究的 MSL-FSCO 模型还存在随着系统规模的增大计算量大幅增加的问题。为了使其更具实用化意义，下一步的研究将聚焦于提高模型的求解效率，如：采用更有效的数值积分方法处理微分方程，借鉴动态优化问题的结构分解技术对模型进行分解、实现并行计算等。

参考文献

[1] 肖云鹏, 张兰, 张轩, 等. 包含独立储能的现货电能量与调频辅助服务市场出清协调机制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊 1): 167-180.
XIAO Yunpeng, ZHANG Lan, ZHANG Xuan, et al. The coordinated market clearing mechanism for spot electric energy and regulating ancillary service incorporating independent energy storage resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 167-180.

[2] 刘坚, 王建光, 王晶, 等. 面向电力现货市场的独立储能经济性分析与容量补偿机制探索[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(2): 179-189.
LIU Jian, WANG Jianguang, WANG Jing, et al. A study on tech-economic analysis on independent energy storage

- in spot power market and associated capacity mechanisms[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2024, 7(2): 179-189.
- [3] 程杉, 李洋洋, 刘炜炜, 等. 电动汽车协助火电机组参与调频辅助服务优化控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(6): 142-151.
CHENG Shan, LI Fengyang, LIU Weiwei, et al. Optimal control strategy of thermal power units with electric vehicles participating in frequency regulation auxiliary services[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(6): 142-151.
- [4] WANG Y, CHEN C, ZHANG S, et al. A tri-level programming-based frequency regulation market equilibrium under cyber attacks[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(4): 927-937.
- [5] 国家能源局山西监管办公室. 山西独立储能电站参与电力一次调频市场交易实施细则(试行)[EB/OL]. [2024-09-30]. https://sxb.nea.gov.cn/dtyw/jggg/202309/t20230913_60791.html
- [6] 国家能源局南方监管局. 广东电力市场现货电能量交易实施细则[EB/OL]. [2024-09-30]. https://nfj.nea.gov.cn/xxgk/fdzdgnr/dlaqj/202402/t20240208_240834.html
- [7] 刘士齐, 楼楠, 张鸿轩, 等. 包含第三方独立主体的南方区域调频市场实时安全校核方法[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(11): 153-161.
LIU Shiqi, LOU Nan, ZHANG Hongxuan, et al. Real-time security verification method for China southern regional frequency regulation market including third-party independent entities[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(11): 153-161.
- [8] 武亚光, 邓佑满, 张锐, 等. 发电侧电力市场中安全校核算法的研究与实现[J]. *中国电机工程学报*, 2001, 21(6): 49-53.
WU Yaguang, DENG Youman, ZHANG Rui, et al. A security correction algorithm for the generation market[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(6): 49-53.
- [9] 邓韦斯, 吴云亮, 孙宇军, 等. 面向现货市场出清的发电计划校正决策方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(2): 164-172.
DENG Weisi, WU Yunliang, SUN Yujun, et al. Decision-making method of generation scheduling correction for electricity spot market clearing[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(2): 164-172.
- [10] 孙立钧, 顾雪平, 刘彤, 等. 一种基于深度强化学习算法的电网有功安全校正方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(10): 114-122.
SUN Lijun, GU Xueping, LIU Tong, et al. A deep reinforcement learning algorithm-based active safety correction method for power grids[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(10): 114-122.
- [11] 臧振东, 昌力, 缪源诚, 等. 市场环境多下级电网快速安全校正优化建模及应用[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(9): 171-177.
ZANG Zhendong, CHANG Li, MIAO Yuancheng, et al. Optimal modeling of fast security correction and its application to multi-layer power grid in market environment[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(9): 171-177.
- [12] 王艳松, 卢志强, 李强, 等. 基于源-荷协同的电网静态安全校正最优控制算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(20): 73-80.
WANG Yansong, LU Zhiqiang, LI Qiang, et al. Optimal control algorithm for static safety correction of power grid based on source-load coordination[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(20): 73-80.
- [13] CHAVEZ H, BALDICK R, SHARMA S. Governor rate-constrained OPF for primary frequency control adequacy[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(3): 1473-1480.
- [14] 王廷涛, 苗世洪, 姚福星, 等. 计及动态频率响应约束的高比例风电电力系统日前-日内联合调度策略[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(7): 2590-2604.
WANG Tingtao, MIAO Shihong, YAO Fuxing, et al. Day-ahead and intra-day joint dispatch strategy of high proportion wind power system considering dynamic frequency response constraints[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(7): 2590-2604.
- [15] 姚宇, 叶承晋, 朱超, 等. 考虑需求侧快速响应资源的数据驱动频率约束经济调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(2): 34-45.
YAO Yu, YE Chengjin, ZHU Chao, et al. Data-driven frequency constrained economic dispatch considering fast demand resources[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(2): 34-45.
- [16] 张嘉琪, 胥国毅, 王程, 等. 考虑同步机调差系数灵敏度与频率约束的机组组合[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(13): 102-110.
ZHANG Jiaqi, XU Guoyi, WANG Cheng, et al. Unit commitment considering the sensitivity of the synchronous generator adjustment coefficient and frequency constraint[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(13): 102-110.
- [17] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 大规模风电并网条件下考虑动态频率约束的机组组合[J]. *电网技术*, 2020, 44(7): 2513-2519.
WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Dynamic

frequency constraint unit commitment in large-scale wind power grid connection[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(7): 2513-2519.

[18] REZKALLA M, PERTL M, MARINELLI M. Electric power system inertia: requirements, challenges and solutions[J]. *Electrical Engineering*, 2018, 100(4): 2677-2693.

[19] 赵福林, 俞啸玲, 杜诗嘉, 等. 计及需求响应的含大规模风电并网下电力系统灵活性评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(1): 42-51.
ZHAO Fulin, YU Xiaoling, DU Shijia, et al. Assessment on flexibility of a power grid with large-scale wind farm integration considering demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(1): 42-51.

[20] 李若瑾. “源-荷”协调的主动配电网规划及运行优化调度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
LI Ruojin. Research on planning and operation optimization of active distribution networks with “source-load” coordination[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.

[21] 刘彦伶, 武志刚, 赖翔, 等. 异质空调负荷参与多区域电力系统频率调节的协同控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(3): 47-57.
LIU Yanling, WU Zhigang, LAI Xiang, et al. Cooperative control strategy for heterogeneous air-conditioning loads participating in frequency regulation of multi-area power systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(3): 47-57.

[22] SAXENA A, SHANKAR R. An interactive operating demand response approach for hybrid power systems integrating renewable energy sources[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(3): 174-194.

[23] FAN D, ZHANG S, HUANG H, et al. Three-stage day-ahead scheduling strategy for regional thermostatically controlled load aggregators[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(2): 321-331.

[24] LIU C, DU P. Participation of load resources in day-ahead market to provide primary-frequency response reserve[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5): 5041-5051.

[25] KUSHWAHA P, PRAKASH V, BHAKAR R, et al. PFR constrained energy storage and interruptible load scheduling under high RE penetration[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(15): 3070-3077.

[26] CHAKRAVORTY D, CHAUDHURI B, HUI S Y R. Rapid frequency response from smart loads in great Britain power system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(5): 2160-2169.

[27] WAIDE P, BRUNNER C U. Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems[J]. *IEA Energy Papers*, 2011(7).

[28] OUANJLI N E, DEROUICH A, GHZIZAL A E, et al. Modern improvement techniques of direct torque control for induction motor drives-a review[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(2): 1-12.

[29] MALEKPOUR M, AZIZIPANAH-ABARGHOOEER, TENG F, et al. Fast frequency response from smart induction motor variable speed drives[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(2): 997-1008.

[30] SHORT T L, WANG S, TOLBERT L M, et al. Primary frequency control using motor drives for short term grid disturbances[J]. *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 2021, 2(1): 1-10.

[31] AZIZIPANAH-ABARGHOOEER R, MALEKPOUR M. Smart induction motor variable frequency drives for primary frequency regulation[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, 35(1): 1-10.

[32] JAVADI M, AMRAEE T, CAPITANESCU F. Look ahead dynamic security-constrained economic dispatch considering frequency stability and smart loads[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 108: 240-251.

[33] PRABHA K. *Power system stability and control*[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

[34] 陈仕龙, 单节杉, 晏妮, 等. *电力拖动与控制技术*[M]. 成都: 四川大学出版社, 2018.

[35] 毛叔钧, 曾家瑞. 电力系统频率特性的实用分析法——WPJ-1 微机频率记录装置在电力调度现场的应用[J]. *电力系统自动化*, 1989, 13(2): 62-66.
MAO Shujun, ZENG Jiarui. Real analysis of power system frequency characteristics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1989, 13(2): 62-66.

收稿日期: 2024-11-11; 修回日期: 2025-05-02

作者简介:

李佩杰(1984—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定与优化运行; E-mail: lipeijie@gxu.edu.cn

韩佩卓(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行; E-mail: hpeizhuo@163.com

赵晓慧(1983—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统优化运行. E-mail: zhaoxiaohui@163.com

(编辑 魏小丽)