[优化调度]

考虑新能源逆向分布的多区域电力系统频率安全约束优化调度策略

文/庹明暐[1] 张木兰[1] 高涛[2] 尚学全[2]
1. 汽车动力传动与电子控制湖北省重点实验室（湖北汽车工业学院）；2. 十堰巨能电力设计有限公司

基于电力系统节点频率响应的动态特性，构建新能源电力系统节点频率响应模型，同时基于模型推导出关键节点的频率特征值约束，并纳入多区域电力系统优化调度模型。为提升优化调度模型的求解效率，采用分解算法对原问题的分解子问题进行频率稳定性验证，并基于验证误差生成基于灵敏度的优化割。最后验证所提模型的有效性。

随着国家碳达峰、碳中和行动的不断推进，电力行业低碳态势快速发展，以风电和光伏为代表的新能源发电并网成为未来新型电力系统的重要特征[1]。预测到2060年我国风电和光伏发电装机容量占比之和需达到约80%，发电量占比之和达到约70%。新型电力系统的转变是我国能源结构优化和绿色低碳发展的重要一环，也给电网的频率调控带来了新的挑战[2]。不同于传统同步发电机，新能源发电输出具有较大的波动性和间歇性，区域性明显。并且新能源机组通过电力电子器件接入电网，本身有同步惯量和调频能力，大规模并网削弱了系统的频率响应能力，如2016 年南澳发生“9·28”大停电，2019 年英国发生“8·9”大停电等[3]。如何高效整合新能源发电、优化电力系统调度，对提升电力系统的稳定性和可靠性，实现其绿色转型具有重要意义。

系统频率与有功功率之间存在紧密耦合关系，在传统日前调度策略中引入频率安全约束是提升电力系统频率响应能力的有效手段[4]。日前优化调度能够优化事故前的运行状态，实现不同区域间的调频资源互济，确保系统频率在稳定范围内。此外，日前调度还能满足电力供需平衡，减少弃风、弃光现象，提高新能源消纳。因此，研究大规模新能源并网背景下的多区域电网调度对于预防频率失稳事故的发生具有重要意义。

当前考虑频率动态安全的电力系统优化调度研究对于频率响应特性的分析常基于惯性中心理论与经典的平均系统频率模型。然而，传统基于惯性中心理论的频率分析方法无法准确反映整体系统动态，简化模型往往忽略频率响应的时空特性，导致区域频率跌落最低值和频率变化最大速率的实际数值超过安全阈值，造成继电器等保护装置动作，引发频率失稳事故[5]。为解决多区域频率变化的不一致性问题，特定区域发生故障后的频率演变等于惯性中心加上特定跨区域振荡演变。这些研究基于初始频率下降速率、最低频率和准稳态频率三个指标进行详细的线性推导，适用于多区域系统。文献[3]通过分析频率动态过程，特别是关注初始时刻频率的下降速率、最低频率点及准稳态频率三个关键指标，生成多区域系统的频率安全约束集为评估和保障系统的频率稳定性提供了有效的工具。文献[6]提出一种新型多区域频率响应模型，该模型融入飞

基金项目：汽车动力传动与电子控制湖北省重点实验室开放基金项目（ZDK12023B01）

轮储能系统以支持系统惯性和一次频率调节，为多区域频率安全约束提供新思路。尽管这些研究在频率安全约束优化调度方面取得一定进展，但由于新能源电力系统网络拓扑、发电组合和负载分布等因素，各区域关键节点频率响应显著不同，对于优化调度的限制依然存在。

本文根据电力系统节点频率响应模型，解释电力系统节点频率响应时空分布特性产生的机理，建立节点频率变化率与有功缺额、网架结构、惯量分布和调频参数等的数学关系，分析节点频率特征量的控制途径。基于节点频率响应特征量的表达式构建了约束集，并纳入电力系统日前优化调度模型。在此基础上阐述基于图神经网络加速的模型求解策略，给出具体求解流程，最后结合实例进行说明。

电力系统节点频率响应模型

电力系统作为一个复杂的动态网络，包含发电机、变电站和负载等电力设备以及连接这些设备的输电线路。频率是判断电网稳定运行的重要指标，电力系统频率的控制通常基于惯性中心理论及其相关衍生模型，这类模型将电力系统简化为单机系统，系统的动态频率由摇摆方程确定，即

$$\Delta P_m-\Delta P_e=M\frac{\mathrm{d}\Delta\omega}{\mathrm{d}t}+D\Delta\omega \tag{1}$$

式中，M为系统惯量；D为系统阻尼；$\Delta\omega$为角速度变化；ΔP_m为系统的机械功率变化，ΔP_e为电力负荷变化。

ΔP_m和ΔP_e在系统正常运行状态下的差值非常小，系统频率稳定。当发生功率缺额时，系统频率下降，调速器可以通过增加机械功率使系统功率恢复平衡。为解决惯性中心理论模型所忽略的系统节点频率时空分布差异，通过确定各个节点的摆动方程，可对不同区域节点的频率响应进行准确表征

$$m_i\ddot{\theta}_i+d_i\dot{\theta}_i=P_{in,i}-\sum_{j=1}^{n}b_{ij}\sin(\theta_i-\theta_j) \tag{2}$$

式中，m_i和d_i分别为节点i上的惯量系数和阻尼系数；θ为节点的电压相角；$P_{in,i}$为节点的输入功率；b_{ij}为支路的电纳。

需要注意的是，不管是传统的同步发电机还是逆变器控制电源，惯性系数m_i为节点惯量的共同作用等效。对于同步发电机来说，m_i为机械惯性系数，而对于逆变器电源来说，m_i则受到功率测量模组中低通滤波器的截止频率以及下垂增益的影响；与之类似，同步电机的阻尼系数d_i则受到机械惯性、下垂增益、调速器响应时间以及阻尼绕组中阻尼转矩的影响，而逆变器控制电源d_i则受到下垂增益以及低通滤波器截止频率的影响。

考虑无扰动状态下，$\sum_N P_i=0$时，系统同步频率满足$\dot{\theta}_i=0$，此时引入加权拉普拉斯矩阵$L(\theta^{(0)})$，其中的每一个元素可以定义为

$$L_{ij}=\begin{cases}-b_{ij}V_i^{(0)}V_j^{(0)}\cos(\theta_i^{(0)}-\theta_j^{(0)})\\ \sum_{q\in K^-(i)}-b_{iq}V_i^{(0)}V_q^{(0)}\cos(\theta_i^{(0)}-\theta_q^{(0)})\end{cases} \tag{3}$$

其中拉普拉斯矩阵由初始稳态下相邻节点之间的电压相位差的余弦值计算得出。考虑扰动发生时

$$P_i(t)=P_i^{(0)}+\delta P_i(t) \tag{4}$$

将式（4）代入式（2）可以得到

$$\begin{aligned}&m_i\ddot{\theta}_i+d_i\dot{\theta}_i\\&=\delta P_i(t)-\sum_{j=1}^{n}b_{ij}\cos\left(\theta_i^{(0)}-\theta_j^{(0)}\right)\left(\delta\theta_i-\delta\theta_j\right)\end{aligned} \tag{5}$$

对式（5）进行求解可以得到节点i的特征向量以及特征值的频率偏移量多分量求和表达式

$$\delta\dot{\theta}_i(t)=\frac{\Delta Pe^{-\frac{\gamma t}{2}}}{m}\sum_{\alpha=1}^{N_g}u_{\alpha i}^{(0)}u_{\alpha b}^{(0)}\frac{\sin\left(\sqrt{\frac{\lambda_\alpha}{m}-\frac{\gamma^2}{4}}t\right)}{\sqrt{\frac{\lambda_\alpha}{m}-\frac{\gamma^2}{4}}} \tag{6}$$

节点频率变化率的表达式可以计算为

$$\begin{aligned}&F_{rcf,i}(t_0)=\\&\frac{\Delta Pe^{\frac{\gamma t}{2}}}{2\pi m}\sum_{\alpha=1}^{N_g}\frac{\beta_{\alpha i}\beta_{\alpha b}}{\sqrt{\frac{\lambda_\alpha}{m}-\frac{\gamma^2}{4}}\Delta t}\left[\begin{array}{l}e^{-\frac{\gamma\Delta t}{2}}\sin\left(\sqrt{\frac{\lambda_\alpha}{m}-\frac{\gamma^2}{4}}(t_0+\Delta t)\right)\\-\sin\left(\sqrt{\frac{\lambda_\alpha}{m}-\frac{\gamma^2}{4}}t_0\right)\end{array}\right]\end{aligned} \tag{7}$$

计及频率安全的电力系统优化调度模型

首先基于电力系统节点频率变化率以及频率偏移量的表达式构建频率相关约束，并将生成的约束纳入多区域电力系统优化调度模型。该模型旨在满足各项系统运行约束的基础上，最小化电力系统运行成本，并确保系统频率的稳定性。具体公式表述为

$$\min_{\Phi}\sum_{g\in G}\sum_{t\in T}(c_gP_{g,t}+c_g^{NL}u_{g,t}+c_g^{SU}v_{g,t}+c_g^{RE}r_{g,t}) \tag{8}$$

$$\sum_{g\in G(n)} P_{g,t}u_{g,t} + \sum_{k\in K(n-)} P_{k,t} - \sum_{k\in K(n+)} P_{k,t} - D_{n,t} + E_{n,t} = 0, \forall n,t \tag{9}$$

$$P_{k,t} - b_k(\theta_{n,t} - \theta_{m,t}) = 0, \forall k,t \tag{10}$$

$$-P_k^{\max} \leqslant P_{k,t} \leqslant P_k^{\max}, \forall k,t \tag{11}$$

$$P_g^{\min} u_{g,t} \leqslant P_{g,t}, \forall g,t \tag{12}$$

$$P_{g,t} + r_{g,t} \leqslant u_{g,t} P_g^{\max}, \forall g,t \tag{13}$$

$$0 \leqslant r_{g,t} \leqslant R_g^{re} u_{g,t}, \forall g,t \tag{14}$$

$$\sum_{j\in G} r_{j,t} \geqslant P_{g,t} + r_{g,t}, \forall g,t \tag{15}$$

$$P_{g,t} - P_{g,t-1} \leqslant R_g^{hr}, \forall g,t \tag{16}$$

$$P_{g,t-1} - P_{g,t} \leqslant R_g^{hr}, \forall g,t \tag{17}$$

$$v_{g,t} \geqslant u_{g,t} - u_{g,t} - 1, \forall g,t \tag{18}$$

$$v_{g,t+1} \leqslant 1 - u_{g,t}, \forall g,t \leqslant nT - 1 \tag{19}$$

$$v_{g,t} \leqslant u_{g,t}, \forall g,t \tag{20}$$

$$\sum_{s=t-UTg}^{t} v_{g,s} \leqslant u_{g,t}, \forall g,t \geqslant UT_g \tag{21}$$

$$\sum_{s=t-UTg}^{t+DT_g} v_{g,s} \leqslant 1 - u_{g,t}, \forall g,t \geqslant nT - DT_g \tag{22}$$

$$u_{g,t}, v_{g,t} \in \{0,1\}, \forall g,t \tag{23}$$

式（9）定义了目标函数，式（10）～式（23）详细描述模型的各项物理约束。式（9）确保各节点的电力平衡，式（10）计算各线路的传输功率，且传输必须满足式（11）中给定的线路传输容量。计划发电量和发电备用由式（12）～式（17）给定，受到各个机组发电容量和调速率的限制。式（15）定义的发电备用需要确保总的备用能够应对任意单机脱网的情况。发电机组的起停状态变量由式（18）～式（23）中的二进制变量来确定。同步发电机的最小停机时间及在关机前所需的最小运行时间分别在式（21）和式（22）中详细描述。此外，表示发电机启动和承诺状态的二进制变量在式（23）中呈现。

基于灵敏度割的分解算法

当供电过剩或负载突然减少时，电网频率可能超出正常运行范围的上限出现过频问题，此时一般可以通过断开一些电机机组来减少过剩的电力。相比之下，低频的处理方式要复杂得多，尤其是在新能源占比较高的电网中。由于新能源发电机组通常缺乏用于阻尼波动和稳定频率所必需的机械惯性。因此，需要在目前系统优化调度中引入频率相关约束以应对低频问题，弥补惯性不足并确保系统的频率稳定。

$$F_{\mathrm{rcf},i}(t_1) \leqslant \mathrm{RoCoF}_{\lim}, \forall i \in N_G, t \tag{24}$$

$$F_{\mathrm{rcf},i}(t_2) \leqslant \mathrm{RoCoF}_{\lim}, \forall i \in N_G, t \tag{25}$$

$$F_{\mathrm{nadir},t} \geqslant f_{\mathrm{nadir,lim}}, \forall i \in N_G \tag{26}$$

$$F_{\infty,t} \geqslant f_{\mathrm{nadir,lim}}, \forall i \in N_G \tag{27}$$

在评估关键节点的频率稳定性时，传统分解算法中用于评估频率稳定性的优化割，主要基于惯量参数和机组起停指标，这类方法并非最有效的解决方案。由于传统割的生成常基于系统惯性中心理论，其只能间接地影响系统频率稳定性。此外，由于此类割通常基于系统内全部发电机的起停状态，从而忽略关键节点频率动态响应的影响。因此，在本研究中，提出一系列基于关键节点系统频率特征量敏感度的割，以增强分解算法的鲁棒性与高效性。系统节点i的频率变化率的近似表达式为

$$F_{rcf,0}(t) \approx F_{rcf,i}(P^G) + \sum_{g\in G} dF_t \Delta P^G \tag{28}$$

当节点频率在时间t时超过阈值，则节点频率指标的灵敏度可以近似为

$$\mathrm{d}F_{\mathrm{rcf},i,t}(t_1) = \left(F_{\mathrm{rcf},i,t}(t_1) - F_{\mathrm{rcf},i,0}(t_1)/\Delta P^G\right) \tag{29}$$

$$\mathrm{d}F_{\mathrm{rcf},i,t}(t_2) = \left(F_{\mathrm{rcf},i,t}(t_2) - F_{\mathrm{rcf},i,0}(t_2)/\Delta P^G\right) \tag{30}$$

$$\mathrm{d}F_{\mathrm{nadir},i,t} = (F_{\mathrm{nadir},i,t} - F_{\mathrm{nadir},i,0})/\Delta P^G \tag{31}$$

$$\mathrm{d}F_{\infty,i,t} = (F_{\infty,i,t} - F_{\infty,i,0})/\Delta P^G \tag{32}$$

为提升第（n+1）次迭代的频率稳定性，最优割可以定义为

$$\sum_{g\in G} F_{\mathrm{rcf},i,t}(t_1) P_{g,t} < \hat{C}_{\mathrm{rcf},i,t}, \forall i,t \tag{33}$$

$$\sum_{g\in G} F_{\mathrm{rcf},i,t}(t_2) P_{g,t} < \hat{C}_{rcf,i,t}, \forall i,t \tag{34}$$

$$\sum_{g\in G} F_{\mathrm{nadir},i,t} P_{g,t} < \hat{C}_{\mathrm{nadir},i,t}, \forall i,t \tag{35}$$

$$\sum_{g\in G} F_{\infty,i,t}(t_1) P_{g,t} < \hat{C}_{\infty,i,t}, \forall i,t \tag{36}$$

通过迭代的方法不断更新不可行割并反馈回主问题，最终实现含非线性约束的优化调度模型的求解。

实例分析

如图1所示，采用IEEE 24母线系统进行仿真分析，系统包含24个母线、33台发电机和38条输电线。发电机的总发电容量为3 393 MW，系统峰值负

荷为2 281 MW。将线路参数、机组参数录入PSS/E软件，各工况的运行数据代入系统进行暂态分析，选取了四种场景进行分析，总结如下。

1）传统电力系统优化调度模型不考虑频率安全约束。

2）考虑频率安全的电力系统优化调度模型，包含基于惯量中心理论模型的系统频率安全约束。

3）考虑区域频率安全的电力系统优化调度模型，包含基于多区域频率响应模型的区域频率安全约束。

4）本文所提出的节点频率动态安全约束的多区域电力系统优化调度模型。

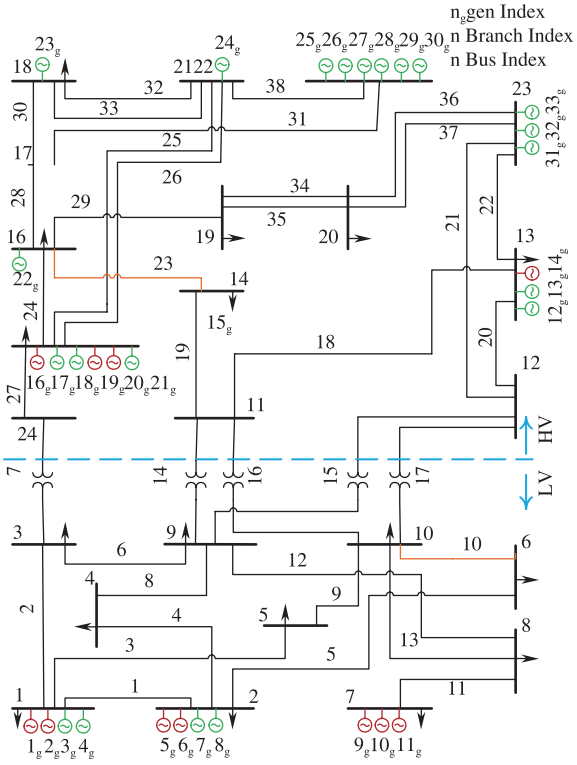

图1　IEEE 24母线系统

首先基于系统网络拓扑结构计算系统拉普拉斯矩阵，通过分段线性化对频率相关约束进行线性化处理并求解主问题获取各个机组的调度初始值，然后在子问题中基于节点电压相位更新拉普拉斯方程并生成灵敏度割返回住问题，最终通过迭代求解。表1比较了不同可再生能源渗透率水平下各模型的迭代求解次数以及总运行成本。模型1采用常规的机组优化调度作为基准组，其中不包含频率约束。随着可再生能源渗透率的降低，总运行成本增加，这一趋势在所有案例中都一致。模型2和模型3在传统优化调度模型基础上分别考虑系统范围和区域范围的频率响应约束，仿真结果频率安全约束的引入导致系统运行成本的明显增加。同时随着新能源渗透率的升高，模型4的运行成本在10%的可再生能源渗透率场景下达到了825万元的最大值。

表1　不同新能源渗透率下的系统运行成本比较

（单位：百万元）

新能源渗透率（%）	50	40	30	20	10
模型1	5.55	6.01	6.45	6.94	7.32
模型2	5.98	6.40	6.87	7.38	7.77
模型3	6.13	6.61	7.05	7.58	8.05
模型4	6.38	6.72	7.25	7.79	8.25

表2展示了上述各运行场景下的模型求解迭代次数以及频率仿真结果。 模型1在正常运行状态下无法确保扰动情况下系统节点频率稳定性，同时其他模型中的频率安全约束均得到满足。对于模型2和模型3，系统和区域的频率相关约束均得到满足，但是系统内节点的最大瞬时频率变化率仍然超过了预设的0.5 Hz/s阈值。

表2　不同新能源渗透率下的系统运行成本比较

新能源渗透率	迭代次数	最大频率变化率（%）	频率最低值/Hz	稳态频率/Hz
模型1	-	1.18	58.55	58.87
模型2	3	0.73	59.28	59.50
模型3	6	0.58	59.56	59.69
模型4	13	0.49	59.72	59.85

如图2所示，功率扰动发生后瞬时频率变化率开始上升。模型4能够通过追踪节点频率动态响应生成频率安全约束，从而在扰动期间确保了系统关键节点的稳定性。

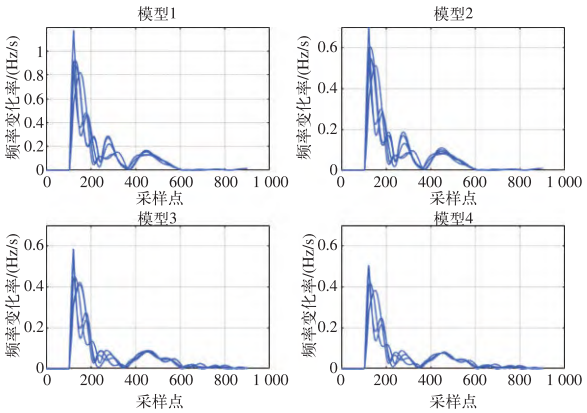

图2　不同场景下的频率变化率

结束语

大规模新能源并网将导致系统频率响应能力降低，频率响应时空分布特性显著，本文利用系统节点频率响应模型揭示控制参数分布对于多分量节点频率特征量的影响机制，由此推导节点频率安全约束以及灵敏度优化割，并将生成的约束集纳入系统日前优化调度模型，结果显示所提出的分解优化方法能够实现计及节点频率安全的多区域电力系统优化调度问题高效求解，且模型能够实现系统的抗扰动能力，确保系统节点的频率稳定。该策略对类似工程具有借鉴意义，也可以推广到实时系统，实现大范围、多区域电力系统运行的经济性与稳定性。EA

(收稿日期：2024-10-28)

参考文献

[1] 李明节，陈国平，董存，等．新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]．电网技术，2019，43(11)：3979-3986．

[2] 陈亦平，卓映君，刘映尚，等．高比例可再生能源电力系统的快速频率响应市场发展与建议[J]．电力系统自动化，2021，45(10)：174-183．

[3] 信向誉，王涛，顾雪平等．规模风电接入下考虑多区域频率动态安全的机组组合与风险调度[J]．中国电机工程学报，2023，43(15)：5824-5839．

[4] 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．

[5] 张子扬，张宁，杜尔顺，等．双高电力系统频率安全题评述及其应对措施[J]．中国电机工程学报，2022．

[6] Saberi Oskouee S，Kamali S，Amraee T．Primary Frequency Support in Unit Commitment Using a Multi-Area Frequency Model With Flywheel Energy Storage[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2021，36(6)：5105—5119．

[7] 电力系统电压和无功电力技术导则：GB/T40427—2021[S]．北京：中国电力出版社，2021．

[8] 供配电系统设计规范：GB 50052—2009[S]．北京：中国电力出版社，2017．

[9] 中国电力工程顾问集团有限公司，中国能源建设集团规划设计有限公司．电力工程设计手册·电力系统规划设计[Z]．北京：中国电力出版社，2019．

[10] 电力系统电压和无功电力技术导则：GB/T40427—2021[S]．北京：中国电力出版社，2017．

[11] 35 kV～110 kV变电站设计规范：GB50059—2011[S]．北京：中国电力出版社，2011．

[12] 35 kV～110 kV变电站设计规范：DL/T5103—2018[S]．北京：中国电力出版社，2018．