

考虑频率与区间联络线功率安全约束的 两区互联电力系统机组组合

申家锴¹, 刘洋², 李卫东¹, 顾泰宇³, 巴宇¹, 王海霞¹

(1. 大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 国家电网公司东北分部, 辽宁 沈阳 110180;

3. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006)

摘要:随着电源结构与电网形态的转变, 互联电力系统频率时空分布特征日益显著, 区域频率差异与区间联络线功率振荡增大, 基于统一频率假设的频率安全约束机组组合方法不再适用。针对考虑频率时空分布特征的两区互联电力系统安全约束机组组合, 推导区域频率与区间联络线功率闭式解, 并基于闭式解的两项划分, 推得区域频率最低点、最大变化率、准稳态值以及区间联络线功率振荡峰值、准稳态值等一系列解析安全量化指标。基于所得指标, 构建考虑区域频率与区间联络线功率安全约束的机组组合模型。并根据调度模式与指标特点, 提出兼顾区域能力保障与区间能力协调的两级两阶段迭代求解算法。结果表明, 所得指标可准确描述两区互联电力系统的安全特征, 所提模型和算法可有效保障两区互联电力系统机组组合方案的运行安全。

关键词: 互联电力系统; 频率安全; 联络线功率安全; 解析安全量化指标; 机组组合

中图分类号: TM 761+.2

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202208032

0 引言

互联电力系统的日前调度包括联络线交易计划制定、机组组合等。我国电网主要采用分级调度模式, 其中上级调度机构负责制定区间联络线交易计划, 下级调度机构负责完成区域内的机组组合。随着“双碳”目标下新型电力系统的发展, 由“双低”(低惯量、低一次调频能力)特征引发的频率稳定问题受到了广泛关注^[1-3], 在机组组合中考虑频率稳定问题成为研究的热点之一^[4]。与单一系统不同, 互联电力系统的频率稳定控制需要区域之间的协同配合, 由于各区资源的特性差异及分布差异, 实际系统中, 频率具有时空分布特征, 区间联络线功率存在振荡^[5-6]。由于区域调度机构无法事先获知相邻区域的开机方案, 因而无法从整体考虑频率差异及功率振荡对系统安全的影响。考虑到上级调度机构的信息优势与协调作用, 互联电力系统的频率及联络线功率安全校验可由其负责完成。

由于先前系统的频率差异与功率振荡并不显著, 在制定机组组合方案时, 可依据各区电网固定的频率调节系数来估计区间联络线功率增量, 并基于统一频率模型估算频率最大偏移等^[7-8]。这种忽略

区域间运行状态变化的静态视角分析方法尽管存在一定偏差, 但仍可接受。随着电源结构与电网形态的转变, 频率时空分布特征更加显著^[9-10], 再沿用静态视角分析方法制定机组组合方案将产生较大误差, 可能导致误判而危及系统运行安全。以动态视角在机组组合中考虑频率稳定问题, 关键是在安全约束中计入频率时空分布特征。已有的频率安全约束机组组合研究^[11-17]大多基于统一频率假设, 显然无法考虑这一特征因素。与已有研究相比, 动态视角下互联电力系统安全约束机组组合的理论增量为: ①在安全约束构建中, 需基于互联电力系统频率响应模型考虑区域频率差异与区间联络线功率振荡; ②在机组组合求解中, 需根据调度模式考虑多个区域的多个非线性安全约束的协调。

就构建安全约束的解析安全量化指标而言, 文献[18]基于扰动区与非扰动区的两区划分, 建立了两机等值频率响应模型并推导了区域频率闭式解, 但未给出区域频率最大变化率等安全指标的解析方法; 文献[7]解析考虑了区间联络线功率准稳态值, 但未考虑其峰值; 文献[6]建立了两区联络线功率振荡模型并解析推导了区间联络线功率峰值表达式, 文献[19-20]进一步研究了直流闭锁等故障下的功率峰值计算, 但均未计及发电机的一次调频作用; 文献[21]基于频域泰勒展开的方法推导了区域频率与区间联络线功率的多个安全量化指标表达式, 但具备精度的表达式需要保留上百项, 极其复杂。综上, 目前仍然缺少能够准确描述区域频率与区间联络线功率安全的解析量化指标。

收稿日期: 2022-05-03; 修回日期: 2022-08-07

在线出版日期: 2022-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51677018); 国家电网公司科技项目(2021YF-11)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677018) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(2021YF-11)

就互联电力系统安全约束机组组合的优化算法而言,由于目前关于互联电力系统的研究主要以提升经济性和灵活性为主,关注多区域间频率安全及资源互济的研究还较少^[3]。文献[21]在考虑区域频率与区间联络线功率安全约束的机组组合中,采用了布尔函数法解决安全约束带来的非线性问题,但该方法空间复杂度爆炸,难以应用于大规模系统;针对频率安全约束非线性的两阶段迭代方法^[15-17],其有效性仅在基于统一频率假设的频率安全约束机组组合中被证明,但如何解决区域频率与区间联络线功率多个安全约束带来的非线性问题,以及如何根据调度模式在两阶段迭代中协调多个安全约束,还需进一步研究。综上,目前仍缺少针对互联电力系统的安全约束机组组合优化算法。

对此,本文针对两区互联电力系统安全约束机组组合展开研究,主要贡献如下。

1) 基于两机等值频率响应模型进一步推导了区间联络线功率振荡首摆与准稳态闭式解;基于闭式解的快、慢变化项划分,推得区域频率最低点、最大变化率、准稳态值,以及区间联络线功率振荡峰值、准稳态值等解析安全量化指标。

2) 基于所得指标建立了考虑区域频率与区间联络线功率安全的机组组合模型;基于指标的参数灵敏度分析,采用分段线性化方法构造了线性优化割;并基于各区参数对指标的影响,设计了安全约束的校验策略,提出了兼顾区域能力保障与区间能力协调的两级两阶段迭代求解算法。

1 两区互联电力系统的解析安全量化指标

互联电力系统中,区域频率最低点、最大变化率、准稳态值以及区间联络线功率振荡峰值、准稳态值等指标影响系统的安全稳定运行,并受各区开机方案的影响。本节将针对两区互联电力系统,基于两机等值频率响应模型,推导区域频率与区间联络线功率的解析安全量化指标。

1.1 两区互联电力系统频率响应模型

考虑到互联电力系统频率时空分布特征主要由区域间联系较弱导致的区域振荡模式产生,且频率动态由有功变化主导,假设各区内频率一致,分别将各区聚合为一台等值发电机。等值机组及互联电力系统部分参数定义如下: H 、 R 、 F_H 、 T_R 和 D 分别为机组调速器的惯性时间常数、调差系数、高压缸做功比例、再热时间常数和等效阻尼; f 、 δ 和 P_m 分别为频率、机组的功角和机械功率; P_d 为扰动功率(功率盈余时为正,功率缺失时为负); P_p 和 P_f 分别为一次调频比例反馈与一阶惯性反馈环节功率; K_m 为发电机增益。后文中,变量左侧 Δ 表示对应变量的增量;上标“ $'$ ”表示变量在两机等值模型中的对应参数;下标

$k(k=1,2)$ 表示区域 k 。

含区外直流的两区互联电力系统示意图如图1(a)所示,基于直流潮流简化网络结构,并采用低阶调速器降低阶数,可得两机等值电力系统频率响应模型^[17,21],如图1(b)所示。图中: s 为拉氏算子; $B'_{s,1,1}$ 和 $B'_{s,2,1}$ 为机组间功率交换系数矩阵 B'_s 中的元素; ω_0 为额定角速度; P'_T 为区间联络线功率(流出为正,流入为负); $\Delta P'_{s,1,2}$ 和 $\Delta P'_{s,2,1}$ 为机组间振荡功率矩阵 $\Delta P'_s$ 中的元素。

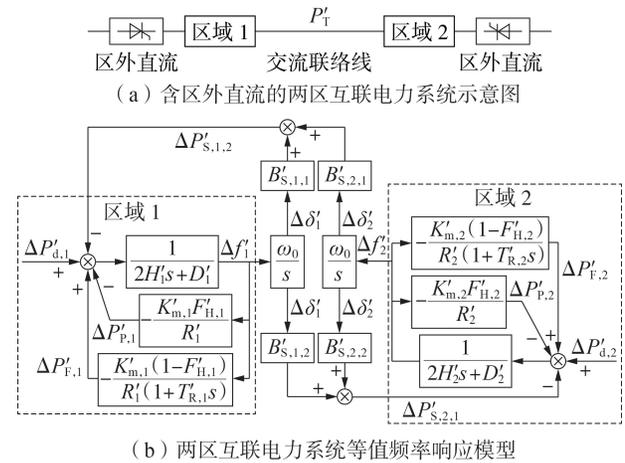


图1 含区外直流的两区互联电力系统及频率响应模型
Fig.1 Two-area interconnected power system with DC outside area and its frequency response model

为方便计算,本文以 S_B 为基准容量。区域 k 中发电机的增益系数 $K_{m,k,i}$ 为:

$$K_{m,k,i} = \frac{U_{k,i} P_{\max,k,i}}{S_B} \quad i \in V_k, k \in \kappa \quad (1)$$

式中: κ 为区域集合; $U_{k,i}$ 为区域 k 中机组 i 的启停状态变量,其值为0表示停机,其值为1表示开机; $P_{\max,k,i}$ 为区域 k 中机组 i 的额定功率; V_k 为区域 k 中机组集合。

随着风电、光伏等可再生能源电站的一次调频功能改造^[22],可再生能源的调频控制应当被计及。当前,一次调频功能改造主要为在可再生能源电站有功功率控制系统中,增加模拟常规机组调频特性的频率控制环节(虚拟惯性控制与下垂控制)。由于添加的频率控制环节与常规机组具有相似结构,可与常规机组同时等值聚合^[15-17]。图1(b)中调速器参数的等值聚合公式见附录A式(A1)、(A2)。

定义扰动所在区域为扰动区,相邻区域为非扰动区,本文设区域1为扰动区,则区域2为非扰动区。区间联络线功率增量 $\Delta P'_T$ 为非扰动区对扰动区的支援功率,等于扰动区电磁功率增量。根据图1(b),区域1中电磁功率增量 $\Delta P'_T$ 为 $\Delta P'_{s,1,2}$ 与 $\Delta P'_{d,1}$ 之差,如式(2)所示。

$$\Delta P'_T = \Delta P'_{s,1,2} - \Delta P'_{d,1} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta P'_{s,1,2} = B'_{s,1,1} \Delta \delta'_1 - B'_{s,2,1} \Delta \delta'_2 \\ \Delta P'_{d,1} = B'_{L,1,v} \Delta P_d \quad v \in N \end{cases} \quad (3)$$

式中: $B'_{L,1,v}$ 为区域 1 中初始扰动功率分配矩阵 B'_L 的元素; N 为系统节点集合; v 为扰动发生节点。由文献[18]可知机组间功率交换系数矩阵 B'_s 与初始扰动功率分配矩阵 B'_L 中的元素分别存在如下关系:

$$\begin{cases} B'_{s,1,1} = \sum_{i \in V_1} \sum_{\tau \in V_1} B_{s,i,\tau}, \quad B'_{s,1,2} = \sum_{i \in V_1} \sum_{\tau \in V_2} B_{s,i,\tau} \\ B'_{L,1,v} = \sum_{i \in V_1} B_{L,i,v} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $B_{s,i,\tau}$ 为机组 i, τ 间的功率交换系数。由于 $B'_{s,1,1} = B'_{s,2,2} = -B'_{s,1,2} = -B'_{s,2,1}$, 为方便后文计算, 记 $w' = \omega_0 B'_{s,1,1}$ 。

1.2 模型闭式解

1.2.1 模型的振动方程与区域频率闭式解

图 1(b) 所示模型为 2 个 3 阶系统互联组成的 6 阶系统, 无法直接求取闭式解。为解决考虑区间关系与调速器动态带来的高阶问题, 根据调速器一阶惯性反馈环节增量 $\Delta P'_{F,k}$ 的低通滤波特性, 采用文献[18]提出的频率反馈解环、频率近似替代、模态分解等方法, 可将该模型系统动态方程转换为以 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ 为主模态坐标的二阶二自由度强迫振动方程, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} 2H\ddot{y}_1(t) + D_{\text{eq}}\dot{y}_1(t) = \omega_0 (\Delta P_d + \Delta P_F(t) + \chi_3\dot{y}_2(t)) \\ 8HH_1H_2\ddot{y}_2(t) + (4H_1^2D'_{\text{eq},2} + 4H_2^2D'_{\text{eq},1})\dot{y}_2(t) + \\ 4H^2w'y_2(t) = \omega_0 (\chi_1 + \chi_2 + \chi_3\dot{y}_1(t)) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $D_{\text{eq}} = D + K_m F_H / R$, $D'_{\text{eq},k} = D'_k + K'_{m,k} F'_{H,k} / R'_k$; 等号左侧的系数 $2H$ 与 $8HH_1H_2$ 为模态质量, D_{eq} 与 $4H_1^2D'_{\text{eq},2} + 4H_2^2D'_{\text{eq},1}$ 为模态阻尼, $4H^2w'$ 为模态刚度系数; 等号右侧为模态坐标下的强迫输入, ΔP_d 与 χ_1 为初始扰动产生的强迫输入, $\Delta P_F(t)$ 与 χ_2 为调速器一阶惯性反馈环节产生的强迫输入, $\chi_3\dot{y}_1(t)$ 与 $\chi_3\dot{y}_2(t)$ 为模态阻尼矩阵非对角元素产生的强迫输入, 带下划线的表达式为标记项。 χ_1, χ_2, χ_3 的表达式分别为:

$$\begin{cases} \chi_1 = 2H_1'\Delta P'_{d,2} - 2H_2'\Delta P'_{d,1} \\ \chi_2 = 2H_1'\Delta \hat{P}'_{F,2}(t) - 2H_2'\Delta \hat{P}'_{F,1}(t) \\ \chi_3 = -(2H_1'D'_{\text{eq},2} - 2H_2'D'_{\text{eq},1}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: 变量上方“ $\hat{\cdot}$ ”表示变量的近似值。频率、模态坐标与模态矩阵 Φ 的关系如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta f'_1(t)\omega_0 \\ \Delta f'_2(t)\omega_0 \end{bmatrix} = \Phi \dot{y} = \begin{bmatrix} 1 & -2H'_2 \\ 1 & 2H'_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_1(t) \\ \dot{y}_2(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

经验证, 在式(5)中 $\chi_3\dot{y}_2(t)$ 对 $\dot{y}_1(t)$ 影响很小, χ_2 与 $\chi_3\dot{y}_1(t)$ 对 $\dot{y}_2(t)$ 影响很小。忽略标记项, 可解耦 $y_1(t)$ 与 $y_2(t)$; 分别求解 $\dot{y}_1(t)$ 与 $\dot{y}_2(t)$, 然后代入式(7), 则可得区域频率闭式解; 对闭式解求导可得区

域频率变化率闭式解。闭式解的详细求解过程见附录 B 式(B1)~(B8)。

1.2.2 区间联络线功率闭式解

联立式(2)、(3)、(7), 可得机组间振荡功率 $\Delta P'_{s,1,2}(t)$ 与模态坐标的关系为:

$$\begin{aligned} \Delta P'_{s,1,2}(t) &= w'(\Delta \delta'_1(t) - \Delta \delta'_2(t)) = \\ &w' \int (\Delta f'_1(t) - \Delta f'_2(t)) \omega_0 dt = -2Hw'y_2(t) \quad (8) \end{aligned}$$

将频率表达式式(B2)、(B4)代入式(8), 可得该简化方式下的 $\Delta P'_{s,1,2}(t)$; 然后代入式(2), 可得区间联络线振荡功率 $\Delta P_T^{(1)}(t)$ 。图 2 为区间联络线功率振荡的仿真值与解析值 $\Delta P_T^{(1)}(t)$ 对比。与仿真值对比发现, $\Delta P_T^{(1)}(t)$ 曲线的振荡峰值与准稳态值均存在较大偏差, 故该方式所得闭式解不能准确描述区间联络线功率的安全特征。

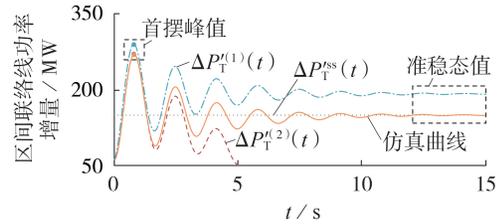


图 2 区间联络线功率振荡的仿真值与解析值对比
Fig.2 Comparison of simulative value and analytical value of inter-area tie-line power oscillation

经验证, 该偏差由求解式(B2)、(B4)时忽略标记项引起。这些标记项对区域频率影响很小, 但其积分对区间联络线功率影响显著, 因此在求解区间联络线功率闭式解时应被考虑。然而计及上述标记项会导致方程变量的耦合, 无法解析。考虑到求解闭式解的目的为求取安全量化指标, 可根据待求指标特点采取针对性简化。需要说明的是, 由于后续推导结果仅与 $\dot{y}_1(t)$ 有关而与 $y_1(t)$ 无关, 且 $\chi_3\dot{y}_2(t)$ 对 $\dot{y}_1(t)$ 影响很小, 因此 $\chi_3\dot{y}_2(t)$ 将被继续忽略。

1) 区间联络线功率振荡首摆。

区间联络线功率最大值出现在区间联络线功率振荡的首摆峰值^[6]。在该时间尺度内, 可作如下假设:

(1) 假设 1, 调速器时间常数较大, 可认为调速器一阶惯性环节未响应, 仅考虑比例反馈环节, 即 $\Delta P_F(t)$ 与 $\Delta P'_{F,k}(t)$ 恒为 0;

(2) 假设 2, 频率下降斜率变化缓慢, 可采用初始下降斜率近似。

基于假设 1, 忽略式(5)中的 $\Delta P_F(t)$ 及含 $\Delta P'_{F,k}(t)$ 的 χ_2 ; 基于假设 2, 忽略式(5)中 $D_{\text{eq}}\dot{y}_1(t)$ 。则式(5)可以改写为:

$$\begin{cases} \ddot{y}_2(t) + 2\zeta'\omega_n'\dot{y}_2(t) + \omega_n'^2 y_2(t) = \frac{2H\chi_1 + P_d\chi_3 t}{16H^2 H_1' H_2'} \\ \zeta' = \frac{4H_1'^2 D_{eq,2}' + 4H_2'^2 D_{eq,1}'}{8w'H^2} \omega_n' \\ \omega_n' = \sqrt{\frac{2Hw'}{4H_1' H_2'}} \end{cases} \quad (9)$$

求解式(9)并将求解结果代入式(8),可得 $\Delta P_{s,1,2}^{(2)}(t)$ 。然后将 $\Delta P_{s,1,2}^{(2)}(t)$ 代入式(2),则可得基于待求特征简化的区间联络线振荡功率 $\Delta P_T^{(2)}(t)$ 为:

$$\Delta P_T^{(2)}(t) = b_1 + b_2 t + \sqrt{b_3^2 + b_4^2} e^{-\zeta'\omega_n' t} \sin(\omega_n' t + \phi_2') \quad (10)$$

$$\begin{cases} b_1 = -\Delta P_{d,k}' - b_3 \\ b_2 = \frac{\Delta P_d \chi_3}{4H^2} \\ \phi_2' = \text{Atan}\left(\frac{b_3}{b_4}\right) \\ b_3 = -\frac{2H\omega_n' \chi_1 - 2\zeta' \Delta P_d \chi_3}{4H^2 \omega_n'} \\ b_4 = -\frac{2H\zeta' \omega_n' \chi_1 + \Delta P_d (1 - 2\zeta'^2) \chi_3}{4H^2 \omega_n'} \\ \omega_n' = \omega_n' \sqrt{1 - \zeta'^2} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\text{Atan}(\cdot)$ 为自定义的方位角函数,其表达式见附录B式(B9)。

2) 区间联络线功率准稳态值。

对于准稳态而言,动态过渡过程已结束,区间联络线功率和区域频率均达到准稳态值。此时所有动态元件的时间常数均不再起延迟作用,即等效为0。设该时刻为 t_∞ ,则 $\dot{y}_1(t_\infty)$ 与 $y_2(t_\infty)$ 均为常数, $\ddot{y}_1(t_\infty)$ 与 $\dot{y}_2(t_\infty)$ 均为0,将上述参数代入式(5),可得准稳态频率闭式解 $\Delta f^{ss}(t)$ 为:

$$\Delta f^{ss}(t) = \dot{y}_1(t_\infty) = \Delta P_d / D_{ss} \quad (12)$$

$$D_{ss} = D + K_m R^{-1} \quad (13)$$

由于非扰动区增发功率的准稳态值即为区间联络线功率增量的准稳态值,则区域联络线功率增量准稳态值的闭式解 $\Delta P_T^{ss}(t)$ 为:

$$\Delta P_T^{ss}(t) = -D_{ss,1}' \Delta f^{ss}(t) = -D_{ss,1}' \Delta P_d / D_{ss} \quad (14)$$

与图2所示仿真法及 $\Delta P_T^{(1)}(t)$ 曲线对比可知, $\Delta P_T^{(2)}(t)$ 描述的区间联络线功率振荡首摆以及 $\Delta P_T^{ss}(t)$ 描述的区间联络线功率准稳态值均具有高精度。进一步验证将在3.1节完成。

1.3 解析安全量化指标

本节将基于所得闭式解推导区域频率最低点、最大变化率、准稳态值以及区间联络线功率振荡峰值、准稳态值等关键特征的解析安全量化指标。

对于区域频率与区间联络线功率准稳态值,由于式(12)、(14)所示闭式解恒为常数,因此式(12)、

(14)分别为区域频率与区间联络线功率准稳态值的解析安全量化指标。对于区域频率最低点、最大变化率以及区间联络线功率振荡峰值,由于式(B2)、(B4)及式(B6)、(B7)与式(10)所示闭式解仍为超越函数构成的超越方程,无法直接解析,因此本节将基于闭式解的快变项、慢变项划分,推导安全量化指标的近似解析值。

1.3.1 基于快变项、慢变项划分的解析求解方法

由式(B2)、(B4)及式(B6)、(B7)与式(10)可以看出,表达式均由不同角频率的函数组成(常数项、一次项和指数项角频率为0)。根据角频率大小,表达式可被分为快变项(角频率大)与慢变项(角频率小)。依据该方法,划分结果如下:式(B2)、(B4)及式(B6)、(B7)中第1项为慢变项,第2项为快变项;式(10)前2项为慢变项,第3项为快变项。设原闭式解描述的为原曲线,则原曲线以及划分后的快、慢变项曲线如图3所示。由图可知,原曲线的极点时刻很大程度上由快变项直接决定,受慢变项影响不大。基于该特征,在求解原曲线极点时采用快变项曲线的极点时刻近似替代原曲线的极点时刻,可得具有较高精度的近似极点。下面基于该近似方法推导解析安全量化指标。

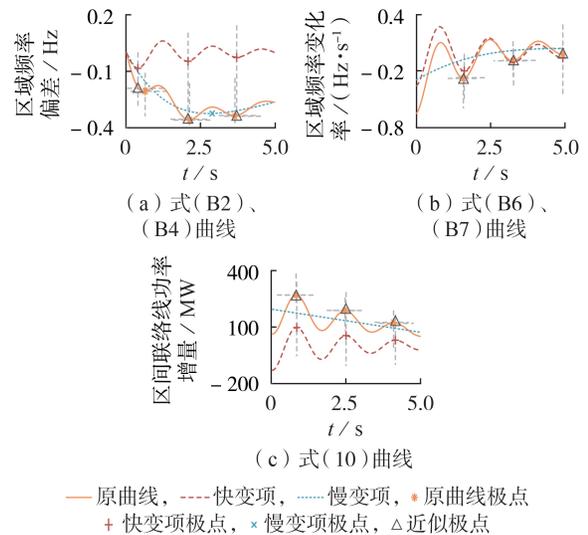


图3 原曲线分解与极值点近似示意图

Fig.3 Schematic diagram of original curve decomposition and extreme point approximation

1.3.2 区域频率安全量化指标

1) 频率最低点。

当大功率缺失故障发生后,受频率时空分布特征影响,频率最低点相较系统频率最低点向下偏移,如图3(a)所示(图中原曲线的最小极点、慢变项曲线的最小极点分别表示频率最低点和系统频率最低点)。在参数取值范围内仿真发现,由于快变项曲线振荡是衰减的,且振荡幅值小于慢变项曲线的偏移

幅值,因此频率最低点会出现在慢变项曲线极小值点对应时刻前后的快变项曲线极小值点时刻。

分别令式(B6)、(B7)中慢变项与快变项为0,可得慢变项与快变项极小值点时刻的表达式分别为:

$$t_{SP}^{\text{Nadir}} = \begin{cases} \frac{2}{\omega_r} \left[\frac{\varphi_1 - \pi}{2\pi} \right] + \frac{\pi - \varphi_1}{\omega_r} & 0 < \zeta < 1 \\ \frac{1}{T_1 - T_2} \ln \frac{-\alpha T_1}{(\alpha + 1)T_2} & \zeta \geq 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} t_{FP,1,\tau}^{\text{Nadir}} = \frac{(2\tau + 1) - \phi_1}{\omega_r'} & \text{区域 1} \\ t_{FP,2,\tau}^{\text{Nadir}} = \frac{2\pi\tau - \phi_1}{\omega_r'} & \text{区域 2} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整函数; τ 为极小值点机组编号; $\omega_r = \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}$, ω_n 为自然振荡频率, ζ 为阻尼比, α 为系数, T_1 、 T_2 为特征根, ϕ_1 、 φ_1 为相角,以上变量的关系式见附录B式(B1)、(B3)、(B5);下标SP和FP分别代表慢变项与快变项。

由于区域频率最低点出现在慢变项曲线最低点前后,令 $t_{SP}^{\text{Nadir}} = t_{FP,k,\tau}^{\text{Nadir}}$,向上取整,可得:

$$\begin{cases} \tau_1^* = \left\lceil \frac{t_{SP}^{\text{Nadir}} \omega_r' + \phi_1 - 1}{2\pi} \right\rceil \\ \tau_2^* = \left\lceil \frac{t_{SP}^{\text{Nadir}} \omega_r' + \phi_1}{2\pi} \right\rceil \end{cases} \quad (17)$$

则各区域的频率最低点为:

$$\Delta f_k^{\text{Nadir}} = \min \left(\Delta f_k' \left(t_{FP,k,\tau}^{\text{Nadir}} \right) \right) \quad \tau \in [\tau_k^* - 1, \tau_k^*] \quad (18)$$

2) 频率最大变化率。

根据解析求解方法,式(B6)、(B7)的极值可依据快变项曲线极点时刻近似求取。式(B6)、(B7)快变项曲线的导数为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{f}_{FP,1}' = -2H_2' \beta \omega_n'^2 e^{-\zeta' \omega_n' t} \sin(\omega_r' t + 2\phi_1') \\ \Delta \dot{f}_{FP,2}' = 2H_1' \beta \omega_n'^2 e^{-\zeta' \omega_n' t} \sin(\omega_r' t + 2\phi_1') \end{cases} \quad (19)$$

式中: β 为系数,见附录B式(B1)。令 $\Delta \dot{f}_{FP,1}' = 0$, $\Delta \dot{f}_{FP,2}' = 0$,可得各区域极值点时刻为:

$$t_{FP,\tau}^{\text{RoCoF}} = (\tau\pi - 2\phi_1') / \omega_r' \quad \tau \in \mathbf{N} \quad (20)$$

由于频率最大变化率仅可能出现在端点时刻或 $t_{FP,\tau}^{\text{RoCoF}}$ 时刻,且扰动后快变项与慢变项曲线均是衰减的,因此区域频率最大变化率仅可能出现在端点时刻与首个极小值点时刻。经验证,扰动区的频率最大变化率为初始端点,非扰动区为 $\tau=0$ 的极值点。对应表达式为:

$$\begin{cases} t_{\max,1}^{\text{RoCoF}} = 0 & \text{扰动区} \\ t_{\max,2}^{\text{RoCoF}} = \frac{2\pi}{\omega_r'} \left\lceil \frac{\phi_1'}{\pi} \right\rceil - \frac{2\phi_1'}{\omega_r'} & \text{非扰动区} \end{cases} \quad (21)$$

则区域 k 的频率最大变化率为:

$$\Delta \dot{f}_k^{\text{RoCoF}} = \min \left(\Delta \dot{f}_k'(0), \Delta \dot{f}_k'(t_{\max,k}^{\text{RoCoF}}) \right) \quad (22)$$

1.3.3 区间联络线功率安全量化指标

区间联络线功率振荡最大值为首摆振荡峰值,即为式(10)的首个极值点,同样可依据该式快变项曲线的极值点时刻近似求取。式(10)快变项导数为:

$$\Delta \dot{P}_{T,FP}^{(2)}(t) = -\omega_n' \sqrt{b_3^2 + b_4^3} e^{-\zeta' \omega_n' t} \sin(\omega_r' t + \phi_1' + \phi_2') \quad (23)$$

令 $\Delta \dot{P}_{T,FP}^{(2)}(t) = 0$,可得首个极值点时刻为:

$$t_T^{\text{Peak}} = \frac{\pi}{\omega_r'} \left\lceil \frac{\phi_1' + \phi_2'}{\pi} \right\rceil - \frac{\phi_1' + \phi_2'}{\omega_r'} \quad (24)$$

则区间联络线功率变化峰值为:

$$\Delta P_T^{\text{Peak}} = \Delta P_T^{(2)}(t_T^{\text{Peak}}) \quad (25)$$

2 机组组合

本节将基于解析安全量化指标,针对两区互联电力系统,构建考虑区域频率与区间联络线功率安全的机组组合模型,并根据指标特点,设计多个安全约束的校验策略,分别构建线性优化割,进而提出兼顾区域能力保障与区间能力协调的两级两阶段迭代求解算法。

2.1 目标函数

为了在机组组合中最大化消纳可再生能源,本文将可再生能源作为无发电成本资源^[15-16],综合考虑区域内常规机组的发电成本、启停成本,构建目标函数如下:

$$F_k = \min \sum_{i \in V} \sum_{j=1}^T \left[U_{k,i,j} C_{k,i,j} + d_{k,i} U_{k,i,j} (1 - U_{k,i,j-1}) \right] \quad (26)$$

$$C_{k,i,j} = a_{k,i} P_{k,i,j}^2 + b_{k,i} P_{k,i,j} + c_{k,i} \quad (27)$$

式中: $a_{k,i}$ 、 $b_{k,i}$ 、 $c_{k,i}$ 为区域 k 机组 i 的发电成本系数; $d_{k,i}$ 为区域 k 机组 i 开机成本; $P_{k,i,j}$ 为区域 k 机组 i 调度时段 j ($j=1, 2, \dots, T$)的出力, T 为调度周期总时段数; $U_{k,i,j}$ 为区域 k 机组 i 调度时段 j 的启停状态。

2.2 约束条件

本文根据由大功率扰动故障组成的预想故障集构建安全约束条件。根据安全稳定导则^[23],本文考虑的预想故障包括直流闭锁、大容量发电机跳闸、大负荷突然变化等单一元件造成的大幅功率波动。

为保证机组组合方案的频率安全,需保证区域频率及区间联络线功率等安全指标在所有预想故障下均不越限。安全约束包括区域频率的最低点约束、最大变化率约束、准稳态约束以及联络线功率的峰值约束、准稳态约束等。基于解析安全量化指标,构建安全约束如式(28)~(32)所示。

$$f_{k,\nu,j}^{\text{Nadir}} \geq f_{\min,k}^{\text{Nadir}} \quad (28)$$

$$\left| \dot{f}_{k,\nu,j}' \right| \geq \dot{f}_{\max,k}^{\text{RoCoF}} \quad (29)$$

$$f_{\nu,j}^{\text{ss}} \geq f_{\min}^{\text{ss}} \quad (30)$$

$$\Delta P_{T,\nu,j}^{\text{Peak}} \leq \Delta P_{T\max}^{\text{Peak}} \quad (31)$$

$$\Delta P_{T,\nu,j}^{\text{ss}} \leq \Delta P_{T\max}^{\text{ss}} \quad (32)$$

式中: $f_{\min,k}^{\text{Nadir}}$ 、 $f_{\max,k}^{\text{RoCoF}}$ 和 f_{\min}^{ss} 分别为区域 k 所允许的频率最小值、最大下降斜率以及最小准稳态值; $\Delta P_{\text{Tmax}}^{\text{Peak}}$ 和 $\Delta P_{\text{Tmax}}^{\text{ss}}$ 分别为系统允许的区间联络线功率增量最大值及最大准稳态值; ν ($\nu=1, 2, \dots, V_d$) 为预想故障的编号, V_d 为预想故障总数。

除安全约束外, 还应考虑功率平衡约束、常规机组出力约束、风电出力约束、爬坡约束、最小开机时间约束、最小停机时间约束、备用容量约束、最大弃风量约束等常规约束, 分别如附录 C 式 (C1) — (C8) 所示。

2.3 优化求解算法

由于式 (28) — (32) 为非线性约束, 本文机组组合为包含多个非线性安全约束的混合整数非线性规划问题。考虑到上级调度机构的协调作用, 以及多个非线性约束的变化特点, 依据基于主子问题划分的两阶段迭代方法^[15-17], 提出如下求解算法。

1) 基于两级调度的主子问题划分。

基于两阶段迭代求解思路, 分级调度模式下机组组合的主子问题划分如下: 主问题为已知联络线交换功率的区域内机组组合, 包括目标函数式 (26) 与常规约束式 (C1) — (C8), 为混合整数线性规划问题, 该问题由下级调度机构完成并将结果上传至上级调度机构; 子问题为已知机组组合方案的区域频率与区间联络线功率安全约束校验, 包括式 (28) — (32), 为非线性约束校验问题, 由上级调度机构完成; 优化割为连接主子问题的补充约束, 作用为缩小优化求解的可行域, 当校验不合格时由上级调度机构更新后下发给下级调度机构。

2) 多个安全约束的线性化优化割构造。

将优化割作为补充至主问题的约束, 由于主问题为混合整数线性规划问题, 所构造的优化割亦是线性的。设安全量化指标集合 $Q'_{k,\nu,j} = \{f_{k,\nu,j}^{\text{Nadir}}, f_{k,\nu,j}^{\text{RoCoF}}, f_{\nu,j}^{\text{ss}}, -\Delta P_{\text{T},\nu,j}^{\text{Peak}}, -\Delta P_{\text{T},\nu,j}^{\text{ss}}\}$, 参量集合 $Z'_{k,j} = \{H'_{k,j}, R_{k,j}^{-1}, T'_{\text{R},k,j}, F'_{\text{H},k,j}\}$ 。由于 $Z'_{k,j}$ 为函数 $Q'_{k,\nu,j}$ 的自变量, 且 $Z'_{k,j}$ 为关于决策变量 $U_{k,i,j}$ 的线性函数 (集合 $Z'_{k,j}$ 中 $T'_{\text{R},k,j}$ 、 $F'_{\text{H},k,j}$ 可用大 M 法转换为线性函数), 因此本文线性优化割基于 $Z'_{k,j}$ 与 $Q'_{k,\nu,j}$ 的关系构造。

对 $Q'_{k,\nu,j}$ 进行参数灵敏度分析可知 (见 3.1 节), $Q'_{k,\nu,j}$ 中元素均可近似为关于 $Z'_{k,j}$ 的线性函数, 记为 $\hat{Q}'_{k,\nu,j}(Z'_{k,j})$ 。基于多元分段线性化方法^[17], 子问题中不同安全约束对应的优化割可按如下方式构造。

(1) 记 $\hat{Q}'_{k,\nu,j}(Z'_{k,j})$ 为 $Q'_{k,\nu,j}(Z'_{k,j})$ 线性化后的结果, 则 $\hat{Q}'_{k,\nu,j}(Z'_{k,j})$ 可以表示为:

$$\hat{Q}'_{k,\nu,j}(Z'_{k,j}) = \max_{1 \leq \delta \leq E} \left\{ c_{k,\nu,j,\delta}^{(1)} H'_{k,j} + c_{k,\nu,j,\delta}^{(2)} R_{k,j}^{-1} + c_{k,\nu,j,\delta}^{(3)} T'_{\text{R},k,j} + c_{k,\nu,j,\delta}^{(4)} F'_{\text{H},k,j} + c_{k,\nu,j,\delta}^{(5)} \right\} \quad (33)$$

式中: $c_{k,\nu,j,\delta}^{(1)}$ — $c_{k,\nu,j,\delta}^{(5)}$ 为区域 k 故障 ν 调度时段 j 第 δ 段线性化函数系数; E 为分段数。

(2) 在 $Q'_{k,\nu,j}(Z'_{k,j,l})$ 上取 L 个真值, 由最小二乘法可得 $\hat{Q}'_{k,\nu,j}(Z'_{k,j,l})$ 的线性化系数, 即:

$$\min_{c_{k,\nu,j,\delta}^{(1)}, \dots, c_{k,\nu,j,\delta}^{(5)}} \sum_{1 \leq l \leq L} \left(\hat{Q}'_{k,\nu,j}(Z'_{k,j,l}) - Q'_{k,\nu,j}(Z'_{k,j,l}) \right)^2 \quad (34)$$

(3) 构造线性优化割为:

$$\hat{Q}'_{k,\nu,j}(Z'_{k,j}) \geq \hat{Q}'_{k,\nu,j}(Z_{k,j}^*) + \varepsilon \quad (35)$$

式中: $Z_{k,j}^*$ 为不合格方案计算所得的聚合参量值; ε 为一极小值, 为避免严格不等式设置。

3) 考虑多个安全约束协调的优化求解流程。

由式 (35) 可以看出, 通过计算 $\hat{Q}'_{k,\nu,j}(Z_{k,j}^*)$, 可在两阶段迭代求解中不断提高不等式约束下限, 从而提升开机方案的安全水平。然而, $Z'_{k,j}$ 的改变对 $Q'_{k,\nu,j}(Z'_{k,j})$ 中不同指标的影响不同, 因而改变 $Z'_{k,j}$ 可能会使一些指标安全水平提升, 但会导致另一些指标安全水平下降。此外, 改变不同区域 $Z'_{k,j}$ 对安全指标的提升效果不同, 因而性价比不同。因此在子问题校验中, 应当根据安全指标特点, 考虑不同安全约束之间以及不同区域资源之间的协调。

根据 3.1 节安全量化指标的参数灵敏度分析结果, 本文进一步将子问题校验分为 3 个子校验阶段。子校验 1 由式 (31)、(32) 组成, 目的为保证联络线功率安全, 方式为更新扰动区不合格约束对应的优化割; 子校验 2 为式 (29), 目的为提升本区域的惯性响应能力, 方式为更新约束不合格区域对应的优化割; 子校验 3 由式 (28)、(30) 组成, 目的为提升系统整体调频能力, 方式为更新调频成本增加较少区域的不合格约束对应的优化割。Flag 初始值为 1, 表示扰动区 1, 求解流程如附录 C 图 C1 所示。当预想故障中存在造成后果最为严重的功率扰动时, 在子问题安全校验中仅校验该扰动即可。

3 算例分析

为便于对解析安全量化指标做范围更广的参数灵敏度分析及鲁棒性验证, 本文在算例 1 采用结构较简单的 IEEE 两区 4 机系统; 为便于验证本文所建机组组合模型及所提求解算法的有效性, 在算例 2 中采用了机组较多、规模较大的 IEEE 两区 96 节点系统。

3.1 安全量化指标验证与分析

IEEE 两区 4 机系统见附录 D 图 D1, 基本参数取自文献 [18], 其中动态参数及取值范围见附录 D 表 D1。设系统扰动为初始时刻 7 号节点 (区域 1) 的 300 MW 负荷突增为系统容量的 7.5%。安全指标的参数灵敏度分析及对比采用控制变量法进行 (改变

区域 1 或区域 2 模型的动态参数)。需要说明的是,由于无论系统规模大小,基于系统容量的参数标么值均落在相同范围,因此基于该取值范围进行参数灵敏度分析可保证结论的普适性。

分别采用仿真方法(SIM-ASI,标杆值)、本文方法(TEFR-ASI)、统一频率解析方法^[8](SFR-ASI)、区间联络线功率解析方法(REF-ASI,峰值与稳态值计算方法分别来自文献[20]和文献[7])等不同方法计算频率与区间联络线功率安全量化指标的参数灵敏度,结果分析见附录 E 图 E1—E3。由图可得主要结论如下。

1) 稳态指标不受频率时空分布特征的影响,各方法所得稳态指标结果相同。除此以外,与 SFR-ASI 方法以及 REF-ASI 方法相比,本文方法的准确性大幅提升,指标精度最少提升 67%,最多提升 99.47%。

2) 增加系统调频能力的优先原则为:对于频率最大变化率安全指标,优先考虑本区域成本较低的调频资源;对于频率最低点与准稳态安全指标,优先增加任意区域中成本较低的调频资源;对于区间联络线功率安全指标,优先增加扰动区成本较低的调频资源。此外,安全指标的变化具有分段线性特征,可依据分段线性化方法进行进一步的线性化处理。

3.2 机组组合方案分析

3.2.1 方案设计与基础数据

IEEE 两区 96 节点系统见文献[24]。该模型含有 2 个区域、66 台发电机组,其中区域 1 含有域外直流输入,并通过交流联络线与区域 2 相连。为计及可再生能源参与调频,分别在节点 11、19、35、43 接入 300 MW 风电机组,改进后系统如附录 F 图 F1 所示。算例基本参数取自文献[24-25]。此外,机组动态参数见附录 F 表 F1,日内小时负荷系数见附录 F 表 F2,节点负荷系数见附录 F 表 F3,日联络线功率交换计划见附录 F 图 F2,日风电功率预测见附录 F 图 F3,区域 1 与区域 2 的日总负荷分别设为 75 400、44 400 MW。系统线性优化割系数如附录 F 表 F4 所示。

设直流闭锁为系统遭遇的最严重扰动,系统允许的最低频率、准稳态值、最大频率下降斜率分别为 49.25 Hz、49.68 Hz、1 Hz/s,区间联络线功率波动允许的最大峰值与准稳态值分别为 520、390 MW,备用容量系数与弃风系数为 5%。

为分析机组组合求解过程,验证机组组合模型的有效性,本文设置 4 种对比方案:①方案 1,不考虑区域频率与区间联络线功率安全约束的机组组合;②方案 2,在方案 1 的基础上考虑区域频率最大变化率安全约束的机组组合;③方案 3,在方案 1 的基础上考虑区域频率最低点与准稳态安全约束的机组组合;④方案 4,在方案 2、3 的基础上,考虑区间联络线

功率峰值与准稳态值安全约束的机组组合。设机组组合调度时段为[1, 24],每个调度时段为 1 h。基于 MATLAB 平台,采用 YALMIP 工具箱调用 CPLEX 12.10 求解。

3.2.2 4 种方案下的机组组合结果分析

4 种方案在时段[10, 16]的机组启停如附录 G 图 G1、G2 所示。分别计算各方案下 24 个时段区域 1 (2) 频率最低点 $\Delta f_1^{\text{Nadir}}$ ($\Delta f_2^{\text{Nadir}}$)、区域 1 频率最大变化率 $\Delta f_1^{\text{RoCoF}}$ 、准稳态值 Δf^{ss} 以及联络线功率增量峰值 ΔP_T^{Peak} 、准稳态值 ΔP_T^{ss} ,结果如图 4 所示。需要说明的是,由于区域 2 中频率最大变化率始终小于允许值,因此后续不再分析。

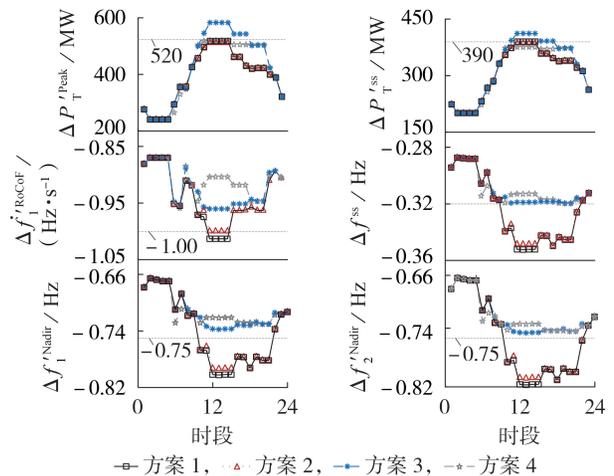


图 4 4 种方案的频率与联络线功率安全指标
Fig.4 Frequency and tie-line power safety indicators under four schemes

可以看出,方案 1 中 2 个区域开机数量均较少,系统频率响应能力明显不足,扰动后多个时段的区域频率最低点、准稳态值以及时段[12, 15]中区域 1 的频率最大变化率均不满足安全约束。区间联络线功率稳态值与峰值虽未超过允许值,但多个时段已非常贴近,优化不当可能导致越限。

相较方案 1,方案 2 结果增加了区域 1 的开机数量,有效提升了惯性响应能力,使得扰动后区域 1 的频率最大变化率下降至允许范围,频率最低点与准稳态值等指标虽有一定改善,但仍然越限。相较方案 1、2,方案 3 同时在 2 个区域增加了更多机组,系统频率遏制能力得到大幅提升,各区域频率最低点、稳态值均被抬升至安全范围,但由于未考虑两区的协调能力,区间联络线功率波动峰值与准稳态值大幅增加,出现越限现象。

方案 2、3 中,区域频率变化率约束与区域频率最低点约束在保障区域频率安全上分别发挥了良好作用,但一味增加两区开机数量而不做协调可能会导致区间联络线功率安全指标越限。相较方案 2、

3,方案4结果适当增加了区域1机组的开机数量,减小了区域2机组的开机数量,在提升区域频率指标安全水平的同时,有效降低了区间联络线功率峰值与准稳态值,全面保障了区域频率与区间联络线功率安全。

4种方案的发电成本对比如表1所示,方案4的发电成本增加最多,方案3、2次之。这是由于为保证扰动后的区域频率或区间联络线功率稳定,方案2—4均依次增开了更多发电机组,导致发电成本有所提升。

表1 4种方案发电成本对比
Table 1 Comparison of power generation cost under four schemes

方案	发电成本 / \$			增加成本 / \$
	区域1	区域2	总成本	
1	703 987.45	286 173.98	990 161.43	
2	704 332.02	286 173.98	990 506.00	344.57
3	706 692.12	291 432.65	998 124.77	7 963.34
4	712 306.45	289 684.64	1 001 991.09	11 829.66

3.2.3 机组组合求解过程分析

为更加清晰地说明本文求解算法的有效性,下面给出方案4的优化求解过程,如图5所示。由图可知:整个优化求解过程进行了37次迭代,可分为①—⑦这7个部分,其中,⑦为结束判断,其余分别对应于3个子校验阶段,更新不同优化割指标。具体而言:①、④针对区间联络线功率指标;②针对区域频率最大变化率指标;③、⑤、⑥针对区域频率最

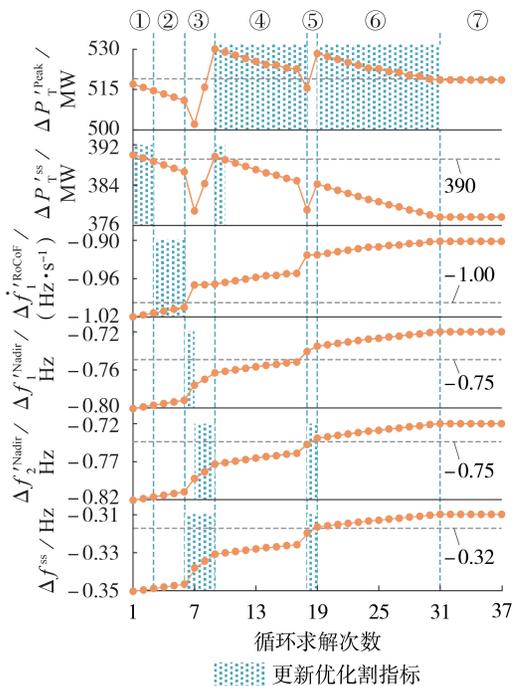


图5 方案4机组组合模型优化求解过程

Fig.5 Optimization solution process of unit commitment model under Scheme 4

低点及准稳态值指标。可以看出:在优化求解的过程中,每当区间联络线功率指标越限,均能被及时限制在安全范围;每当区域频率最大变化率需要减小,均可优先选取本地资源;每当区域频率最低点与准稳态需要提升,均可灵活选取各区资源。因此,本文所提两级协调的两阶段迭代算法能够实现区域能力保障与区间能力协调,从而保障系统区域频率与区间联络线功率的安全稳定运行。

4 结论

本文针对两区互联系统频率安全,在解析安全量化指标推导中考虑了频率时空分布特征的影响,基于所得指标建立了两区互联电力系统安全约束机组组合模型并提出了求解算法。所得结论如下:

1)基于两机等值频率响应模型进一步推导所得解析安全量化指标,与统一频率指标相比,不仅可准确描述两区互联电力系统区域频率最低点、最大变化率、准稳态值,还可准确描述区间联络线功率变化峰值、准稳态值等安全特征,且具有较强鲁棒性;

2)基于指标参数灵敏度分析所得增加调频能力的优先原则,相比经济优先原则,能够考虑资源位置的影响,调频资源选择的目地性更强、效率更高,可为调度决策提供支撑;

3)依据优先原则提出的两级协调的两阶段迭代求解算法,可利用两级调度机构的协作关系,完成频率与区间联络线功率等多个安全约束的有序校验,实现系统能力的保障与协调,更好地维护两区互联电力系统的频率安全。

本文针对两区系统展开,其研究框架与范式同样可适用于多区互联电力系统。随着多机频率响应解析分析方法的突破,在本文研究的基础上,后续可进一步开展多区互联电力系统的机组组合研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 文云峰,杨伟峰,林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):211-222. WEN Yunfeng, YANG Weifeng, LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(9):211-222.
- [2] 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.
- [3] 刘中建,周明,李昭辉,等. 高比例新能源电力系统的惯量控制技术与惯量需求评估综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(12):1-11,53. LIU Zhongjian, ZHOU Ming, LI Zhaohui, et al. Review of inertia control technology and requirement evaluation in renewable-dominant power system[J]. Electric Power Automation

- Equipment, 2021, 41(12): 1-11, 53.
- [4] 张程铭,柳璐,程浩忠,等. 考虑频率安全的电力系统规划与运行优化研究综述与展望[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 250-265. ZHANG Chengming, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Review and prospects of planning and operation optimization for electrical power systems considering frequency security[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 250-265.
- [5] 张恒旭,刘玉田. 电力系统动态频率响应时空分布特征量化描述[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 64-70. ZHANG Hengxu, LIU Yutian. Quantitative description of space-time distribution features of dynamic frequency responses[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 64-70.
- [6] 汤涌,孙华东,易俊,等. 两大区互联系统交流联络线功率波动机制与峰值计算[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 1-6. TANG Yong, SUN Huadong, YI Jun, et al. AC tie-line power fluctuation mechanism and peak value calculation for two-area interconnected power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 1-6.
- [7] RABBANIFAR P, JADID S. Stochastic multi-objective tie-line power flow and frequency control in market clearing of multi-area electricity markets considering power system security[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(12): 1960-1978.
- [8] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [9] MA N, WANG D. Extracting spatial-temporal characteristics of frequency dynamic in large-scale power grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2654-2662.
- [10] JIN C, LI W, SHEN J, et al. Active frequency response based on model predictive control for bulk power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3002-3013.
- [11] 宋晓芳,周海强,薛峰,等. 计及源荷不确定性及频率安全的电力系统区间优化调度方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 212-220. SONG Xiaofang, ZHOU Haiqiang, XUE Feng, et al. Interval optimal dispatching method of power system considering source-load uncertainty and frequency security[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 212-220.
- [12] RESTREPO J F, GALIANA F D. Unit commitment with primary frequency regulation constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1836-1842.
- [13] AHMADI H, GHASEMI H. Security-constrained unit commitment with linearized system frequency limit constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1536-1545.
- [14] 林恒先,侯凯元,陈磊,等. 高比例风电电力系统考虑频率安全约束的机组组合[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 1-9. LIN Hengxian, HOU Kaiyuan, CHEN Lei, et al. Unit commitment of power system with high proportion of wind power considering frequency safety constraints[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 1-9.
- [15] 申家锴,李卫东,李正文,等. 计及一次调频死区与限幅的高比例风电电力系统机组组合[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1326-1337. SHEN Jiakai, LI Weidong, LI Zhengwen, et al. Unit commitment of power system with high proportion of wind power considering the deadband and limiter of primary frequency response[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1326-1337.
- [16] 王霞,应黎明,卢少平. 考虑动态频率约束的一次调频和二次调频联合优化模型[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2858-2867. WANG Xia, YING Liming, LU Shaoping. Joint optimization model for primary and secondary frequency regulation considering dynamic frequency constraint[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2858-2867.
- [17] 蔡国伟,钟超,吴刚,等. 考虑风电机组超速减载与惯量控制的电力系统机组组合策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 134-142. CAI Guowei, ZHONG Chao, WU Gang, et al. Unit commitment strategy of power system considering overspeed load reduction and inertia control of wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 134-142.
- [18] SHEN J, LI W, LIU L, et al. Frequency response model and its closed-form solution of two-machine equivalent power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2162-2173.
- [19] 屠竞哲,杨莉,黄涌,等. 直流闭锁引发交流联络线功率波动的机理以及峰值计算[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 12-17. TU Jingzhe, YANG Li, HUANG Yong, et al. Mechanism and peak value calculation of AC tie-line power swing caused by DC blocking[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 12-17.
- [20] 郝梦竹,王青,李文启,等. 不同直流闭锁故障对弱交流联络线功率波动影响机制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 88-94. HAO Mengzhu, WANG Qing, LI Wenqi, et al. Power fluctuation influence mechanism of weak AC tie-line caused by different DC block[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 88-94.
- [21] RABBANIFAR P, AMJADY N. Frequency-constrained unit-commitment using analytical solutions for system frequency responses considering generator contingencies[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(17): 3548-3560.
- [22] 刘洋,邵广惠,张弘鹏,等. 新能源参与系统一次调频分析及参数设置[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 683-689. LIU Yang, SHAO Guanghui, ZHANG Hongpeng, et al. Analysis of renewable energy participation in primary frequency regulation and parameter setting scheme of power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 683-689.
- [23] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [24] GRIGG C, WONG P, ALBRECHT P, et al. The IEEE reliability test system-1996. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1010-1020.
- [25] WANG S J, SHAHIDEHPOUR S M, KIRSCHEN D S, et al. Short-term generation scheduling with transmission and environmental constraints using an augmented Lagrangian relaxation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1294-1301.

作者简介:



申家锴

申家锴(1991—),男,博士研究生,研究方向为电力系统频率响应建模、分析与控制、频率安全约束机组组合等(E-mail: shenjiakai@mail.dlut.edu.cn);

刘洋(1985—),男,高级工程师,硕士,研究方向为电网调控运行与大容量电力电子技术(E-mail: 102296318@qq.com);

李卫东(1964—),男,教授,博士生导师,通信作者,研究方向为电力系统自动化,近期关注新型电力系统频率稳定分析与控制(E-mail: wdli@dlut.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

(下转第 189 页 continued on page 189)

System-side harmonic impedance estimation method based on minimum impedance deviation criterion and improved adaptive bat algorithm

CHENG Weijian¹, LIN Shunfu¹, XU Liangfeng¹, LIU Chitao², LI Dongdong¹, FU Yang¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Qingpu Power Supply Company of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 201700, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing system-side harmonic impedance estimation methods are sensitive to the background harmonic fluctuation, a novel system-side harmonic impedance estimation method is proposed. Based on the minimum impedance deviation criterion and the improved adaptive bat algorithm, the optimal initial value of the system-side harmonic impedance is obtained, so as to get the estimation value of background harmonic voltage which is close to the real value. *K*-means cluster analysis is carried out on the estimation value of background harmonic voltage, and based on the clustering results the harmonic sample data is divided into multiple clusters, so that the background harmonic fluctuation corresponding to each cluster data is reduced. Considering that the harmonic data are all complex phasors, the complex least square method is used to obtain the estimation value of system-side harmonic impedance in each cluster, and the mean value of them is taken as the final estimation value. Compared with the existing methods, the proposed method can better adapt to the change of background harmonic fluctuation, and has better estimation accuracy when the user-side harmonic impedance is not much greater than the system-side harmonic impedance. Several examples verify the effectiveness and applicability of the proposed method.

Key words: system-side harmonic impedance; background harmonic; minimum impedance deviation criterion; improved adaptive bat algorithm; clustering algorithms

(上接第 175 页 continued from page 175)

Unit commitment considering safety constraints of frequency and inter-areal tie-line power in two-area interconnected power system

SHEN Jiakai¹, LIU Yang², LI Weidong¹, GU Taiyu³, BA Yu¹, WANG Haixia¹

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Northeast Branch of State Grid Corporation of China, Shenyang 110180, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

Abstract: With the transformation of the power generation structure and the power grid form, the spatial-temporal characteristics of frequency in interconnected power systems have become prominent, the areal frequency differences and ITP (Inter-area Tie-line Power) oscillation have increased, where the unit commitment with frequency safety constraint based on the unified frequency assumption is no longer applicable. For considering the spatial-temporal characteristics in the safety constrained unit commitment of two-area interconnected power system, the closed-form solutions of areal frequency and ITP are derived. Then, a series of analytic safety indicators such as the nadir value, maximum rate value, quasi-steady-state value of areal frequency, and the peak value, quasi-steady-state value of ITP are deduced based on the two-terms division of closed-form solutions. Moreover, based on the obtained indicators, the unit commitment model with safety constraints about areal frequency and ITP is established. And based on the scheduling modes and indicator characteristics, the two-level two-stage iterative solution algorithm giving consideration to areal capacity guarantee and interval capacity coordination is proposed. Results show that the proposed indicators can accurately describe the safety characteristics of two-area interconnected power system, and the proposed model and algorithm can effectively guarantee the operation safety of the unit commitment scheme in two-area interconnected power system.

Key words: interconnected power system; frequency safety; inter-areal tie-line power safety; analytic safety quantitative indicators; unit commitment

附录 A

为便于表示，记机组参数 $X = \{H, D\}$ ， $Y = \{F_H, T_R\}$ 。则聚合参数 X'_k 、 Y'_k 的计算式为：

$$X'_k = \sum_{i \in V_k} K_{m,k,i} X_{k,i}, \quad Y'_k = \frac{\sum_{i \in V_k, i \in W_k} Y_{m,k,i} K_{m,k,i} R_{k,i}^{-1}}{\sum_{i \in V_k, i \in W_k} K_{m,k,i} R_{k,i}^{-1}} \quad (\text{A1})$$

式中： W_k 为区域 k 的可再生能源机组集合。本文不考虑可再生能源调频能力随出力的变化，则 R_k^{-1} 与 $K'_{m,k}$ 的表达式为：

$$R_k^{-1} = \frac{\sum_{i \in V_k} K_{m,k,i} R_{k,i}^{-1}}{K'_{m,k}}, \quad K'_{m,k} = \sum_{i \in V_k} K_{m,k,i} \quad (\text{A2})$$

附录 B

令

$$\begin{cases} \zeta = \frac{2HR + (DR + K_m F_H) T_R}{2(DR + K_m)} \omega_n, & \omega_n^2 = \frac{DR + K_m}{2HRT_R} \\ \beta = \frac{\chi_1}{8HH_1'H_2'\omega_r}, & \omega_n' = \sqrt{\frac{2Hw'}{4H_1'H_2'}}, \quad \omega_r' = \omega_n' \sqrt{1 - \zeta'^2}, \quad \zeta' = \frac{4H_1'^2 D'_{\text{eq},2} + 4H_2'^2 D'_{\text{eq},1}}{8w'H^2} \omega_n' \\ D'_{\text{eq},k} = D'_k + \frac{K'_{m,k} F'_{H,k}}{R'_k} \quad k \in \kappa \end{cases} \quad (\text{B1})$$

区域频率闭式解可由系统惯性中心频率和振荡频率两部分组成，由于频率时空分布特征由区域间弱联系引起的区域振荡模式产生，有 $0 < \zeta' < 1$ ，因此根据 ζ 的取值不同，频率闭式解可表示如下。

① 当 $0 < \zeta < 1$ 时

$$\begin{cases} \Delta f_1'(t) = \frac{R\Delta P_d}{DR + K_m} [1 + \alpha e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_r t + \varphi_0)] - 2H_2'\beta e^{-\zeta'\omega_n' t} \sin(\omega_r' t) \\ \Delta f_2'(t) = \frac{R\Delta P_d}{DR + K_m} [1 + \alpha e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_r t + \varphi_0)] + 2H_1'\beta e^{-\zeta'\omega_n' t} \sin(\omega_r' t) \end{cases} \quad (\text{B2})$$

式中：系统惯性中心频率部分的参数为：

$$\alpha = \sqrt{\frac{1 + T_R^2 \omega_n^2 - 2\zeta\omega_n T_R}{1 - \zeta^2}}, \quad \omega_r = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}, \quad \varphi_0 = \varphi_1 + \varphi_2 = \text{Atan}\left(\frac{\omega_r T_R}{1 - \zeta\omega_n T_R}\right) + \text{Atan}\left(\frac{-\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}\right) \quad (\text{B3})$$

② 当 $\zeta \geq 1$ 时

$$\begin{cases} \Delta f_1'(t) = \frac{R\Delta P_d}{DR + K_m} [1 + \alpha e^{-T_1 t} - (\alpha + 1)e^{-T_2 t}] - 2H_2'\beta e^{-\zeta'\omega_n' t} \sin(\omega_r' t) \\ \Delta f_2'(t) = \frac{R\Delta P_d}{DR + K_m} [1 + \alpha e^{-T_1 t} - (\alpha + 1)e^{-T_2 t}] + 2H_1'\beta e^{-\zeta'\omega_n' t} \sin(\omega_r' t) \end{cases} \quad (\text{B4})$$

式中：系统频率部分的参数为：

$$\alpha = \frac{T_{R,\text{sys}} \omega_n - \zeta}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} - \frac{1}{2}, \quad \omega_r = \omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}, \quad T_1 = \zeta\omega_n - \omega_r, \quad T_2 = \zeta\omega_n + \omega_r \quad (\text{B5})$$

进一步对式(B2)、(B4)求导，可得区域频率变化率的解析表达式为：

① 当 $0 < \zeta < 1$ 时

$$\begin{cases} \Delta \dot{f}_1'(t) = \frac{\alpha R\Delta P_d \omega_n}{DR + K_m} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_r t + \varphi_1) + 2H_2'\beta \omega_n' e^{-\zeta'\omega_n' t} \sin(\omega_r' t + \phi_1') \\ \Delta \dot{f}_2'(t) = \frac{\alpha R\Delta P_d \omega_n}{DR + K_m} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_r t + \varphi_1) - 2H_1'\beta \omega_n' e^{-\zeta'\omega_n' t} \sin(\omega_r' t + \phi_1') \end{cases} \quad (\text{B6})$$

② 当 $\zeta \geq 1$ 时

$$\begin{cases} \Delta \dot{f}'_1(t) = \frac{R\Delta P_d}{DR + K_m} [-\alpha T_1 e^{-T_1 t} + (\alpha + 1)T_2 e^{-T_2 t}] + 2H'_2 \beta \omega'_n e^{-\zeta' \omega'_n t} \sin(\omega'_n t + \phi'_1) \\ \Delta \dot{f}'_2(t) = \frac{R\Delta P_d}{DR + K_m} [-\alpha T_1 e^{-T_1 t} + (\alpha + 1)T_2 e^{-T_2 t}] - 2H'_1 \beta \omega'_n e^{-\zeta' \omega'_n t} \sin(\omega'_n t + \phi'_1) \end{cases} \quad (B7)$$

式(B6)、(B7)中:

$$\phi'_1 = \text{Atan} \frac{-\sqrt{1 - \zeta'^2}}{\zeta'} \quad (B8)$$

式中: $\text{Atan}(\cdot)$ 为自定义的方位角函数, 取值范围为 $(-\pi, \pi)$ 。该函数表达式如下:

$$\text{Atan}(y/x) = \begin{cases} \arctan(y/x) & x > 0 \\ \arctan(y/x) + \pi & y \geq 0, x < 0 \\ \arctan(y/x) - \pi & y < 0, x < 0 \\ +\pi/2 & y > 0, x = 0 \\ -\pi/2 & y < 0, x = 0 \\ \text{无解} & y = 0, x = 0 \end{cases} \quad (B9)$$

附录 C

常规约束条件如下所示:

$$\sum_{i \in V_k} P_{m,k,i,j} \pm P'_{T,j} + P'_{D,k,j} = P'_{L,k,j} \quad (C1)$$

$$U_{k,i,j} P_{\min,k,i} \leq P_{m,k,i,j} \leq U_{k,i,j} P_{\max,k,i}, \quad i \notin W_k \quad (C2)$$

$$0 \leq P_{m,k,i,j} \leq P_{\text{wf},k,i,j}, \quad i \in W_k \quad (C3)$$

$$-P_{\text{down},k,i} \leq P_{m,k,i,j} - P_{m,k,i,j-1} \leq P_{\text{up},k,i} \quad (C4)$$

$$(X_{\text{up},k,i,j-1} - T_{\text{up},k,i})(U_{k,i,j-1} - U_{k,i,j}) \geq 0 \quad (C5)$$

$$(X_{\text{down},k,i,j-1} - T_{\text{down},k,i})(U_{k,i,j-1} - U_{k,i,j}) \geq 0 \quad (C6)$$

$$\sum_{i \in W_k} U_{k,i,j} (P_{\max,k,i} - P_{m,k,i,j}) \geq \xi P'_{L,k,j} \quad (C7)$$

$$\sum_{i \in W_k} \sum_{j=1}^T (P_{\text{wf},k,i,j} - P_{m,k,i,j}) \leq \psi \sum_{i \in W_k} \sum_{j=1}^T P_{\text{wf},k,i,j} \quad (C8)$$

式中: $P_{L,k,j}$ 为区域 k 第 j 时段负荷功率; $P'_{D,k,j}$ 为区域 k 第 j 时段的直流输入功率; $P'_{T,j}$ 为系统第 j 时段的区间联络线功率(扰动区取正); $P_{\min,k,i}$ 、 $P_{\max,k,i}$ 分别为区域 k 机组 i 的最小、最大出力; $P_{\text{wf},k,i,j}$ 为区域 k 第 j 时段预测可再生能源最大出力; $P_{\text{up},k,i}$, $P_{\text{down},k,i}$ 为区域 k 机组 i 最大爬坡功率; $T_{\text{up},k,i}$, $T_{\text{down},k,i}$ 为区域 k 机组 i 最小启停时间; $X_{\text{up},k,i,j}$, $X_{\text{down},k,i,j}$ 为区域 k 机组 i 的连续开停机小时数; ξ_k 与 ψ_k 分别为区域 k 的备用系数与最大弃风率。

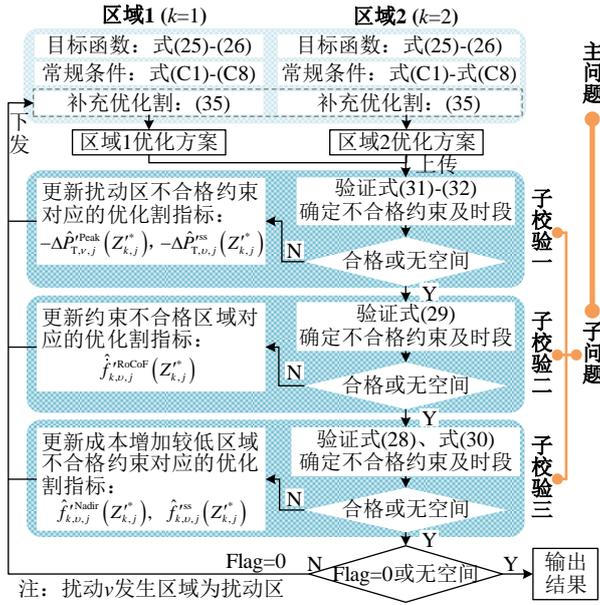


图 C1 机组组合优化求解流程
Fig.C1 Unit commitment optimization solution process

附录 D

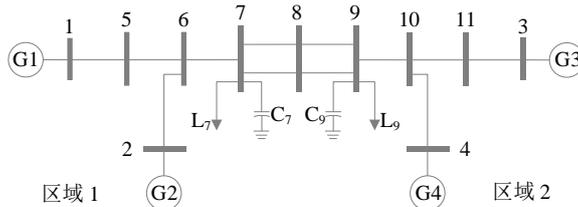


图 D1 IEEE 两区 4 机标准测试系统
Fig. D1 IEEE 2-area 4-generator standard power system

表 D1 机组初始动态参数

参数	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	典型范围
H_i	5	5	9	9	3-9
R_i	0.3	0.3	0.3	0.3	0.15-0.40
$T_{R,i}$	7	7	7	7	6-13
$F_{H,i}$	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04-0.1

附录 E

图 E1—E3 为 3.1 节所得区域频率与区间联络线功率安全量化指标的参数灵敏度。图中： e_{\max} 为最大相对误差百分数；MAPE 为平均绝对误差百分数； \bar{A} 为以 A 所在区域系统容量为基准值的参数。

由图 E1-E3 的误差对比可以看出，与仿真结果相比，本文解析方法计算结果的 e_{\max} 与 MAPE 大小非常接近，并且绝大部分 e_{\max} 与 MAPE 均小于 1%，最大 e_{\max} 与 MAPE 分别为 2.92% 与 2.26%，因此，本文所得解析安全量化指标具有极高的精度，同时具有较好的鲁棒性。进一步与 SFR-ASI 方法以及 REF-ASI 方法对比可知，除稳态指标外，本文解析计算的准确性大幅提升，指标精度最少提升 67%，最多提升 99.47%。对于稳态指标，各方法结果相同，可知稳态指标不受频率时空分布特征影响。

由图 E1(a)—(c)可以看出，区域参数变化对区域频率最低点以及准稳态安全指标的影响趋势相同。其中，区域频率最低点与 \tilde{R}'_k 和 $T'_{R,k}$ 负相关，与 \tilde{H}'_k 和 $F'_{H,k}$ 正相关；区域频率准稳态值与 \tilde{R}'_k 负相关，与其余

参数无关。因此，当需要提升区域频率最低点与准稳态值时，应当优先增加成本较低的调频资源，而无需关注资源所在区域。

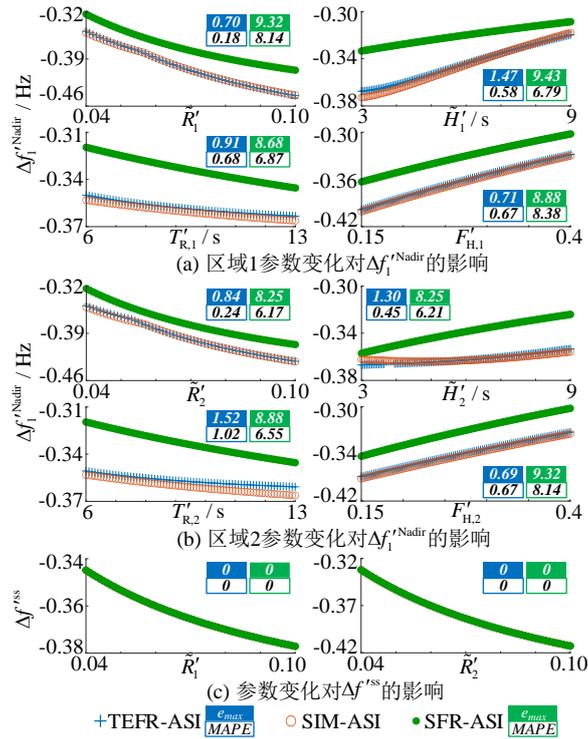


图 E1 区域频率最低点与准稳态安全指标的分析及对比

Fig. E1 Analysis and comparison of safety indicators of the nadir and quasi-steady state valve of areal frequency

由图 E2 可以看出，参数变化对两区频率最大变化率的影响趋势不完全相同，但不相反。其中，扰动区的频率最大变化率仅与本区 \tilde{H}'_k 正相关，与其余参数无关；非扰动区的频率最大变化率与 \tilde{H}'_k ， $F'_{H,k}$ 正相关，与 \tilde{R}'_k 负相关，且受本区参数变化的影响更大。因此，在改善区域频率最大变化率安全指标时，应优先考虑本区域成本较低的调频资源。

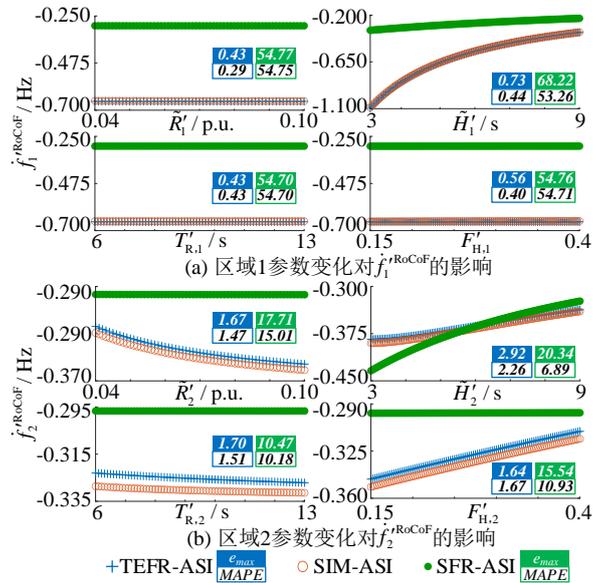


图 E2 区域频率最大变化率安全指标的分析及对比

Fig. E2 Analysis and comparison of safety indicators of the maximum change rate valve of areal frequency

由图 E3(a)—(c)可以看出，两区参数变化对区间联络线功率峰值以及准稳态值的影响趋势相反。其中，联络线功率峰值除与 $T'_{R,k}$ 关系不大外，与扰动区 \tilde{R}'_k 正相关，与 \tilde{H}'_k 和 $F'_{H,k}$ 负相关，与非扰动区恰好相反；区间联络线功率准稳态值与扰动区 \tilde{R}'_k 正相关，而非扰动区 \tilde{R}'_k 负相关。可以看出，区间联络线功率大小取决于两区的调频能力对比，扰动区的能力相对越强，区间联络线功率指标值就越小。因此，在提升区域频率支撑能力的同时，要注意两区域之间的能力协调。考虑到扰动区形势更为严峻，当区间联络

线功率安全指标越限时，应当优先考虑增加扰动区的频率响应能力。

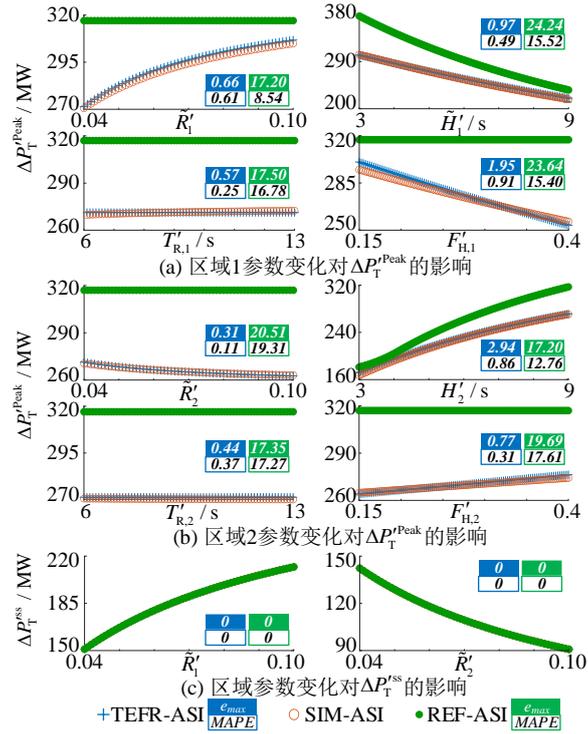


图 E3 区间联络线功率安全指标的分析及对比

Fig. E3 Analysis and comparison of safety indicators of inter-areal tie-line power

此外，由图 E1—E3 可以看出，安全指标随参数的变化趋势具有分段线性化特征。因此，可依据分段线性化方法进行进一步的线性化处理。

附录 F

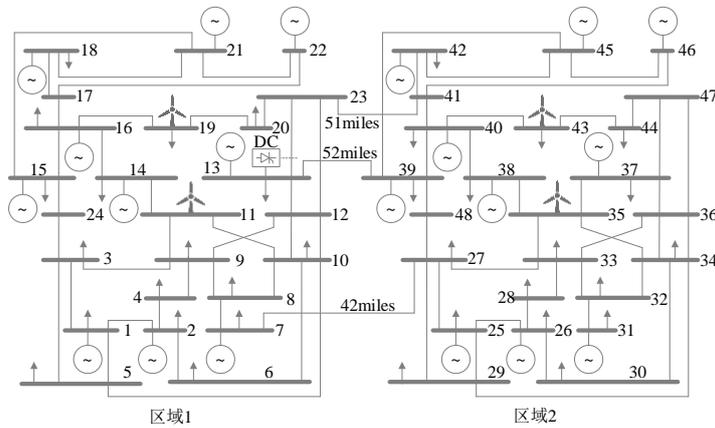


图 F1 含风电的 IEEE 两区 96 节点系统

Fig. F1 IEEE 2-area 96-node power system with wind power

表 F1 机组动态参数
Table F1 Dynamic parameter of generator

机组编号	类型	母线	H	R	T_R	F_H	X_d'
G ₁₆ —G ₂₀	U ₁₂	15	4.53	0.04	8.0	0.34	0.346 8
G ₁ 、G ₂ /G ₅ 、G ₆	U ₂₀	1/2	3.65	0.04	7.0	0.33	0.165 9
G ₂₅ —G ₃₀	U ₅₀	22	4.54	0.05	8.5	0.29	0.236 1
G ₃ 、G ₄ /G ₇ 、G ₈	U ₇₆	1/2	5.94	0.05	9.0	0.28	0.341 6
G ₉ —G ₁₁	U ₁₀₀	7	4.08	0.05	10.5	0.25	0.333 7

G ₂₁ /G ₂₂ /G ₃₁ 、G ₃₂	U ₁₅₅	15/16/23	6.06	0.05	9.5	0.30	0.413 3
G ₁₂ —G ₁₄	U ₂₀₀	13	6.19	0.04	11.0	0.27	0.334 2
G ₃₄ /G ₃₅	W ₃₀₀	11/19	3.25	0.035			
G ₁₅ /G ₃₃	U ₃₅₀	14/23	5.10	0.05	12.0	0.32	0.280 9
G ₂₃ /G ₂₄	U ₄₀₀	18/21	5.71	0.05	11.5	0.30	0.160 6

注：机组 G36—G70 的动态参数节与机组 G3—G70 相同。

表 F2 日内小时负荷系数
Table F2 Intraday hourly load factor

节点	系数	节点	系数	节点	系数
1	0.0379	9	0.0614	17	0
2	0.0340	10	0.0684	18	0.1168
3	0.0632	11	0	19	0.0635
4	0.0260	12	0	20	0.0449
5	0.0249	13	0.0930	21	0
6	0.0477	14	0.0681	22	0
7	0.0439	15	0.1112	23	0
8	0.0600	16	0.0351	24	0

注：节点 25—48 的节点负荷系数与节点 1—24 相同。

表 F3 节点负荷系数
Table F3 Bus load factor

时段	系数	时段	系数	时段	系数
1	0.0322	9	0.0437	17	0.0482
2	0.0302	10	0.0477	18	0.0482
3	0.0291	11	0.0497	19	0.0467
4	0.0281	12	0.0503	20	0.0462
5	0.0281	13	0.0497	21	0.0462
6	0.0291	14	0.0503	22	0.0467
7	0.0322	15	0.0503	23	0.0437
8	0.0382	16	0.0487	24	0.0362

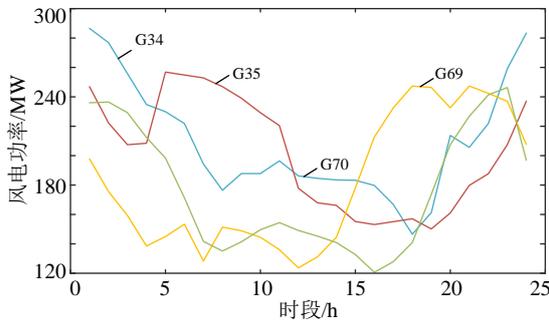


图 F2 日内风电功率预测

Fig. F2 Intraday wind power forecast

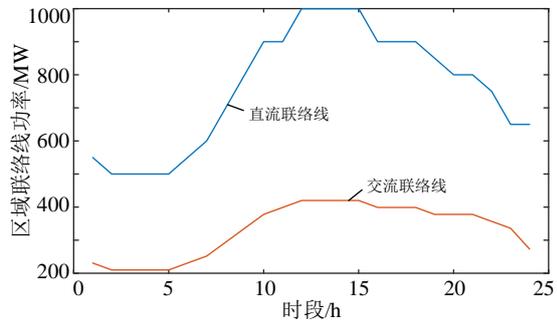


图 F3 日内联络线传输功率计划

Fig. F3 Intraday tie-line transmission power plan

表 F4 线性优化割系数
Table F4 Linear optimization cut coefficient

优化割	$c^{(1)}$	$c^{(2)}$	$c^{(3)}$	$c^{(4)}$	$c^{(5)}$	R^2
$\hat{f}_1^{r\text{ndir}}$	1.38E-5	8.21E-6	1.70E-2	-1.25E-4	-2.93E-2	0.993
$\hat{f}_2^{r\text{ndir}}$	4.11E-6	5.97E-6	1.20E-2	-1.01E-4	-2.18E-2	0.989
$\hat{f}_1^{r\text{RoCoF}}$	1.48E-4	0	0	0	-4.97E-2	0.954
$\hat{f}_2^{r\text{RoCoF}}$	1.70E-5	2.78E-6	7.42E-3	-1.26E-5	-2.20E-2	0.984
$\hat{f}_1^{r\text{ss}}$	0	4.76E-6	0	0	-1.10E-2	0.999
$\hat{f}_2^{r\text{ss}}$	0	3.29E-6	0	0	-8.56E-3	0.999
$-\Delta \hat{P}_{T,j}^{\text{Peak}}$	-1.98E-2	-1.16E-3	-3.35	0	11.0	0.990
$-\Delta \hat{P}_{T,j}^{\text{ss}}$	0	2.64E-3	0	0	6.10	0.999

注： R^2 (goodness of fit)为拟合优度，表征拟合程度(越接近 1 越好)。

附录 G

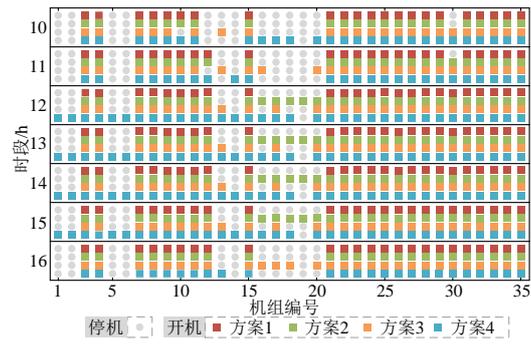


图 G1 区域 1 中 4 种方案的机组启停情况

Fig. G1 Unit start-stop situation of four schemes in Area 1

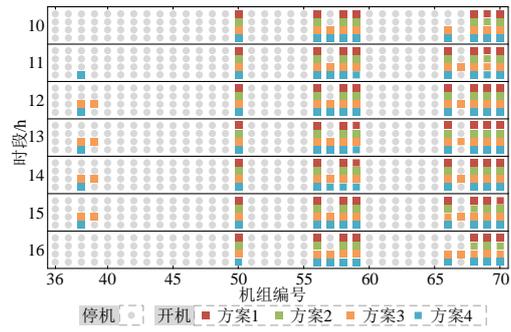


图 G2 区域 2 中 4 种方案的机组启停情况

Fig. G2 Unit start-stop situation of four schemes in Area 2