

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.216

引用格式:肖强,周佳鑫,范璇,等.计及N-1约束的联络线功率交互能力刻画与分析[J].重庆大学学报,2025,48(9):12-20.



## 计及N-1约束的联络线功率交互能力刻画与分析

肖强<sup>1</sup>,周佳鑫<sup>1</sup>,范璇<sup>1</sup>,邵先琪<sup>1</sup>,周倩<sup>2</sup>,瞿圣朋<sup>3a,3b</sup>,林伟<sup>3a,3b</sup>,杨知方<sup>3a,3b</sup>

(1. 国网重庆市电力公司经济技术研究院,重庆 401120; 2. 国网重庆市电力公司,重庆 400015;

3. 重庆大学 a. 电气工程学院; b. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

**摘要:**电力系统联络线功率交互能力的精准表征,有助于实现中国跨区电力传输的可执行性和最优性。然而,现有方法仅考虑基态场景电力系统联络线功率交互能力,忽略N-1故障场景对电力系统联络线功率交互能力的影响,无法实现联络线功率交互能力的精准表征。文中针对计及N-1约束的电力系统联络线功率交互能力展开研究,依据基态场景与N-1故障场景的耦合关系,提出基于解耦表征策略的N-1故障场景下电力系统联络线功率交互能力快速刻画方法;依据火电机组不同调控模式,分析N-1故障场景调控能力对电力系统联络线功率交互能力影响,辅助跨区电力资源优化配置决策制定。某省661节点系统算例表明:所提方法中能够精准、高效地表征联络线功率能力。

**关键词:**联络线;功率传输能力;N-1故障场景;快速表征;机组控制模式

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)09-012-09

## Tie-line exchange capability considering N-1 constraints: characterization and analysis

XIAO Qiang<sup>1</sup>, ZHOU Jiaxin<sup>1</sup>, FAN Xuan<sup>1</sup>, SHAO Xianqi<sup>1</sup>, ZHOU Qian<sup>2</sup>, QU Shengpeng<sup>3a,3b</sup>,  
LIN Wei<sup>3a,3b</sup>, YANG Zhifang<sup>3a,3b</sup>

(1. State Grid Chongqing Economic Research Institute, Chongqing 401120, P. R. China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400015, P. R. China; 3a. School of Electrical Engineering; 3b. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Accurate characterization of tie-line power transfer capability is essential for ensuring the feasibility and optimality of cross-regional power exchanges. However, existing methods typically consider only the base operating scenario and neglect N-1 contingencies, leading to inaccurate assessments of regional tie-line transfer capabilities. This paper addresses this gap by focusing on the tie-line exchange capability of power systems under N-1 contingency constraints. A fast determination strategy is proposed based on the coupling relationship between the base case and N-1 scenarios, using a decomposition approach. Furthermore, the impacts of various generator control modes on tie-line exchange capability under N-1 contingencies are analyzed to support the optimal

收稿日期:2023-07-03 网络出版日期:2024-07-04

作者简介:肖强(1989—),男,硕士,主要从事新能源发展研究,(E-mail)200911xsq@163.com。

通信作者:林伟,男,博士,(E-mail)wlin1994@hotmail.com。

allocation of cross-regional power transfers. The proposed methods is validated using a provincial-level power system, demonstrating its accuracy and practical effectiveness.

**Keywords:** tie-line; power exchange capability; N-1 contingency; fast determination; unit control mode

随着中国新能源电力的持续增长,负荷呈现强波动性,区域电网仅靠自身的内部电源难实现源荷的平衡<sup>[1-4]</sup>资源呈现逆向分布,跨区电力传输是中国电网常态<sup>[5]</sup>。例如,截至2020年4月,宁夏电网外送新能源达到31.32亿kW·h;累计2000亿kW·h电量已由哈密南到郑州的±800 kV特高压直流输电工程外送<sup>[6-8]</sup>。

随着中国复奉、宾金等多条跨区电力传输通道的投入运行<sup>[9]</sup>,各区域电力系统的联络线交互能力不断加强<sup>[10-14]</sup>。因此,精准刻画电力系统联络线功率交互能力,有助于实现跨区电力传输的可执行性和最优性<sup>[15-16]</sup>。目前,电力系统联络线功率交互能力刻画方法可按其表征形式分为3类。

1)基于可用传输容量的表征形式。文献[17-19]通过计算边界断面的最大传输功率,表征电力系统联络线功率交互能力,忽略发电机容量约束,实现基于网流法的可用传输容量快速计算。由于忽略发电机容量约束,文献[17-18]难以保证可用传输容量的精准计算。Yu等<sup>[19]</sup>提出采用以边界断面传输功率之和/边界某联络线传输功率最大为目标函数、基态系统运行要求(如发电机容量约束、线路容量约束等)为约束的优化模型,求取可用传输容量。由于Yu等<sup>[19]</sup>仅考虑特定最大可用传输容量,其电力系统联络线功率交互能力的近似刻画精度仍有待提升。

2)基于等值线路容量的表征形式。文献[20-21]基于等值网络,将电力系统联络线功率交互能力表征为边界节点等值线路容量。特别地,Jang等<sup>[20]</sup>基于Kron消去法,在保证等值前后边界节点等值线路总传输容量相等,对基态场景的电力系统进行等值处理。Mohapatra等<sup>[21]</sup>基于二次规划,计算边界节点等值线路容量的上限估计值、下限估计值和最优估计值。然而,上述方法均只基于特定网架展开等值,无法适用于考虑N-1故障后网架结构发生变化的场景。

3)基于可行域的表征形式。文献[22-25]以多面体可行域表征电力系统联络线功率交互能力。文献[22-23]基于多参数规划理论,通过枚举基态场景约束可能的起作用约束和不起作用约束组合,研究满足基态场景约束的联络线功率可行变化范围。Lin等<sup>[24]</sup>进一步提出改进多参数规划理论,通过枚举与可行域边界平面相关的起作用约束和不起作用约束组合,实现可行域加速刻画。然而,当考虑N-1故障时,海量N-1故障场景运行约束将大幅增加起作用约束和不起作用约束组合的枚举计算负担<sup>[25]</sup>。Tan等<sup>[26]</sup>基于顶点搜索的可行域求解方法,通过反复求解以基态系统运行要求为约束的优化问题,搜索可行域顶点;Du等<sup>[27]</sup>提出了基于深度卷积神经网络的用于计算大量含有N-1故障场景约束的调度问题。然而,求解考虑海量N-1故障场景运行约束的优化问题具有较大的计算负担。

综上所述,电力系统联络线传输能力可由可行域形式精准描绘,现有相关研究仅考虑基态场景约束,难以计及N-1故障场景约束。由于电力系统元件故障难以避免,电力跨区传输需考虑N-1故障场景<sup>[28]</sup>。换言之,以可行域形式表征的电力系统联络线传输能力需能同时满足基态场景与N-1故障场景。因此,文中以可行域形式表征电力系统联络线传输能力,研究考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力刻画方法,从而为电力跨区传输提供准确的调度边界。文中工作主要包括如下2点:

1)依据基态场景与N-1故障场景的耦合关系,提出基于解耦表征策略的快速刻画方法,缓解由于海量N-1故障场景约束产生的可行域刻画计算量爆炸问题。

2)分析火电机组在N-1故障场景下,不同控制模式对电力系统联络线功率交互能力影响,以期为电力资源跨区域优化配置提供辅助决策依据。

## 1 考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力刻画

在文中给出考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力刻画模型,提出基于解耦表征策略的快速刻画方法。

### 1.1 考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力刻画模型

将考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力描述为:在满足电力系统基态场景约束的前提下,同时也满足N-1故障场景约束的基态联络线功率 $\mathbf{P}_{B,N}$ 的所有可行组合点。以下介绍电力系统基态场景约束和N-1故障场景约束的数学表征形式。

#### 1.1.1 基态场景约束

##### 1) 功率平衡约束

$$\mathbf{1}_G^T \mathbf{P}_{G,N} + \mathbf{1}_B^T \mathbf{P}_{B,N} = \mathbf{1}_D^T \mathbf{P}_D, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{P}_{G,N}$ 、 $\mathbf{P}_{B,N}$ 分别为基态场景的火电机组有功功率和联络线有功功率; $\mathbf{P}_D$ 为电力用户有功负荷需求; $\mathbf{1}$ 表征全1列向量;上标T表示转置操作。

##### 2) 线路有功潮流上下限约束

$$\mathbf{F}_{\min} \leq \mathbf{S}_N \times (\mathbf{M}_G \mathbf{P}_{G,N} + \mathbf{M}_B \mathbf{P}_{B,N} - \mathbf{M}_D \mathbf{P}_D) \leq \mathbf{F}_{\max}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{S}_N$ 为基态场景转移分布因子矩阵; $\mathbf{M}_G$ 、 $\mathbf{M}_B$ 和 $\mathbf{M}_D$ 分别为 $\mathbf{P}_{G,N}$ 、 $\mathbf{P}_{B,N}$ 和 $\mathbf{P}_D$ 的节点关联矩阵; $\mathbf{F}_{\min}$ 和 $\mathbf{F}_{\max}$ 为线路潮流上界与下界。

##### 3) 火电机组有功功率上下限约束

$$\mathbf{P}_{G,\min} \leq \mathbf{P}_{G,N} \leq \mathbf{P}_{G,\max}, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{P}_{G,\max}$ 和 $\mathbf{P}_{G,\min}$ 分别为火电机组有功功率上界和下界。

##### 4) 联络线有功功率上下限约束

$$\mathbf{P}_{B,\min} \leq \mathbf{P}_{B,N} \leq \mathbf{P}_{B,\max}, \quad (4)$$

式中: $\mathbf{P}_{B,\max}$ 和 $\mathbf{P}_{B,\min}$ 分别为联络线有功功率的物理传输上界和下界。

#### 1.1.2 第c个故障场景约束

##### 1) 功率平衡约束

$$\mathbf{1}_G^T \mathbf{P}_{G,c} + \mathbf{1}_B^T \mathbf{P}_{B,c} = \mathbf{1}_D^T \mathbf{P}_D, \quad \forall c \in C, \quad (5)$$

式中: $\mathbf{P}_{G,c}$ 和 $\mathbf{P}_{B,c}$ 分别为第c个故障场景的火电机组有功功率和联络线有功功率。文中将第c条线路故障场景称为第c个故障场景。

##### 2) 线路有功潮流上下限约束

$$\mathbf{F}_{c,\min} \leq \mathbf{S}_c \times (\mathbf{M}_G \mathbf{P}_{G,c} + \mathbf{M}_B \mathbf{P}_{B,c} - \mathbf{M}_D \mathbf{P}_D) \leq \mathbf{F}_{c,\max}, \quad \forall c \in C, \quad (6)$$

式中: $\mathbf{S}_c$ 为第c个故障场景的转移分布因子矩阵; $\mathbf{F}_{c,\max}$ 和 $\mathbf{F}_{c,\min}$ 分别为第c个故障场景的线路潮流上界与下界。

##### 3) 火电机组有功功率上下限约束

$$\mathbf{P}_{G,\min} \leq \mathbf{P}_{G,c} \leq \mathbf{P}_{G,\max}, \quad \forall c \in C. \quad (7)$$

##### 4) 联络线有功功率上下限约束

$$\mathbf{P}_{B,\min} \leq \mathbf{P}_{B,c} \leq \mathbf{P}_{B,\max}, \quad \forall c \in C. \quad (8)$$

##### 5) 机组控制模式约束

$$|\mathbf{P}_{G,c} - \mathbf{P}_{G,N}| \leq \mathbf{R}_G, \quad \forall c \in C. \quad (9)$$

式中: $\mathbf{R}_G$ 为故障场景出现后的火电机组有功功率变化限制。特别地,文中将 $\mathbf{R}_G=0$ 称为预防性控制模式<sup>[29]</sup>;否则称为校正性控制模式<sup>[30]</sup>。上述N-1故障场景约束(5)~(9)可替换为N-k故障场景约束,以实现计及N-k故障场景的联络线功率交换能力刻画。

将式(1)~(9)简称为

$$\mathbf{F}_{G,N} \mathbf{P}_{G,N} + \mathbf{F}_{B,N} \mathbf{P}_{B,N} \leq \mathbf{G}_N, \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_{G,c} \mathbf{P}_{G,c} + \mathbf{F}_{B,c} \mathbf{P}_{B,c} + \mathbf{F}_{G,Nc} \mathbf{P}_{G,N} \leq \mathbf{G}_c, \quad \forall c \in C, \quad (11)$$

式中:约束(10)表征基态场景约束(1)~(4), $\mathbf{F}_{G,N}$ 和 $\mathbf{F}_{B,N}$ 为常数矩阵, $\mathbf{G}_N$ 为常数向量;约束(11)表征N-1故障场景约束, $\mathbf{F}_{G,c}$ 、 $\mathbf{F}_{B,c}$ 和 $\mathbf{F}_{G,Nc}$ 为常数矩阵, $\mathbf{G}_c$ 为常数向量。应当注意:文中仅以直流潮流模型(1)~(9)为例,阐述考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交换能力刻画模型;所阐述模型可扩展至其余线性潮流模型(如文献[31]所提计及电力系统无功功率的线性潮流模型)。

基于文献[22-24]的多参数规划类确定方法,其本质在于枚举式(10)~(11)中可能的起作用约束和不起作

用约束类型,因此枚举计算负担庞大,难以获得表征电力系统联络线功率交互能力的可行域。而基于文献[25]的顶点搜索方法,其本质在于通过反复求解以式(10)~(11)为约束的优化问题,从而获得可行域顶点。然而N-1约束往往数量庞大,求解相应优化问题也具有较大的计算负担。

为此,文中将研究考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力快速刻画方法。

## 1.2 基于解耦表征策略的快速刻画方法

观察(10)~(11)可以发现:1)N-1故障场景的约束(11)通过基态约束(10)相互耦合;2)若去除基态约束(10),N-1故障场景的约束(11)不存在耦合关系。文中提出如下基于解耦刻画策略的考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力确定方法:1)考虑第 $c$ 个故障场景的约束(11)及基态约束(10),刻画其可行域 $\Omega_c$ 以表征故障场景 $c$ 下的电力系统联络线功率交互能力;2)将所有故障场景的可行域取交集,表征考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力。上述解耦刻画策略概述于图1所示。

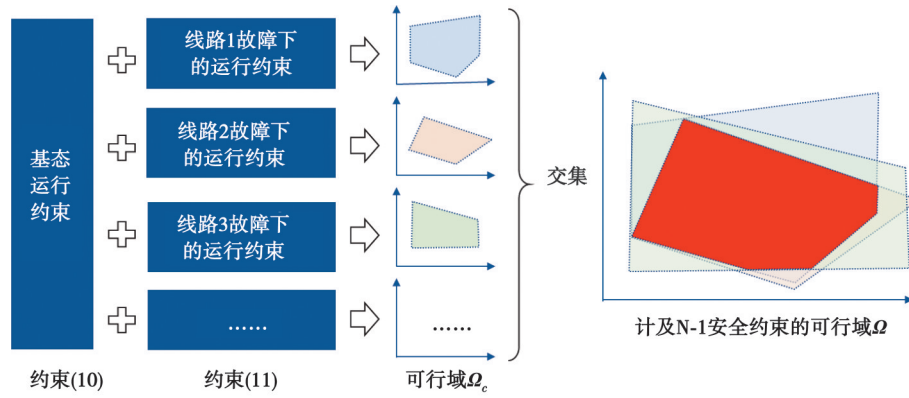


图1 解耦刻画策略

Fig. 1 Decomposed determination strategy

基于所提解耦刻画策略,可将式(10)~(11)中的大量约束,拆分为少量约束以实现不同故障场景可行域的并行刻画,从而大大降低考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力计算负担。同时,由于文中在解耦刻画时仍考虑N-1安全约束(11),最终由交集所得的可行域仍旧保留考虑N-1故障场景约束对电力系统联络线功率交互能力的影响,从而最终实现考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力的精准刻画。应当注意,不同故障场景可行域的刻画可由文献[22-25]实现。以文献[25]的顶点搜索法为例,基于下述(12)~(19)阐述第 $c$ 个故障场景的可行域 $\Omega_c$ 的求解流程,其核心思想可凝练为:基于线性规划问题(12)~(16),通过寻找故障场景可行域的部分顶点,构造故障场景完整可行域的内近似可行空间;求解优化问题(17)~(19),通过外平移内近似可行空间平面寻找完整可行域顶点,从而实现内近似可行空间的有效扩大。

步骤1 基于下述优化问题(12)~(16),计算基态场景联络线有功功率 $P_{B,N}$ 在其各维度最值。第 $i$ 个维度的最小值可由下述优化问题计算获得:

$$\min_{P_{B,c}, P_{G,c}, P_{G,N}, P_{B,N}} P_{B,N,i}, \quad (12)$$

s.t.

$$F_{G,N} P_{G,N} + F_{B,N} P_{B,N} \leq G_N, \quad (13)$$

$$F_{G,c} P_{G,c} + F_{B,c} P_{B,c} + F_{G,Nc} P_{G,N} \leq G_c, \quad (14)$$

式中, $P_{B,N,i}$ 为向量 $P_{B,N}$ 中的第 $i$ 个元素。

第 $i$ 个维度的最大值可由下述优化问题求得:

$$\max_{P_{B,c}, P_{G,c}, P_{G,N}, P_{B,N}} P_{B,N,i}, \quad (15)$$

s.t.

$$\text{约束(13)~(14)}. \quad (16)$$



将由式(12)~(16)求得的最优解(关于 $\mathbf{P}_{B,N}$ )作为顶点集合 $V$ ,由此构造可行域初始化空间 $\Omega_c$ 。

步骤2 记可行域 $\Omega_c$ 的第 $k$ 个边界平面为 $\mathbf{A}_k \mathbf{P}_{B,N} \leq \mathbf{b}_k$ 。通过将可行域 $\Omega_c$ 的各个边界平面向外平移以实现可行域新顶点的搜索。特别地,通过求解下述线性规划问题,获得由第 $k$ 个边界平面搜寻的新顶点:

$$\max_{\mathbf{P}_{B,c}, \mathbf{P}_{G,c}, \mathbf{P}_{G,N}, \mathbf{P}_{B,N}} P_{B,N,i}, \quad (17)$$

s.t.

$$\text{约束(13)~(14)}, \quad (18)$$

$$\mathbf{A}_k \mathbf{P}_{B,N} = \mathbf{b}_k'. \quad (19)$$

由于线性规划最优解为约束集合顶点,线性规划问题(17)~(19)中的最优解(关于 $\mathbf{P}_{B,N}$ )为由第 $k$ 个边界平面所搜寻获得的可行域新顶点。在对可行域所有边界平面完成线性规划问题(17)~(19)的求解后,将所有最优解合并至顶点集合 $V$ 中,产生新顶点集合 $V_{\text{new}}$ 。

步骤3 计算考虑新顶点集合 $V_{\text{new}}$ 前后的可行域 $\Omega_c$ 的体积变化量 $\Delta V$ 。当 $\Delta V$ 小于某一提前设定的定值后,终止步骤1和步骤2,并记步骤1和步骤2所获得的可行域 $\Omega_c$ 表征为 $\mathbf{A}_c \mathbf{P}_{B,N} \leq \mathbf{b}_c$ ;否则将 $\mathbf{A}_c \mathbf{P}_{B,N} \leq \mathbf{b}_c$ 返回至步骤2。

一旦获得所有故障场景的可行域 $\Omega_c (\forall c \in C)$ ,则将所有故障场景可行域 $\Omega_c (\forall c \in C)$ 的交集(即 $\Omega = \bigcap_{c \in C} \Omega_c$ )视作考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力。

## 2 火电机组控制模式对电力系统联络线功率交互能力的影响分析

随着中国新能源大规模的并网和电力负荷的激增,跨区电力传输愈发重要。火电机组作为电网中的重要调节手段之一,研究其不同控制模式对电力系统联络线功率交互能力的影响,可为电力资源的广域优化配置提供辅助决策依据。

火电机组N-1故障场景控制模式可分为预防性控制和校正性控制,其区别<sup>[32]</sup>在于:1)预防性控制要求火电机组在N-1故障状态下无须调整出力也可保证电力系统安全运行,即约束(9)中限制 $\mathbf{R}_g$ 为0;2)校正性控制则允许机组调整出力以保证电力系统安全运行,即约束(9)中的 $\mathbf{R}_g$ 不为0。

与预防性控制下的约束(10)~(11)相比,校正性控制的约束(10)~(11)与其区别仅在于:式(11)不等式的右侧项参数 $\mathbf{G}_c$ 可由0放宽至某一限值。校正性控制模式有助于扩大电力系统运行区域,影响约束(11),扩大解耦表征策略中的各个故障状态下的可行域 $\Omega_c$ ,最终拓宽考虑N-1故障场景的可行域 $\Omega$ 。另外,若校正性控制其允许机组调整出力愈多(即 $\mathbf{R}_g$ 越大),则考虑N-1故障场景的可行域 $\Omega$ 将愈大。

## 3 算例分析

以中国某661节点省级电网为例验证,所提方法有效性。所采用661节点省级电网共包含48台火电机组、1047条输电线路/变压器,并总计接入3条联络线(分别位于节点5、9和60)。在算例中,基态场景约束共有1099条;N-1故障场景数为797,并且N-1故障场景约束共有913362条。

3.1节验证基于解耦表征策略的考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力快速刻画方法。

3.2节定量分析不同火电机组控制模式对考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力的影响。

### 3.1 所提快速刻画方法验证

首先着重分析在电力系统联络线功率交互能力评估过程中,纳入N-1故障场景的重要性及其对电力系统安全运行的影响。基于图2可知,电力系统联络线功率交互能力可能由于N-1故障场景出现的显著差异导致。由图2可知:如果仅考虑基态场景,可能会高估N-1故障情况下的电力系统联络线功率交互能力。这种高估将错误估计电力系统联络线功率交互能力,使得电力系统运行超出安全边界。仔细观察图2所示的可行域变化可发现:在考虑N-1故障场景时,某些在基态可行的联络线功率组合由于不能满足N-1场景下更加严格的约束条件而变得不再可行。这一现象导致了可行域显著缩减,即由图2(a)所示的较大空间,减少到图

2(b)所示的更为紧凑的区域。上述变化体现了N-1故障场景对电力系统联络线功率交互能力的显著影响。

为验证所提快速刻画方法(第1.1节)的有效性,对比如下2种方法。

方法1:传统方法,即完备考虑约束(10)~(11),直接刻画电力系统联络线功率交互能力。

方法2:1.1节所提的快速刻画方法。

文中采用的顶点搜索法获取表征联络线功率交互能力的可行域。计算结果表明:方法1在整体上耗费了1472.2 s的总计算时间。而采用方法2,在并行处理797个不同故障状态下,最短计算时间为2.37 s,最长计算时间则为4.97 s,平均计算时间仅为2.59 s。上述结果表明:方法2比方法1可显著缩短计算时间,将平均计算时间缩短至原来的0.2%。上述计算负担显著降低的原因在于:方法1需要反复解决涵盖大量约束条件的优化问题,其中本算例基态场景约束条件数量为1099个,而N-1故障场景的约束条件则高达913362个,因此其计算过程相对耗时。相反,方法2仅需对每个故障状态下的可行域进行刻画,显著降低计算复杂度。此外,由于每个故障场景下的可行域能够进行并行计算,提升了方法2的计算效率。通过上述仿真算例表明,所提快速刻画方法在降低电力系统联络线功率交互能力评估的计算成本方面具有显著优势,从而为跨区电力系统互联运行提供更为高效的分析工具。

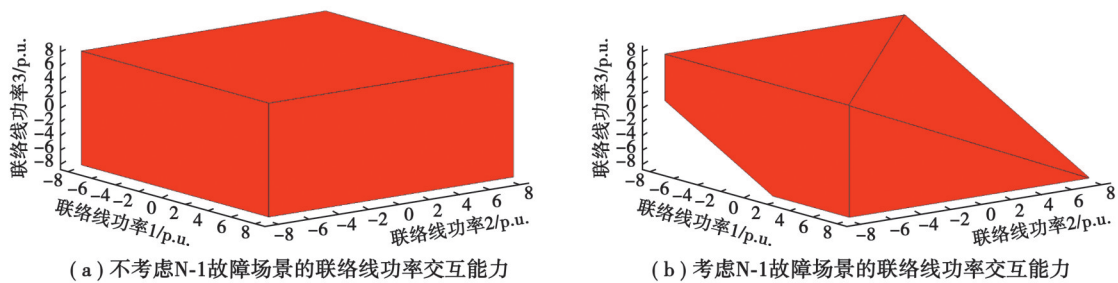


图2 N-1故障场景对联络线功率交互能力的影响

Fig. 2 Impacts of N-1 contingencies on tie-line power exchange capability

### 3.2 火电机组控制模式对电力系统联络线功率交互能力的影响

进一步探究火电机组控制模式对电力系统联络线功率交互能力的影响。考虑3类场景的电力系统联络线功率交互能力,如图3所示。

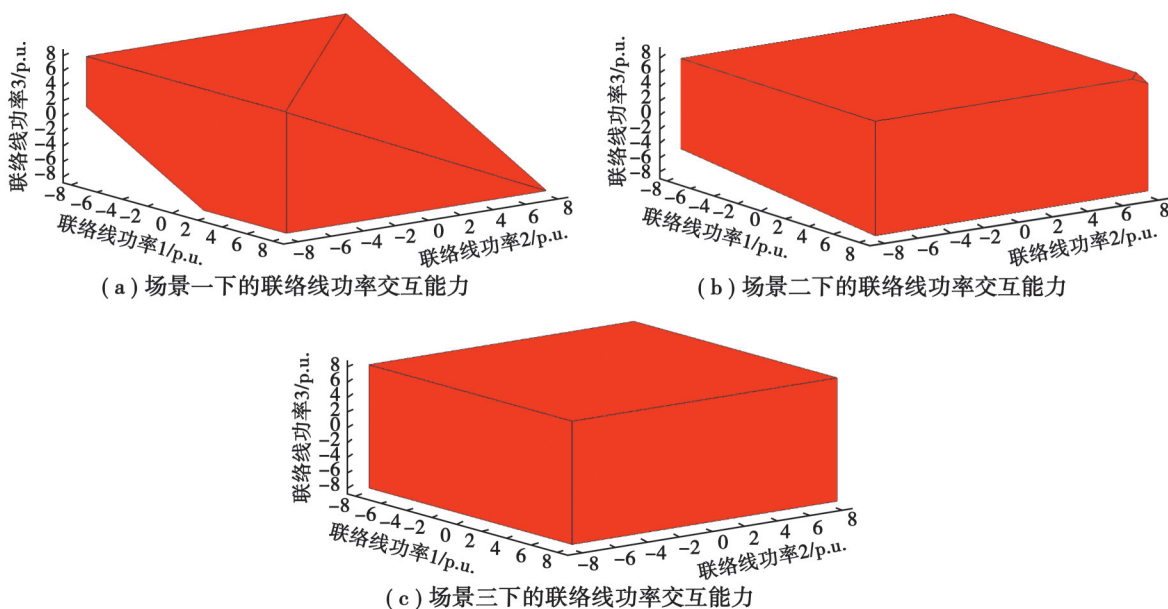


图3 不同调节能力 $R_G$ 的联络线功率交互能力对比

Fig. 3 Comparison of the tie-line power exchange capabilities with different  $R_G$

场景一:火电机组为校正性控制模式,且式(9)中的 $R_G$ 为机组容量上限的10%。

场景二:火电机组为校正性控制模式,且式(9)中的 $R_G$ 为机组容量上限的20%。

场景三:火电机组为校正性控制模式,且式(9)中的 $R_G$ 为机组容量上限的40%。

由图3可知:当机组运行在校正性控制模式,其具备的调节能力 $R_G$ 可显著影响电力系统联络线功率交互能力。具体而言,随着调节能力 $R_G$ 的增强,表征电力系统联络线功率交互能力的可行域越大。这是由于:较大的 $R_G$ 意味着在发生N-1故障时,电力系统将更灵活,以满足基态场景约束和N-1故障场景约束。特别地,当 $R_G$ 调节能力足够强时,N-1故障场景约束将不再影响可行域,如图3(c)与图2(a)相同。在该情形下,仅考虑基态场景约束的联络线功率组合,已能满足N-1故障场景约束需求,使得在计及N-1故障场景约束的可行域与仅计及基态场景的可行域一致。另外,在本算例中,如果采用预防性模式时(即 $R_G=0$ ),将不存在同时满足基态场景约束和N-1故障场景约束的联络线功率组合。

## 4 结 论

电力资源跨区跨省传输推动中国电力资源广域优化配置。为保证电力系统运行安全性和经济性,需以可行域形式,在完备考量基态场景和N-1场景的前提下,精准刻画电力系统联络线功率交互能力。文中提出考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力快速刻画方法,分析火电机组不同控制模式对电力系统联络线功率交互能力的影响,有如下结论。

1)现有刻画方法在面对海量N-1故障场景运行约束时,具有显著的计算负担,难以实现考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力的高效刻画。文中提出基于解耦刻画策略的快速刻画方法,并行处理不同故障下的少量约束,获得各个故障场景的电力系统联络线功率交互能力,进而以交集形式获得考虑N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力的高效刻画。

2)分析火电机组不同控制模式对传输能力的影响:当机组故障前后调节能力越大时,可充分发挥机组灵活性,从而扩大联络线功率可行域,提升联络线功率交互能力。因此,当机组处于校正性控制模式时,其传输能力将高于预防性控制模式下的传输能力。

文中方法目前仅考虑单时段下计及N-1故障场景的电力系统联络线功率交互能力的高效刻画与分析,未计及各类时段耦合约束(如火电机组爬坡约束、储能荷电状态连续约束等)在不同故障场景间的耦合作用。因此,未来工作之一为融合时段耦合约束与N-1故障场景约束的电力系统联络线功率交互能力的高效刻画。

## 参考文献

- [1] 李中兴,李峰,管霖,等.考虑源荷互补的低压网络拓扑规划方法研究[J].电气自动化,2022,44(3):17-21.  
Li Z X, Li F, Guan L, et al. Research on low-voltage network topology planning method considering source and load complementarity[J]. Electrical Automation, 2022, 44(3): 17-21.(in Chinese)
- [2] Liu S, Yang Z F, Xia Q, et al. Power trading region considering long-term contract for interconnected power networks[J]. Applied Energy, 2020, 261: 114411.
- [3] Zhang Z W, Wang C F, Lv H C, et al. Day-ahead optimal dispatch for integrated energy system considering power-to-gas and dynamic pipeline networks[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4): 3317-3328.
- [4] Lai Q H, Zhang Z, Zhang K J, et al. Research on pilot protection for Tie line of renewable energy sources[J]. IEEE Access, 2023, 11: 1613-1628.
- [5] 张逸康,赵晋泉,刘子文,等.大电网调度自动巡航中经济运行域的构建方法[J].电力系统自动化,2020,44(12):64-73.  
Zhang Y K, Zhao J Q, Liu Z W, et al. Construction method of economic operation region in automatic cruise for bulk power grid dispatching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 64-73.(in Chinese)
- [6] 刘振亚,张启平.国家电网发展模式研究[J].中国电机工程学报,2013,33(7):1-10,25.  
Liu Z Y, Zhang Q P. Study on the development mode of national power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10, 25.(in Chinese)

- [7] 朱一兵,丛野,张粒子,等. 跨国跨州/跨省跨区输电定价机制及对中国专项工程定价的启示[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(4): 86-100.
- Zhu Y B, Cong Y, Zhang L Z, et al. Transnational/interstate and trans-provincial/trans-regional transmission pricing mechanism and its enlightenment for pricing of dedicated projects in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4): 86-100. (in Chinese)
- [8] 张海波,胡彦广,田雪沁. 计及中长期交易和充裕性、灵活性均衡的跨区直流日前输电计划优化[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(4): 1381-1394.
- Zhang H B, Hu Y G, Tian X Q. Optimization of cross-regional HVDC day-ahead transmission plan considering medium and long-term transactions, and equilibrium of adequacy, flexibility[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(4): 1381-1394. (in Chinese)
- [9] 孙立飞,申建建,张俊,等. 跨省互联水电站群长期多目标联合优化调度[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3901-3910.
- Sun L F, Shen J J, Zhang J, et al. Research on long-term multi-objective optimal operation for trans-provincial hydropower plants[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3901-3910. (in Chinese)
- [10] 林顺富,张琪,沈运帷,等. 考虑灵活性互济的跨区电网灵活性资源优化调度策略[J]. 电力建设, 2023, 44(8): 71-81.
- Lin S F, Zhang Q, Shen Y W, et al. Optimal dispatching strategy of flexible resources considering flexible mutual aid among regional grid[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(8): 71-81. (in Chinese)
- [11] 刘硕,张梦晗,于松泰,等. 计及跨区备用辅助服务互济的互联网出清方法[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 35-47.
- Liu S, Zhang M H, Yu S T, et al. Market clearing method for regional coordinated transaction scheduling with reserve ancillary services sharing[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 35-47. (in Chinese)
- [12] 辛保安. 为中国式现代化赋能展担当 [N/OL]. (2023-01-03) [2023-04-06]. <http://www.xinhuanet.com/energy/20230103/3de801eac0a449ef8c7c511d76bf2c7e/c.html>.
- [13] 戴双凤,叶泽,姜曼,等. 跨省区电力交易综合效益评估模型及应用[J]. 中国电力, 2022, 55(12): 179-186.
- Dai S F, Ye Z, Jiang M, et al. Research and its application of evaluation model for comprehensive performances in trans-province power trading[J]. Electric Power, 2022, 55(12): 179-186. (in Chinese)
- [14] Zhang H, Zhang S X, Cheng H Z, et al. Joint generation, transmission and energy storage systems expansion planning in multi-area power systems considering detailed modeling of Tie lines[C]//2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). July 13-15, 2020, Weihai, China. IEEE, 2020: 720-726.
- [15] Karaom C, Jirapong P, Thararak P. Optimal distribution network reconfiguration implemented with Tie line and capacitor using improved particle swarm optimization[C]//2020 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI). October 14-16, 2020, Chiangmai, Thailand. IEEE, 2020: 61-64.
- [16] 王建学,李清涛,王秀丽,等. 大规模新能源并网系统电源规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3114-3124.
- Wang J X, Li Q T, Wang X L, et al. A generation expansion planning method for power systems with large-scale new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3114-3124. (in Chinese)
- [17] Kumar S, Billinton R. Adequacy equivalents in composite power system evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(3): 1167-1173.
- [18] Billinton R, Zhang W. Enhanced adequacy equivalent for composite power system reliability evaluation[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(5): 420.
- [19] Yu J, Liu J L, Li W Y, et al. Limit preserving equivalent method of interconnected power systems based on transfer capability consistency[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(14): 3547-3554.
- [20] Jang W, Mohapatra S, Overbye T J, et al. Line limit preserving power system equivalent[C]//2013 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI). February 22-23, 2013, Urbana, IL, USA. IEEE, 2013: 206-212.
- [21] Mohapatra S, Jang W, Overbye T J. Equivalent line limit calculation for power system equivalent networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2338-2346.
- [22] Lin W, Yang Z F, Yu J, et al. Determination of transfer capacity region of Tie lines in electricity markets: theory and analysis[J]. Applied Energy, 2019, 239: 1441-1458.
- [23] 张林,杨高峰,汪洋,等. 基于多参数规划理论的互联网直流联络线功率可行域确定方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5763-5771, 5904.



- Zhang L, Yang G F, Wang Y, et al. Determination of the DC Tie-line transfer capacity region of the interconnected power grid: a multi-parametric programming approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5763-5771, 5904. (in Chinese)
- [24] Lin W, Yang Z F, Yu J, et al. Tie-line power transmission region in a hybrid grid: fast characterization and expansion strategy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2222-2231.
- [25] Sundar K, Nagarajan H, Roald L, et al. Chance-constrained unit commitment with N-1 security and wind uncertainty[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2019, 6(3): 1062-1074.
- [26] Tan Z F, Zhong H W, Wang J X, et al. Enforcing intra-regional constraints in Tie-line scheduling: a projection-based framework[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4751-4761.
- [27] Du Y, Li F X, Li J, et al. Achieving 100x acceleration for N-1 contingency screening with uncertain scenarios using deep convolutional neural network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3303-3305.
- [28] 王砚平, 鲍威, 李赢, 等. 考虑 N-1 故障的安全约束机组组合模型及约束削减方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 167-175.
- Wang Y P, Bao W, Li Y, et al. Model and constraint-reduction method for security-constrained unit commitment considering N-1 contingency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 167-175. (in Chinese)
- [29] 汪洋, 夏清, 康重庆. 考虑电网 N-1 闭环安全校核的最优安全发电计划[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 39-45.
- Wang Y, Xia Q, Kang C Q. Optimal security constrained generation scheduling considering closed-loop N-1 security correction[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 39-45. (in Chinese)
- [30] Capitanescu F, Martinez Ramos J L, Panciatici P, et al. State-of-the-art, challenges, and future trends in security constrained optimal power flow[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(8): 1731-1741.
- [31] Long J R, Yang Z F, Zhao J B, et al. Modular linear power flow model against large fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 402-415.
- [32] 刘林虎, 金黎明, 夏清, 等. 电力系统输电运行弹性空间建模与效益评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 7-13.
- Liu L H, Jin L M, Xia Q, et al. Modelling and benefit evaluation of flexible space of transmission operation in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 7-13. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)