

# 极端条件下异构能源系统风险抵御与灵活协同

潘超,李载源,唐华,杨铖,兰冰

(东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室,吉林 吉林 132012)

**摘要:**考虑东北地区自然灾害、恶劣天气等极端条件影响,研究电-气-热异构能源系统风险运行特性。挖掘域内灵活资源并参与异构能流交互,提出风险抵御体系,包括源荷侧的风险界定、网侧薄弱环节辨识及风险保供策略;建立灵活协同层化模型,从评估、抵御、稳定及经济4个层面对系统风险运行进行分析与调节。对东北某地区异构能源系统仿真,研究风险场景的多种协同抵御方案,利用风险抵御体系分析系统风险响应韧性与灵活协同能力。结果表明,风险抵御体系可以有效实现风险的态势感知与差异化治理,低碳单元可以进一步平衡系统供需关系,基于风险抵御的灵活协同能够有效降低极端条件对系统的影响。

**关键词:**异构能源系统;风险;灵活资源;供需失衡;保供

**中图分类号:**TM715

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202505021

## 0 引言

在能流交互和“双碳”目标背景下,构建多能流联供异构能源系统(heterogeneous energy system, HES)能有效促进风光消纳并实现能源转型<sup>[1]</sup>。随着分布式电源的广泛接入,新型电力系统在极端天气、自然灾害等条件下,将更易出现供需失衡以及调控裕度不足等问题<sup>[2]</sup>。因此,制定合理风险抵御方案并挖掘域内灵活资源,对于提升电-气-热HES的韧性和灵活性至关重要。

目前,国内外学者已对系统遭遇多种风险场景的安全稳定问题进行深入研究<sup>[3]</sup>。文献[4]指出系统受寒潮、高温等极端天气影响,极易发生供需失衡问题。文献[5]指出电压、频率等因素诱发新能源大规模脱网,导致系统短时出力紧缺,备用容量裕度降低,引发电力供需失衡,更严重将造成大规模停电事故。文献[6]指出美国德克萨斯州于2021年受暴风雪等极寒天气影响,导致切负荷量较大,但系统可供跨区域支援功率不足,加剧区域间不平衡问题。针对极端条件的恶性影响,已有文献提出了解决系统稳定性失衡的方案。文献[7]针对强对流等极端天气下配电网风险预警及清障处理需求,提出了分区预警-总体权衡-优化处理机制。文献[8]指出在网侧多能流系统耦合的不确定性影响下,准确有效地建模对于确保可再生能源在系统中的最佳集成至关重要。文献[9]提出由静止无功补偿器(static var compensator, SVC)和静止无功发生器(static var generator, SVG)构成移动式无功补偿装置,同时配备

储能单元可有效平抑电压波动。上述文献主要针对系统面临的各类稳定性及供需失衡风险提出应对措施,但针对多能流联供拓扑尚缺乏一种有效的交互与协同调控策略。

基于需求侧灵活资源的协调弹性特点,通过研究配电网源荷资源灵活互动特性,利用灵活资源能有效应对各类失衡风险问题<sup>[10]</sup>。文献[11]指出大型可控工业负荷具有功率可调性,可通过电力调峰、调频及备用辅助服务市场参与系统抵御失衡风险。文献[12]研究了共享储能对电-气-热HES的灵活调节方案。文献[13]通过固体氧化物电池(solid oxide fuel cell, SOFC)、固体氧化物电解池(solid oxide electrolytic cell, SOEC)、电转气(power to gas, P2G)技术及余热收集单元实现电、氢、气、热的转换,构成多能流交互拓扑。已有研究表明灵活资源有效提升了系统风险的韧性,但灵活资源参与多能联供抵御风险的研究尚有不足,对于HES灵活性能流交互与协同还需完善。

本文研究了极端条件下HES风险抵御体系,搭建灵活协同层化模型,提出电-气-热流网侧辨识指标,基于源荷侧界定风险度,综合考虑风险影响、灵活抵御、安全可靠及经济运行等因素,评估运行方案的可行性。以东北某区域系统为研究对象,仿真分析极端条件下HES失衡响应并评估其风险运行效益,验证本文所提HES灵活能流风险抵御体系的有效性。

## 1 极端条件下HES灵活能流风险抵御体系

### 1.1 极端条件下HES灵活能流交互框架

以东北某区域HES为对象研究其组成,系统运行通过电-气-热流实现。电流子系统分为源、网、荷3个部分:源侧主要包括上级电网、风光电源;网侧主要包括HES供电网络及移动式无功补偿装置(SVC、

收稿日期:2024-07-11;修回日期:2025-01-17

在线出版日期:2025-05-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB2404000)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2022YFB2404000)

SVG等);荷侧主要包括工商民用负荷及储能单元。气流子系统主要分为氢气和天然气,氢气由SOEC、P2G电解水产生,天然气由上级气网和P2G甲烷化供给。热流子系统由上级热网、热电联产(combined heat and power, CHP)、电锅炉(electric boiler, EB)、余热收集单元等组成。依据电-气-热流子系统特性,引入2种能流耦合设备:EB及CHP组成的电热耦合设备;SOEC/SOFC、P2G及燃气轮机(gas turbine, GT)组成的电气耦合设备。

结合该系统构成挖掘其灵活资源,包含:灵活供能(电、气、热源);调控机组(CHP、EB、GT、P2G、SOEC/SOFC、余热收集单元);灵活调控需求侧负荷(如可控工业负荷);共享储能(如储氢、储电、储气及储热单元)。

本文研究的HES位于高纬高寒地区,受地理气候等因素影响较大。冬春两季低温覆冰、光照不足、强风频发;夏秋两季水光充足、风能匮乏、雷电侵扰性强。研究表明,HES在恶劣天气、自然灾害等极端条件下的运行环境具有较强的季节变化性与失衡风险性<sup>[14]</sup>。因此,本文构建极端条件下灵活资源参与异构能流交互框架,如附录A图A1所示。

## 1.2 风险抵御体系

结合HES风险运行能流交互,本文提出一种风险抵御体系,包括源荷侧风险类型界定、网侧薄弱环节辨识及风险保供策略3个环节。

### 1.2.1 源荷侧风险类型界定

本文综合考虑极端条件下各子系统源荷侧的不确定性因素,划分风险场景类型。本文重点研究电流子系统,包括其源、荷侧的风险界定。

#### 1)源侧。

风光能源受季节性影响显著,系统由于风光不确定性造成供能短缺;另外雾霾、冰雹等恶劣天气也会限制分布式电源供能。设定源侧风险界定判据为<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} CS^{\text{av}} \leq \omega CS^{\text{nom}} \\ t_2 - t_1 \geq \psi_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: $t_1$ 、 $t_2$ 分别为计算的起、止时刻; $S^{\text{av}}$ 、 $S^{\text{nom}}$ 分别为计算时间内源侧分布式电源的平均出力及其额定值; $C$ 为平均容量因子; $\omega$ 为 $CS^{\text{av}}$ 和 $CS^{\text{nom}}$ 的比值,当 $\omega \geq 1$ 时,表明系统正常运行,当 $\omega < 1$ 时,表明系统处于非完全供能场景,其值越小则风险越高; $\psi_s$ 为供能受限时长,若源侧持续供能受限时长 $\psi_s$ 超过2 h,则表明系统面临长时间供能紧缺风险。

#### 2)荷侧。

负荷高峰期间供能紧缺,采用限电措施以满足系统用能需求;高寒低温环境中输电系统出现严重覆冰,导致线路断裂或塔架倒塌;雷电或强风侵袭可能引发电气设备故障或短路。受其极端条件影响,

负荷侧将面临用能短缺、中断及切除等风险。依据源侧界定方式,设定荷侧风险界定判据为:

$$\begin{cases} CL^{\text{av}} \leq \tau CL^{\text{nom}} \\ t_2 - t_1 \geq \psi_L \end{cases} \quad (2)$$

式中: $L^{\text{av}}$ 、 $L^{\text{nom}}$ 分别为计算时间内荷侧的平均负荷量及其额定值; $\tau$ 为 $CL^{\text{av}}$ 和 $CL^{\text{nom}}$ 的比值,当 $\tau \geq 1$ 时,表明系统正常运行,当 $\tau < 1$ 时,表明系统处于非完全用能场景,其值越接近1表明此时荷侧将达到峰值,其值越低表明荷侧将处于低谷期; $\psi_L$ 为用能受限时长,若荷侧持续用能短缺时长 $\psi_L$ 超过2 h,则表明系统面临长时间用能不足风险。

基于源、荷侧的风险界定判据,本文设定边界指标 $R_{\text{ex}}$ 以表征极端条件下系统风险程度,其数值越大表明风险程度越严重,具体表达式见式(3)。

$$\begin{cases} R_{\text{ex}} = \kappa_s \omega^2 + \kappa_L \tau^2 \\ \kappa_s + \kappa_L = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\kappa_s$ 、 $\kappa_L$ 分别为源、荷侧0-1状态变量,当 $\kappa_s$ 取0、 $\kappa_L$ 取1时,表明荷侧面临风险,当 $\kappa_s$ 取1、 $\kappa_L$ 取0时,表明源侧面临风险。

融合源荷侧风险类型,利用能源供给与损耗构建源网荷供需关系评价指标,如式(4)所示。

$$\begin{cases} D = CS^{\text{av}} - CL^{\text{av}} - CG^{\text{av}} \\ \Gamma_D = |D|/P_N \end{cases} \quad (4)$$

式中: $G^{\text{av}}$ 为计算时间内网侧的平均网损量; $D$ 为供需失衡量; $\Gamma_D$ 为供需关系评价指标; $P_N$ 为源/荷侧额定功率值,当 $D > 0$ 时, $P_N$ 表示源侧额定功率值,当 $D < 0$ 时, $P_N$ 表示荷侧额定功率值。式(4)为评价系统供需失衡程度提供量化评判标准。当供需平衡时, $D = 0$ ;当供大于需时, $D > 0$ , $\Gamma_D$ 数值表明供过于求的程度;当供小于需时, $D < 0$ , $\Gamma_D$ 数值表明供不应求的程度。

考虑极端条件下源侧风光波动与荷侧行为异常,从而引发系统供需失衡风险,本文通过风险界定判据将风险类型划分为非完全供/用能场景。与正常运行时新能源出力不确定导致的供需失衡相比,本文所研究的风险场景与正常场景兼顾源荷因素,考虑极端条件对系统安全可靠性的威胁,并利用边界指标衡量非完全供/用能场景的风险程度,对其进行量化评价,以辅助应急保供决策。

本文提出了源荷风险界定判据,其能够讨论极端条件下系统面临风险的边界和范围,着重考虑风险场景中源荷的波动与异常;而考虑不确定性源荷曲线的传统研究主要针对正常运行时风光与负荷波动问题。因此,本文工作在传统研究的基础上界定了风险运行的不确定性。

### 1.2.2 网侧薄弱环节辨识

本文依据源荷侧的风险界定判据,探寻风险场

景中网侧薄弱环节(包含支路及节点),采用指数型函数<sup>[16]</sup>构建电、热、气3个部分网侧风险辨识指标,其中热、气部分分别见附录A式(A1)、(A2)。电网以节点电压和支路功率为关键参量进行风险态势评估,风险辨识指标 $X$ 包含节点电压与支路功率,分别如式(5)、(6)所示。

$$\begin{cases} X_{i,t}^{u,up} = \frac{e^{U_{i,t}-U_i^{\max}}-1}{e-1} \\ X_{i,t}^{u,down} = \frac{e^{U_i^{\min}-U_{i,t}}-1}{e-1} \end{cases} \quad (5)$$

$$X_{ij,t}^l = \frac{e^{l_{ij,t}-l_{ij}^{\max}}-1}{e-1} \quad (6)$$

式中: $X_{ij,t}^l$ 为支路 $ij$ 在 $t$ 时刻的功率风险辨识指标; $X_{i,t}^{u,up}$ 、 $X_{i,t}^{u,down}$ 分别为节点 $i$ 在 $t$ 时刻的电压风险辨识指标 $X_{i,t}^u$ 的上、下限; $U_{i,t}$ 、 $U_i^{\max}$ 、 $U_i^{\min}$ 分别为节点 $i$ 在时刻 $t$ 运行电压标幺值及其上、下限; $l_{ij,t}$ 、 $l_{ij}^{\max}$ 分别为支路 $ij$ 在时刻 $t$ 传输有功功率标幺值及其上限。系统正常运行时节点电压与支路功率均满足限值要求<sup>[17]</sup>,风险辨识指标均小于0;反之,节点电压与支路功率越限,风险辨识指标大于0。若节点电压越上限,则风险辨识指标取 $X_{i,t}^{u,up}$ ,若节点电压越下限,则风险辨识指标取 $X_{i,t}^{u,down}$ ;风险辨识指标数值越大,表明该环节在电网中越脆弱。

考虑到极端条件下HES保供问题,通过式(5)、(6)计算电网运行风险指标,将网侧薄弱环节按等级进行划分<sup>[18]</sup>,如表1所示。

表1 薄弱环节等级划分

Table 1 Classification of weak links by level

| 等级划分 | 网侧风险辨识指标范围      | 保供状态 |
|------|-----------------|------|
| 一级   | $[0.8, \infty)$ | 紧急保供 |
| 二级   | $[0.5, 0.8)$    | 优先保供 |
| 三级   | $[0.2, 0.5)$    | 一般关注 |
| 四级   | $[0, 0.2)$      | 常规监控 |

网侧薄弱环节辨识旨在探寻极端条件下网侧风险部位,实现多种风险模式下系统潜在薄弱环节的全面识别;传统的 $N-1$ 静态安全分析主要关注元件故障时系统的安全稳定性,相对而言,网侧薄弱环节辨识基于异构能流交互风险分析,在系统风险响应识别与量化聚类方面具有明显优势。

本文利用风险类型界定与薄弱环节辨识,量化系统风险运行的供需关系并划分其保供状态,进而实现风险场景的精细化分类。

### 1.2.3 风险保供策略

依据风险界定类型,本文利用风险辨识指标寻找网侧薄弱环节,并按照其保供状态构建风险保供策略;发掘源荷侧灵活资源,参与HES异构能流协同交互,以提升系统风险韧性与灵活响应能力;同时,考虑网侧电压质量问题,利用无功补偿改善系统

运行稳定性。

1)源侧非完全供能场景。

a)紧急保供:网侧风险辨识指标 $X \geq 0.8$ 的薄弱环节为一级保供,该环节储能单元最先供电,保障重点单位用能;借助SOFC实现氢电转换,弥补缺额,从而降低损失,为故障抢修争取时间。

b)优先保供:网侧风险辨识指标 $0.5 \leq X < 0.8$ 的薄弱环节保供等级次之,针对该环节提升CHP和GT燃气供能,确保供电充足;储能及氢电单元弥补差额,以减轻危害,提高经济效益。

c)一般关注:网侧风险辨识指标 $0.2 \leq X < 0.5$ 的薄弱环节的风险等级较低,该环节需要采取调控负荷错峰用能,避免时段性耗能拥挤,从而抑制风险升级,削弱后续演变。

d)常规监控:在网侧风险辨识指标 $X < 0.2$ 的薄弱环节中,无风险威胁该环节稳定运行,需持续监控,及时处置问题。

2)荷侧非完全用能场景。

a)紧急保供:网侧风险辨识指标 $X \geq 0.8$ 的薄弱环节为一级保供,该环节迅速启动储能单元,补足负荷需求;同时借助SOEC及P2G单元实现电气转换,为抢修争取时间,以防电能过剩损失经济效益。

b)优先保供:网侧风险辨识指标 $0.5 \leq X < 0.8$ 的薄弱环节保供等级次之,针对该环节调整CHP、EB出力及GT燃气量,实现电热转换。确保及时用电,减轻风险。

c)一般关注:网侧风险辨识指标 $0.2 \leq X < 0.5$ 的薄弱环节的风险等级较低,该环节需要调控负荷改变用能计划,保证有序用电,避免风险升级,保障持续稳定。

d)常规监控:在网侧风险辨识指标 $X < 0.2$ 的薄弱环节中,无风险威胁该环节稳定运行,需持续监控,及时处置问题。

考虑网侧电压质量,利用无功补偿改善系统运行稳定性场景。在风险场景中针对电网稳定运行问题,研究电压变化与无功波动的关系,构建无功需求量指标 $\Delta Q$ ,表征网侧保供状态。

$$\begin{cases} \Delta U_{i,t} = |U_{i,t} - U_N| \\ \Delta Q_{i,t} = K_{\Delta U} \frac{\Delta U_{i,t}}{\Delta t} U_{i,t}^2 |Z_i| \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\Delta U_{i,t}$ 为节点 $i$ 在时刻 $t$ 的电压变化量; $U_N$ 为电压额定值; $\Delta Q_{i,t}$ 为节点 $i$ 在时刻 $t$ 的无功波动量; $K_{\Delta U}$ 为无功电压敏感系数; $Z_i$ 为节点 $i$ 等效阻抗; $\Delta t$ 为电压变化的时间间隔。

根据网侧无功需求量,确定各薄弱环节无功补偿策略。

1)紧急保供:网侧风险辨识指标 $X \geq 0.8$ 的薄弱环节为一级保供,该环节利用移动式无功补偿装置,

最短时间到达薄弱环节并投入使用。

2) 优先保供:网侧风险辨识指标  $0.5 \leq X < 0.8$  的薄弱环节保供等级次之,针对其风险等级划分,该环节依据用户的优先级别制定补偿预案,合理分配无功补偿资源。

3) 一般关注:网侧风险辨识指标  $0.2 \leq X < 0.5$  的薄弱环节的风险等级较低,该环节通过有序用电避免风险升级,关注电网各节点无功需求量,根据需求适当调整补偿预案。

4) 常规监控:在网侧风险辨识指标  $X < 0.2$  的薄弱环节中,无风险威胁该环节稳定运行,需持续监控,及时处置问题。

风险保供旨在满足极端条件下系统的可靠供电需求,保供策略的制定力求提升风险场景中系统安全稳定运行能力,确保其在可靠用能的前提下实现灵活资源的优化调度;考虑灵活性资源的优化研究更侧重于系统正常运行时的灵活性发掘与协同,进而提高其灵活裕度和运行效益。因此,本文所提保供策略基于风险界定与薄弱环节辨识,依据保供状态形成差异化应对措施,在此过程中发掘源荷灵活资源,参与 HES 能流交互协同,在提升系统风险韧性与灵活响应能力方面具有较大优势。

综上所述,本文通过源荷侧风险界定与网侧薄弱环节辨识,制定风险保供策略,形成 HES 风险抵御体系,如附录 A 图 A2 所示。

## 2 基于 HES 风险抵御体系的灵活协同层化模型

基于 HES 风险抵御体系,本文构建灵活协同层化模型。其中,风险评估层考虑极端条件对系统源网荷的影响,评估其安全风险态势;灵活抵御层挖掘灵活性资源,评估其响应特性;供电稳定层评估保供策略对电网稳定的影响;经济运行层分析多能协同调控成本。

### 2.1 风险评估层

利用源荷侧风险边界指标与网侧薄弱环节辨识指标,本文构建电流子系统风险评估函数  $f_1$  为:

$$f_1 = \lambda_1 R_{ex} + \lambda_2 X_{i,t}^u + \lambda_3 X_{ij,t}^l \quad (8)$$

式中:  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  为薄弱环节风险指标的权重系数,各项权重赋值采用主客观复合方法,原理见附录 A 式 (A3)。系统正常运行时  $f_1 = 0$ ,  $f_1$  越大表明系统运行发生风险的可能性越大。

### 2.2 灵活抵御层

针对供需失衡问题,本文研究灵活性资源参与源网荷互动效果,构建灵活抵御评估函数  $f_2$  为:

$$f_2 = \sum_{i \in T} |P_{i,t}^{\max} - P_{i,t}^{\min}| / P_N \quad (9)$$

式中:  $P_{i,t}^{\max}$ 、 $P_{i,t}^{\min}$  分别为节点  $i$  在时刻  $t$  的负荷高、低用

能量;  $T$  为采样时刻集合。  $f_2$  越小表明灵活性越好。

### 2.3 供电稳定层

利用风险保供策略降低风险影响,针对电压波动性,本文构建供电稳定性评估函数  $f_3$  为:

$$f_3 = \max_{i \in K} \left\{ \frac{1}{\Delta} \times \sum_{t \in T} \left| \frac{2U_{i,t+1} - U_{i,t}}{U_N} \right| \right\} \quad (10)$$

式中:  $K$  为电网节点集合;  $\max \{ \}$  为取最大值函数;  $\Delta$  为采样时刻总数,本文取 24。系统正常运行时  $f_3$  波动范围较小<sup>[19]</sup>,风险运行时  $f_3$  越限,当越上限时  $f_3$  越小表明系统稳定保供性能越好,当越下限时则相反。

### 2.4 经济运行层

在降低风险的前提下考虑系统的经济效益,研究保供策略的调控成本,本文构建经济评估函数  $f_4$  为:

$$f_4 = C_{\text{CHP}} + C_{\text{EB}} + \sum_{b=1}^B C_{\text{ESS},b} + C_g^{\text{UP}} + C_l^{\text{UP}} + C_{\text{loss}} \quad (11)$$

式中:  $C_l^{\text{UP}}$ 、 $C_g^{\text{UP}}$  分别为从上级电、气网购能成本;  $C_{\text{loss}}$  为网损成本;  $C_{\text{CHP}}$ 、 $C_{\text{EB}}$  分别为 CHP、EB 运行成本;  $C_{\text{ESS},b}$  为储能设备  $b$  运行成本;  $B$  为储能设备总数。上述参数的具体数学模型见附录 A 式 (A4) — (A9)。  $f_4$  越小表明成本越低。

### 2.5 协同效益层

本文综合考虑系统的风险评估函数  $f_1$ 、灵活抵御评估函数  $f_2$ 、稳定性评估函数  $f_3$  及经济评估函数  $f_4$ , 联立以上 4 个函数构建多目标协同效益。

本文利用风险界定判据与网侧薄弱环节辨识方法,提升了 HES 在极端条件下的风险识别能力;利用风险保供策略改善系统的风险运行稳定性。进一步,本文采用灵活协同层化模型,从系统风险性、灵活性、可靠性及经济性角度评估分析 HES 源荷互动的灵活协同效果。

## 3 算例分析

### 3.1 仿真结构与参数设置

东北某地区 HES 由 33 节点电网系统、30 节点热网系统及 20 节点气网系统<sup>[20]</sup>共同耦合,网架结构如附录 B 图 B1 所示,典型日风光出力及负荷用能如附录 B 图 B2 所示,具体参数见附录 B 表 B1 — B3。系统供能侧包含上级能源、CHP 以及风光能源,CHP 连接电网节点 1 与热网节点 30,并通过气网节点 5 向 CHP 供能。风电场 1 与风电场 2 分别由节点 18、28 接入电网,光伏场站接入电网节点 22。此外,电网节点 16、19、25、30 处连接可控工业负荷;在风光接入位置配置电氢耦合单元,引入 P2G 完成电-气-热流的灵活交互,同时配备余温收集单元,将 P2G 过程中产生的余热接入热网。

### 3.2 源荷侧风险类型界定验证

针对极端条件下 HES 源荷侧运行情况,本文选取 12:00 作为典型时刻,非完全供/用能风险场景作为代表性场景,利用风险界定判据,研究不同场景下的风险类型,源荷侧风险类型界定结果见附录 B 表 B4。结合系统配置,设源侧额定功率为 150 MW,荷侧额定功率为 120 MW,基于非完全供/用能风险场景,本文研究源荷侧供需失衡状态,计算系统供需关系评价指标  $\Gamma_D$ ,其中正常运行时供需失衡量的波动范围为  $\pm 10\% D_N$  ( $D_N$  为供需失衡量额定值)。不同场景下,供需失衡量及供需关系评价指标的计算结果见附录 B 表 B5。

由表 B5 可知,源侧供需关系评价指标数值一般高于荷侧,这说明源侧风险运行场景导致系统的供需失衡程度高于荷侧风险运行场景。在非完全供能场景中,风电装机容量较大且不确定性较强,故其出力缺额引起的系统供需失衡程度高于光伏。在非完全用能场景中,当系统运行于供需失衡状态时,耗能较高的环节供需失衡程度严重。因此,考虑源荷侧供需失衡程度的差异性,可以合理利用薄弱环节辨识与风险保供策略实现区域风险态势等级划分与无功补偿治理。

### 3.3 网侧薄弱环节辨识与风险保供状态验证

基于供需失衡风险类型界定判据计算各场景边界指标,结果见附录 B 表 B6。利用边界指标分析网侧薄弱环节,以非完全供能场景 1(风电场 1 的弃风量为风电装机容量的 40%)和非完全用能场景 2(节点 9 负荷切除)为例,研究 12:00 薄弱环节的节点辨识与系统的保供状态。网侧风险辨识指标运行结果见图 1。结合图 B2、B3,系统在时段[08:00, 20:00]用能较多,受弃风量的影响较为明显。负荷用电量越大,网侧风险辨识指标越高,薄弱环节位于节点 8—18 所在区域内。结果表明,能流汇集区域更易遭受源荷侧扰动的影响。

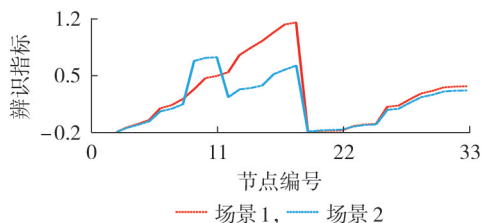


图1 典型场景中 12:00 网侧风险辨识指标

Fig.1 Indexes of grid-side risk identification in typical scenarios at 12:00

场景 1 中部分风电机组退出,导致邻近区域供电不足,进而影响节点邻域电压波动。按照薄弱环节等级划分保供状态,其中节点 14—18 处电压跌落较为严重,为紧急保供;节点 1—5 及节点 19—25 处

电压波动未超出限值,为安全状态。场景 2 中负荷切除导致供电过剩,使相邻节点电压波动,系统运行稳定性在该场景下所受影响程度低于场景 1。其中,节点 9—11 及节点 17、18 所在区域为优先保供,节点 1—5 及节点 19—25 所在区域为安全状态。不难看出,风险扰动和节点之间的距离将影响各环节的保供状态。

本文依据薄弱环节辨识结果分析典型时刻下系统节点的无功需求,为风险保供提供辅助决策,典型场景下各节点的无功需求见附录 B 图 B3。由图可知,虽然不同场景中系统的供需失衡程度具有差异性,但网侧电压波动与无功需求分布具有相似规律。其中,薄弱环节的保供状态等级越高,无功需求越大。因此,本文根据保供等级采用区域化治理策略,达到因地制宜的效果。

### 3.4 基于风险抵御体系 HES 灵活协同层化模型验证

基于风险抵御体系,本文利用灵活协同层化模型制定各场景运行方案。

1) 方案 1。模拟 HES 正常/风险运行,考虑源荷侧风险边界指标与薄弱辨识指标,利用风险评估层模型分析系统的风险性;结合供电稳定层与经济运行层模型,评估供需运行风险对系统造成的影响。

2) 方案 2。在方案 1 的基础上引入灵活抵御层模型,分析风险抵御体系对系统抗风险能力的提升效果,其中灵活性资源包括 CHP、GT、EB 等调控机组、共享储能及大型工业可控负荷。

3) 方案 3。在方案 2 的基础上,进一步研究低碳单元参与多能流交互的运行效果,其中低碳单元包含 P2G、SOEC / SOFC 及余温收集单元等。

各场景采用改进粒子群优化算法<sup>[21]</sup>计算,优化求解系统运行多样性解集。依据权重赋值确定方式以及系统需求设定风险评估权重序列为(0.3, 0.4, 0.3),各场景中不同方案的系统运行结果见附录 B 表 B7。表中,不同场景中各方案的系统运行指标存在较大差异。在相同方案中对比分析各场景的协同效益,方案 1 中非完全供能场景的系统风险性较非完全用能场景提高 3.85%~23.08%,方案 2 中灵活抵御模型使非完全供能场景的系统风险性较非完全用能场景降低 8.57%~18.92%,可靠性提升 1.08%~4.17%,灵活性提升 1.19%~7.93%,经济性降低 4.64%~8.36%。上述结果表明,灵活抵御模型可降低场景类型对系统运行风险的影响,增加其成本投入能够提升系统可靠性及灵活性。方案 3 中通过低碳单元可进一步提升系统风险调控的灵活性,非完全供能场景的系统灵活性较非完全用能场景提升 0.18%~5.25%,同时引入低碳单元可实现电-气-热多能流转换,使经济成本降低 1.14%~5.49%。这说明低碳单元可进一步提升系统灵活性,并通过多能

流交互增强系统经济运行能力。

进一步分析相同场景中不同运行方案的协同效益,以2个典型场景为例,方案1中非完全供/用能场景下系统的风险性较正常运行时均明显增大,可靠性分别降低42.05%、31.82%,但由于部分风电机组的退出和负荷用能的减少,使其运行成本分别降低5.09%、6.83%。方案2通过灵活抵御模型优化系统运行,使风险评估、灵活抵御及供电稳定等指标较方案1均有效改善,其中系统风险性分别降低23.17%、10.13%,灵活性分别增加11.91%、14.05%,可靠性分别提升26.40%、19.83%;同时,由于调控机组、共享储能等参与系统运行,使其成本分别增加17.77%、18.17%,因此合理利用灵活资源可有效提升系统的风险响应韧性及调控灵活性。方案3考虑低碳单元,与方案2相比,风险性分别降低6.35%、7.04%,灵活性分别提升7.71%、6.19%,可靠性分别提升3.26%、3.23%,经济成本分别降低1.58%、5.28%。结果表明,通过低碳单元参与调控可以降低系统风险运行的经济成本,并进一步改善其协同效益。

研究HES的需求响应,各场景下的负荷波动情况见附录B图B4。场景1中,风电场1部分机组退出导致新能源出力明显下降,负荷用量受源荷关系的显著影响;与正常情况相比,负荷昼高峰时段突增,夜低谷时段锐减。场景2中,节点9处负荷切除,导致其峰谷波动显著。故风险场景中系统削峰填谷压力增加,出现供需失衡等问题,影响其安全与灵活性。

针对上述情况,挖掘各类灵活资源,考虑方案2、3的协同调控,本文研究供需失衡风险下HES源荷储时序响应特性,如图2所示。

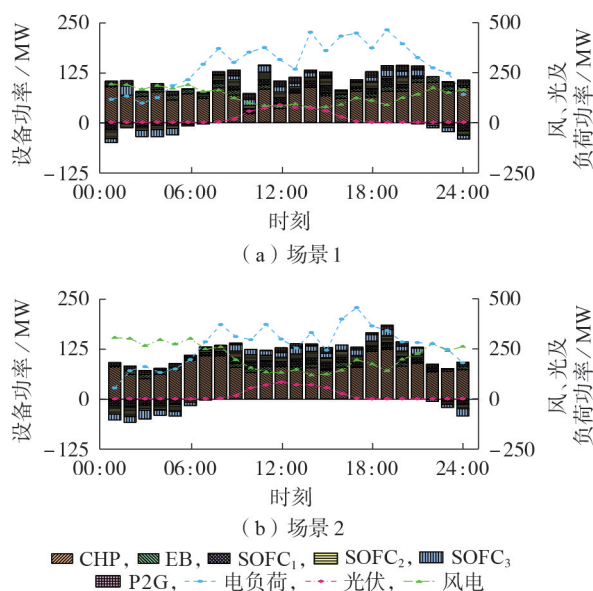


图2 典型场景中HES时序响应

Fig.2 Time series response of HES in typical scenarios

场景1中方案2引入灵活抵御模型参与HES能流协同,避免供需失衡风险。[22:00,(次日)05:00]为夜间负荷低谷时段,风光出力难以满足用电需求,调整通过CHP出力以满足负荷需求,SOEC与P2G通过多能流交互,促进电-氢-气资源的灵活互动并降低弃风量。[06:00,21:00]为昼间负荷高峰时段,负荷用电量的逐步增加,风光能源受限,日间热负荷降低,通过调节CHP供热和供电量,改善系统供需不匹配问题;该时段SOFC释放电能可有效补充供电缺额,缓解极端条件下HES削峰填谷压力。场景2中负荷切除导致系统的供需不匹配。夜间SOEC、P2G吸收盈余电能,平抑风能波动;昼间负荷用量增加,风光出力与负荷用能不匹配问题加剧,方案2利用各类灵活资源进行调控,例如CHP降低电能,SOFC释放电能满足间歇性负荷波动需求,并提高能源利用率。由此可见,在非完全供/用能场景中,各类灵活资源参与多能协同可以有效抵御供需失衡风险。

进一步分析方案3的HES能流协同效果,以正常场景和场景2为例,P2G与余热收集单元的时序响应结果如附录B图B5所示。在供需失衡风险下,夜间负荷低谷时段,P2G、电氢耦合单元参与调控,产气量峰值相较正常情况显著增加;余热收集单元收集能流交互过程中产生的余热,制热量峰值相较正常情况明显提升。昼间负荷高峰时段,P2G、余热收集等单元补足源荷差额;结合图2,该时段内低碳单元可缩短源荷差额,从而降低供需失衡影响。结果表明,低碳单元进一步平衡供需关系,提升系统风险抵御能力。

本文结合各类灵活资源的时序响应情况,研究灵活协同层化模型参与风险保供时对网侧薄弱环节的改善效果,网侧风险辨识指标见图3。

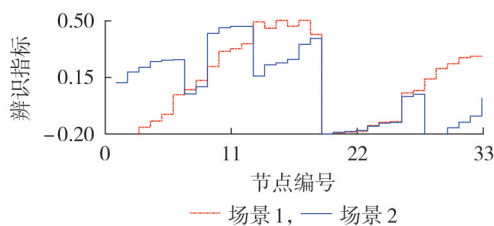


图3 灵活协同层化模型中网侧风险辨识指标

Fig.3 Indexes of grid-side risk identification in flexible collaborative layered model

结合图1与图3,对比分析灵活协同层化模型参与风险保供前、后系统的保供状态。在场景1中保供级别最高的薄弱节点14—18引入调控机组及储能单元参与紧急保供,结合无功补偿策略,电压波动显著降低;场景2中节点9—11以及节点17、18所在区域优先保供,通过调整CHP、EB出力及GT燃气量

确保及时用电,削弱后续演变。典型场景中各薄弱环节均得到有效改善。由此可见,灵活资源参与风险抵御可减轻供需失衡对HES网侧的影响,显著提高系统抗干扰能力。

#### 4 结论

本文研究HES在极端条件下的风险抵御体系,构建风险场景灵活协同层化模型,得出以下结论。

1)结合灵活资源参与异构能流交互,提出风险抵御体系,利用边界指标描述源荷侧风险程度,辨识网侧薄弱环节形成风险抵御策略,可对系统运行风险进行量化评估,并有效提升系统应对风险的抗干扰能力。

2)本文提出灵活协同层化模型,从稳定性、灵活性及经济性等角度评估HES源网荷互动抵御风险的协同效果。结果表明,合理利用灵活资源可有效提升系统的风险响应韧性与调控灵活性。

3)通过引入P2G、余热收集等低碳单元,可进一步平衡系统供需关系,促进灵活资源对网侧薄弱环节的改善,从而提升系统的风险抵御能力。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 参考文献:

- [1] 杨锡运,陶准,黄欣欣,等. 基于异构能源区块链的综合能源系统交易模型[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 224-231.  
YANG Xiyun, TAO Zhun, HUANG Xinxin, et al. Transaction model of integrated energy system based on heterogeneous energy blockchain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 224-231.
- [2] 辛保安,李明节,贺静波,等. 新型电力系统安全防护体系探究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5723-5732.  
XIN Baoan, LI Mingjie, HE Jingbo, et al. Research on security defense system of new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5723-5732.
- [3] 孙华东,徐式蕴,许涛,等. 电力系统安全稳定性的定义与分类探析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7796-7809.  
SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Research on definition and classification of power system security and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7796-7809.
- [4] 赵洪山,林诗雨,曲岳晗,等. 考虑极端天气冲击过程的风电机组竞争失效可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4): 40-47.  
ZHAO Hongshan, LIN Shiyu, QU Yuehan, et al. Reliability evaluation of wind turbine competitive failure considering extreme weather impact process[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 40-47.
- [5] 江西省人民政府办公厅. 江西省人民政府办公厅关于印发江西省大面积停电事件应急预案的通知[J]. 江西省人民政府公报, 2023(13): 10-27.
- [6] 侯验秋,丁一,包铭磊,等. 电-气耦合视角下德州大停电事故分析及对我国新型电力系统发展启示[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7764-7775.  
HOU Yanqiu, DING Yi, BAO Minglei, et al. Analysis of Texas blackout from the perspective of electricity-gas coupling and its enlightenment to the development of China's new power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7764-7775.
- [7] 姚福星,苗世洪,涂青宇,等. 考虑强对流天气的乡镇配电网树线矛盾风险预警及优化处理[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6188-6203.  
YAO Fuxing, MIAO Shihong, TU Qingyu, et al. Risk warning and optimization processing for tree-line contradiction in rural distribution network considering severe convective weather[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 6188-6203.
- [8] FAN H, WANG C Y, LIU L, et al. Review of uncertainty modeling for optimal operation of integrated energy system[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 9: 641337.
- [9] RABIEE A, FESHKI FARAHANI H, KHALILI M, et al. Integration of plug-in electric vehicles into microgrids as energy and reactive power providers in market environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(4): 1312-1320.
- [10] 徐维炜,陈红坤,汤骏,等. 计及配电网灵活性的峰谷电价分布鲁棒定价策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(12): 178-186.  
XU Weiwei, CHEN Hongkun, TANG Jun, et al. Distributionally robust pricing strategy of peak-valley electricity price considering flexibility of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(12): 178-186.
- [11] 邱星宇,吴毓峰,王梓耀,等. 计及并离网频率约束的微电网容量优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 166-177.  
QIU Xingyu, WU Yufeng, WANG Ziyao, et al. Optimal configuration method of microgrid capacity considering grid connection and islanding frequency constraints[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 166-177.
- [12] 刘洋,谢平平,黄炳开,等. 基于智能储能软开关的多馈线共享储能鲁棒性规划[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 238-245.  
LIU Yang, XIE Pingping, HUANG Bingkai, et al. Robust planning of multi-feeder-sharing energy storage based on E-SOP[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 238-245.
- [13] 罗潇,任洲洋,温紫豪,等. 考虑氢能系统热回收的电氢区域综合能源系统日前优化运行[J]. 电工技术学报, 2023, 38(23): 6359-6372.  
LUO Xiao, REN Zhouyang, WEN Zihao, et al. A day-ahead dispatching method of regional integrated electric-hydrogen energy systems considering the heat recycle of hydrogen systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(23): 6359-6372.
- [14] 王强钢,吴雪琴,杨龙杰,等. 考虑设备变工况特性和灵活性供需匹配的园区综合能源系统优化配置模型[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(3): 20-28, 37.  
WANG Qianggang, WU Xuehui, YANG Longjie, et al. Optimal allocation model of community integrated energy system considering off-design performance of device and flexible supply-demand matching[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 20-28, 37.
- [15] 姜海洋,杜尔顺,马佳豪,等. 考虑长周期供需不平衡风险的新型电力系统规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 5845-5858.  
JIANG Haiyang, DU Ershun, MA Jiahao, et al. Power system optimal planning method considering long-term imbalance risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 5845-5858.
- [16] 任洪波,张宇晨,吴琼,等. 面向韧性提升的综合能源系统规划与运行调度研究综述[J/OL]. 电力系统自动化. (2024-06-05)[2024-11-18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240604.1438.010.html>.

- [17] 徐玉韬,冯起辉,谈竹奎,等. 考虑转供与重构协同的多端柔性互联配电网供电恢复策略[J]. 电工技术学报,2024,39(9):2696-2709.  
XU Yutao, FENG Qihui, TAN Zhukui, et al. Optimal power restoration strategy for multi-terminal flexible interconnected distribution networks based on flexible interconnection device and network reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9):2696-2709.
- [18] 刘威,张东霞,丁玉成,等. 基于随机矩阵理论与熵理论的电网薄弱环节辨识方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(20):5893-5901.  
LIU Wei, ZHANG Dongxia, DING Yucheng, et al. Power grid vulnerability identification methods based on random matrix theory and entropy theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20):5893-5901.
- [19] 吴志,李广焕,张小平,等. 基于单端口耦合等值的配电网静态电压稳定指标分析及应用[J]. 电力系统自动化,2023,47(23):44-54.  
WU Zhi, LI Guanghuan, ZHANG Xiaoping, et al. Analysis and application of static voltage stability indices for distribution network based on single-port coupling equivalence [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23):44-54.
- [20] CHEN Z X, ZHANG Y J, JI T Y, et al. Coordinated optimal dispatch and market equilibrium of integrated electric power and natural gas networks with P2G embedded[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3):495-508.
- [21] 王典,潘超,鹿丽,等. 计及风-光时序相关特性的源-储并网阶段式规划策略[J]. 东北电力大学学报,2020,40(4):1-10.  
WANG Dian, PAN Chao, LU Li, et al. Source-storage staged planning strategy considering wind-photovoltaic timing related characteristics[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2020, 40(4):1-10.

#### 作者简介:

潘 超(1981—),男,教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定与电磁兼容(E-mail:31563018@qq.com);

李载源(2000—),男,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为综合能源系统(E-mail:2634803557@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

## Risk defense and flexible collaboration of heterogeneous energy system under extreme conditions

PAN Chao, LI Zaiyuan, TANG Hua, YANG Cheng, LAN Bing

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** Considering the impact of extreme conditions such as natural disasters and severe weather in Northeast China, the risk operation characteristics of electricity-gas-heat heterogeneous energy system are studied. The flexible resources in the domain are excavated, which participates in heterogeneous energy flow interaction. A risk defense system is proposed, including risk definition on the source-load side, identification of weak links on the grid side, and supply guarantee strategy for risk. A flexible collaborative layered model is established to analyze and regulate the risk operation of the system from four levels: evaluation, defense, stability and economy. The simulation of a heterogeneous energy system in a certain region of Northeast China is carried out, and a variety of collaborative defense schemes for risk scenarios are studied. The risk defense system is used to analyze the risk response resilience and flexible collaborative ability of the system. The results show that the risk defense system can effectively realize the situation awareness and differentiated governance of risk, and the low-carbon unit can further balance the supply-demand relationship of the system, which verifies that the flexible collaboration based on risk defense can effectively reduce the impact of extreme conditions on the system.

**Key words:** heterogeneous energy system; risk; flexibility resources; supply-demand imbalance; supply guarantee