

输配一体化综合能源系统的运行多指标评估方法

何宇斌^{1,2}, 张伊宁¹, 马光¹, 郭创新¹, 周昱甬³, 叶刚进³

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510623;
3. 国网杭州供电公司, 浙江 杭州 310000)

摘要:为量化风电波动和设备随机故障等多重不确定因素对综合能源系统的影响,提出了一种输配一体化综合能源系统的运行多指标评估方法。在模型上,建立了含上层输网级能源网架和下层配网级能源枢纽的统一架构,精细刻画电/气/热等多种能源在发输配用全流程的耦合特性;在方法上,通过状态空间分割分别处理风电波动和设备故障场景,提出混合等分散蒙特卡洛抽样法改善评估收敛特性,并采用连续线性化方法求解最优多能流问题以平衡算法精度和速度,进一步提升评估效率;在指标上,面向低碳运行环境,建立计及运行经济性、系统可靠性、风电消纳性、能源环保性等在内的多指标评估框架,全面描述多重不确定因素对系统运行的影响。通过对包含17个能源枢纽的RTS79-40Node综合能源测试系统进行分析,验证了所提方法的有效性与合理性。

关键词:综合能源系统;能源枢纽;能源管理;可靠性分析;混合等分散蒙特卡洛抽样;连续线性化;最优多能流
中图分类号:TM 711;TK 01 **文献标志码:**A **DOI:**10.16081/j.epae.201908021

0 引言

综合能源系统 IES(Integrated Energy System)是现代智能电网的发展方向,亦是支撑“第三次工业革命”的核心技术^[1]。2015年国家发改委能源局明确提出“加强能源互联,促进多种能源优化互补”^[2]。随着能源互联网战略的推进,现代能源系统中存在的多重随机因素如风电波动、设备故障等会对其运行带来严重影响,如何合理量化 IES 的运行安全可靠,对指导系统运行方式和状态检修具有重要意义^[3]。

近年来,国内外学者已经逐步针对 IES 的运行可靠性评估展开相应研究工作。文献[4]从物理、信息和市场层面分析了能源互联网可靠性评估现有研究的理论方法及其存在的不足,提出关键性科学问题及未来的研究方向。与电力系统类似,IES 的可靠性评估分为系统建模、评估方法、指标体系3个重要环节。针对输网层面,文献[5]研究了电-气耦合系统的供能可靠性问题,并计及了气网传输的时滞特性,对电、气网络运行方式进行协调。文献[6]从随机故障和源荷波动的角度出发,基于电转气装置和燃气机组 NGU(Natural Gas-fired Unit)的能流模型,从系统运行层面提出了含电转气的 IES 可靠性评估方法。针对配网层面,文献[7]提出在配网级 IES 运行过程中,计及用户对不同能源的品位差异进行多

能耦合的需求协调,尽可能提升孤岛模式下的运行可靠性。配网层 IES 可抽象为能源枢纽 EH(Energy Hub)的形式,文献[8]从多能流耦合特性出发,对单一能源枢纽的可靠性评估方法进行研究,并将其分别应用于能源枢纽的长期规划层面。但目前的研究仅单独面向输电网或配电网层级,缺乏对输配一体的 IES 的统一评估。

在评估方法方面,一般采用蒙特卡洛(MC)模拟法^[9]、解析法^[5]或两者相结合^[7]的方式进行。其中,MC 模拟由于鲁棒性强且不需显性表达式,应用最为广泛。文献[9]采用概率能量流对多能系统运行状态进行定量表述,为 IES 的安全评估体系提供基础。文献[10]进一步提出等分散 MC 抽样用于电网运行评估,通过对故障空间的分割提升评估效率,但未考虑风电波动。在每次场景评估中都需要对非凸非线性多能流模拟调度问题进行优化。已有学者对多能流问题的线性化^[11]和二阶锥凸化^[12]方法进行研究,以提升运行优化问题的求解效率。但目前,由于能源互联网环境下随机因素增多,如何实现系统评估的快速计算是未来的重要研究方向。

在指标体系方面,以上相关研究的评估指标主要集中在供能可靠性方面。文献[13]从能源、装置、配电、用户4个环节设计了配网层 IES 的评估指标,但未考虑随机因素的影响。目前能源互联网的指标体系设计仍处于起步阶段,对环保性、经济性、能效性等方面指标的量化分析有待深入。

针对上述问题,本文首先建立了基于能源枢纽的输配一体化 IES 模型;其次,对风电波动和设备故障场景进行状态空间分割,并采用混合等分散蒙特卡洛 MS-MC(Mixed Scatter-Monte Carlo)抽样法进

收稿日期:2019-02-20;修回日期:2019-06-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877190);国网浙江省电力有限公司科技项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877190) and the Science and Technology Program of State Grid Zhejiang Electric Power Corporation

行快速评估,量化 IES 在运行经济、系统可靠、风电消纳、能源环保、转化效率等多类指标特性。模拟调度环节则采用连续线性化方法对多能流优化问题快速求解,提升评估效率。

1 IES 的输配一体化建模

通常而言,一个完整的 IES 可认为由输网层传输网架和配网层能源枢纽共同构成^[14]。上层传输网架是指省市级的高压输电网络及其配套的输气网络,通过长距离、大容量的能源输送将电力及天然气资源输送到相应区域。随着能源互联网战略推进及分布式能源的建设,以区县、园区为单位的区域级 IES 开始涌现,本节将区域级 IES 中的低压配网及其内部配套的能源转换设备抽象为能源枢纽的形式。图 1 为输配一体化 IES 的典型拓扑结构,配网级能源转化设备包括热电联产 CHP (Combined Heat Power) 机组、电锅炉 EB (Electric Boiler) 和蓄热设备 HS (Heat Storage)。与之相对应地,系统运行约束包括输网级和配网级 2 个部分。

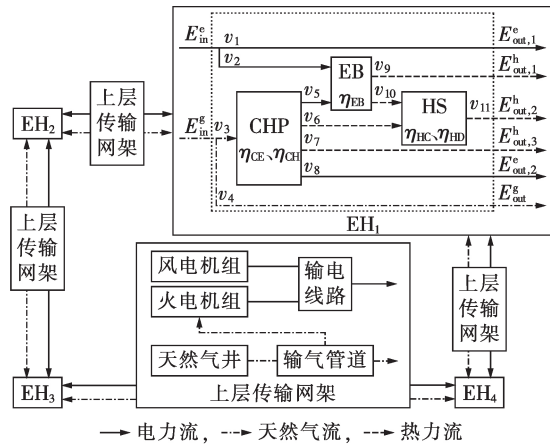


图1 输配一体化的 IES 典型拓扑结构

Fig.1 Typical topology structure of IES connecting transmission and distribution levels

1.1 输网级能源网架约束

输网级能源网架约束包括输电网约束和输气网约束两部分,以下分别对各能源系统约束进行阐述。

1.1.1 输电网络约束

输电网络约束包括非燃气机组的运行费用二次函数式(1)、机组出力约束式(2)、网络电力平衡约束式(3)、输电线路直流潮流方程式(4)、输电线路传输容量约束式(5)、节点相角约束式(6)和平衡节点约束式(7)。

$$F_i^e(P_i) = \alpha_{1,i} I_i + \alpha_{2,i} P_i + \alpha_{3,i} P_i^2 \quad (1)$$

$$P_i^{\min} I_i \leq P_i \leq P_i^{\max} I_i \quad (2)$$

$$\sum_{i \in C_{G,j}} P_i + \sum_{q \in C_{W,j}} (P_{W,q} - S_{W,q}) - \sum_{hj \in C_{F,j}} f_{hj} + \sum_{hj \in C_{E,j}} f_{hj} - \sum_{r \in C_{EH,j}} E_{in,r}^e = 0 \quad (3)$$

$$f_{hj} = I_{hj} (\theta_h - \theta_j) / X_{hj} \quad (4)$$

$$-f_{hj}^{\max} \leq f_{hj} \leq f_{hj}^{\max} \quad (5)$$

$$-\theta_j^{\max} \leq \theta_j \leq \theta_j^{\max} \quad (6)$$

$$\theta_{ref} = 0^\circ \quad (7)$$

其中, P_i 为机组 i 的出力, $i \notin N_{GU}$, N_{GU} 为燃气机组集合; $P_i^{\min}$ 、 $P_i^{\max}$ 分别为机组 i 出力的下限、上限值; $F_i^e(P_i)$ 为机组 i 的运行费用; $\alpha_{1,i}$ 、 $\alpha_{2,i}$ 、 $\alpha_{3,i}$ 为费用函数各次项参数; I_i 、 I_{hj} 为 0-1 整数变量, 分别表示机组 i 和线路 hj 的故障情况, 其取值为 0 表示发生故障, 取值为 1 表示未发生故障; $P_{W,q}$ 和 $S_{W,q}$ 分别为风电场 q 的可用出力和弃风量; f_{hj} 为线路 hj 的电力潮流, 其正负表示潮流方向; $f_{hj}^{\max}$ 为线路 hj 的最大传输容量; $E_{in,r}^e$ 为节点 j 上所带能源枢纽 r 入口端的电力需求; $C_{G,j}$ 、 $C_{EH,j}$ 和 $C_{W,j}$ 分别为节点 j 所连机组、能源枢纽和风电场的集合; $C_{F,j}$ 和 $C_{E,j}$ 分别为以节点 j 为起点和终点的线路集合; X_{hj} 为线路 hj 的电抗; θ_h 、 θ_j 分别为节点 h 、节点 j 的电压相角; $\theta_j^{\max}$ 为电压相角限值; θ_{ref} 为平衡节点的电压相角。

1.1.2 输气网络约束

输气网络为高压管道, 且本文为单时间点运行评估问题, 稳态建模具备较好的计算精度和效率, 气网采用稳态模型进行分析^[15]。输气网络的约束包括燃气机组耗气量函数式(8)、网络天然气平衡方程式(9)、稳态天然气 Weymouth 方程式(10)、节点气压约束式(11)、天然气井供气约束式(12)、加压站升压约束式(13)和加压站传输约束式(14)。

$$P_i = \eta_{G2P} F_i^{GAS} \quad i \in N_{GU} \quad (8)$$

$$\sum_{sp \in C_{S,m}} v_{sp} - \sum_{mn \in C_{CF,m}} g_{mn} + \sum_{mn \in C_{GE,m}} g_{mn} - \sum_{c \in C_{CF,m}} h_c + \sum_{c \in C_{CE,m}} h_c - \sum_{r \in C_{EH,m}} \gamma E_{in,r}^g - \sum_{i \in C_{U,m}} F_i^{GAS} = 0 \quad (9)$$

$$g_{mn} |g_{mn}| = I_{mn} (K_{mn}^{gf})^2 (\pi_m^2 - \pi_n^2) \quad (10)$$

$$\pi_m^{\min} \leq \pi_m \leq \pi_m^{\max} \quad (11)$$

$$v_{sp}^{\min} I_{sp} \leq v_{sp} \leq v_{sp}^{\max} I_{sp} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \pi_n \leq \pi_m \leq \Gamma_c \pi_n & I_c = 1 \\ \pi_m = \pi_n & I_c = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$0 \leq h_c \leq h_c^{\max} \quad (14)$$

其中, $i \in N_{GU}$; γ 为天然气单位能量的体积系数, 本文中取 $107.51 \text{ m}^3 / \text{MW}$, 用以统一输、配网中的天然气量纲; η_{G2P} 为燃气机组的气转电系数, 由机组效率和 γ 综合得到, 本文取 $0.00744 \text{ MW} / \text{m}^3$; I_{mn} 、 I_{sp} 、 I_c 为 0-1 整数变量, 分别表征管道 mn 、天然气井 sp 和加压站 c 的故障情况, 其取值为 0 表示发生故障, 取值为 1 表示未发生故障; v_{sp} 为天然气井 sp 的供气量; g_{mn} 为线路 mn 的天然气潮流, 其正负表示潮流方向; h_c 为流进加压站的潮流; F_i^{GAS} 和 $E_{in,r}^g$ 分别为气节点 m 上燃气机组和能源枢纽 r 入口端的天然气需求; $C_{S,m}$ 、 $C_{EH,m}$

和 $C_{U,m}$ 分别为气节点 m 所带天然气井、能源枢纽和燃气机组的集合; $C_{GF,m}$ 和 $C_{GE,m}$ 分别为以气节点 m 为起点和终点的输气管道集合; $C_{CF,m}$ 和 $C_{CE,m}$ 分别为以气节点 m 为进口和出口的加压站集合; K_{mn}^{gf} 为管道特性参数; π_n 、 π_m 分别为节点 n 、节点 m 的气压; $\pi_m^{\min}$ 和 $\pi_m^{\max}$ 分别为节点 m 气压的最低与最高限值; $v_{sp}^{\min}$ 和 $v_{sp}^{\max}$ 分别为天然气井 sp 供气量的最低与最高限值; Γ_c 为升压比例; $h_c^{\max}$ 为加压站传输容量限制。

1.2 配网级能源枢纽约束

配网级的 IES 可表述为能源枢纽的形式。能源枢纽从上层传输网架获取资源,并将其转化为电/气/热形式配送至终端用户。传统能源枢纽建模采用调度因子描述输入输出量间的转化关系,但会引入非线性项。本文参考文献[16]的方法,从能量流

$$C_r = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_{HC} & 0 & 0 & 0 & \eta_{HC} & -1/\eta_{HD} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_{CE} & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_{CH} & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \eta_{EB} & 0 & 0 & \eta_{EB} & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中, $E_{in,r}^e$ 、 $E_{in,r}^g$ 、 $E_{in,r}^h$ 和 $E_{out,r}^e$ 、 $E_{out,r}^g$ 、 $E_{out,r}^h$ 分别为电、气、热能源在能源枢纽中的输入和输出量; $v_{1,r}$ — $v_{11,r}$ 为能源枢纽中的其他能量流,与图1对应; η_{EB} 为 EB 转化率; η_{CE} 和 η_{CH} 分别为 CHP 机组对电和热的转化率; η_{HC} 和 η_{HD} 分别为 HS 的充、放热效率; ΔE_r 为储热变化量。此外,另有以下的能源枢纽能量流补充约束:式(19)表征除了储热变化量 ΔE_r 外, EH 中其他输入量均为具有固定方向的非负能量流;式(20)—(23)分别对蓄热设备的充/放热能力、储热变化量和储热容量进行约束;式(24)和式(25)分别对 CHP 机组和 EB 的运行功率进行限制。

$$E_{in,r}^e, E_{in,r}^g, v_{1,r}, v_{2,r}, \dots, v_{11,r} \geq 0 \quad (19)$$

$$v_{6,r} + v_{10,r} \leq H_{U,r} H_{C,r}^{\max} \quad (20)$$

$$v_{11,r} \leq (1 - H_{U,r}) H_{D,r}^{\max} \quad (21)$$

$$0 \leq S_{H,r} \leq S_{H,r}^{\max} \quad (22)$$

$$S_{H,r} = S_{H,r,0} + \Delta E_r \quad (23)$$

$$v_{3,r} \leq C_{HP,r}^{\max} \quad (24)$$

$$v_{2,r} + v_{5,r} \leq E_{B,r}^{\max} \quad (25)$$

其中, $H_{C,r}^{\max}$ 和 $H_{D,r}^{\max}$ 分别为蓄热设备的充、放热限值; $H_{U,r}$ 为 HS 的充、放热状态,其值为 1 时表示充热,值为 0 时表示放热; $S_{H,r}$ 和 $S_{H,r}^{\max}$ 分别为储热量和储热量限值; $S_{H,r,0}$ 为初始储热量; $C_{HP,r}^{\max}$ 和 $E_{B,r}^{\max}$ 为设备运行功率限值。注意到能源枢纽建模下对各能源转化设备进行抽象描述,如将同一能源枢纽中的多台 CHP 机

传递分配的角度建立线性化增广耦合矩阵,提升建模效率。建模中仅从能量流传输、配送的角度对配网能量流进行分析,而不作细化的潮流计算。图1给出了能源枢纽的典型内部结构与能量流关系,例如 CHP 机组可由上层网络获取天然气,一方面产生电力配送至 EB 及用户终端,另一方面产生热能配送至 HS 及用户终端。相应地,此能源枢纽可建模为如下的线性多输入-多输出端口模型:

$$V_{out,r} = C_r V_{in,r} \quad (15)$$

其中, $V_{in,r}$ 和 $V_{out,r}$ 分别为第 r 个能源枢纽的增广输入-输出能量流矩阵; C_r 为增广的能源枢纽线性化耦合矩阵^[16]。

$$V_{in,r} = [E_{in,r}^e, E_{in,r}^g, \Delta E_r, v_{1,r}, v_{2,r}, \dots, v_{11,r}]^T \quad (16)$$

$$V_{out,r} = [E_{out,r}^e, E_{out,r}^g, E_{out,r}^h, 0, \dots, 0]^T \quad (17)$$

组进行等效,各设备参数采用该类设备的典型参数表示。

式(26)和式(27)表示允许对终端用户的电、气、热需求进行一定程度的切负荷,以应对供能不足或紧急拥塞情况。

$$E_{out,r}^{(\cdot)} = D_{E,r}^{(\cdot)} - L_{D,r}^{(\cdot)} \quad (26)$$

$$0 \leq L_{D,r}^{(\cdot)} \leq L_{D,r}^{(\cdot),\max} \quad (27)$$

其中, $\{\cdot\}=e$ 、 $\{\cdot\}=g$ 、 $\{\cdot\}=h$ 分别表征终端用户中的电、气、热能源需求形式; $D_{E,r}^{(\cdot)}$ 为终端用户对 3 种能源的原始需求; $L_{D,r}^{(\cdot)}$ 为 3 种能源的紧急切负荷量; $L_{D,r}^{(\cdot),\max}$ 为切负荷限值。

2 MS-MC 抽样

本文考虑的随机因素包括风电波动和设备故障 2 种类型,传统可采用 MC 方法进行抽样评估,但存在评估效率较低的问题。文献[10]提出了一种等分散 MC 抽样方法,通过细分设备故障空间以加快收敛效率,但只能处理离散特征的随机因素。为综合考虑风电波动和随机故障,本文将其进一步发展可为考虑连续特征随机因素(即风电波动)的 MS-MC 抽样方法。其核心思想是通过状态空间分割^[17]将系统状态分为风电波动空间和设备故障空间 2 个特征空间。连续的风电波动空间采用反向场景削减^[18]的方法获得典型场景集,再抽样获得具体风电波动情

况;离散的设备故障空间则采用等分散 MC 抽样进行以提升收敛效率。最后,整合两部分状态空间获得整体系统的运行状态。此外,考虑到本文研究为单时间点的运行评估问题,且风电波动采用历史数据拟合,暂不计及随机因素的时空相关性,其可通过在随机因素建模中进行一定的预处理实现。

2.1 风电空间的场景削减抽样

风电场的实际可用出力与预测出力间通常存在误差。本文采用 TLS(T-Location-Scale)分布构建风电场出力波动模型,此类分布由于在拟合风电预测误差方面效果突出,在风电预测方面广为应用^[19]。首先,基于历史数据拟合预测误差的概率分布参数。以此为基础,采用反向场景削减的方法获得 S_N 个带概率属性的典型风电场景^[18],其基本流程为:先对 TLS 分布的风电场景进行抽样获得初始 S_M 个场景,之后通过计算各场景间的欧氏距离,筛选出最近似的 2 个场景并进行合并,直到获得最终的 S_N 个典型场景 $\{W_1, W_2, \dots, W_s, \dots, W_{S_N}\}$ 。其中 W_s 包含场景 s 下所有 N_W 座风电场的实际可用出力 $[P_{W,s,1}, P_{W,s,2}, \dots, P_{W,s,q}, \dots, P_{W,s,N_W}]$ 和场景发生概率 $P_{R,s}$ 2 种属性。通常,5~10 个典型场景即可有效模拟风电波动情况,本文设置 $S_N=5$ 。

在第 M 次指标评估中,在 $[0, 1]$ 区间选取随机数 $R_{W,M}$,并将其归属至相应的典型风电场景中,此抽样场景的风电实际出力可表示为:

$$W_M = \begin{cases} W_1 & 0 \leq R_{W,M} \leq P_{R,1} \\ W_a & \sum_{s=1}^{a-1} P_{R,s} < R_{W,M} \leq \sum_{s=1}^a P_{R,s}, a > 1 \end{cases} \quad (28)$$

其中, a 为典型风电场景序号。

2.2 故障空间的等分散抽样

目前研究中大多采用方差系数低于阈值作为 MC 抽样评估方法的收敛标准^[19]。考虑到设备故障为小概率事件,如何实现故障场景的高效抽样对降低方差系数、加快收敛速度具有重要作用。为减少抽样次数,提升 IES 的运行评估效率,本文采用等分散抽样法^[10]处理设备故障空间,具体步骤如下。

将 $[0, 1]$ 区间分成满足式(29)的 K 个子空间,式中约束表征子区间均可涵盖各设备故障概率。

$$\max \{P_{F,1}, P_{F,2}, \dots, P_{F,S_C}\} \leq 1/K \quad (29)$$

其中, $P_{F,e}$ 为设备 e 的故障概率; S_C 为系统中设备总数。针对设备 e ,在 $[0, 1]$ 区间选取随机数 $R_{F,e}$,并将其归属至相应的故障子空间中。对于故障子空间 k ,设备 e 的状态 $I_{k,e}$ 可表示为:

$$I_{k,e} = \begin{cases} 1 & (k-1)/K \leq R_{F,e} \leq (k-1)/K + P_{F,e} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (30)$$

依此类推对所有设备进行如上处理,可获得故障子空间 k 的系统故障状态,即 $I_k = [I_{k,1}, I_{k,2}, \dots, I_{k,S_C}]$ 。

2.3 MS-MC 抽样

本文将风电空间抽样和故障空间抽样结合,提出了 MS-MC 抽样方法。所提方法可高效评估离散及连续随机因素对系统的影响,具有较好的适用性。系统状态可表示为 $O_{M,k} = [W_M, I_k]$ 。对此系统状态进行后续的模拟调度,评估此风电波动 W_M 下故障子空间 k 的运行指标 $S(O_{M,k})$ 。融合所有 K 个故障子空间,可获得风电场景 W_M 下整个故障空间的系统运行指标 $S_{\text{sys},M}$ 。

$$S_{\text{sys},M} = \sum_{k=1}^K S(O_{M,k}) / K \quad (31)$$

MS-MC 抽样的方差系数可以通过式(32)计算,其中 $V(\hat{E}(S_{\text{sys}}))$ 为由式(33)计算的均值方差。当方差系数低于阈值时,评估过程收敛。

$$\mu = \sqrt{V(\hat{E}(S_{\text{sys}})) / \hat{E}(S_{\text{sys}})} \quad (32)$$

$$V(\hat{E}(S_{\text{sys}})) = \frac{1}{N_s(N_s - 1)} \sum_{M=1}^{N_s} (S_{\text{sys},M} - \hat{E}(S_{\text{sys}}))^2 \quad (33)$$

其中, N_s 为风电场景抽样次数; $\hat{E}(S_{\text{sys}})$ 为系统的运行指标平均值,如式(34)所示。

$$\hat{E}(S_{\text{sys}}) = \sum_{M=1}^{N_s} S_{\text{sys},M} / N_s \quad (34)$$

需要指出的是,IES 中存在如火力、风电、光伏、水力、生物质能等多类型的发电形式。为保证论文简洁性,本文建模和抽样方法仅选取具有确定性特征的火力发电和具有随机性特征的风电为代表,所提出的模型与算法对多类型发电资源具有较好的拓展性。

3 运行多维度评估

3.1 模拟调度

在抽样获得系统风电波动和设备故障场景后,以最小化运行成本为目标对此状态下的 IES 进行模拟调度。运行成本包括非燃气机组运行费用、天然气井供气费用、弃风惩罚和切负荷费用 4 项,如式(35)所示。计及上述运行约束式(1)~(27),可构建 IES 的最优多能流模型。

$$\min \sum_{i \in N_{GU}} F_i^c(P_i) + \sum_{sp} \rho_{\text{GAS}} v_{sp} + \sum_q \rho_{\text{WIND}} S_{W,q} + \sum_r \sum_{\{\cdot\}} \alpha_{\{\cdot\}} L_{D,r}^{(\cdot)} \quad (35)$$

其中, ρ_{GAS} 为天然气价格; ρ_{WIND} 为弃风惩罚系数; $\alpha_{\{\cdot\}}$ 为切负荷惩罚系数。

由于式(10)为二次 Weymouth 函数,导致最优多能流模型求解难度较高。分段线性化方法可将原模型转化为混合整数线性规划(MILP)问题处理^[11],但无法兼顾算法精度和速度。注意到 MILP 问题的求解难度主要在于整数变量(即分段数目),文献[20]提出了两阶段线性化方法,其核心思想是通过第 1

阶段线性化获得 IES 的大致运行域,再通过第2阶段收窄运行空间,但第2阶段线性化区间的划分依赖上轮结果。本文对其进行改进,在算法开始时即确定不同迭代次数下的分段精度,分段区间的确定更为便捷。具体算法为连续线性化算法,其算法流程如下:

(1) 基于抽样结果,输入系统参数,建立输配一体化 IES 模拟调度模型,设置天然气潮流精度 $A_f=1$;

(2) 设置天然气潮流的线性化分段数为 k_f ;

(3) 基于最新运行域(初次线性化时为整个天然气潮流可行域),采用增量线性化方法处理式(10),气压二次项可直接通过变量替换消除,而二次项 $g_{mn}|g_{mn}|$ 则处理成多个线性化分段的形式,具体可参见文献[11];

(4) 求解以上 IES-MILP 模拟调度问题,得到系统的最新运行域,并更新天然气潮流精度 $A_f = k_f A_f$;

(5) 重复步骤(2)~(4),直至计算精度满足式(36),分段线性化流程停止,获得此状态下的模拟调度方案。

$$A_f \geq A_f^{\min} \quad (36)$$

其中, $A_f^{\min}$ 为计算精度阈值。

值得注意的是,在极少数情况下(出现比例小于5%)存在后一次 MILP 模型无解的情况,这是由不同迭代下线性化的斜率和截距参数不同导致的,此时可选取上轮结果作为最终解。

3.2 评估指标

随着以风电为主的新能源机组的不断渗透以及低碳能源战略的持续推进,IES 的运行面临更大的挑战,关注的要素不再局限于安全可靠方面。本文在传统可靠性评估体系的基础上,提出多维度的运行评估指标体系,以全面衡量各类不确定因素下 IES 在运行经济、系统可靠、能源环保、风电消纳、转化效率、多样需求等多方面的特性。需要指出的是,本研究侧重于系统评估,而并非给出唯一的调度方案,目的是让规划、调度人员对现有方案进行整体把控,以指导后续的方案优化。

(1) 运行经济性指标。

本文从发电费用、供气费用、切负荷惩罚、弃风电惩罚4个方面出发,构建如式(37)所示的运行经济性指标 S_{cost} ,即模拟调度模型的目标值:

$$S_{\text{cost}} = \sum_{i \in N_{\text{GU}}} F_i^c(P_i) + \sum_{sp} \rho_{\text{GAS}} v_{sp} + \sum_q \rho_{\text{WIND}} S_{w,q} + \sum_r \sum_{\{ \cdot \}} \alpha_{\{ \cdot \}} L_{D,r}^{\{ \cdot \}} \quad (37)$$

(2) 系统可靠性指标。

能量损失期望 EDNS(Expected Demand Not Supplied)和失负荷概率 LOLP(Loss Of Load Probability)是常用的可靠性指标。需计算各场景负荷损

失量 S_{load} 和损失情况 S_{cut} ,各场景均值即为 EDNS 和 LOLP^[6]。

$$S_{\text{load}} = \sum_r (L_{D,r}^e + L_{D,r}^g + L_{D,r}^h) \quad (38)$$

$$S_{\text{cut}} = \begin{cases} 0 & S_{\text{load}} = 0 \\ 1 & S_{\text{load}} > 0 \end{cases} \quad (39)$$

(3) 能源环保性指标。

为促进系统绿色环保运行,以系统运行时的碳排放总量作为能源环保性的衡量标准。能源环保性指标 S_{car} 由式(40)计算。

$$S_{\text{car}} = \sum_{i \in N_{\text{GU}}} \beta_{\text{NGU},i} P_i + \sum_{i \notin N_{\text{GU}}} \beta_{\text{non-NGU},i} P_i + \sum_r \beta_{\text{CHP},r} v_{3,r} + \sum_r \beta_{\text{EB},r} (v_{2,r} + v_{5,r}) \quad (40)$$

其中, $\beta_{\text{NGU},i}$ 、 $\beta_{\text{non-NGU},i}$ 、 $\beta_{\text{CHP},r}$ 和 $\beta_{\text{EB},r}$ 分别为燃气机组、非燃气机组、CHP 机组和 EB 机组的单位出力碳排放量,单位为 t/MW。

(4) 风电消纳性指标。

风电消纳能力 S_{acc} 是评估新能源利用率的重要指标。提升风电消纳能力,对于改善能源结构、提升运行效率、保护生态环境和促进能源消费都具有重要作用,其表述为实际利用风电占可用风电的比例:

$$S_{\text{acc}} = \sum_q (P_{w,q} - S_{w,q}) / \sum_q W_q \quad (41)$$

(5) 转化效率性指标。

定义能源转化效率 S_{eff} 表征 IES 中能源从产生到使用的转换效率,其可表述为各终端用户最终获得的能源热值占系统初始提供热值的比例。其中,初始能源由燃煤机组供电、上网风电和天然气井供气构成:

$$S_{\text{eff}} = \left(\sum_{r, \{ \cdot \}} E_{\text{out},r}^{\{ \cdot \}} \right) / \left[\sum_{i \in N_{\text{GU}}} P_i + \sum_q (P_{w,q} - S_{w,q}) + \sum_{sp} v_{sp} / \gamma \right] \quad (42)$$

(6) 需求多样性指标。

定义需求多样性指标 S_{var} 以体现终端用户的负荷构成,更丰富的需求结构将为系统提供更多样的功能方式,可更有效发挥能源替代作用。

$$S_{\text{var}} = -(\overline{D}_E^{\{ \cdot \}} \log_3 \overline{D}_E^{\{ \cdot \}}) \quad (43)$$

$$\overline{D}_E^{\{ \cdot \}} = \sum_r D_{E,r}^{\{ \cdot \}} / \sum_{\{ \cdot \}} \sum_r D_{E,r}^{\{ \cdot \}} \quad (44)$$

其中, $\overline{D}_E^{\{ \cdot \}}$ 为不同形式能源需求的比重。

(7) 综合运行指标。

在得到以上多维指标后,可进一步采用熵权法确定各指标权重^[20],以获得综合运行指标,整体把控系统状态,并进一步辅助系统规划、运维方案的制定。

$$S_{\text{com}} = \sum_x \beta_x S_{\text{NOR},x} \quad (45)$$

其中, S_{com} 为综合运行指标; β_x 为各指标权重; $S_{NOR,x}$ 为各指标均一化后的数值。

由此, 输配一体化 IES 的多指标评估流程如图 2 所示, 包括初始化、指标评估和模拟调度三大环节。

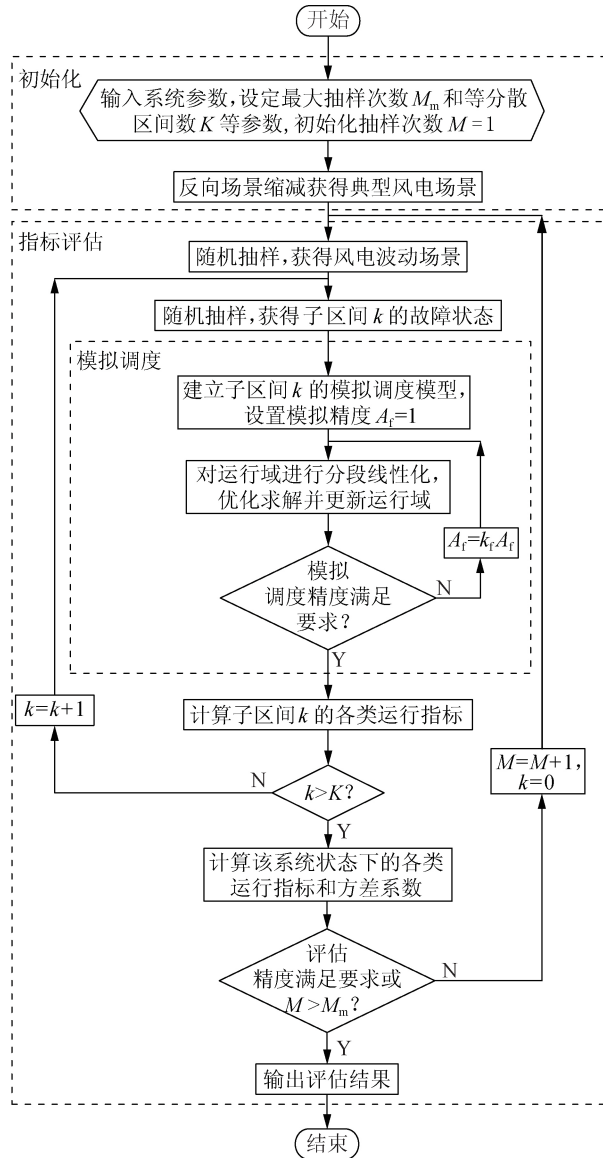


图 2 IES 多指标评估流程图

Fig.2 Flowchart of multi-index evaluation for IES

4 算例分析

选取 RTS79-40Node 输配一体化 IES 作为研究对象。其中上层输电网络采用 RTS79 系统, 输气网络采用 2 个互联的比利时 20 节点天然气系统。上层输网含 17 台燃煤机组、12 台燃气机组、4 座风电场、10 个天然气井、38 条输电线路和 40 条输气线路。下层配网中含 17 个能源枢纽, 各能源枢纽终端用户的电、气、热负荷分别为 2365 MW、586 MW、1800 MW, 需求多样性指标为 0.89。其他各项指标方差系数收敛阈值为 0.01, 系统拓扑及其他参数见文献[21]。

4.1 算法表现分析

采用 MS-MC 抽样法对 IES 进行多指标评估, 各项指标的方差系数收敛过程如图 3 所示。结果表明, 各项指标的方差系数均随抽样次数的增加逐渐下降, EDNS、LOLP、运行经济性、风电消纳性、能源环保性和转化效率性指标的方差系数基本呈逐项减小趋势, 且分别在约 1600 次、700 次、250 次、50 次、25 次和 15 次抽样后收敛。由于不同随机场景下的切负荷差异较大, EDNS 的方差系数收敛速度最慢, 一般将其选为评估算法的收敛标准。

图 4 对比了传统 MC 抽样和本文所提 MS-MC 方

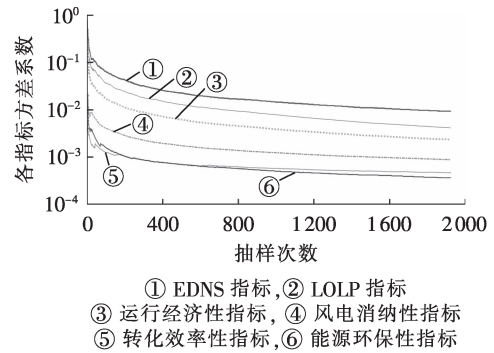


图 3 MS-MC 抽样下的指标收敛过程

Fig.3 Convergence process of indexes with MS-MC sampling

法。结果表明, 对于所采用的 IES 测试系统, MS-MC 抽样可通过较少的抽样次数实现多指标评估, EDNS 的方差系数分别在 70 次和 1600 次抽样后快速下降到 0.1 和 0.01 以下。而在传统 MC 抽样方法下, 方差系数需要 250 次抽样方可达到 0.1, 且在达到抽样上限 (5000 次) 后依然有 0.236 的方差系数。后续测试表明, 本系统下传统 MC 抽样需约 12000 次抽样方可达到收敛条件。这是由于 MS-MC 抽样将原始 $[0, 1]$ 故障空间分为多个子区间, 从而提高了故障状态的被抽样的次数。同时通过对风电场景削减, 以典型场景集表征风电波动情况, 在准确反映风电随机出力的同时降低了各抽样风电场景间的差异。在评估结果有效性方面, 以 EDNS 指标为例, 两者仅相差 0.96% (MS-MC 抽样的 EDNS 为 49.81 MW, 传统 MC 抽样的 EDNS 为 49.33 MW), 说明了本文评估算法的准确性。

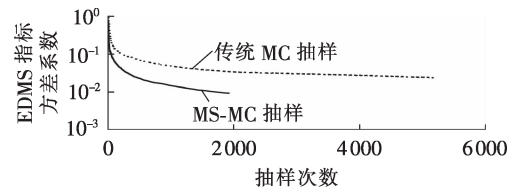


图 4 不同抽样方法下的 EDNS 指标收敛过程

Fig.4 Convergence process of EDNS with different sampling methods

为测试 MS-MC 抽样法的效率, 将设备故障的

[0,1]区间按1—6等分进行评估测试,见表1。在本测试算例中,MS-MC抽样法具有较好的计算效果,无论是在哪种区间划分方式下,评估抽样次数均较传统MC抽样算法(1分段)显著减少,且随着区间数的增加,各区间抽样到故障事件的概率增加,抽样次数呈严格递减趋势。由于区间划分后会增加每次抽样的模拟调度次数,算法总的模拟调度次数未必随区间增加而改善,但均比传统MC抽样策略下的表现更好,评估总时间由模拟调度次数决定。在EDNS指标方面,各等分散策略下差异不大,评估结果在[49.00,49.26] MW间小幅波动,说明等分散策略并不会影响计算精度。从算法表现来看,将故障区间分为5段是比较理想的结果,计算时间较传统MC抽样有效降低了约20 min。本节其余测试均采用5分段策略进行。

表1 不同等分散区间下的运行指标与算法效率

Table 1 Results of operating indexes and computational performance with different scatter intervals

等分散 区间数	EDNS / MW	抽样 次数	模拟 调度数	总计算 时间 / s
1(传统MC)抽样	49.15	11 120	11 120	5 026
2	49.24	4 805	9 610	4 343
3	49.15	3 035	9 105	4 115
4	49.00	2 168	8 672	3 919
5	49.01	1 633	8 165	3 690
6	49.26	1 405	8 432	3 811

4.2 相关因素分析

表2比较了不同的风电渗透率下IES的运行指标。其中,基准场景下风电装机容量1 950 MW,渗透率为30%,风电场的预测出力随渗透率同比变化。由于需求多样性仅与负荷构成有关,各场景下均为0.89,而转化效率指标总维持在[0.82,0.84]之间,与随机因素关联不大,故不对此2项指标作重点分析。表2结果显示,在风电渗透率小于20%时,风电装机容量的不足是导致切负荷发生的重要原因,即使系统完全消纳了可用风电,依然频繁出现无法满足用户需求的情况。在10%~20%渗透率区间,

表2 不同风电渗透率下的IES运行指标

Table 2 Results of IES operating indexes under different wind power penetrations

渗透 率 / %	EDNS / MW	LOLP / %	经济运行 指标 / \$	能源环保 指标 / t	风电消纳 指标 / %
10	158.54	100.00	303 620	1 935.8	100.00
15	85.09	85.19	226 840	1 867.8	100.00
20	59.98	55.29	193 940	1 783.5	99.83
25	52.12	49.61	177 890	1 691.6	94.87
30	49.81	48.82	170 020	1 648.1	89.13
35	46.60	48.86	162 380	1 588.1	84.62
40	48.60	47.73	166 050	1 567.2	75.70
45	49.13	49.50	172 280	1 555.2	63.73
50	46.91	46.75	180 320	1 553.0	52.21

EDNS和LOLP指标均随渗透率的提高而明显改善。由于系统可靠性和清洁电力供应量的提升,相应地,系统运行的经济性和环保性也显著提升。在风电渗透率大于35%时,制约系统运行的关键为输电网传输容量约束,其拥塞状况导致部分清洁能源无法在电网中有效传输。由于系统能够消纳的风电总量固定,风电渗透率的提高将使消纳率降低,弃风惩罚也使经济运行指标逐步恶化,而此时渗透率的提升对EDNS、LOLP和能源环保指标已无助益。表2可为系统规划人员提供风电场建设指导。对本系统而言,目前30%的风电渗透率在多项指标上表现优异,是较为理想的选择。未来需注重提高电网传输能力以促进更多新能源的消纳。

为辨识影响IES运行的关键环节,对不同不确定因素进行分析。其中,场景1为同时考虑风电波动和设备故障的基准场景。在场景1的基础上,场景2—5分别不考虑风电波动、电网故障、气网故障和燃气机组故障,指标结果如表3所示。场景2下,由于测试系统为高消纳系统,其风电消纳主要受线路传输能力约束,准确的风电预测虽可促进风电消纳但效果并不明显。与场景3相比,场景4对系统可靠性的提升效果更为明显,EDNS和经济运行指标分别改善了12.25 MW和\$ 11 400。结果显示,对本测试系统而言,天然气网络设备的随机故障是影响IES安全可靠运行的关键环节,现有天然气网络建设较为落后,容易发生突发拥塞从而导致切负荷事件。为提升系统运行效率,需加强对气网中输气管道、天然气井等薄弱环节的巡视和检修,并逐步加建相关设备提升气网输气能力。场景5显示,燃气机组是输电和输气网络的重要耦合环节,其故障将对电-气多能流带来较大影响,对IES的安全运行具有重要作用。

表3 不同场景下的IES运行指标

Table 3 Operating indexes of IES in different scenarios

场景	EDNS / MW	LOLP / %	经济运行 指标 / \$	能源环保 指标 / t	风电消纳 指标 / %
1	49.81	48.82	170 020	1 648.1	89.13
2	47.22	47.88	167 570	1 656.3	91.58
3	28.05	27.42	148 370	1 657.2	91.22
4	15.80	24.74	136 970	1 662.1	90.23
5	34.53	36.89	155 060	1 660.6	90.66

5 结论

本文立足于能源互联网战略需求,针对输配一体化IES提出了与之适应的多指标评估方法。通过算例分析进行仿真,得到以下主要结论。

(1)本文在IES建模中计及了多能流约束及耦合特性,并以能源枢纽为桥梁对上层输网和下层配网进行统一建模,由此得到的评估结果更具实际意义。

(2)MS-MC抽样法可实现小概率故障事件的快速抽样和风电波动的有效表征,通过较少的抽样实现评估过程收敛。

(3)通过风电渗透率和多维度运行指标的关联关系分析,可为风电场建设提供指导。通过不确定因素集与指标间的关联分析,可有效辨识IES的薄弱环节,为电-气设备的预防性检修和维护提供建议。

本文所提出的多指标评估方法是对目前IES研究的有益补充,但目前仅通过能源枢纽对配网系统进行传输、分配关系的简化描述,尚未计及配网安全约束。下一阶段将重点研究计及配网层拓扑和设备故障的输配一体化评估方法。

参考文献:

- [1] RIFKIN J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[M]. New York, USA: Palgrave MacMillan, 2011.
- [2] 国务院. 关于积极推进“互联网+”行动的指导意见[J]. 全国商情, 2015, 28(26): 8-10.
- [3] 王璟, 王利利, 林济铿, 等. 能源互联网结构形态及技术支撑体系研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 1-10.
WANG Jing, WANG Lili, LIN Jikeng, et al. Energy internet morphology and its technical support system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 1-10.
- [4] 丁一, 江艺宝, 宋永华, 等. 能源互联网风险评估研究综述(一): 物理层面[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3806-3816.
DING Yi, JIANG Yibao, SONG Yonghua, et al. Review of risk assessment for energy internet, part I: physical level[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3806-3816.
- [5] 陈娟伟, 余涛, 许悦, 等. 气电耦合综合能源系统供电可靠性评估解析算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 59-66.
CHEN Juanwei, YU Tao, XU Yue, et al. Analytic method for power supply reliability assessment of electricity-gas coupled energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 59-66.
- [6] 余娟, 马梦楠, 郭林, 等. 含电转气的电-气互联系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 708-715.
YU Juan, MA Mengnan, GUO Lin, et al. Reliability evaluation of integrated electrical and natural-gas system with power-to-gas[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 708-715.
- [7] 葛少云, 李吉峰, 刘洪, 等. 考虑多能耦合及品位差异的含储能微网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 165-173.
GE Shaoyun, LI Jifeng, LIU Hong, et al. Reliability evaluation of microgrid containing energy storage system considering multi-energy coupling and grade difference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 165-173.
- [8] XU Xiandong, HOU Kai, JIA Hongjie, et al. A reliability assessment approach for the urban energy system and its application in energy hub planning[C]//Power & Energy Society General Meeting. Denver, USA: IEEE, 2015: 1-5.
- [9] 孙娟, 卫志农, 孙国强, 等. 计及P2H的电-热互联综合能源系统概率能量流分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 62-68.
SUN Juan, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Analysis of probabilistic energy flow for integrated electricity-heat energy system with P2H[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 62-68.
- [10] 蒋程, 刘文霞, 张建华, 等. 含风电接入的发电系统风险评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 260-270.
JIANG Cheng, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Risk assess-

ment of generation and transmission systems considering wind power penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 260-270.

- [11] URBINA M, LI Zuyi. A combined model for analyzing the interdependency of electrical and gas systems[C]//39th North American Power Symposium. Las Cruces, USA: IEEE, 2007: 468-472.
- [12] HE Yubin, YAN Mingyu, SHAHIDEHPOUR M, et al. Decentralized optimization of multi-area electricity-natural gas flows based on cone reformulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4531-4542.
- [13] 陈柏森, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 区域综合能源系统的综合评估指标与方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 174-182.
CHEN Baisen, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Comprehensive evaluation indices and methods for regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 174-182.
- [14] YAN Mingyu, HE Yubin, SHAHIDEHPOUR M, et al. Coordinated regional-district operation of integrated energy systems for resilience enhancement in natural disasters[EB/OL]. [2019-02-20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8466024>.
- [15] ALABDULWAHAB A, ABUSORRAH A, ZHANG Xiaping, et al. Coordination of interdependent natural gas and electricity infrastructures for firming the variability of wind energy in stochastic day-ahead scheduling[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 606-615.
- [16] WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Standardized matrix modeling of multiple energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 257-270.
- [17] 王晓滨, 黄武浩, 楼华辉, 等. 系统状态空间分割法在电力系统可靠性评估中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 124-129.
WANG Xiaobin, HUANG Wuhao, LOU Huahui, et al. Application of state-space partitioning method in power system reliability assessment[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 124-129.
- [18] MA Xiyuan, SUN Yuanzhang, FANG Hualiang. Scenario generation of wind power based on statistical uncertainty and variability[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 894-904.
- [19] 唐晓骏, 程振龙, 张鑫, 等. 交直流混联系统电压稳定在线评估体系[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1175-1180.
TANG Xiaojun, CHENG Zhenlong, ZHANG Xin, et al. An on-line voltage stability evaluation system for AD/DC hybrid power system[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1175-1180.
- [20] CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Optimal power and gas flow with a limited number of control actions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5371-5380.
- [21] HE Yubin. ConnectedEH17_reliability.xlsx[EB/OL]. (2019-01-26)[2019-02-20]. <http://pan.baidu.com/s/1YDsFAPeMc-VBCMSRq2ILdw>.

作者简介:



何宇斌

何宇斌(1991—),男,广东珠海人,博士研究生,主要研究方向为电-气综合能源系统、智能电网风险调度(E-mail: heyubin@zju.edu.cn);

张伊宁(1991—),女,浙江杭州人,博士研究生,主要研究方向为综合能源系统、需求响应、主动配电网(E-mail: zynlx99@sina.com);

郭创新(1969—),男,湖北黄冈人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为综合能源系统规划运行、智能电网风险评估与调度决策(E-mail: guochuangxin@zju.edu.cn)。

(下转第136页 continued on page 136)

Coordinated cyber-physical multi-stage attack strategy considering cascading failure of integrated electricity-natural gas system

CAO Maosen¹, WANG Leibao¹, HU Bo¹, XIE Kaigui¹, FU Jian¹, WEN Lili²,
ZHOU Ping², FAN Xuan², LI Bo², ZENG Yi²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Chongqing Economic Research Institute, Chongqing 401120, China)

Abstract: As for the risk analysis of integrated electricity-natural gas system under malicious attack, the coordinated cyber-physical multi-stage attack strategy that takes into account the cascading failure of integrated electricity-natural gas system is proposed. Firstly, in order to mislead the operator and reduce the safety margin of power grid, an improved LR (Load Redistribution) attack model is proposed to maximize the degree of line overload. Secondly, considering the time-scale difference of dispatching between natural gas system and power system, a new coordinated multi-stage attack strategy for integrated electricity-natural gas system is constructed. In the initial stage, gas sources or pipelines in gas system are attacked to influence the state of natural gas generators at the integrated electricity-natural gas node. Then, the improved LR attack and physical attack are adopted alternately to the power system, which eventually leads to a black-out. Finally, a Q-Learning based algorithm is proposed to identify the optimal attack strategy. The correctness and validity of the proposed attack strategy are verified by the Belgium 20-node natural gas system and the IEEE 30-bus system.

Key words: multi-energy system; integrated electricity-natural gas system; load redistribution attack model; coordinated cyber-physical attack; cascading failure; Q-Learning algorithm

(上接第127页 continued from page 127)

Multi-index evaluation for integrated energy system operation connecting transmission and distribution levels

HE Yubin^{1,2}, ZHANG Yining¹, MA Guang¹, GUO Chuangxin¹, ZHOU Yuyong³, YE Gangjin³

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Power Dispatching and Control Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China;
3. State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310000, China)

Abstract: In order to quantify the impact of multiple uncertainties such as wind power fluctuations and equipment random failures on the IES (Integrated Energy System), a multi-index evaluation method for IES operation is proposed. In terms of modeling, the unified framework including the energy network in upper transmission level and the EH (Energy Hub) in lower distribution level is established, and the coupling characteristics of electricity, gas and heat in the whole process of generation-transmission-distribution-utilization are described in detail. In terms of methodology, wind power fluctuations and equipment failures are handled by state-space partitioning respectively, while the MS-MC (Mixed Scatter-Monte Carlo) sampling method is proposed to accelerate evaluation convergence. Meanwhile, sequential linearization method is adopted to solve the optimal multi-energy flow problem for the balance of approximation accuracy and solution speed, which further improves the efficiency of evaluation. In terms of indicators, facing the low carbon operation environment, a multi-index evaluation framework including operation economy, system reliability, wind power accommodation, environment protection and so on is established to comprehensively describe the impact of multiple uncertainties on IES operation. The effectiveness and rationality of the proposed methods are verified by the simulations on RTS79-40Node IES with 17 EHs.

Key words: integrated energy system; energy hub; energy management; reliability analysis; MS-MC sampling; sequential linearization; optimal multi-energy flow