

考虑多能流传输与热惰性的综合能源系统 序贯模拟可靠性评估

刘文霞, 杨 粤, 李征洲, 伊 放

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要:为提高综合能源系统可靠性评估的精度和实用性,提出一种考虑多能流传输与热惰性的综合能源系统序贯模拟可靠性评估方法。以冷热电三联供机组为核心构建综合能源系统结构模型,并进行计及损耗的综合能源多能潮流计算;在系统状态分析中考虑负荷重要程度和运行经济性,建立负荷削减优化模型;计及热网惰性及传输延时特性,对供热可靠性指标进行修正。基于运行模拟和序贯蒙特卡洛模拟方法对20节点综合能源系统进行可靠性评估,仿真结果验证了所提方法的有效性。

关键词:综合能源系统;可靠性评估;冷热电三联供;负荷削减;蒙特卡洛模拟

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202006007

0 引言

为实现节能减排、缓解能源压力,世界各国都在发展综合能源系统 IES(Integrated Energy System)。IES 不仅能够打破传统供能系统的体制、技术及市场壁垒,增强多种能流下源、网、荷的整体互动性,而且其能流间的可替代性和互补性将提高系统的供能可靠性^[1]。因此,如何考虑不同能源供能中断对用户影响的差异性、各能源系统运行状态变化特征以及故障下的多能互补^[2],建立综合能源可靠性指标并研究可靠性评估方法,成为 IES 规划和运行中亟待解决的问题。

针对 IES 可靠性评估的研究主要涉及元件可靠性建模、故障状态分析、可靠性指标及评估方法 4 个方面。在可靠性建模方面,文献[3-5]采用马尔科夫两状态模型来表征系统中分布式电源以及电、热、气网的设备可靠性;文献[6]考虑燃气机组自身故障及供气网络故障引起的燃气机组停运,建立燃气机组设备的可用率模型。在 IES 故障状态分析方面,大多数文献都采用故障模式后果分析法,遍历所有元件故障对系统内各负荷的影响,并建立预想事故与故障后果的对应关系集合。文献[7]依据能源品位差异确定故障后的负荷供应优先级别,并制定负荷削减策略。目前关于 IES 故障负荷削减的模型有 2 类:一类是以电、气、热负荷的削减量之和最小为目标的负荷削减优化模型^[8];另一类是以系统运行费用最小为目标对负荷削减量进行优化^[9]。在可靠性评估指标方面,文献[3,9]将传统电力系统可靠性评估的平均故障停电频率指标(SAIFI)、平均故障停电时间指标(SAIDI)等指标扩展到供热、供气子系统,形成 IES 供能可靠性指标体系。在此基础上,文献

[10-11]计及冷、热负荷的热量耗散惯性,以终端水箱的热水温度为可靠性判据进行供热可靠性指标统计计算,更为准确地描述了用户的用能可靠性情况。在可靠性评估方法方面,传统电力系统可靠性评估主要包括解析法与模拟法,考虑 IES 中光伏、储能等设备的接入以及热负荷与天气、温度等因素的相关性,文献[12-15]采用蒙特卡洛模拟法进行 IES 可靠性评估。

目前,关于 IES 可靠性评估还存在以下几个问题:①现有 IES 可靠性评估中大多忽略了实际的网络拓扑及热网传输损耗,仅模拟热力终端的温度变化,故无法反映网络传输性能对可靠性的影响;②负荷削减策略大多从供能者和社会角度出发制定,忽略了用户对供能可靠性需求的差异性;③由于热网惰性及传输延时,故障时刻系统的状态变化具有时滞性,此时的状态与故障恢复时间共同决定了用户供热温度的变化,对可靠性具有重要影响,而目前的可靠性评估中大多未进行系统运行的模拟,无法获取故障时的状态,导致评估结果粗糙。

为此,本文在现有研究的基础上提出一种考虑多能流传输与热惰性的 IES 序贯模拟可靠性评估方法。本文的主要创新工作包括:针对多能系统时空及能流特性的差异,考虑热网传输延时及其终端热惰性,对供热可靠性指标进行修正;建立模拟系统运行的多能流模型,以及考虑负荷重要程度和运行经济性的负荷削减优化模型;将多能流潮流计算与序贯蒙特卡洛相结合,提出 IES 序贯模拟可靠性评估方法。由于考虑了网络拓扑、传输延时、终端热惯性以及用户可靠性需求的差异性,该方法提高了 IES 可靠性评估的精度,为实际系统的运行和设计提供了技术支撑。

1 IES及多能潮流计算

1.1 IES结构

IES的核心是由燃气机组、余热锅炉与吸收式溴化锂机组组成的冷热电三联供(CCHP),在此基础上考虑与地源热泵(HP)联合配置以实现冷、热与电源的解耦以及机组的灵活运行,并配置电锅炉(EB)应对尖峰负荷及作为机组故障下的热源备用。在系统内部接入分布式光伏(PV),形成如图1所示IES结构。

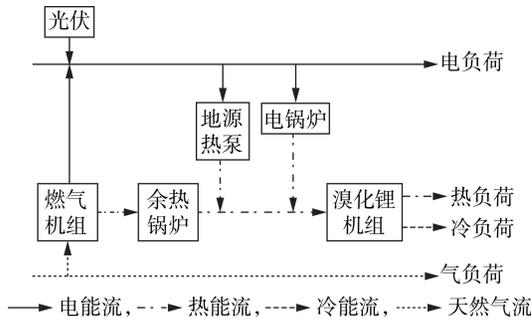


图1 IES结构

Fig.1 Structure of IES

1.2 综合能源多能潮流计算

IES的热网状态具有时序相关性,为确定故障时刻系统运行状态以分析供能可靠性指标,需要对系统进行运行仿真。本文采用电热联合潮流计算各时段系统状态,状态量包括节点电压、支路功率、节点供回水温度和管道流量等。系统以供电子系统为核心,通过中压线路与外部电网相连以保障系统发生故障时的供电可靠性,故采用以热定电的运行方式,在该运行方式下,首先计算供热子系统潮流,得到热网的流量分布及供回水温度情况,以此计算维持供热热水温度所需要的热源热功率,在电热耦合节点处通过电转热设备的功率模型得到供电子系统中的电转热等效电负荷大小,从而进行供电子系统的潮流计算。故IES综合潮流计算可分为热网潮流、电热潮流耦合和配电网潮流3个部分。

(1)热网潮流。

热网潮流模型由水力模型和热力模型组成^[16]。本文考虑的热网供热媒介为热水,忽略供、回水管因为水温差异导致的微小流量变化,可将供、回水网络等效为一个管网进行水力计算,并利用流量平衡方程对辐射状热力网络建立水力模型,如式(1)所示。

$$Am = m_q \quad (1)$$

其中, A 为管网支路和节点的关联矩阵; m 为管道流量; m_q 为节点注入流量。

利用热力模型对各节点的供、回水温度进行分析,反映计及传输损耗下热网各节点的温度情况。供水网络的节点温度取决于上级节点供水温度、环境温度、管道流量以及管道的传输损耗特性,如式

(2)所示。

$$T_{sj} = (T_{si} - T_{en})e^{\frac{-\lambda d_{ij}}{c_w m_{ij}}} + T_{en} \quad (2)$$

其中, T_{si} 、 T_{sj} 、 T_{en} 分别为供水管道始端 i 、末端 j 温度和室外环境温度; λ 为单位长度管道的导热系数; d_{ij} 为管道 ij 的长度; c_w 为水的比热容; m_{ij} 为管道 ij 的流量。

同理可得到回水网络的节点温度模型为:

$$T_{ij} = (T_{ri} - T_{en})e^{\frac{-\lambda d_{ij}}{c_w m_{ij}}} + T_{en} \quad (3)$$

其中, T_{ri} 、 T_{ij} 分别为回水管道始端 i 、末端 j 温度。

流入负荷点的热热水经换热后流出,进入回水网络,该换热过程造成的水温变化主要与热负荷大小 $\Phi_{L,j}$ 及流量有关,可以由比热容模型表征:

$$\Phi_{L,j} = c_w m_{ij} (T_{sj} - T_{ri}) \quad (4)$$

对于网络中含多端口且发生流量混合的节点,其混合后的水温可由热量守恒定律计算,如式(5)所示。

$$\left(\sum m_{out}\right)T_{out} = \sum (m_{in}T_{in}) \quad (5)$$

其中, m_{in} 、 m_{out} 分别为节点流入流量和流出流量; T_{in} 、 T_{out} 分别为流入温度和流出温度。

根据热网潮流得到流回热源的回水温度,利用热源设备对循环水进行加热以保持供水温度的稳定。

(2)电热潮流耦合。

热电联产机组、地源热泵和电锅炉的配置节点是电、热潮流的耦合节点,将电转热设备视为电力系统的负荷,在通过能流平衡及热网潮流计算得到各设备产热功率的情况下,可由设备的效率模型求取各电转热设备消耗的电功率,将其视为配电网等效负荷。

(3)配电网潮流。

电源包括大电网及光伏,电负荷包括常规负荷以及耦合设备等等效电负荷。本文以连接大电网的节点为平衡节点,将光伏等效为电功率为负值的负荷,并采用电力系统潮流计算的直角坐标形式。

$$\begin{cases} P_i - \sum_{j=1}^n [e_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] = 0 \\ Q_i - \sum_{j=1}^n [f_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, P_i 、 Q_i 分别为节点 i 注入有功和无功; e_i 、 f_i 分别为节点 i 电压的实部和虚部; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵中对应节点 i 、 j 间的电导和电纳; n 为节点数。

2 IES序贯模拟可靠性评估

2.1 元件可靠性模型

两状态模型广泛应用于电力系统可靠性评估元件建模中,因此本文IES中各电、热子系统的元件都

采用两状态可靠性模型,其正常、故障状态分别由元件故障率 γ 和修复率 μ 这2个参数进行表征。

元件的运行-故障时间序列可以通过对无故障持续工作时间和修复时间模拟得到。状态持续时间的抽样值一般采用服从指数分布的形式。

$$t_{\text{un}} = -\ln \beta_1 / \gamma \quad (7)$$

$$t_{\text{re}} = -\ln \beta_2 / \mu \quad (8)$$

其中, t_{un} 、 t_{re} 分别为无故障持续工作时间和修复时间的抽样值; β_1 、 β_2 为0~1间的随机数。

2.2 计及热惰性的供热系统故障分析

为了解供热子系统中热负荷的可靠性状态,需要对负荷的温度变化过程进行分析。利用非稳态导热的集总参数模型分析室内平均温度随时间的变化规律,建筑物集总体的能量守恒关系如式(9)所示。

$$\rho c_a V \frac{dT}{dt} = -hS(T - T_{\text{en}}) \quad (9)$$

其中, ρ 为室内空气密度; c_a 为空气比热容; V 、 T 分别为室内空气体积和温度; h 为建筑物与室外空气之间对流传热的表面传热系数; S 为建筑物表面面积。

负荷的温度主要随其建筑物围护结构、室外温度等因素对传热过程的影响而变化。其中围护结构对温度变化时间的影响可以简化为建筑物热储备系数 χ 对温度变化时间的影响,其模型为:

$$\chi = \frac{\rho c_a V}{hS} \quad (10)$$

热储备系数 χ 越大,则材料的蓄热性越好,其抵抗温度波动的能力越强,从而使热网终端表现出冬季阻滞室内温度下降、夏季阻滞室内温度上升的热惰性,故用户侧实际供能故障时刻滞后于元件故障时刻。根据我国建筑气候区划分标准,可将供暖地区的室外计算温度划分为4个区间,并以此界定4个温度区间供暖地区具有代表性建筑围护结构的热储备系数的基准值,具体见附录中表A1。

根据式(9)对冬季集中供暖和夏季集中供冷分别设定最低和最高标准温度,可以利用不同负荷的热储备系数及其室外温度计算出室内温度变化至标准温度所需时间,以反映建筑物热惰性导致的故障延时,将该时间定义为允许温度变化时间 t_p :

$$t_p = \chi \ln \frac{T_0 - T_{\text{en}}}{T_p - T_{\text{en}}} \quad (11)$$

其中, T_p 为标准温度(冬季供热取最低标准温度,夏季供冷取最高标准温度); T_0 为建筑物初始室内温度。

热力网络主要由热源、管道、阀门及补偿器组成,热源设备故障导致供热功率不足时需要进行热负荷削减,管道及阀门发生故障将导致上级阀门下游的用户供热能流中断。元件的故障定位及修复工

作由故障发生时刻开始,经元件修复时间 t_{re} 后故障修复,且供热能流经延时 t_c 后传输至用户,此时重新恢复用户供热。供能恢复时间的计算模型如式(12)所示。

$$\begin{cases} t_r = t_{\text{re}} + t_c \\ t_c = L/v_w \end{cases} \quad (12)$$

其中, t_r 为供能恢复时间; L 为管道长度; v_w 为水流流速。

若供能恢复时间 t_r 不超过允许温变时间 t_p ,则恢复供能时用户室温未偏离标准温度范围,认为该负荷点处于正常状态,否则记作1次故障。

$$R_i = \begin{cases} 1 & t_p - t_r \geq 0 \\ 0 & t_p - t_r < 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中, R_i 为负荷 i 的可靠性状态,其值为1时表示正常,为0时表示故障。

2.3 IES 负荷削减优化模型

当系统元件发生故障,能源供给无法满足所有负荷时,需进行负荷削减以使系统恢复稳定运行。在能够获得更好的系统运行经济性的前提下,可通过降低电转热设备运行出力,即削减耦合设备等等效电负荷来保障对常规电负荷的供电。同时考虑不同类型电负荷的相对重要程度差异,系统进行负荷削减时将优先保障重要等级更高的负荷用电可靠性。

(1)目标函数。

函数 z 考虑电、热、冷的用能价格及电负荷的相对重要程度,以等效负荷削减量的经济性为优化目标。

$$\min z = \sum_{i=1}^{n_e} P_{E,i} v_i R_{E,i} + \sum_{j=1}^{n_\Phi} P_{\Phi,j} R_{\Phi,j} + \sum_{k=1}^{n_c} P_{C,k} R_{C,k} \quad (14)$$

其中, n_e 、 n_Φ 、 n_c 分别为电、热、冷负荷节点数; v_i 为节点 i 电负荷的相对重要程度系数; $P_{E,i}$ 、 $P_{\Phi,j}$ 、 $P_{C,k}$ 分别为节点 i 电负荷的电价、节点 j 热负荷的热价、节点 k 冷负荷的冷价; $R_{E,i}$ 、 $R_{\Phi,j}$ 、 $R_{C,k}$ 分别为节点 i 电负荷、节点 j 热负荷和节点 k 冷负荷削减量。

(2)约束条件。

基于系统能流平衡状态下的运行模型,可建立负荷削减中的等式约束:

$$\begin{cases} P_{\text{DN},i} + P_{s,i} + R_{E,i} - P_{E-H,i} - P_{L,i} - P_i = 0 & i = 1, 2, \dots, n_e \\ \Phi_{s,j} + R_{\Phi,j} - \Phi_{L,j} - \Phi_j = 0 & j = 1, 2, \dots, n_\Phi \\ C_{s,k} + R_{C,k} - C_{L,k} - C_k = 0 & k = 1, 2, \dots, n_c \end{cases} \quad (15)$$

其中, $P_{\text{DN},i}$ 、 $P_{s,i}$ 、 $P_{E-H,i}$ 、 $P_{L,i}$ 分别为电负荷节点 i 由市政10 kV电网接入的电功率、系统内部电源功率、电转热负荷和常规电负荷; $\Phi_{s,j}$ 为供暖期热网节点 j 的热源功率; $C_{s,k}$ 、 $C_{L,k}$ 分别为供冷期热网节点 k 的冷源功率和冷负荷; Φ_j 、 C_k 分别为热负荷节点 j 的注入热

功率、冷负荷节点 k 的注入冷功率。

此外,负荷削减优化模型中还包括各节点电压、支路功率、线路流量、负荷削减量、机组出力等上下限约束,限于篇幅,此处不再赘述。

2.4 计及热网延时特性的供热可靠性指标修正

IES 中热网的元件故障后果具有明显的延时特性,造成无法利用抽样值对指标进行统计。延时的来源一方面是由于热网负荷具有热惰性,另一方面则是由于冷、热能流与电能的传输速度不同而造成的用户供能恢复时刻的延迟。本节计及建筑物储热性能、天气等因素影响,基于上述延时特性对 IES 供热可靠性指标进行修正。

用户的供热恢复后,室内温度逐步恢复并维持在正常范围内,该过程可以使用热力学能量守恒定律建立温度恢复时间的求解模型。

$$qv_w t_u^2 = \alpha c_a \rho V (T_p - T_i) \quad (16)$$

$$t_r = \chi \ln \frac{T_0 - T_{en}}{T_f - T_{en}} \quad (17)$$

其中, q 为单位长度散热器通过自然对流的散热量; t_u 为温度恢复时间; α 为热损耗系数; T_i 为供热恢复过程的初始室内温度。

联立式(16)、(17),可得到温度恢复时间 t_u 的显式表达式:

$$t_u = \sqrt{\frac{\alpha c_a \rho V [T_p - T_{en} - (T_0 - T_{en})/e^{t_r/\chi}]}{qv_w}} \quad (18)$$

故 IES 元件故障造成供热中断时,以实际用户室内温度偏离标准温度范围的时间作为可靠性指标的统计数据,其主要由供能恢复时间、允许温度变化时间和温度恢复时间组成,计算模型如式(19)所示。

$$t_f = t_r - t_p + t_u \quad (19)$$

其中, t_f 为修正后的用户供热故障时间。

2.5 IES 可靠性评估流程

本文将多能潮流计算与序贯蒙特卡洛模拟相结合,进行系统状态抽样、状态分析及指标统计,具体评估流程如下。

(1)元件状态抽样。在大量抽样年内,对系统中每一元件重复进行随机数生成及状态持续时间抽样,并组合所有元件状态转移过程,获得给定时间跨度内系统时序状态转移过程。

(2)潮流计算。计及系统网络参数、气温及源荷变化,对系统进行潮流计算。

(3)故障时刻状态获取。利用步骤(1)中元件状态抽样结果,寻找无故障工作时间最短的元件并记录故障发生时刻和元件故障时间,并由步骤(2)中的潮流模拟得到对应时刻的系统状态。

(4)状态分析。结合本文所提可靠性模型对系统状态进行分析,包括多能流的供能平衡分析以及

综合能源负荷削减优化。

(5)负荷点指标统计。根据上一步分析结果统计各负荷点的可靠性指标。

(6)收敛判断。当可靠性指标的方差系数小于给定值或模拟抽样的次数 K 达到最大抽样次数时,结束循环,否则返回步骤(1)进行下一个状态的生成和分析。

(7)系统指标计算。统计各负荷点的可靠性指标,并对系统可靠性进行计算。

3 算例分析

3.1 算例概况

为对本文所提可靠性评估方法进行验证,本节以一个含 10 节点配电网络系统和 10 节点热力网络的 IES 进行仿真。IES 网架结构及供能设备组成如图 2 所示(图中 GAS 表示气网),系统外接 10 kV 市网和天然气网,其余结构见 1.1 节。

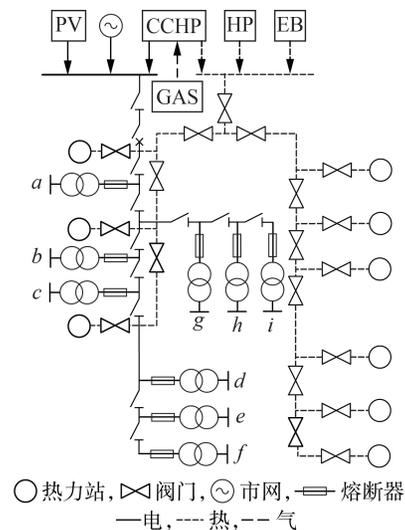


图2 IES结构

Fig.2 Structure of IES

系统的电、冷、热负荷数据见附录中表 A2,其中设置负荷节点 $a-c$ 为居民型,节点 $d-f$ 为商业型,节点 $g-i$ 为工业型。系统电负荷为全年时段,计划采暖期为 11 月 1 日至次年 3 月 31 日,供暖的温度标准最低为 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$,计划供冷期为 6 月 1 日至 9 月 30 日,供冷的温度标准最高为 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。系统负荷变化曲线、光伏出力、机组容量配置及相关运行参数设置分别见附录中图 A1—A3 与表 A3、A4。

3.2 系统供能可靠性指标

本文通过以下 3 种场景的可靠性指标计算完成系统供能可靠性分析。

场景 1:电、热、冷独立供应非耦合系统,且采用传统蒙特卡洛模拟法进行可靠性分析。

场景 2:电、热、冷联合供应耦合系统,且采用传

统蒙特卡洛模拟法进行可靠性分析,基于故障抽样统计供热可靠性指标。

场景3:电、热、冷联合供应耦合系统,且采用综合潮流与蒙特卡洛相结合的序贯模拟方法进行可靠性分析,基于温度模拟统计供热可靠性指标。

进行序贯蒙特卡洛模拟的时长为1000 a,经仿真模拟得到如表1所示各场景下系统供能可靠性指标。

(1)场景1、2的供能可靠性指标对比。

由表1数据可见,相较于传统的独立供能模式,实现各能流互补互济后的IES供能可靠性得到提升,电力系统的用户平均供能中断次数(AITC)由0.28695次/a下降至0.10955次/a,平均供能中断时间(AIHC)由0.76115 h/a下降至0.24804 h/a,系统供电可靠率(RS)由99.9913%提高至99.9972%。系统供电可靠性的提升主要来源于孤岛情况下IES内部电源出力以及电源容量不足时,所采取的削减电转热等效负荷的运行策略;供热、供冷可靠性的提升主要来源于电-热、气-热等多种供能方式下的能流互济。

(2)场景2、3的供能可靠性指标对比。

对比场景2和3的可靠性指标,在基于序贯模拟的评估方法下,热网AITC由1.36326次/a下降至0.40276次/a,AIHC由13.51166 h/a下降至5.05479 h/a,可见用户实际经历的平均故障次数及平均故障时间情况优于传统可靠性评估方法下的统计情况,修正后的指标更为准确地刻画了用户的供能舒适性。统计模拟运行的1000 a中元件故障转化情况以对比指标修正前后的可靠性变化见表2。

在模拟运行中共发生7461次IES中各类元件的故障,当以场景2传统可靠性指标进行数据统计时,共计有11983次供热中断和12231次供冷中断;当以场景3中修正后的可靠性指标进行数据统计,各类元件故障共造成3599次供热中断及5213次供冷中断,供热、供冷故障转化率分别为30.03%和42.62%。造成供热、供冷故障转化率不同的原因在于不同供能季节中可靠性判据中温度标准与用户温度变化速度的不同。由此可见,由于热网传输及负荷的延时特性,IES中设备元件的故障未必导致用户供热、供冷的可靠性状态改变,即传统可靠性指标较为保守,未真实反映终端用户的可靠性状况。

表1 用户可靠性指标

Table 1 Reliability indexes of customer

场景	AITC/(次·a ⁻¹)			AIHC/(h·a ⁻¹)			RS/%		
	电	热	冷	电	热	冷	电	热	冷
1	0.28695	2.60714	2.89873	0.76115	30.77572	19.64091	99.9913	99.1508	99.3274
2	0.10955	1.36326	1.12414	0.24804	13.51166	12.16878	99.9972	99.6298	99.6124
3	0.10955	0.40276	0.47453	0.24804	5.05479	4.94338	99.9972	99.8615	99.8307

表2 故障转化分析

Table 2 Analysis of failure conversion

场景	故障次数		
	元件故障	供热故障	供冷故障
2	7461	11983	12231
3	7461	3599	5213

3.3 负荷削减策略对可靠性指标的影响

在本文的负荷削减计算中,考虑了电负荷的相对重要程度以及各用能的价格,拥有较高相对重要程度及用能价格的负荷会得到更好的可靠性保障。各节点供电可靠性指标如图3所示。

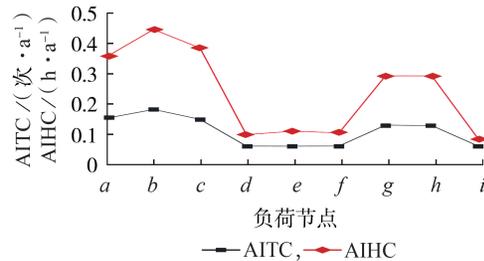


图3 各负荷节点供电可靠性指标

Fig.3 Power supply reliability indexes of each load node

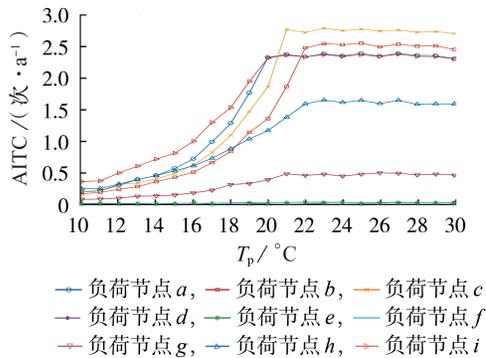
由于商业电价高于工业电价,居民电价最低,故本算例在负荷削减中优先保障节点d—f的用电可靠性,该类节点可靠性指标值为3类负荷中的最低值。而在拥有相同电价的各类型负荷中,节点c、f、i分别拥有同类型负荷中最高的重要程度,其可靠性指标AITC均取得同类型节点中的最低值。算例验证了IES能够实现对不同重要程度及用能价格的负荷进行差异化的可靠性保障。

3.4 供热标准对可靠性指标的影响

本文以供热温度是否偏离供热标准温度为可靠性判据,并模拟偏离标准的温度变化过程以统计可靠性指标,故可靠性指标除了受用户的热储备系数、室外气温等因素影响外,还极大地受到用户对标准温度要求的影响。

为分析不同用户差异化需求下的供热可靠性,本节将冬季供暖的最低标准温度 T_p 设为变量,模拟计算当 T_p 从10℃变化至30℃时,各个节点的供热可靠性指标变化情况如图4所示。

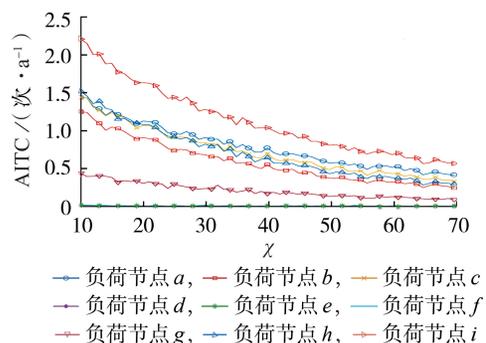
由图4可见,随着冬季最低标准温度升高,可靠性指标AITC变大,即用户的可接受供热波动范围越严格,系统的可靠性越差。在 T_p 达到22℃之后,指

图 4 可靠性指标随 T_p 变化趋势Fig.4 Variation trend of reliability index vs. T_p

标值趋于稳定,即供热要求过于严格时,所有元件故障导致的用户温度下降都会被判定为用户经历 1 次故障,此时各负荷点可靠性指标趋近于场景 2。而由于负荷削减优化模型中价格系数的差异,各负荷点呈现出由高到低不同的可靠性。该算例验证了本文所提 IES 可靠性评估方法能够实现计及不同负荷的差异化用能需求,如用户对供热最低温度的不同要求,对供热可靠性进行更为准确的评估。

3.5 建筑物热储备系数对可靠性指标的影响

系统中不同的用户类型具有差异化的负荷特性,其中热网负荷的建筑物热储备系数 χ 是影响供热可靠性的重要参数。本节以 χ 为变量,模拟计算不同 χ 下各负荷点的供热可靠性指标,如图 5 所示。

图 5 不同 χ 下的供热可靠性指标Fig.5 Heating reliability index under different values of χ

由图 5 可见,随着建筑物热储备系数的不断增大,指标 AITC 呈非线性下降的趋势,且不断趋近于 0,其原因是负荷储热性能的提高会使用户允许降温的时间变长,并逐渐大于元件故障造成的供热中断时间,直至 χ 达到某一临界值时,任一元件故障均不会导致用户温度下降至标准温度以下。而当 χ 反向变小并接近于 0,即负荷不具备热储备能力时,可以认为所有元件故障导致供热中断都将使用户经历 1 次故障,该情况下的可靠性指标 AITC 与场景 2 中未进行序贯模拟及修正的指标一致。

4 结论

本文对冷热电三联供机组与地源热泵联合运行的 IES 进行可靠性评估研究。首先在系统运行能流模型的基础上,考虑电负荷相对重要程度,建立以综合能源负荷削减经济性最优为目标函数的负荷削减优化模型;然后计及热网传输延时特性及终端热惰性修正热网可靠性评估指标,并结合系统潮流计算与蒙特卡洛模拟,提出基于运行模拟的 IES 可靠性评估方法及流程;最后构建算例进行分析,得出以下结论:

(1) 相比于传统的供能方式,实现各子系统间交互响应、能流互济的 IES 使供能可靠性得到提升,将成为“三型两网”发展背景下建设高可靠性配电网的重要研究方向;

(2) 考虑热网网架管道的传输延时并计及热网终端的热惰性,以实际用户经历温度偏离供能标准温度的时间进行可靠性统计,能够更为准确地评估 IES 供热子系统的可靠性,该方法与考虑用户差异化用能需求的综合能源服务理念相契合;

(3) 考虑网架、负荷以及温度等因素的变化对系统进行模拟运行,通过潮流计算获取系统状态,并基于蒙特卡洛方法进行可靠性评估,算例验证了该方法的可行性与合理性,为含多能流的 IES 可靠性评估提供技术支撑。

本文在 IES 运行模拟中简化了二级管网的复杂结构,将其等效为一级管网末端热力站的热用户。对 IES 进行更为准确的运行模拟和能流计算,并在此基础上进行可靠性评估是后续研究的方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 韦晓广,高仕斌,臧天磊,等. 社会能源互联网:概念、架构和展望[J]. 中国电机工程学报,2018,38(17):4969-4986,5295. WEI Xiaoguang,GAO Shibin,ZANG Tianlei,et al. Social energy internet: concept, architecture and outlook[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(17):4969-4986,5295.
- [2] 李更丰,黄玉雄,别朝红,等. 综合能源系统运行可靠性评估综述及展望[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):12-21. LI Gengfeng,HUANG Yuxiong,BIE Zhaohong,et al. Review and prospect of operational reliability evaluation of integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):12-21.
- [3] 董晓晶,刘洪,宫建锋,等. 考虑多类型综合需求响应的电热耦合能源系统可靠性评估[J]. 电力建设,2018,39(11):10-19. DONG Xiaojing,LIU Hong,GONG Jianfeng,et al. Reliability assessment of coupled electricity-heat energy system considering multi-type integrated demand response[J]. Electric Power Construction,2018,39(11):10-19.
- [4] 王旭东,林济铿. 基于网络化简的含分布式电源的配电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(4):38-43. WANG Xudong,LIN Jikeng. Reliability evaluation based on network simplification for the distribution system with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems,

- 2010,34(4):38-43.
- [5] 王韶,谭文,黄晗. 计及微电网中可再生能源间歇性影响的配电网可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):31-37.
WANG Shao,TAN Wen,HUANG Han. Distribution system reliability evaluation considering influence of intermittent renewable energy sources for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):31-37.
- [6] 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.
- [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电网可靠性评估[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] 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.
- [9] CHAUDRY M,WU J Z,JENKINS N. A sequential Monte Carlo model of the combined GB gas and electricity network[J]. Energy Policy,2013,62:473-483.
- [10] 吕佳炜,张沈习,程浩忠. 计及热惯性和运行策略的综合能源系统可靠性评估方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(20):9-16.
LÜ Jiawei,ZHANG Shenxi,CHENG Haozhong. Reliability evaluation of integrated energy system considering thermal inertia and operation strategy[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(20):9-16.
- [11] 黄玉雄,李更丰,别朝红,等. 分布式综合能源系统可靠性评估[J]. 智慧电力,2017,45(7):43-50.
HUANG Yuxiong,LI Gengfeng,BIE Zhaohong,et al. Reliability evaluation of distributed integrated energy systems[J]. Smart Power,2017,45(7):43-50.
- [12] LI G F,BIE Z H,KOU Y,et al. Reliability evaluation of integrated energy systems based on smart agent communication[J]. Applied Energy,2016,167:397-406.
- [13] 程林,常焱,刘满君,等. 基于伪时序状态转移抽样法评估含储能电力系统可靠性[J]. 电力系统自动化,2014,38(7):53-59.
CHENG Lin,CHANG Yao,LIU Manjun,et al. Reliability evaluation of energy storage integrated power system based on pseudo-sequential state transition sampling algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(7):53-59.
- [14] 张弛,唐庆华,严玮,等. 基于粒子群-内点混合优化算法的区域综合能源系统可靠性评估[J]. 电力建设,2017,38(12):104-111.
ZHANG Chi,TANG Qinghua,YAN Wei,et al. Reliability evaluation of integrated community energy system based on particle-swarm-interior-point hybrid optimization algorithm[J]. Electric Power Construction,2017,38(12):104-111.
- [15] 路红池,谢开贵,王学斌,等. 计及多能存储和综合需求响应的多能源系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):72-78.
LU Hongchi,XIE Kaigui,WANG Xuebin,et al. Reliability assessment of multi-energy system considering multi-storage and integrated demand response[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):72-78.
- [16] 夏天,陈瑜玮,郭庆来,等. 基于PSASP的电热耦合能源系统潮流计算[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):55-61.
XIA Tian,CHEN Yuwei,GUO Qinglai,et al. Power flow calculation based on PSASP for combined thermal and electric energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):55-61.

作者简介:



刘文霞

刘文霞(1967—),女,吉林长春人,教授,博士,研究方向为电力系统风险及可靠性评估、经济调度(E-mail:liuwenxia001@163.com);

杨粤(1995—),男,贵州铜仁人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统可靠性评估(E-mail:yy294082513@163.com);

李征洲(1995—),女,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统规划(E-mail:965968177@qq.com);

伊放(1994—),男,山东淄博人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统规划(E-mail:610737759@qq.com)。

(编辑 王锦秀)

Reliability evaluation of integrated energy system considering multi-energy flow transmission and thermal inertia based on sequential simulation

LIU Wenxia,YANG Yue,LI Zhengzhou,YI Fang

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: In order to improve the accuracy and practicability of reliability evaluation of IES(Integrated Energy System), a reliability evaluation method considering multi-energy flow transmission and thermal inertia based on sequential simulation is proposed. The structural model of IES is built with CCHP(Combined Cooling,Heating and Power) unit as the core,and the multi-energy flow calculation considering loss is carried out. The load importance degree and operation economy are considered in system state analysis,and the optimal load reduction model is built. The reliability index of heat supply is modified considering the inertia and transmission delay characteristics of heating network. The reliability evaluation of a 20-bus IES is carried out based on operation simulation and sequential Monte Carlo simulation method,and the simulative results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: integrated energy system;reliability evaluation;CCHP;load reduction;Monte Carlo simulation

附录:

表 A1 不同室外温度的建筑物热储备系数 χ
Table A1 Building thermal reserve coefficient χ for different outdoor temperatures

室外温度/°C	χ / h	室外温度/°C	χ / h
-5~-10	45~50	-20~-30	55~65
-10~-20	50~55	<-30	65~75

表 A2 负荷设置
Table A2 Load setting

节点	负荷类型	电/热/冷 负荷/MW	电负荷 重要程度	电/热(冷)价/ [元·(kW·h) ⁻¹]
a	居民型	0.2/0.24/0.4	1	0.477/0.140
b	居民型	0.3/0.36/0.6	1	0.477/0.140
c	居民型	0.4/0.48/0.8	1.009 65	0.477/0.140
d	商业型	0.7/1.05/1.3	1.387 86	0.597/0.200
e	商业型	0.8/1.2/1.4	1.387 86	0.597/0.200
f	商业型	0.9/1.35/1.5	1.451 57	0.597/0.200
g	工业型	1.2/1.8/2.0	1.098 81	0.508/0.200
h	工业型	1.3/1.95/3.2.2	1.098 81	0.508/0.200
i	工业型	1.4/2.1/2.5	1.284 43	0.508/0.200

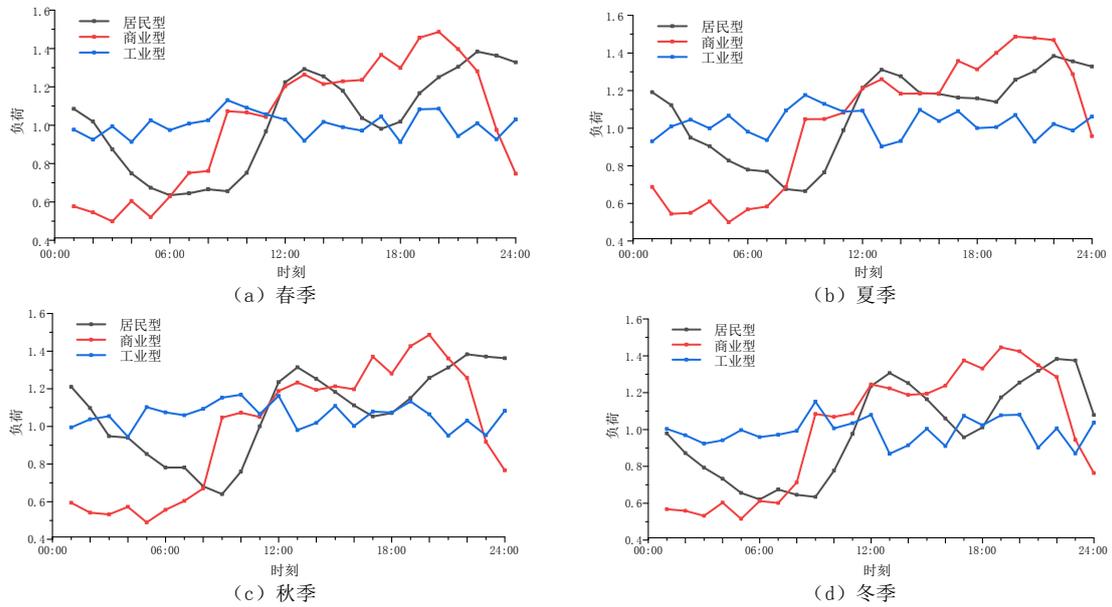


图 A1 四季典型日电负荷曲线
Fig.A1 Typical daily power load curves of four seasons

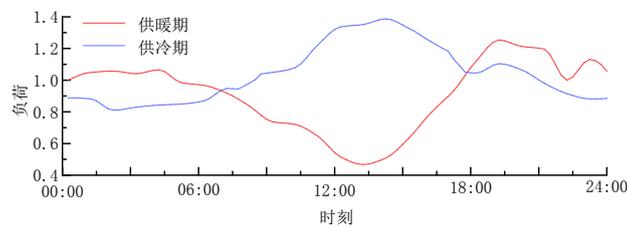


图 A2 冷热负荷曲线
Fig.A2 Heat and cold load curves

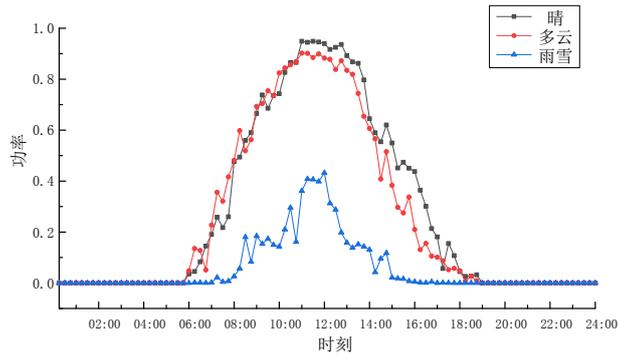


图 A3 光伏出力曲线
Fig.A3 Photovoltaic output curves

表 A3 机组配置及可靠性参数

Table A3 Unit configuration and reliability parameters

设备名称	容量/MW	台数	故障率/ (次·a ⁻¹)	平均故障修复时间/h
冷热电三联供机组	2	3	1.50	12
地源热泵	1	2	0.60	6
电锅炉	2	2	0.40	5
光伏	1	1	0.40	20
溴化锂机组	—	—	0.40	2
上级电网	—	—	0.80	3

表 A4 运行参数

Table A4 Operation parameters

参数名称	参数值
热(冷)电比	1.25
地源热泵效率	4.00
电锅炉效率	0.95
供/回水温度/°C	75/55
管道导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	0.05