

计及多能存储和综合需求响应的多能源系统可靠性评估

路红池¹, 谢开贵¹, 王学斌², 吴涛¹, 胡博¹, 伏坚¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 青海 西宁 810008)

摘要:提出一种计及多能存储和综合需求响应的多能源系统可靠性评估模型。首先,将电、热等负荷分为柔性负荷和非柔性负荷,建立多能源系统的综合需求响应模型;其次,以能源购买成本与负荷削减成本之和最小为目标函数,建立计及多能存储和综合需求响应的最优负荷削减模型;然后,基于时序蒙特卡洛模拟法,对计及多能存储和综合需求响应的多能源系统进行可靠性评估;最后,基于构建的含有储热、储电、储气等多能存储的多能源系统进行算例分析,评估了9个不同场景下多能源系统的可靠性。算例表明多能存储和综合需求响应可协同优化各时段能源供给和柔性负荷需求,减少元件故障导致的失负荷量,进而显著提升多能源系统的可靠性和经济性。

关键词:多能源系统;多能存储;综合需求响应;最优负荷削减;可靠性评估

中图分类号:TM 711

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201908019

0 引言

传统化石能源的日渐枯竭和环境的恶化促进了能源系统的改革和发展。目前,能源系统逐渐由传统电、气、热系统独立运行供应模式向多能耦合协调运行模式转变,组成多能源系统。多能源系统由多种能源系统耦合构成,包括不同能源形式间的传输、转换、存储等功能单元^[1]。

优化运行多能源系统有助于提高可再生能源渗透率和能源利用率、降低系统运行成本和缓解环境污染^[2-3]。储能和需求响应通过调整能源枢纽各时间段的输入和输出来优化运行多能源系统,提升系统灵活性、经济性和能源利用率^[4],因而得到迅猛发展。目前,针对多能源系统多能存储和综合需求响应的研究侧重于多能存储和综合需求响应的建模^[4-6]及含储能和需求响应的系统规划与优化运行^[5-10]。文献[4]分析了多能源系统中综合需求响应的构成和建模方法,并探讨了综合需求响应的未来发展方向。文献[5-6]通过离散时间系统对多能源系统中的储能装置进行建模,并对含储能的多能源系统进行优化设计。文献[7]根据综合需求响应的特性定义广义需求响应,提出了一种基于能源枢纽的多能源系统分层调度模型。文献[8]对电冷热负荷进行分类,构建多能源系统的综合需求响应模型,并优化设计含储能和综合需求响应的能源枢纽。文献[9-10]提出一种计及多能存储和综合需求响应的

多能源系统日前调度优化模型,算例表明储能和需求响应可以提升系统经济性,增加系统的灵活性。

多种能源的协调运行不仅影响能量的供应比例,而且显著影响能源系统可靠性。已有部分研究提出适用于多能源系统的可靠性评估模型^[11-15]。文献[11-13]建立多能源系统元件的马尔科夫状态空间转移图,提出一种通用的能源枢纽可靠性评估模型,评估系统的供电可用率。文献[14]建立了多能源系统的最优负荷削减模型,提出一种基于蒙特卡洛法的多能源系统可靠性评估模型。文献[15]提出一种基于状态枚举的冲击增量法,与优化调度模型相结合,评估多能源系统可靠性。此外,文献[16]计及综合需求响应,对电热耦合系统配电网进行可靠性评估,但仅考虑电锅炉一种能源转换装置,未考虑多能耦合等因素对多能源系统可靠性的影响。

随着能源网络耦合程度逐渐提高,多能存储和综合需求响应将成为其运行优化的关键环节。在系统运行优化前后,多能存储技术和综合需求响应技术可调整柔性负荷和能量转换装置的出力水平,在增加能源系统灵活性、经济性和可再生能源利用率的同时,改变多能源系统运行工况,进而影响系统可靠性。然而,鲜有研究分析多能存储和综合需求响应对多能源系统可靠性的影响。

因此,本文提出一种计及多能存储和综合需求响应的多能源系统可靠性评估模型。首先,以能源购买成本与负荷削减成本之和最小为优化目标,考虑功率平衡、系统运行、能量转换、储能和需求响应等约束,建立多能源系统最优负荷削减模型;其次,基于时序蒙特卡洛模拟法评估计及多能存储和综合需求响应的多能源系统可靠性;最后,量化分析多能存储和综合需求响应对多能源系统可靠性的影响。

收稿日期:2019-04-08;修回日期:2019-06-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902200);国家电网公司科技项目(5228001700CW)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB0902200) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5228001700CW)

1 多能源系统模型

能源枢纽由苏黎世联邦理工学院电力系统和高压实验室的 Patrick Favre-Perrod 教授在“未来能源网络展望(VOFEN)”项目^[17]中提出,此概念的提出为多能源系统的综合管理提供了一个新思路^[18]。本文基于能源枢纽概念设计多能源系统,如图 1 所示。该能源枢纽由输入侧(电能、天然气)、能量转换装置(变压器、CHP 机组、燃气锅炉和电锅炉)、储能装置(电、气和热储能)和输出侧(电和热负荷)构成。

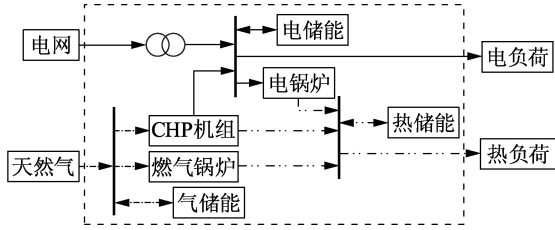


图 1 多能源系统模型

Fig.1 Model of multi-energy system

1.1 能量转换装置模型

能量转换装置是多能源系统中多种能源耦合的枢纽,用于能量之间的转换。本文采用式(1)所示的线性模型对该类装置进行统一建模^[7]。

$$P_{1,k,s}^t = \eta_{k,s} P_{0,k,s}^t \quad (1)$$

其中, $P_{1,k,s}^t$ 和 $P_{0,k,s}^t$ 分别为第 k 台 s 类能量转换装置在 t 时刻的输入和输出功率; $\eta_{k,s}$ 为第 k 台 s 类能量转换装置的能量转换效率。

1.2 储能装置模型

本文考虑储电、储气和储热 3 种储能形式。常见的储电装置包括超级电容^[19]、锂离子电池^[19]和铅酸蓄电池^[20]等,储气装置包括储气柜^[21]和液化天然气^[22]等,储热装置包括热水蓄热器^[23]和相变储能换热器^[24]等。储能装置本质上皆是实现能量在不同时间段上的转移,模型如下所示^[5]:

$$P_{\text{dis}}^t = P_0^t - P_1^t \quad (2)$$

$$E^{t+1} = (1 - \gamma) E^t + \eta_c P_1^t \Delta t - P_0^t \Delta t / \eta_d \quad (3)$$

其中, P_{dis}^t 为储能装置 t 时刻与多能源系统的净交换功率; P_1^t 、 P_0^t 分别为储能装置 t 时刻的充、放能功率; E^t 为储能装置 t 时刻的总储能; γ 为储能装置的能量自损率; η_c 、 η_d 分别为储能装置的能量充、放效率。

1.3 负荷模型

本文所建立的多能源系统包含电和热 2 种负荷。根据负荷灵活特性的不同,可将负荷分为非柔性负荷和柔性负荷。

1.3.1 非柔性负荷

非柔性负荷是不可调整的负荷。在供能充足的情况下正常供应,在供能不足的情况下发生负荷削减,可表示为:

$$L_{\text{NF},j}^t = \begin{cases} L_{\text{NF},j}^t & \text{供能充足} \\ L_{\text{S,NF},j}^t + L_{\text{C,NF},j}^t & \text{供能不足} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $L_{\text{NF},j}^t$ 为第 j 类负荷 t 时刻的非柔性负荷; $L_{\text{S,NF},j}^t$ 为第 j 类非柔性负荷 t 时刻正常供应的负荷; $L_{\text{C,NF},j}^t$ 为第 j 类非柔性负荷 t 时刻削减的负荷。

1.3.2 柔性负荷

柔性负荷是指可随能源价格和负荷削减情况调整的负荷。此类负荷可从能源价格较高的时间段转移至价格较低的时间段,或从供能不足导致发生负荷削减的时间段转移至供能充足的时间段,但在研究周期内柔性负荷总量保持不变,其模型可表示为:

$$\sum_{t=1}^T L_{\text{F,up},j}^t = \sum_{t=1}^T L_{\text{F,down},j}^t \quad (5)$$

其中, T 为多能源系统的研究周期; $L_{\text{F,up},j}^t$ 和 $L_{\text{F,down},j}^t$ 分别为第 j 类柔性负荷 t 时刻的向上和向下的调整量。

2 多能源系统最优负荷削减模型

多能存储和综合需求响应可显著提高多能源系统的灵活性、可靠性和经济性^[4,9-10,16]。本节建立一个计及多能存储和综合需求响应的多能源系统最优负荷削减模型。

2.1 目标函数

本文以多能源系统的能源购买成本和负荷削减惩罚成本之和最小为目标函数:

$$C = \min \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} p_i^t P_i^t \Delta t + \sum_{t=1}^T \sum_{j \in J} \beta_j L_{\text{C},j}^t \Delta t \right) \quad (6)$$

其中, I 为能源枢纽的输入端口集合,包括电和气 2 种能源; J 为能源枢纽的输出端口集合,包括电和热 2 种负荷; p_i^t 为第 i 类能源口 t 时刻的价格; P_i^t 为第 i 类能源 t 时刻的输入功率; β_j 为第 j 类负荷削减的惩罚单价; $L_{\text{C},j}^t$ 为第 j 类负荷 t 时刻的负荷削减量。

2.2 约束条件

2.2.1 功率平衡约束

(1) 电功率平衡约束。

$$P_e^t = \sum_{k=1}^{K_{\text{tr}}} P_{\text{tr},1,k}^t \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^{K_{\text{tr}}} P_{\text{tr},0,k}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{chp}}} P_{\text{chpe},0,k}^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{es}}} P_{\text{es,dis},k}^t = L_e^t + \sum_{k=1}^{K_{\text{eb}}} P_{\text{eb},1,k}^t \quad (8)$$

其中, P_e^t 为系统电输入端口 t 时刻的输入功率; L_e^t 为系统电输出端口 t 时刻的输出功率; $P_{\text{tr},1,k}^t$ 、 $P_{\text{tr},0,k}^t$ 分别为第 k 台变压器 t 时刻的输入、输出功率; $P_{\text{chpe},0,k}^t$ 为第 k 台 CHP 机组 t 时刻的输出电功率; $P_{\text{es,dis},k}^t$ 为第 k 台电储能装置 t 时刻与多能源系统的净交换功率; $P_{\text{eb},1,k}^t$ 为第 k 台电锅炉 t 时刻的输入功率; K_{tr} 、 K_{chp} 、 K_{es} 和 K_{eb} 分别为变压器、CHP 机组、电储能和电锅炉的数量。

(2) 天然气功率平衡约束。

$$P_g^t + \sum_{k=1}^{K_{gs}} P_{gs,dis,k}^t = \sum_{k=1}^{K_{chp}} P_{chp,1,k}^t + \sum_{k=1}^{K_{ab}} P_{ab,1,k}^t \quad (9)$$

其中, P_g^t 为系统天然气输入端口 t 时刻的输入功率; $P_{chp,1,k}^t$ 为第 k 台 CHP 机组 t 时刻的输入功率; $P_{gs,dis,k}^t$ 为第 k 台气储能装置 t 时刻与多能源系统的净交换功率; $P_{ab,1,k}^t$ 为第 k 台燃气锅炉 t 时刻的输入功率; K_{gs} 和 K_{ab} 分别为气储能和燃气锅炉的数量。

(3) 热功率平衡约束。

$$\sum_{k=1}^{K_{ab}} P_{ab,0,k}^t + \sum_{k=1}^{K_{eb}} P_{eb,0,k}^t + \sum_{k=1}^{K_{hs}} P_{hs,dis,k}^t + \sum_{k=1}^{K_{chp}} P_{chp,0,k}^t = L_h^t \quad (10)$$

其中, L_h^t 为系统热输出端口 t 时刻的输出功率; $P_{chp,0,k}^t$ 为第 k 台 CHP 机组 t 时刻的输出热功率; $P_{hs,dis,k}^t$ 为第 k 台热储能装置 t 时刻与多能源系统的净交换功率; $P_{ab,0,k}^t$ 和 $P_{eb,0,k}^t$ 分别为第 k 台燃气锅炉和电锅炉 t 时刻的输出功率; K_{hs} 为热储能数量。

(4) 需求侧功率平衡约束。

$$L_j^t + L_{C,j}^t + L_{F,up,j}^t - L_{F,down,j}^t = L_{D,j}^t \quad (11)$$

其中, L_j^t 为系统第 j 个输出端口 t 时刻的输出功率; $L_{D,j}^t$ 为系统第 j 个输出端口 t 时刻的负荷需求量。

2.2.2 能量转换约束

$$P_{tr,0,k}^t = \eta_{tr,k} P_{tr,1,k}^t \quad (12)$$

$$P_{chpe,0,k}^t = \eta_{chpe,k} P_{chp,1,k}^t \quad (13)$$

$$P_{chph,0,k}^t = \eta_{chph,k} P_{chp,1,k}^t \quad (14)$$

$$P_{ab,0,k}^t = \eta_{ab,k} P_{ab,1,k}^t \quad (15)$$

$$P_{eb,0,k}^t = \eta_{eb,k} P_{eb,1,k}^t \quad (16)$$

其中, $\eta_{chpe,k}$ 和 $\eta_{chph,k}$ 分别为第 k 台 CHP 机组产电和产热的效率; $\eta_{tr,k}$ 、 $\eta_{ab,k}$ 和 $\eta_{eb,k}$ 分别为第 k 台变压器、燃气锅炉和电锅炉的能量转换效率。

2.2.3 系统运行约束

系统运行约束包括系统输入输出约束和能量转换装置的输入约束。

$$0 \leq P_i^t \leq P_i^{\max} \quad (17)$$

$$0 \leq L_j^t \leq L_{D,j}^t \quad (18)$$

$$0 \leq P_{tr,1,k}^t \leq P_{tr,k}^{\max} N_{tr,k}^t \quad (19)$$

$$0 \leq P_{chp,1,k}^t \leq P_{chp,k}^{\max} N_{chp,k}^t \quad (20)$$

$$0 \leq P_{ab,1,k}^t \leq P_{ab,k}^{\max} N_{ab,k}^t \quad (21)$$

$$0 \leq P_{eb,1,k}^t \leq P_{eb,k}^{\max} N_{eb,k}^t \quad (22)$$

其中, $P_i^{\max}$ 为能源枢纽第 i 类能源的最大输入功率; $P_{tr,k}^{\max}$ 、 $P_{chp,k}^{\max}$ 、 $P_{ab,k}^{\max}$ 和 $P_{eb,k}^{\max}$ 分别为第 k 台变压器、CHP 机组、燃气锅炉和电锅炉的最大输入功率; $N_{tr,k}^t$ 、 $N_{chp,k}^t$ 、 $N_{ab,k}^t$ 和 $N_{eb,k}^t$ 分别为第 k 台变压器、CHP 机组、燃气锅炉和电锅炉 t 时刻的元件运行状态, 0 表示元件故障, 1 表示元件运行。

2.2.4 储能装置约束

储能约束包括能量平衡约束、容量约束、功率充

放状态和上下限约束等。

$$P_{s,dis,k}^t = P_{s,0,k}^t - P_{s,1,k}^t \quad (23)$$

$$E_{s,k}^{t+1} = (1 - \gamma_{s,k}) E_{s,k}^t + (\eta_{s,c,k} P_{s,1,k}^t \Delta t - P_{s,0,k}^t \Delta t / \eta_{s,d,k}) \quad (24)$$

$$0 \leq P_{s,0,k}^t \leq P_{s,0,k}^{\max} \alpha_{s,k}^t \quad (25)$$

$$0 \leq P_{s,1,k}^t \leq P_{s,1,k}^{\max} \beta_{s,k}^t \quad (26)$$

$$0 \leq \alpha_{s,k}^t + \beta_{s,k}^t \leq 1 \quad (27)$$

$$E_{s,k}^{\min} \leq E_{s,k}^t \leq E_{s,k}^{\max} \quad (28)$$

$$E_{s,k}^0 = E_{s,k}^{T+1} \quad (29)$$

$$\alpha_{s,k}^t \leq N_{s,k}^t \quad (30)$$

$$\beta_{s,k}^t \leq N_{s,k}^t \quad (31)$$

其中, $P_{s,1,k}^{\max}$ 和 $P_{s,0,k}^{\max}$ 分别为第 k 台 s 类储能装置的最大充、放功率; $E_{s,k}^{\min}$ 和 $E_{s,k}^{\max}$ 分别为储能装置的最小和最大容量; $\alpha_{s,k}^t$ 和 $\beta_{s,k}^t$ 为储能装置充放状态, 0 表示无能量充放, 1 表示能量充放; $N_{s,k}^t$ 为第 k 台 s 类储能装置 t 时刻的运行状态, 0 表示元件故障, 1 表示元件运行。

2.2.5 需求响应约束

本文中只有柔性负荷参与需求响应, 如下所示:

$$\sum_{t=1}^T L_{F,up,j}^t = \sum_{t=1}^T L_{F,down,j}^t \quad (32)$$

$$0 \leq L_{F,up,j}^t \leq L_{F,up,j}^{\max} M_{F,up,j}^t \quad (33)$$

$$0 \leq L_{F,down,j}^t \leq L_{F,down,j}^{\max} M_{F,down,j}^t \quad (34)$$

$$0 \leq M_{F,up,j}^t + M_{F,down,j}^t \leq 1 \quad (35)$$

其中, $L_{F,up,j}^{\max}$ 和 $L_{F,down,j}^{\max}$ 分别为第 j 类柔性负荷 t 时刻的向上和向下最大调整量; $M_{F,up,j}^t$ 和 $M_{F,down,j}^t$ 分别为第 j 类柔性负荷 t 时刻的向上和向下调整状态, $M_{F,up,j}^t = 1$ 和 $M_{F,down,j}^t = 1$ 分别表示负荷需求向上和向下调整。

3 多能源系统可靠性评估

3.1 可靠性评估指标

本文采用传统可靠性指标来量化评估该多能源系统的可靠性, 包括负荷削减频率 (FLC)、负荷削减概率 (PLC) 和负荷供应不足期望 (EENS)。此外, 本文采用可靠性提升率指标刻画储能和需求响应对多能源系统可靠性的影响, 计算公式如下:

$$\delta_j = \frac{E_{EENS,j}^n - E_{EENS,j}^0}{E_{EENS,j}^0} \times 100\% \quad (36)$$

其中, δ_j 为第 j 种负荷 EENS 的提升率; $E_{EENS,j}^n$ 为场景 n 的第 j 种负荷 EENS 指标; $E_{EENS,j}^0$ 为无储能和需求响应协调优化的系统第 j 种负荷 EENS 指标。

3.2 多能源系统元件停运模型

本文基于能源枢纽模型构建多能源系统, 在对能源枢纽模型进行可靠性评估时, 考虑到能源枢纽模型是对未来能源网络模型抽象化的描述, 侧重于能量的输入、转换与存储、输出^[11-14], 因此, 假设能量输送环节完全可靠, 能源枢纽输入侧每时每刻均可

提供最大功率。能量转换和存储装置的停运模型采用传统电力系统可靠性评估中元件的两状态停运模型,并使用蒙特卡洛模拟法对元件的运行和停运两状态的持续时间进行抽样^[25]。

3.3 可靠性评估算法

由本文1.2节和1.3节给出的多能存储和综合需求响应模型可知,储能的充放能和需求响应的负荷调整均是时间连续过程,且与系统的优化运行息息相关。因此,本文将时序蒙特卡洛模拟法与考虑运行的最优负荷削减模型相结合,评估计及多能存储和综合需求响应的多能源系统可靠性。首先使用时序蒙特卡洛模拟法抽取系统各元件的状态持续时间,得到每个时段的系统状态;其次通过最优负荷削减模型计算得到每小时的最优负荷削减量和削减状态;最后累积计算可靠性指标。具体步骤如下:

(1)输入多能源系统及其元件参数数据,初始化系统各元件的状态;

(2)使用时序蒙特卡洛法模拟抽样得到研究周期 T 内每小时的系统元件状态,以天为单位将系统状态划分成不同区块;

(3)初始化区块计数($d=1$)和模拟年数($y=1$);

(4)选取一个24 h区块,模拟的系统元件状态下,求解该区块的系统最优负荷削减问题,得到该区块每小时的负荷削减状态和最优负荷削减量;

(5)如果模拟样本数达到一年($d=365$),转向步骤(6),否则令 $d=d+1$,转向步骤(4);

(6)计算该年的系统可靠性指标,并令 $y=y+1$;

(7)如果模拟年数到达上限($y>10\,000$)或者系统EENS指标方差达到精度要求($\varepsilon<0.05$),转向步骤(8),否则令 $d=1$,转向步骤(4);

(8)计算多能源系统的可靠性指标。

4 算例分析

本节将提出的多能源系统可靠性评估方法应用于第1节建立的多能源系统中,验证模型和算法的有效性。该多能源系统包括2台变压器、3台CHP机组、1台电锅炉和1台燃气锅炉,相关参数见附录中表A1。该系统还包括1台电储能装置、3台气储能装置和1台热储能装置,具体参数见附录中表A2。

为了提升计算效率,采用典型日曲线表征全年水平,图2和图3分别给出了多能源系统的电、热典型日负荷曲线和电、气典型日能源价格。不同的季节和典型日会影响负荷和能源价格曲线,因此,本文采用负荷和能源价格调整系数表征不同季节、不同典型日的负荷和能源价格^[26],如附录中表A3所示。将电和热2种负荷的削减成本单价分别设置为50元/(kW·h)、40元/(kW·h)^[26]。能源枢纽模型能源输入端电和气的最大输入量分别设为700 kW和

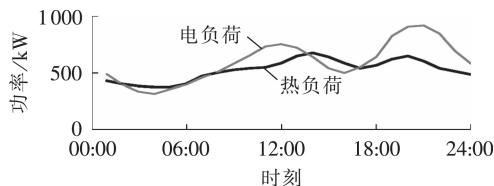


图2 典型日负荷需求曲线

Fig.2 Typical daily loads demand curve

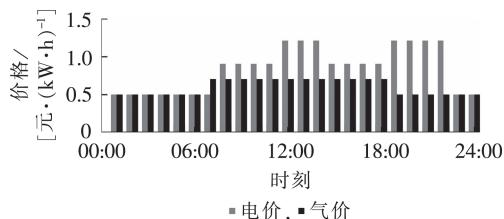


图3 典型日能源价格

Fig.3 Typical daily energy price

900 kW,最大柔性负荷设为该时刻系统总负荷的10%。

本文设置9个场景分析各类储能和需求响应对多能源系统可靠性和经济性的影响,如表1所示。表中,“×”表示多能源系统不存在此类储能装置或此种负荷需求响应;“√”表示多能源系统中存在此类储能装置或此种负荷需求响应。

表1 多能源系统研究场景

Table 1 Different scenarios of integrated energy systems

场景	电储能	气储能	热储能	电需求响应	热需求响应
1	×	×	×	×	×
2	√	×	×	×	×
3	×	√	×	×	×
4	×	×	√	×	×
5	√	√	√	×	×
6	×	×	×	√	×
7	×	×	×	×	√
8	×	×	×	√	√
9	√	√	√	√	√

本文建立的最优负荷削减模型是一个混合整数线性规划(MILP)模型,故调用Gurobi求解器进行求解。所有算例均在Inter Core i5-7500CPU@3.4 GHz、内存8 GB的计算机上进行计算分析。

4.1 可靠性分析

本节分析储能和需求响应对多能源系统可靠性的影响。表2给出了每个场景下的多能源系统的年度可靠性指标,并以场景1为参考,分析不同储能和需求响应对多能源系统可靠性的影响。

场景2—4分别增设电、气和热储能装置,多能源系统的负荷削减概率、频率和能量均有不同程度的减少。电储能安装在电负荷侧,其释放的能量既可以直接供应电负荷,又可以通过电锅炉间接供应热负荷,故其可显著提升电和热负荷的可靠性。热

表2 不同场景的多能源系统可靠性指标

Table 2 Reliability indicators for different scenarios

场景	负荷	FLC / 次	PLC / %	EENS / (kW·h)	δ / %
1	电负荷	11.75	4.63	3974.19	0
	热负荷	18.02	6.73	4751.06	0
2	电负荷	6.14	2.01	1376.39	65.37
	热负荷	13.12	4.48	2664.07	43.93
3	电负荷	11.58	4.48	3875.07	2.49
	热负荷	7.82	2.53	1510.14	68.21
4	电负荷	11.38	4.07	3388.25	14.74
	热负荷	8.58	3.31	1540.69	67.57
5	电负荷	5.47	1.87	1208.95	69.58
	热负荷	2.49	0.87	411.51	91.34
6	电负荷	6.64	2.40	1691.55	57.44
	热负荷	15.28	5.39	3230.26	32.01
7	电负荷	11.50	4.36	3555.41	10.54
	热负荷	12.07	4.64	2371.03	50.09
8	电负荷	6.58	2.21	1561.87	60.70
	热负荷	7.67	2.88	1530.10	67.79
9	电负荷	2.80	0.82	478.00	87.97
	热负荷	1.82	0.56	298.45	93.72

储能安装在热负荷侧,只能供应热负荷需求,但可以通过调整 CHP 机组的热出力来影响电出力,进而改善电负荷可靠性。由于 CHP 机组调节能力有限,故其可使热负荷削减量减少 3 200 kW·h,电负荷仅减少 600 kW·h。气储能安装在气源侧,由于气源是热负荷的主要供给来源,因此电负荷的可靠性降幅不明显,热负荷的负荷削减频率、概率和能量分别降低 58%、62% 和 68%。场景 5 同时计及了电、气和热 3 种储能,由表 2 可知,相比于仅考虑单一储能,协调优化电、气和热储能可大幅改善多能源系统可靠性。

场景 6 考虑电需求响应,通过调整电柔性负荷,改变了电负荷需求,并调整了电锅炉的热出力,进而影响了热负荷的供应水平。故其可显著提升电负荷的可靠性,也可较大程度地提升热负荷的可靠性。场景 7 考虑热需求响应,改变了热负荷需求,由于系统中不存在热转电装置,所以热需求响应对热负荷可靠性的提升率远远高于对电负荷的提升率。由场景 8 的结果可知,与单一需求响应的效果相比,电、热负荷综合需求响应的协调优化可以显著改善多能源系统的可靠性。

场景 9 考虑了多能存储和综合需求响应的协调优化,多能源系统各可靠性指标均显著降低。在负荷削减时间段,多能存储和综合需求响应的协调优化可以增加能量供应并降低负荷需求,进而提高多能源系统的可靠性。

4.2 储能和需求响应对多能源系统可靠性的影响分析

以秋季典型工作日中 1 台变压器和 1 台燃气锅炉故障为例,分析储能和需求响应对系统可靠性的影响。

图 4 和图 5 分别为场景 1、5 和 8 的秋季典型工作日电、热负荷削减曲线。由于变压器和燃气锅炉等主要能量转换装置故障,导致电、热需求供应不足,在时段 18:00—23:00 出现电负荷削减,最大切负荷达到 116 kW。在时段 10:00—15:00 和 18:00—23:00 出现热负荷削减,最大切负荷达到 145 kW。

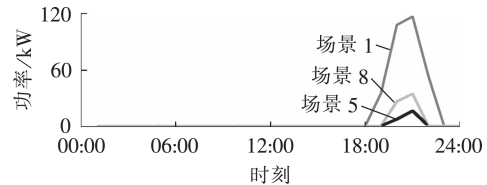


图4 典型日的电负荷削减曲线

Fig.4 Daily electrical load shedding curves

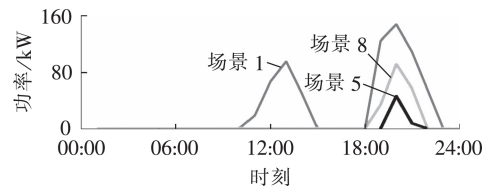


图5 典型日的热负荷削减曲线

Fig.5 Daily heat load shedding curves

图 6 显示了场景 5 中典型日的电、热储能装置的能源充放功率。对比图 4 可知,电储能在能量供应不足的时段 18:00—23:00 释放能量,减少了负荷削减量和停电持续时长。热储能在能量供应不足的时段 10:00—15:00 和 18:00—23:00 释放能量,对比图 5 可知,通过热储能的优化,减少了负荷削减量和停电持续时长,时段 10:00—15:00 的负荷不再削减,降低了负荷削减频率。

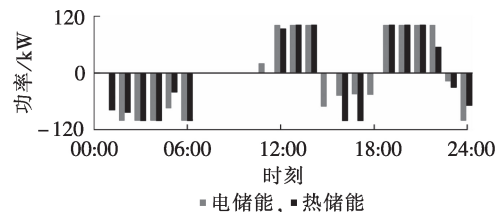


图6 典型日场景5的储能充放功率

Fig.6 Daily charge and discharge power curves of storage devices in Scenario 5

图 7 展示了场景 8 中典型日的电、热柔性负荷的调整曲线。由图 4 和图 5 可知,在时段 10:00—15:00,热负荷侧通过调整热柔性负荷直接降低热需求,电

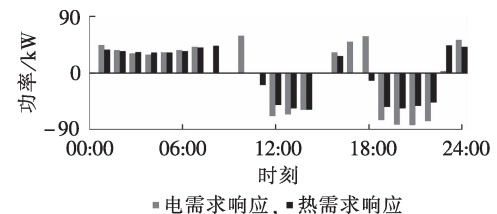


图7 典型日场景8的柔性负荷调整曲线

Fig.7 Daily flexible load adjustment curves in Scenario 8

负荷侧通过调整电柔性负荷来增加电锅炉的热出力,进而提高热负荷的供应能力,两者协调运行使得该时间段的负荷削减量和持续时长降至0。在时段18:00—23:00,电和热需求响应分别通过调整柔性负荷,减小此时间段的负荷需求,进而使得电和热负荷的削减量和停电持续时长显著减小。

4.3 经济性分析

储能和需求响应可显著降低系统运行成本,本节分析储能和需求响应对多能源系统经济性的影响。图8给出了不同场景下模拟周期的系统年平均运行成本。进行对比分析可得如下结论。

(1)场景2、3和4分别增设电、气和热储能装置,与场景1相比,负荷削减惩罚成本和总成本均不同程度地降低,场景2降幅最大,负荷削减成本减少45%,总成本降低5%。场景5考虑了电、热、气储能装置的综合协调优化,使得系统负荷削减惩罚成本减小80%,总成本降低10%。

(2)场景6和7分别考虑了电需求响应和热需求响应,与场景1相比,负荷削减惩罚成本分别减少50%和30%,总成本分别降低4%和2%。场景8考虑了电、热负荷综合需求响应的协调优化,使得系统负荷削减惩罚成本减少65%,总成本减少6%。

(3)场景9考虑了多能存储和综合需求响应的协调优化,系统运行成本显著降低,负荷削减惩罚成本减少90%,总成本减少13%。

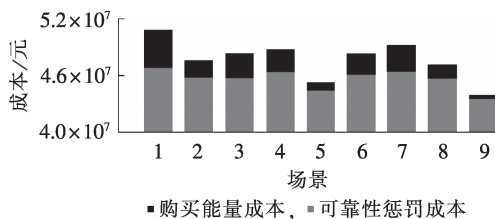


图8 不同场景的年平均成本

Fig.8 Annual average costs for different scenarios

综上,相比单一储能和需求响应,多能存储和综合需求响应的协调优化可显著提高系统运行经济性。

5 结论

为了分析储能和需求响应对多能源系统可靠性的影响,提出一种计及多能存储和综合需求响应的多能源系统可靠性评估模型。通过算例分析验证了本文所建模型的有效性和正确性。算例结果表明:

(1)相比单一储能和需求响应,多能存储和综合需求响应可显著改善多能源系统可靠性和经济性;

(2)在负荷削减时间段,多能存储和综合需求响应的协调优化可以增加能量供应,降低负荷需求,进而减小系统负荷削减的频率、概率和能量;

(3)多能存储和综合需求响应的协调优化可调整多能源系统能源供给和柔性负荷需求,减少多能源系统的能源购买成本和负荷削减成本;

(4)不同类型的储能和需求响应对多能源系统不同负荷可靠性的影响差异较大,其结果对多能源系统的优化规划更加具有现实指导意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 贾宏杰,穆云飞,余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考[J]. 电力建设,2015,36(1):16-25.
JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan. Thought about the integrated energy system in China [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1):16-25.
- [2] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):1-5.
DENG Jianling. Concept of energy internet and its development modes [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 1-5.
- [3] DUIĆ N, ROSEN M A. Sustainable development of energy systems [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 87: 1057-1062.
- [4] 徐箴,孙宏斌,郭庆来. 综合需求响应研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报,2018,38(24):7194-7205.
XU Zheng, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24):7194-7205.
- [5] PARISIO A, VECCHIO C D, VACCARO A. A robust optimization approach to energy hub management [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 42(1):98-104.
- [6] 熊文,刘育权,苏万煌,等. 考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):118-126.
XIONG Wen, LIU Yuquan, SU Wanhuan, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementarity [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 118-126.
- [7] 郝然,艾芊,朱宇超,等. 基于能源集线器的区域综合能源系统分层优化调度[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):171-178.
HAO Ran, AI Qian, ZHU Yuchao, et al. Hierarchical optimal dispatch based on energy hub for regional integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):171-178.
- [8] 崔鹏程,史俊伟,文福拴,等. 计及综合需求侧响应的能量枢纽优化配置[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):101-109.
CUI Pengcheng, SHI Junyi, WEN Fushuan, et al. Optimal energy hub configuration considering integrated demand response [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 101-109.
- [9] 徐航,董树锋,何仲潇,等. 基于多能互补的电/热综合需求响应[J]. 电网技术,2019,43(2):480-489.
XU Hang, DONG Shufeng, HE Zhongxiao, et al. Electro-thermal comprehensive demand response based on multi-energy complementarity [J]. Power System Technology, 2019, 43(2):480-489.
- [10] BRAHMAN F, HONARMAND M, JADID S. Optimal electrical and thermal energy management of a residential energy hub, integrating demand response and energy storage system [J]. Energy and Buildings, 2015, 90:65-75.
- [11] KOEPEL G, ANDERSSON G. The influence of combined power, gas, and thermal networks on the reliability of supply [C] // Proceedings of the Sixth World Energy System Conference. Torino, Italy: [s.n.], 2006:646-651.
- [12] KOEPEL G A. Reliability considerations of future energy systems: multi-carrier systems and the effect of energy storage [D]. Zurich, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2007.
- [13] KOEPEL G, ANDERSSON G. Reliability modeling of multi-

- carrier energy systems[J]. Energy, 2009, 34(3): 235-244.
- [14] XU X, HOU K, JIA H, 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, CO, USA: IEEE, 2015: 1-5.
- [15] LEI Y, HOU K, WANG Y, et al. A new reliability assessment approach for integrated energy systems; using hierarchical decoupling optimization framework and impact-increment based state enumeration method[J]. Applied Energy, 2018, 210: 1237-1250.
- [16] 董晓晶, 刘洪, 宫建峰, 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): 19-28.
- 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): 19-28.
- [17] FAVRE P P. A vision of future energy networks [C]//Power Engineering Society Inaugural Conference & Exposition in Africa. Durban, South Africa: IEEE, 2005: 13-17.
- [18] MOHAMMADI M, NOOROLLAHI Y, MOHAMMADI I B, et al. Energy hub: from a model to a concept—a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 1512-1527.
- [19] 廖川平. 超级电容电池[J]. 化学通报, 2014, 77(9): 865-871.
- LIAO Chuanping. Supercapacitive cell[J]. Chemistry, 2014, 77(9): 865-871.
- [20] RYNKIEWICZ R. Discharge and charge modeling of lead acid batteries[C]//Proceedings of the 1999 14th annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. Dallas, TX, USA: IEEE, 1999: 707-710.
- [21] YANG R X, WANG H H. Total structure FE and theoretical analysis of MAN gas holder[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 799: 596-599.
- [22] SHARAFIAN A, HERRERA O E, MÉRIDA W. Performance analysis of liquefied natural gas storage tanks in refueling stations [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 36: 496-509.
- [23] 董燕京. 热水蓄热器在多热源联网供热系统的应用与节能分析[J]. 区域供热, 2013(2): 94-97.
- DONG Yanjing. Application and energy saving analysis of hot water regenerator in Multi-heat source combined heating system [J]. District Heating, 2013(2): 94-97.
- [24] MIAO X Y, ZHENG T, GÖRKE U J, et al. Thermo-mechanical analysis of heat exchanger design for thermal energy storage systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114: 1082-1089.
- [25] LI W. Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods[M]. Berlin, Germany: Springer Science & Business Media, 2013.
- [26] SHAHMOHAMMADI A, MORADI D M, GHASEMI H, et al. Optimal design of multicarrier energy systems considering reliability constraints [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 878-886.

作者简介:



路红池

路红池(1994—),男,河北邢台人,硕士研究生,主要研究方向为多能源系统规划与可靠性(E-mail: hongchilu@foxmail.com);

谢开贵(1972—),男,四川眉山人,教授,博士,主要研究方向为电力系统规划与可靠性、电力系统优化运行、电力系统分析计算(E-mail: kaiguixie@vip.163.com);

王学斌(1989—),男,青海西宁人,工程师,硕士,从事电力系统分析工作(E-mail: 519957075@qq.com);

吴涛(1992—),男,贵州铜仁人,博士研究生,主要研究方向为电力系统规划与可靠性(E-mail: wutao9210@163.com);

胡博(1983—),男,河南南阳人,教授,博士,主要研究方向为电力系统规划与可靠性、电力系统分析计算、并行计算(E-mail: hboy8361@163.com);

伏坚(1995—),男,四川巴中人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划与可靠性(E-mail: fujian@cqu.edu.cn)。

Reliability assessment of multi-energy system considering multi-storage and integrated demand response

LU Hongchi¹, XIE Kaigui¹, WANG Xuebin², WU Tao¹, HU Bo¹, FU Jian¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Grid Qinghai Electric Power Company Electric Power Research Institute, Xining 810008, China)

Abstract: A reliability assessment model for multi-energy system considering MS-IDR (Multi-Storage and Integrated Demand Response) is proposed. Firstly, the electric and thermal load is divided into flexible load and non-flexible load, and the integrated demand response model of multi-energy system is established. Then, the optimal load curtailment model considering MS-IDR is built with the objective of minimizing the total cost of energy purchase and load shedding. The reliability of the multi-energy system with MS-IDR is evaluated based on the sequential Monte Carlo simulation method. Based on the proposed multi-energy system containing heat storage, electricity storage and gas storage, the reliability of multi-energy system is evaluated under nine different scenarios. Case studies demonstrate that the multi-storage and the integrated demand response can coordinately optimize the energy supply and flexible load demand, reduce the amount of load shedding caused by component failure and enhance the reliability and economy performance of the multi-energy system.

Key words: multi-energy system; multi-storage; integrated demand response; optimal load curtailment; reliability assessment

附录

表 A1 能量转换装置的相关参数

Table A1 Related parameters of the energy converters

能量转换装置	最大输入功率/kW	能量转换效率/%		故障率/(次 a ⁻¹)	修复率/(次 a ⁻¹)
		产电	产热		
变压器	350	0.98	0	6	394
CHP 机组	300	0.4	0.45	8	192
燃气锅炉	250	0	0.9	4	196
电锅炉	350	0	0.94	2	198

表 A2 储能装置的相关参数

Table A2 Related parameters of the energy storage devices

储能装置	最大放电功率	最大充电功率	最大容量	最小容量	充放效率/%	自损系数/%	故障率	修复率
	/kW	/kW	/(kWh)	/(kW h)			/(次 a ⁻¹)	/(次 a ⁻¹)
电储能	100	100	600	20	95	5	1	199
气储能	250	200	1000	50	92	8	1	199
热储能	100	100	600	20	90	10	1	199

表 A3 负荷、价格的周和季节调整系数

Table A3 Weekly and seasonal coefficients of loads and energy price

对象	周系数			季节系数		
	工作日	周末	春	夏	秋	冬
电负荷	1	0.8	0.7	1	0.9	0.8
热负荷	1	0.8	0.75	0.65	0.85	1
电价	1	0.8	0.8	1	0.9	0.7
气价	1	0.8	0.8	0.7	0.9	1