

# 多元储能系统运行策略对综合能源微网可靠性影响评估

刘洪, 李吉峰, 葛少云, 张鹏, 孙昊, 王亦然

(智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 300072)

**摘要:** 针对目前储能环节对供电可靠性影响仍有待挖掘的研究背景, 通过制定储能环节不同的运行策略, 结合相关可靠性指标, 量化分析了多元储能对供电可靠性的影响。首先, 以综合能源微网作为研究对象, 构建了关键设备的能效出力模型; 其次, 针对储能设备制定不同的运行策略, 并梳理相应指标以分析储能设备的自身特性以及对系统整体供电可靠性的影响; 最后, 通过实际算例量化分析储能设备不同配置及不同运行策略对系统供电可靠性产生的影响。重点分析了综合能源微网能量存储环节对系统供电可靠性的影响, 从而为后续储能设备的规划提供了指导。

**关键词:** 综合能源微网; 储能系统; 运行策略; 可靠性

## 0 引言

由于传统化石能源的过度消耗以及不可再生性, 建立以安全可靠、经济高效、清洁环保为目标的先进综合能源供给系统, 已经成为全球各地共同追求的发展目标<sup>[1]</sup>。作为综合能源系统内的关键环节, 储能系统可以发挥平滑负荷以及平抑可再生能源出力不确定性的作用; 同时, 当系统处于孤岛独立运行状态时, 储能设备是决定负荷能否持续供应的关键因素。因此, 研究多元储能设备对综合能源系统的影响十分必要。

目前针对储能环节的研究主要集中在以下两个方面。

1) 对储能设备的容量配置方面。文献[2]研究了独立模式下综合能源微网内多能存储系统优化配置方法, 并提出了微网系统内储电、储热设备的功率/容量配置模型; 文献[3]以平抑风电出力的不确定性为目标, 提出了一种储能容量配置方法, 并具体分析了风电并网方式、装机容量等因素对储能配置的影响; 文献[4]结合博弈论建立了主动配电网扩展规划和光储选址定容的双层优化模型, 并分析了配置方案与用户用电成本之间的关系。

2) 分析储能系统参与能源管理、调峰调频的作用方面。文献[5]通过储能设备对热电运行约束进行有效解耦, 提出了含热电联供综合能源系统的运

行优化方法; 文献[6]以微电网经济利益最大化为目标, 介绍了一种利用负荷与储能协调配合平抑联络线功率波动的策略; 文献[7]在高比例可再生能源接入的背景下, 综合建立技术与经济指标, 提出了一种储能与常规调峰手段的组合调峰方法; 文献[8]通过引入电热两种储能装置, 并制定以经济性最优为目标的能量管理策略, 以解决“以热定电”模式造成大规模弃风与调度经济性较差等问题。

然而, 评估多类型储能系统对综合能源系统可靠性的影响, 目前尚缺乏相关的研究。文献[9]考虑了不同能源之间的品位差异以及通过转换设备产生的耦合关系, 提出了一种能够评估综合能源微网供电可靠性的方法, 但是系统内储能装置是运行在固定策略下, 同时也缺少储能影响的专项分析。文献[10-11]分析了储电装置在不同运行策略下对电力系统可靠性的影响, 但针对单一能源网络的评估与研究, 已经难以满足能源互联网背景下多能耦合协同规划设计的需求。

上述研究成果从思路与模型等方面为本文的研究奠定了基础, 然而目前的研究仍存在以下问题有待完善: ①研究对象大多停留在单一能源储能系统, 而多类型储能设备对综合能源系统的影响仍有待深入挖掘; ②研究问题大多是以经济性最优为目标的调度控制, 未考虑储能系统对综合能源系统可靠性的影响, 而作为未来吸引投资建设的另一重要依据, 量化储能系统对综合能源可靠性的影响十分必要。

因此, 基于上述分析, 本文考虑了多元储能在综合能源微网系统的作用, 并通过算例量化分析了储能设备不同运行策略及不同配置方案对微网系统供

收稿日期: 2018-03-13; 修回日期: 2018-07-16。

上网日期: 2018-12-10。

国家重点研发计划资助项目(2017YFB0903400); 国家自然科学基金资助项目(51777133)。

能可靠性的影响,验证了本文所提观点的有效性 with 适用性。

## 1 综合能源微网架构

作为能源互联网的关键节点,综合能源微网由于其具备灵活的运行模式、高度的多能源集成性与智能的调控方式受到了越来越多的关注;同时,综合能源微网是能源互联网的初级阶段,是以小区、园区或一个相对较小的区域为单位建设的自治运行的能源互联网,具有更高的可建设性。在结构上,综合能源微网可分为能源输入、转换、存储和输出等环节;在构成上,能量管理设备、分布式可再生能源设备、储能设备、能量转换设备和多种终端能源负荷共同组成了综合能源微网的主要架构。本文基于上述特点,构建包含分布式冷热电联供系统、燃气热泵、分布式风机、电制冷机、储电装置、储热装置等设备,以及电/气/冷/热多种能源在内的综合能源微网,典型的微网系统结构如图1所示。

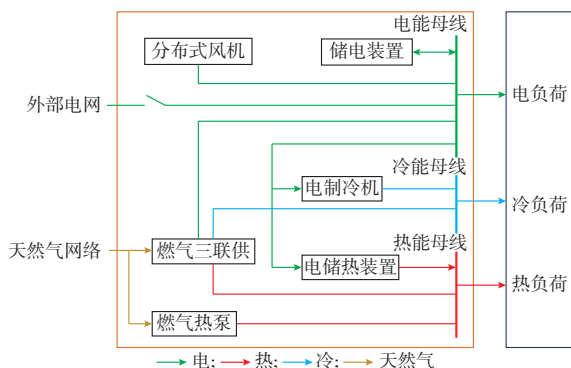


图1 综合能源微网结构

Fig. 1 Structure of multi-energy microgrid

微网系统内包含多种供能设备机组,通过相互配合以满足不同终端能源负荷需求。电负荷常规情况下由冷热电三联供系统及风机进行供给,在供给不足情况下调用储电设备补充;热负荷由冷热电三联供系统及燃气热泵进行供应,供给不足情况下调用储热设备补充;冷负荷由冷热电三联供系统及电制冷机进行供给。

本文后续将重点评估微网系统内储能对电弧岛模式微网系统可靠性的影响,同时做出如下假设:①综合能源微网内部的配送网络均为辐射结构,在可靠性评估过程中考虑设备之间的隔离;②不同终端能源负荷基于上述分析由相应的供能设备或储能进行集中供应;③机组设备的故障由可靠性参数决定,故障相互独立,并且只考虑微网系统内发生单重故障的情况;④在必要时刻外部能源主网络能提供足够的天然气。

## 2 综合能源微网设备能效与出力模型

由于综合能源微网系统内的机组出力以及负荷需求均会随时间发生变化,将会直接影响微网系统内的供需平衡,本节针对微网系统内的关键设备建立能效出力模型,为后续的评估建立模型基础。

### 2.1 风电机组

在风轮系数、风轮扫掠面积、空气密度不变的情况下,风速是决定风机输出功率的主要因素。风电机组输出功率  $P_{output}^{WT}$  的表达式如下:

$$P_{output}^{WT} = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_{ci} \\ A + Bv + Cv^2 & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_x^{WT} & v_r \leq v < v_{co} \\ 0 & v_{co} \leq v \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $v$  为风机轮毂处的风速;  $v_{ci}$ ,  $v_r$ ,  $v_{co}$  分别为风机的切入风速、额定风速和切出风速;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  为风机功率特性曲线参数;  $P_x^{WT}$  为风机的额定功率。

### 2.2 微型燃气三联供系统

正常运行状况下,三联供系统将为吸收式冷机、换热器等自身设备以及微网系统内的电/热/冷终端能源负荷进行供给。常规的运行方式为计及基荷约束条件下的以热(冷)定电,动力设备参考微网终端热(冷)需求量制定运行计划,故实际发电量与电需求存在偏差。当系统发电量高于需求时,可将多余电量进行存储或上网卖出;当发电量低于需求时,可从电网购电或由微网内其他资源(如风机、储电设备)进行补充。不同类型用户对于冷/热能源的需求不同,当需求差异较大时,三联供系统会参考终端热/冷负荷需求中较小的值制定运行计划<sup>[12]</sup>。

在综合能源微网系统中,主要关注燃气三联供系统的出力特性、燃料耗量特性及运维特性等。在本文的研究中,重点关注燃气三联供系统的能效出力特性。燃气三联供系统的模型方程为<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} Q_{MT} = \frac{P_{output}^{CCHP} (1 - \eta_{MT}^{CCHP} - \eta_1^{CCHP})}{\eta_{MT}^{CCHP}} \\ Q_{h0} = Q_{MT} \eta_{rec}^{CCHP} K_{h0} \\ Q_{c0} = Q_{MT} \eta_{rec}^{CCHP} K_{c0} \\ \eta_{rec}^{CCHP} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_0} \\ V_{MT}^{CCHP} = \frac{\sum P_{output}^{CCHP} \Delta t}{\eta_{MT}^{CCHP} L} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $P_{output}^{CCHP}$  为燃气三联供系统输出电功率;  $Q_{MT}$  为燃气三联供系统的排气余热;  $\eta_{MT}^{CCHP}$  为燃气轮机的效率;  $\eta_1^{CCHP}$  为燃气三联供系统的散热损失系数;  $Q_{h0}$  和  $Q_{c0}$  分别为通过烟气余热产生的制热及制冷量;  $K_{h0}$  和  $K_{c0}$  分别为溴冷机的制热系数和制冷系

数,分别取 1.2 和 0.95;  $\eta_{\text{rec}}^{\text{CCHP}}$  为烟气余热回收效率;  $T_0$  为环境温度;  $T_1$  和  $T_2$  为环境系数,本模型中分别取 573.15 K 和 423.15 K;  $V_{\text{MT}}^{\text{CCHP}}$  为运行时间内燃气三联供系统消耗的天然气量;  $\Delta t$  为燃气轮机的运行时间;  $L$  为天然气的低热值,取为  $9.7(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$ 。

### 2.3 储电系统

当综合能源微网系统运行在并网运行模式下时,储电系统主要发挥平抑可再生能源出力不确定性、提高系统运行经济性的作用;而当微网系统运行在孤岛模式下时,储电系统则是重要的能源供给点,其充放电时序策略会直接影响电负荷的供给。

本文采用铅酸电池组成微网系统的储电单元,相比较于其他储能技术,铅酸电池由于其不受场地限制、充电效率与能量密度较高的特点,更适合在微网系统内使用,表示其荷电状态(SOC)的动态模型可表示为<sup>[8]</sup>:

$$S_{\text{SOC}}(t) = (1 - \delta)S_{\text{SOC}}(t-1) + \frac{P_{\text{C}}^{\text{ES}} \Delta t \eta_{\text{C}}^{\text{ES}}}{E_{\text{SOC,max}}} - \frac{P_{\text{D}}^{\text{ES}} \Delta t}{E_{\text{SOC,max}} \eta_{\text{D}}^{\text{ES}}} \quad (3)$$

式中:  $S_{\text{SOC}}(t)$  为  $t$  时刻储电单元的荷电状态;  $\delta$  为储电单元的自放电率;  $P_{\text{C}}^{\text{ES}}$  和  $P_{\text{D}}^{\text{ES}}$  分别为储电单元的充、放电功率;  $\eta_{\text{C}}^{\text{ES}}$  和  $\eta_{\text{D}}^{\text{ES}}$  分别为储电单元的充、放电效率;  $E_{\text{SOC,max}}$  为储电单元的额定容量。

### 2.4 储热系统

基于 2.2 节的介绍,综合能源微网内的三联供系统运行在“以热(冷)定电”的运行机制下,配合燃气热泵,二者均是参考终端能源需求制定运行计划,故在正常运行状况下基本不会生产多余的热量。因此,本文采用以蓄热式电锅炉为代表的电储热设备,在电能富裕时段将多余的电能转换成热能,从而起到后备可控资源的作用,在实现储热功能的同时还能够帮助消纳可再生能源,同时体现不同等级的能源利用。

其动态模型可表示为<sup>[8]</sup>:

$$H_{\text{HS}}(t) = (1 - k_{\text{LOSS}})H_{\text{HS}}(t-1) + Q_{\text{C}}^{\text{HS}} \Delta t \eta_{\text{C}}^{\text{HS}} - \frac{Q_{\text{D}}^{\text{HS}} \Delta t}{\eta_{\text{D}}^{\text{HS}}} \quad (4)$$

式中:  $H_{\text{HS}}(t)$  为  $t$  时刻储热单元的热量;  $k_{\text{LOSS}}$  为储热单元的散热率;  $Q_{\text{C}}^{\text{HS}}$  和  $Q_{\text{D}}^{\text{HS}}$  分别为储热单元的充、放热功率;  $\eta_{\text{C}}^{\text{HS}}$  和  $\eta_{\text{D}}^{\text{HS}}$  分别为储热单元的充、放热效率。

### 2.5 能源转换设备

除上述设备外,综合能源微网内还包含燃气热泵、电制冷机等能源转换装置。能源转换装置的能效出力模型可统一表示为:

$$P_{\text{b}} = C_{\text{ab}} P_{\text{a}} \quad (5)$$

式中:  $C_{\text{ab}}$  为输入能源 a 和输出能源 b 之间的转换系数;  $P_{\text{a}}$  和  $P_{\text{b}}$  分别为输入能源 a 和输出能源 b 的功率。

另外,本文在涉及运行与时序方面的分析中,考虑了机组/储能设备的出力约束、储能设备的容量约束、机组出力的爬坡约束等反映实际运行情况的约束条件。由于篇幅限制,本文不逐一列举说明。

## 3 储能运行策略及可靠性影响评估

### 3.1 储能运行策略

在保障系统内供需平衡的前提下,根据不同的运行需求,可以制定不同的储能运行策略。本文所研究的微网系统包含电储能与热储能两种储能设备,其中,微网系统内产生的多余电能会通过电储热装置转换成热能进行储存,以发挥储热设备的后备资源作用。因此,针对微网系统内的储电装置制定不同的运行策略会直接影响电能的存储情况,并间接影响热能的后备资源,从而影响微网系统的整体供能可靠性。基于上述分析,对于储电设备制定如下 3 种运行策略。

策略 1: 模拟风电出力曲线,计算风电机组的平均输出功率  $P_{\text{av}}^{\text{WT}}$ 。当  $t$  时刻风电机组的输出功率大于平均功率,则多余能量进入储电装置;当  $t$  时刻风电机组的输出功率小于平均功率,则通过储电装置放电补充至平均输出功率  $P_{\text{av}}^{\text{WT}}$ 。在该策略下,电储能设备的状态为:

$$P_{\pm}^{\text{ES}}(t) = \eta_{\pm}^{\text{ES}} (P_{\text{output}}^{\text{WT}}(t) - P_{\text{av}}^{\text{WT}}(t)) \quad (6)$$

式中:  $P_{\pm}^{\text{ES}}(t)$  为电储能设备的充、放电功率,其中“+”表示充电状态,“-”表示放电状态,公式计算结果中的符号代表电储能设备在该时刻的状态;  $\eta_{\pm}^{\text{ES}}$  为电储能设备的充、放电效率。

策略 2: 当  $t$  时刻风电机组与燃气三联供系统的电出力大于微网系统的电负荷需求时,则多余能量进入储电装置;当  $t$  时刻风电机组与燃气三联供系统的电出力小于微网系统的电负荷需求时,则储电装置放电,但是  $t$  时刻储电装置与风机的出力总和不得高于系统负荷需求的  $\beta$  (本文取 30%)。在该策略下,电储能设备的状态为:

$$P_{\pm}^{\text{ES}}(t) = \begin{cases} \eta_{\pm}^{\text{ES}} (P_{\text{output}}^{\text{WT}}(t) - \beta L_{\text{e}}(t)) & P_{\text{output}}^{\text{WT}}(t) > \beta L_{\text{e}}(t) \\ \min\{|P_{\text{output}}^{\text{WT}}(t) + P_{\text{output}}^{\text{CCHP}}(t) - L_{\text{e}}(t)|, |P_{\text{output}}^{\text{WT}}(t) - \beta L_{\text{e}}(t)|\} \eta_{\pm}^{\text{ES}} & P_{\text{output}}^{\text{WT}}(t) \leq \beta L_{\text{e}}(t) \& P_{\text{output}}^{\text{CCHP}}(t) < L_{\text{e}}(t) \\ \eta_{\pm}^{\text{ES}} P_{\text{output}}^{\text{WT}}(t) & P_{\text{output}}^{\text{CCHP}}(t) \geq L_{\text{e}}(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $L_e(t)$ 为 $t$ 时刻的电负荷需求。

策略3:当 $t$ 时刻风电机组与燃气三联供系统的电出力大于微网系统的电负荷需求时,则多余能量进入储电装置;当 $t$ 时刻风电机组与燃气三联供系统的电出力小于微网系统的电负荷需求时,则储电装置放电以满足电负荷需求。在该策略下,电储能设备的状态为:

$$P_{\pm}^{ES}(t) = \eta_{\pm}^{ES} (P_{\text{output}}^{\text{WT}}(t) + P_{\text{output}}^{\text{CCHP}}(t) - L_e(t)) \quad (8)$$

在明确了 $t$ 时刻电储能装置的充、放状态,以及功率大小之后,这里还需要进一步考虑储能设备运行中的功率以及容量限制,分别如式(9)及式(10)所示。

$$P_{\pm}^{ES}(t) = \begin{cases} -P_{\text{disch,max}}^{ES}(t) & P_{\pm}^{ES}(t) \leq -P_{\text{disch,max}}^{ES} \\ P_{\pm}^{ES}(t) & -P_{\text{disch,max}}^{ES} < P_{\pm}^{ES}(t) < P_{\text{ch,max}}^{ES} \\ P_{\text{ch,max}}^{ES}(t) & P_{\pm}^{ES}(t) \geq P_{\text{ch,max}}^{ES} \end{cases} \quad (9)$$

$$P_{\pm}^{ES}(t) = \begin{cases} P_{\pm}^{ES}(t) & P_{\pm}^{ES}(t) + E_{\text{SOC}}(t-1) \leq E_{\text{SOC,max}} \\ E_{\text{SOC,max}} - E_{\text{SOC}}(t-1) & P_{\pm}^{ES}(t) + E_{\text{SOC}}(t-1) > E_{\text{SOC,max}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{\text{ch,max}}^{ES}$ 和 $P_{\text{disch,max}}^{ES}$ 分别为电储能设备的最大充电和放电功率。

综上所述,在孤岛运行模式下,储能装置不同策略的运行机制如图2所示。

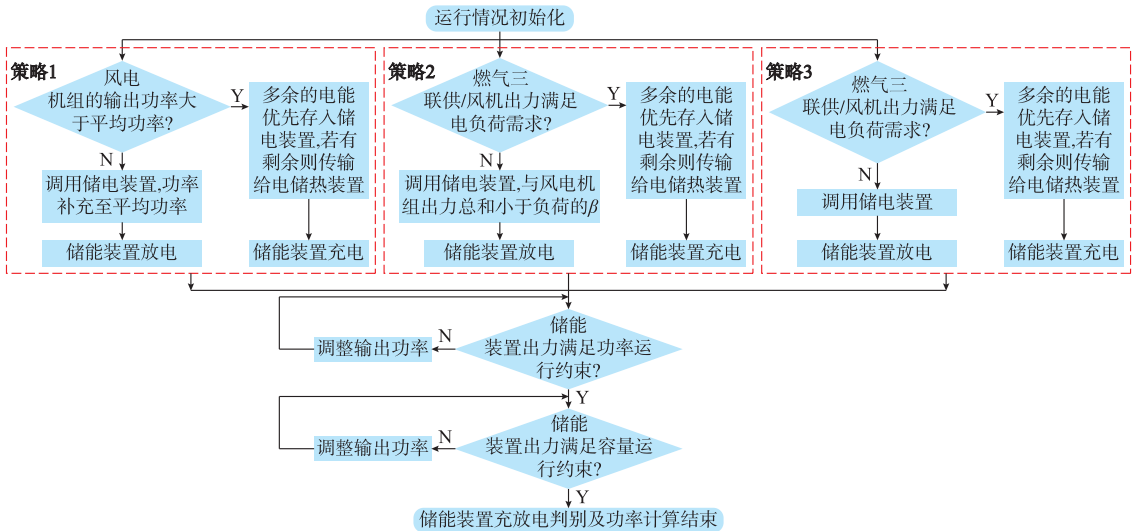


图2 不同策略储能装置运行机制逻辑图

Fig. 2 Logic diagram of operation mechanism for energy storage devices with different strategies

### 3.2 可靠性指标

本文从两个层面设置评估指标:首先,是参考文献[9]中所介绍的系统层面可靠性指标缺供能量期望( $R_{\text{LOEE}}$ )与系统供能不足持续时间( $R_{\text{SAIDI}}$ );其次,是与储能设备相关的设备层可靠性指标,从而进一步评估储能的作用与影响。评估指标的计算方法采用文献[9]中所介绍的蒙特卡洛模拟与故障模式影响分析(FMEA)相结合的方法,具体说明与计算公式如下。

#### 3.2.1 缺供能量期望

缺供能量期望从能量的角度说明微网系统内设备故障或停运事故对能源供给产生的影响,单位为( $\text{MW} \cdot \text{h}$ )/a。缺供能量期望越高,代表该类型能源受设备故障的影响越大,供能可靠性越低。以电能为例,指标的计算公式为:

$$R_{\text{LOEE}}^{\text{elec}} = \frac{8760}{T} \sum_{j=1}^N R_{\text{LOEE},j}^{\text{elec}} \quad (11)$$

式中: $T$ 为蒙特卡洛模拟的时长; $R_{\text{LOEE},j}^{\text{elec}}$ 为第 $j$ 次抽样得到的电能缺供能量期望结果; $N$ 为抽样总数。其中,以燃气三联供系统的故障为例,在故障时间段内系统的电能缺供能量期望为:

$$R_{\text{LOEE,CCHP}}^{\text{elec}} = \sum_{k_e, \text{CCHP}} (\lambda_{\text{CCHP}} R_{\text{LOEE,CCHP}}^{\text{elec},k_e}) \quad (12)$$

$$R_{\text{LOEE,CCHP}}^{\text{elec},k_e} = \begin{cases} 0 & L_e(t) \leq P_{\text{disch}}^{ES}(t) + P_{\text{output}}^{\text{WT}}(t) \\ \int_{r_{\text{CCHP}}} [L_e(t) - (P_{\text{disch}}^{ES}(t) + P_{\text{output}}^{\text{WT}}(t))] dt & \\ L_e(t) > P_{\text{disch}}^{ES}(t) + P_{\text{output}}^{\text{WT}}(t) & \end{cases} \quad (13)$$

式中: $R_{\text{LOEE,CCHP}}^{\text{elec}}$ 为冷热电三联供系统故障造成的电能缺供能量期望; $k_e, \text{CCHP}$ 为微网系统内电力供应受冷热电三联供故障影响的区域; $\lambda_{\text{CCHP}}$ 为冷热电三联

供系统的故障率;  $r_{\text{CCHP}}$  为冷热电三联供系统的修复时间;  $P_{\text{dischar}}^{\text{ES}}(t)$  为  $t$  时刻储电装置可以通过放电提供的电量;  $P_{\text{output}}^{\text{WT}}(t)$  为  $t$  时刻风电机组的出力。

而通过对式(13)的分析, 3.1 节所介绍的不同储能设备的运行策略将会直接对  $P_{\text{dischar}}^{\text{ES}}(t)$  的数值产生影响, 从而影响系统的供能可靠性。

### 3.2.2 系统供能不足持续时间

系统供能不足持续时间从时间的角度说明机组故障或停运事故对系统供能产生的影响, 单位为 h/a。时间越长, 代表该类型能源受机组故障的影响越大, 供能可靠性越低。以电能为例, 指标的计算公式为:

$$R_{\text{SAIDI}}^{\text{elec}} = \frac{8\ 760}{T} \sum_{j=1}^N R_{\text{SAIDI},j}^{\text{elec}} \quad (14)$$

其中, 以燃气三联供系统的故障为例, 在故障时间段内系统供能不足持续时间为:

$$R_{\text{SAIDI,CCHP}}^{\text{elec}} = \sum_{k_e, \text{CCHP}} (\lambda_{\text{CCHP}} R_{\text{SAIDI,CCHP}}^{\text{elec}, k_e}) \quad (15)$$

$$R_{\text{SAIDI,CCHP}}^{\text{elec}, k_e} = \begin{cases} 0 & L_e(t) \leq P_{\text{dischar}}^{\text{ES}}(t) + P_{\text{output}}^{\text{WT}}(t) \\ r_{\text{CCHP}} & L_e(t) > P_{\text{dischar}}^{\text{ES}}(t) + P_{\text{output}}^{\text{WT}}(t) \end{cases} \quad (16)$$

同理, 通过对式(16)的分析, 3.1 节所介绍的不同储能设备的运行策略将会直接对  $P_{\text{dischar}}^{\text{ES}}(t)$  的数值产生影响, 从而影响系统的供能可靠性。

### 3.2.3 平均释放深度

平均释放深度是在评估时间段内储能设备平均每次释放能量与额定容量的比值<sup>[14]</sup>, 频繁的深度放电会影响储能设备的寿命。具体计算公式如下:

$$\lambda_{\text{ES}} = \frac{1}{E_B N_{\text{dish}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{dish}}} E_{\text{dish}}(i) \quad (17)$$

式中:  $E_B$  为储能装置的容量;  $N_{\text{dish}}$  为储能装置的总释放次数;  $E_{\text{dish}}(i)$  为每次释放的能量。

### 3.2.4 设备重要程度

计算设备重要度指标, 首先引入“阀级”<sup>[15]</sup> 概念, 表征当元件发生故障而失效时对综合能源系统供能的影响, 其计算公式为:

$$T(e_i) = \frac{\psi_{s, \max}(e_i)}{\psi_{s, \max}} \quad (18)$$

式中:  $T(e_i)$  为元件  $e_i$  的阀级;  $\psi_{s, \max}$  为综合能源微网所能供给的最大总能量(不考虑系统的随机故障, 所有元件完全可靠),  $\psi_{s, \max}(e_i)$  为元件  $e_i$  故障后, 综合能源微网所能供给的最大总能量。

基于“阀级”概念, 元件  $e_j$  的重要度可以定义如下。

$$I_{\text{prob}}(e_i) = \frac{1 - T(e_i)}{\sum_{i=1}^I (1 - T(e_i))} \quad (19)$$

式中:  $I$  为微网系统内的设备元件数。

综合分析式(18)和式(19), 影响供能量越大的元件“阀级”越低, 其重要程度指标越大, 对综合能源微网可靠性的影响越大, 对整个系统也就越重要。

## 4 算例分析与对比

### 4.1 算例概况

本文以中国南方典型工业园区为例, 物理结构与设备构成如图 1 所示。在终端能源需求方面, 冷负荷需求主要集中在 4 月至 10 月; 热负荷需求包括生产工艺中包含的除湿、新风、热水等需求等, 虽然不存在明确的供应期, 但也具有一定的季节特性; 全年均有电负荷需求, 微网系统内全年的电/热/冷负荷需求特性曲线如附录 A 图 A1 所示。机组的运行参数如附录 A 表 A1 所示, 综合考虑微网内面积、发电效率、最大负荷需求等因素, 风电集群的总装机容量为 4.6 MW, 单台机组的年出力特性曲线如附录 A 图 A2 所示。各类设备机组的可靠性参数如附录 A 表 A2 所示, 其中, 风电机组及储能设备的参数可参考文献[16-17]。

### 4.2 储能配置影响分析

为充分分析储能设备对综合能源微网可靠性的影响, 本文设置如下 4 种场景, 基于文献[9]的方法, 并选取系统可靠性指标  $R_{\text{LOEE}}$  与  $R_{\text{SAIDI}}$  进行对比分析。另外, 假定储能设备按照 3.1 节策略 3 的方式运行。

场景 1: 微网系统内未配置储电、储热设备。

场景 2: 微网系统内配置 1 MW·h 储热设备, 未配置储电设备。

场景 3: 微网系统内配置 3 MW·h 储电设备, 未配置储热设备。

场景 4: 微网系统内配置 3 MW·h 储电设备以及 1 MW·h 储热设备。

储能设备的参数如附录 A 表 A3 所示, 其中, 电储能设备的初始容量为额定容量的 30%, 最大充放电功率为额定容量的 7.5%<sup>[18]</sup>, 设备的效率参数可参考文献[8]。热储能设备的初始容量为额定容量的 50%, 最大充放热功率为额定容量的 80%<sup>[19]</sup>。

针对上述不同场景进行可靠性计算, 计算结果如图 3 所示。

对比不同场景的系统可靠性指标, 储能设备可以全面提升综合能源微网的供能可靠性。其中, 加入储电设备不但可以提升供电可靠性, 还可以在必要时刻通过电制冷机进行能源转换, 从而间接提升微网系统的供冷可靠性; 而储热设备作为重要的后备资源, 对供热可靠性的提升起到了关键作用。

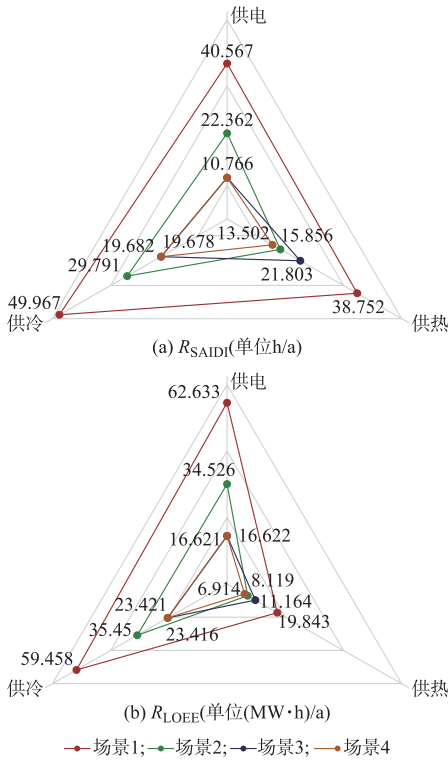


图 3 不同场景下的系统可靠性指标对比  
Fig. 3 Comparison of system reliability indices in different scenarios

### 4.3 运行策略影响分析

在 4.2 节场景 4 的基础上,基于 3.1 节中的不同运行策略,计算不同运行策略下系统及储能设备的可靠性指标,计算结果分别如表 1 及图 4 所示。

表 1 不同运行策略下的系统可靠性指标对比  
Table 1 Comparison of system reliability indices with different operation strategies

运行策略	$R_{LOEE}/((\text{MW} \cdot \text{h}) \cdot \text{a}^{-1})$			$R_{SAIDI}/(\text{h} \cdot \text{a}^{-1})$		
	电	热	冷	电	热	冷
1	44.667	50.9	607.7	45.806	128.931	18.763
2	25.125	10.8	173.5	36.605	16.273	515.962
3	16.622	23.6	913.9	23.415	910.766	213.502

针对系统可靠性计算结果进行分析可知,策略 1 中储能设备的主要目的是平抑可再生能源出力的不确定性,但当负荷水平较高,或者在风电机组或燃气三联供系统发生故障时,容易造成负荷停电,导致系统可靠性较差;策略 2 与策略 3 中储能设备的主要目的是提升微网系统的供能可靠性,区别在于策略 2 中对于可再生能源的渗透提出了限制。相较于策略 1,储能设备运行在策略 2 与策略 3 条件下可以更加有效地提升微网系统的供电可靠性,同时,由于电能对冷能的转换以及对热能的后备作用,合理的运行策略在直接提升微网系统供电可靠性的同时,也间接提升了冷/热能源的供给可靠性。

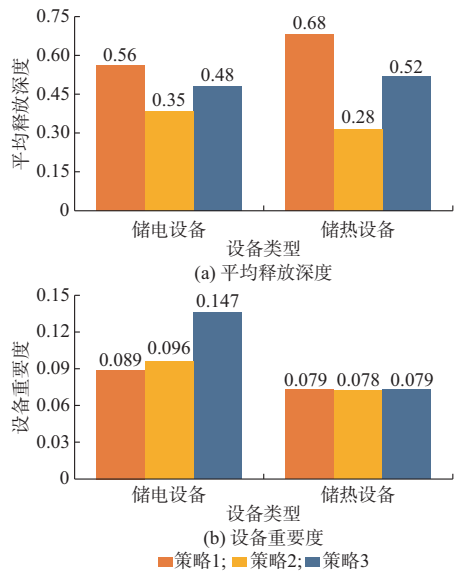


图 4 不同策略下的储能设备指标对比  
Fig. 4 Indices comparison of energy storage devices with different strategies

对于储能设备的可靠性指标而言,由于需要及时平抑可再生能源出力的不确定性,因此,策略 1 中储能设备的充放电循环次数更多、深度更大,长时间下易造成设备损坏;而策略 3 由于充分发挥了风电机组的效力,因此,充放电循环次数较少。在重要程度方面,由于储能设备对电/热/冷能源负荷的供给均会产生直接或间接的影响,因此相较于储能设备的重要程度更高;而对比不同运行策略下的储能重要程度指标,由于储能设备在策略 2 与策略 3 中通过调节供需平衡实现了系统可靠性的提升,因此设备的重要程度更高。

## 5 结语

作为构建能源互联网的重要环节,能源存储设备在平抑可再生能源出力、辅助供需平衡、提升系统功能可靠性的过程中发挥了至关重要的作用。本文以电孤岛式运行的综合能源微网为例,量化分析了多元储能配置方案以及运行策略对系统供能可靠性的影响,并通过相关指标分析了储能设备在综合能源微网中的作用,为储能设备的科学配置以及运行策略的合理制定提供了指导。

本文重点从可靠性的角度分析了不同运行策略下,多元储能系统对综合能源微网能源供给产生的影响,未来将会进一步结合经济性等目标对储能设备的选择进行分析,从而为微网系统内储能设备的选址定容规划提供指导。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] 艾芊, 郝然. 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 2-10. DOI: 10.7500/AEPS20170927008.
- AI Qian, HAO Ran. Key technologies and challenges for multi-energy complementarity and optimization of integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 2-10. DOI: 10.7500/AEPS20170927008.
- [2] 崔明勇, 王楚通, 王玉翠, 等. 独立模式下微网多能存储系统优化配置[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 30-38. DOI: 10.7500/AEPS20170825002.
- CUI Mingyong, WANG Chutong, WANG Yucui, et al. Optimal configuration of multi-energy storage system in standalone microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 30-38. DOI: 10.7500/AEPS20170825002.
- [3] 孙玉树, 唐西胜, 孙晓哲, 等. 风电波动平抑的储能容量配置方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(增刊1): 88-97.
- SUN Yushu, TANG Xisheng, SUN Xiaozhe, et al. Research on energy storage capacity allocation method for smoothing wind power fluctuations [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(Supplement 1): 88-97.
- [4] 刘洪, 范博宇, 唐翀, 等. 基于博弈论的主动配电网扩展规划与光储选址定容交替优化[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 38-45. DOI: 10.7500/AEPS20170118013.
- LIU Hong, FAN Boyu, TANG Chong, et al. Game theory based alternate optimization between expansion planning of active distribution system and siting and sizing of photovoltaic and energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 38-45. DOI: 10.7500/AEPS20170118013.
- [5] 刘涤尘, 马恒瑞, 王波, 等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 113-120. DOI: 10.7500/AEPS20170512002.
- LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 113-120. DOI: 10.7500/AEPS20170512002.
- [6] 冯雷, 蔡泽祥, 王奕, 等. 计及负荷储能特性的微网荷储协调联络线功率波动平抑策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 22-28. DOI: 10.7500/AEPS20161225001.
- FENG Lei, CAI Zexiang, WANG Yi, et al. Strategy for tie line power fluctuation suppressing of load-energy storage coordinated microgrid considering energy-storage characteristic of load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 22-28. DOI: 10.7500/AEPS20161225001.
- [7] 黎静华, 汪赛. 兼顾技术性和经济性的储能辅助调峰组合方案优化[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 44-50. DOI: 10.7500/AEPS20170121003.
- LI Jinghua, WANG Sai. Optimal combined peak-shaving scheme using energy storage for auxiliary considering both technology and economy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 44-50. DOI: 10.7500/AEPS20170121003.
- [8] 刘洪, 陈星屹, 李吉峰, 等. 基于改进 CPSO 算法的区域电热综合能源系统经济调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 193-200.
- LIU Hong, CHEN Xingyi, LI Jifeng, et al. Economic dispatch based on improved CPSO algorithm for regional power-heat integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 193-200.
- [9] 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. DOI: 10.7500/AEPS20170903002.
- GE Shaoyun, LI Jifeng, LIU Hong, et al. Reliability evaluation of containing energy storage microgrid considering multi-energy coupling and grade difference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 165-173. DOI: 10.7500/AEPS20170903002.
- [10] 谢开贵, 王岸, 胡博. 计及储能设备运行策略的风/柴/储混合系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 1-7.
- XIE Kaigui, WANG An, HU Bo. Reliability evaluation of wind-diesel-storage hybrid system considering energy storage system operating strategies[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 1-7.
- [11] 闫涛, 唐巍, 王越, 等. 基于储能多状态模型的含微网配电系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2222-2228.
- YAN Tao, TANG Wei, WANG Yue, et al. Multi-state energy storage model based reliability evaluation of distribution network with microgrid[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2222-2228.
- [12] 徐科, 刘洪, 田喆, 等. 区域分布式供能系统经济性概率分析[J]. 电力建设, 2017, 38(2): 138-146.
- XU Ke, LIU Hong, TIAN Zhe, et al. Economic probability analysis of urban distributed energy supply system[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(2): 138-146.
- [13] 赵波. 微电网优化配置关键技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- ZHAO Bo. Key technology and application of microgrid optimal configuration[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [14] 陈丽丽, 牟龙华, 许旭锋, 等. 储能装置运行策略及运行特性对微电网可靠性的影响[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 70-76.
- CHEN Lili, MOU Longhua, XU Xufeng, et al. Influences of energy storage operational strategy and characteristic on microgrid reliability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 70-76.
- [15] 李更丰, 别朝红, 王睿豪, 等. 综合能源系统可靠性评估的研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 114-121.
- LI Gengfeng, BIE Zhao hong, WANG Ruihao, et al. Research status and prospects on reliability evaluation of integrated energy system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 114-121.
- [16] 任磊, 谢开贵, 胡博, 等. 计及运行策略的微电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 21-29.
- REN Lei, XIE Kaigui, HU Bo, et al. Reliability evaluation of microgrid considering operating strategy [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 21-29.
- [17] 王杨, 万凌云, 胡博, 等. 基于孤岛运行特性的微电网可靠性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2379-2385.
- WANG Yang, WAN Lingyun, HU Bo, et al. Isolated island

operating characteristics based analysis on reliability of microgrid[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(9): 2379-2385.

- [18] GHIANI E, VERTUCCIO C, PILO F. Optimal sizing and management of a smart microgrid for prevailing self-consumption[C]// 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, June 29-July 2, 2015, Eindhoven, Netherlands: 639-645.
- [19] ERDINC O. Economic impacts of small-scale own generating and storage units, and electric vehicles under different demand response strategies for smart households[J]. *Applied Energy*, 2014, 126: 142-150.

---

刘 洪(1979—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:智能配电系统及综合能源系统的规划与评估。E-mail: liuhong@tju.edu.cn

李吉峰(1991—),男,博士研究生,主要研究方向:城市电网规划及电力系统可靠性。E-mail: lijifeng2014@163.com

葛少云(1964—),男,博士,教授,主要研究方向:城市电网规划及电力系统优化运行。E-mail: syge@tju.edu.cn

(编辑 章黎)

## Impact Evaluation of Operation Strategies of Multiple Energy Storage Systems on Reliability of Multi-energy Microgrid

*LIU Hong, LI Jifeng, GE Shaoyun, ZHANG Peng, SUN Hao, WANG Yiran*

(Key Laboratory of the Ministry of Education on Smart Power Grids (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In view of the research background that the effect of energy storage on the reliability of energy supply is still to be excavated, the effect of multiple energy storage on the reliability of energy supply is quantitatively analyzed by formulating different operation strategies of energy storage link and combining relevant reliability indices. Firstly, taking the multi-energy microgrid as the research object, the energy efficiency model of key device is constructed. Secondly, different operation strategies for the energy storage devices are formulated, and the corresponding indicators are sorted out to analyze the characteristics of energy storage device and the impact on the system reliability. Finally, the effect of different configuration of energy storage devices and different operation strategies on the reliability of energy supply system are analyzed quantitatively by actual examples. This paper focuses on the analysis of the impact of the energy storage link of multi-energy microgrid on the reliability of energy supply system, thus providing guidance for the planning of energy storage device.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2017YFB0903400) and National Natural Science Foundation of China (No. 51777133).

**Key words:** multi-energy microgrid; energy storage system; operation strategy; reliability