

基于状态评估的多类型储能系统检修优化策略

王廷涛,苗世洪,张松岩,张迪,姚福星,郑重

(华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室 电力安全与高效湖北省重点实验室,
湖北 武汉 430074)

摘要:电力系统通常会配置多种类型的储能装置以满足系统多样的运行需求。随着运行时间的增长,多类型储能系统的健康状况逐渐劣化,需要统筹兼顾各储能系统的重要程度与劣化程度,编制合理的检修计划。为此,综合考虑多类型储能系统的关键设备及其运行状态,提出了一种基于状态评估的多类型储能系统检修优化策略。综合考虑多类型储能系统的运行特性和技术特征,建立了多类型储能系统关键设备运行状态评价指标体系;基于改进主客观赋权法和属性识别模型,对储能系统关键设备的运行状态进行评估,并依据评估结果制定检修计划;综合考虑检修计划约束和系统运行约束等条件,构建了计及检修风险成本和检修实际成本的多类型储能系统检修优化模型,采用大“M”法对模型中的非线性项进行线性化处理。基于某地区的典型日数据与改进IEEE 30节点系统进行算例仿真,结果验证了所建模型的合理性与有效性。

关键词:多类型储能系统;运行状态评估;主客观赋权法;属性识别模型;检修优化模型;混合整数线性规划模型

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202108013

0 引言

大力发展可再生能源是实现我国碳中和和碳达峰目标的必由之路^[1]。然而,风光等可再生能源具有波动性、间歇性和弱可控性等不友好特性,极大地阻碍了可再生能源产业的进一步发展。储能装置作为促进可再生能源大规模消纳和改善电网运行环境的重要调节资源,受到了学术界和工业界的广泛关注^[2]。不同类型的储能装置具有不同的技术经济特性,适用于电网中不同的应用场景。如抽水蓄能PS(Pumped Storage)等能量型储能在削峰填谷和促进可再生能源消纳等方面具有独特优势;锂离子电池等功率型储能则往往具有出色的响应速度和能量循环效率,在辅助电网调频、调压等方面可以发挥重要的作用。为了满足电力系统的多种运行需求,系统通常会同时配置能量型和功率型等多种类型的储能装置。

随着投运时间的不断增加以及受环境、运行工况等因素的多方面影响,储能装置不可避免地会出现设备故障或健康状态劣化的现象,亟待开展面向储能系统的设备运行状态评估和检修计划制定的相关研究工作。由于不同类型的储能系统彼此之间存在着复杂的耦合关联,任一储能系统的退出均有可能对电网中其他储能系统的正常工作造成不利的影 响。同时,由于各类型储能系统的容量及其在电网

中承担的功能各不相同,不同类型储能系统的检修优先级往往存在一定的差异。因此,综合考虑所有待检修储能系统的自身特点及关联影响,制定多类型储能系统的检修计划,对于保障电网安全稳定运行和充分发挥各类型储能系统的技术优势具有重要的意义。

目前已有针对储能系统关键设备的典型故障分析及运行状态评估方法等方面的研究:文献[3]以PS电站的关键设备——水泵水轮机为研究对象,采用劣化度模型和隶属度函数建立了水泵水轮机的综合状态评估模型;文献[4]以压缩空气储能CAES(Compressed Air Energy Storage)电站的关键设备——压缩机为研究对象,采用序关系法-熵权法进行评价指标的组合权重计算,并引入设备健康因子用于拟合压缩机的综合健康指数曲线;文献[5]从电化学储能系统的角度出发,采用尖锥网络分析法对整个系统的综合性能进行评估。综合而言,已有研究大多侧重于单类型储能系统关键设备的故障分析及运行状态评估,而关于多类型储能系统运行状态的评价方法以及综合考虑储能系统运行状态评价与检修计划制定的研究,目前还鲜有报道。

关于电网设备的检修优化问题,目前已有相关研究,且建立了诸多类型的检修优化模型:文献[6]提出了一种状态关联决策的检修策略,即预定检修计划会随着设备性能比预想状态“过于健康”或“过于严重”而变动;文献[7]构建了设备检修役龄回退模型,并基于该模型推算设备故障率;文献[8]建立了一种电网等风险检修模型,以研究周期内各时段的电网风险接近相等为目标确定各设备的检修时

收稿日期:2021-03-10;修回日期:2021-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777088)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777088)

段,以实现电网风险均衡化;文献[9]提出了一种考虑“不完善检修”的检修策略,在检修因为技术、资源等条件限制而没有使设备恢复至最佳状态的情况下采用役龄损失进行描述。综合而言,现有研究大多侧重于传统电网设备的检修优化。储能系统是电网中的新兴设备,与传统电网设备相比,其投运时间较短,因此关于多类型储能系统及其关键设备检修优化的研究,目前还鲜有报道。此外,现有研究对于检修过程中待检修设备的运行状态较为恶劣时可能造成的风险因素考虑还不够充分。

针对上述问题,本文提出了一种基于状态评估的多类型储能系统检修优化策略:首先,通过分析多类型储能系统关键设备的典型故障,构建其运行状态评价指标体系;其次,基于改进主客观组合赋权法确定各指标的组权权重,采用基于属性识别模型的综合评价法对储能系统关键设备的运行状态进行综合评价,并将评价结果作为后续检修优化模型的输入参数;然后,计及系统运行约束和检修计划约束等条件,综合考虑检修风险成本和检修实际成本,构建多类型储能系统检修优化模型,并采用大“M”法对模型中的非线性项进行线性化处理,以降低模型的求解难度;最后,基于改进IEEE 30节点系统进行算例分析,仿真结果验证了所建模型的合理性与有效性。

1 多类型储能系统关键设备运行状态评价指标

要对多类型储能系统关键设备的运行状态进行评价,首先应构建关键设备的评价指标。本文从关键设备的典型故障出发,分析故障原因及故障前后设备指标的变化特征,从中挖掘特征明显且易于获取的设备指标作为表征其运行状态的评价指标。

本文中的储能系统考虑PS系统、CAES系统、电池储能BES(Battery Energy Storage)系统3类,其中BES主要考虑铅蓄电池储能(Pb-BES)系统和锂电池储能(Li-BES)系统。

1)PS系统所含设备主要有水泵水轮机、上下水库、电动机、发电机等,其核心设备是水泵水轮机。水泵水轮机的典型故障包括轴系振动异常、水导轴承温度异常、主轴密封失效,它们所对应的水泵水轮机部件分别为转轮及主轴、水导轴承、主轴密封,这3个部件构成了水泵水轮机的转动系统,因此可以从这3个部件中选取特征性强的指标作为水泵水轮机的评价指标^[3,10]。水泵水轮机的运行状态评价指标如附录A表A1所示。

2)CAES系统所含设备主要有多级空气压缩机、多级透平膨胀机、冷却器、储气室、燃烧室、电动机、发电机等,其中压缩工况、发电工况的关键设备分别

为空气压缩机和透平膨胀机。根据对压缩机工作原理的分析,其组成部分可以划分为转子系统、气路系统、油路系统、冷却水系统等,其评价指标也与这几类系统相关。转子系统主要考虑转轴径向位移和径向振动速度,当这些指标值过大时,会加剧转子的磨损,容易引起机械性故障。气路系统、油路系统、冷却水系统均需考虑温度和压力,当温度超出正常范围时,可能会造成压缩机的工作效率降低、产气量降低等情况;当压力超出正常范围时,可能会造成压缩机停机的情况。此外,气路系统还需关注排气量的大小,排气量不足可能会导致压缩机发生吸气受阻、气阀泄露等异常状况。综上所述,压缩机的运行状态评价指标如附录A表A2所示^[4]。

膨胀机的典型故障有转子卡机、气体轴承故障、液击故障等。前2类故障本质上均是由转子与气体轴承之间的间隙过小导致二者摩擦造成的,转子卡机是由转子动平衡较差导致转子涡动造成的,气体轴承故障是由气体轴承供气压力与供气杂质率超出正常范围造成的。供气压力越高,转子涡动起始转速越大,这有利于防止涡动;但另一方面,供气压力过高会导致气流孔堵塞,降低轴承稳定性。而供气杂质率过大,其中的油水灰尘会影响气膜的形成。液击故障是由透平膨胀机进气温度过低,工质气体中的低沸点成分(如水蒸气)在膨胀冷却过程中液化产生液滴打坏叶轮所导致的。根据对膨胀机典型故障的分析,可以选取其评价指标如附录A表A3所示^[11]。

3)BES系统最基本的组成单元是电池单体,将电池单体进行串并联组合可以形成电池簇,之后与储能变流器、电池管理系统、电池监测保护系统、电气与通信接口等部分共同组成电池系统。其中,电池单体应作为关键设备进行状态评价,但由于其数量庞大不便于开展评价工作,且当电池单体发生故障时,会在其所在电池簇的指标中有所体现,可以将电池簇作为评价对象。从故障的角度来看,对于Pb-BES而言,其典型故障包括极板硫酸盐化、内短路、活性物质脱落、反极性等;对于Li-BES而言,其典型故障包括正极材料结构失效、内短路、异常产气、热失控、析锂等。当发生上述故障时,通常会表现为电池电压变化率异常、温升过高、健康状态SOH(State Of Health)降低、电解液密度降低、电池单体间温度或电压极差过大等指标异常。基于上述分析,并结合相关的标准规定^[12-13],可选取电池簇的评价指标如附录A表A4所示。

2 多类型储能系统关键设备的运行状态评价方法

2.1 改进主客观权重组合赋权法

主观赋权法侧重于考虑决策者的工作经验和专

业知识,可以充分反映决策者的主观态度,但赋权过程脱离实际数据,容易造成主观偏好性过强的问题。客观赋权法侧重于考虑实际数据,可以充分反映指标数据的统计学规律,但未考虑决策者的主观态度,且要求所用数据具有代表性。针对上述2种方法的优缺点,本文采用改进主客观权重组合赋权法对多类型储能系统关键设备的评价指标进行权重分配。

2.1.1 基于非结构三角模糊数的主观赋权法

主观赋权采用基于非结构三角模糊数的主观赋权法。其中非结构模糊数反映了指标间相对重要性的排序过程,三角模糊数反映了当决策者分别处于乐观、中立、悲观态度时指标赋权结果的差异性,具体方法可参考文献[14]。假设某设备有 n 个评价指标 a_1, a_2, \dots, a_n ,通过基于非结构三角模糊数的主观赋权法可得到主观权重矩阵 $\mathbf{W}_{3 \times n}^s$ 如式(1)所示。

$$\mathbf{W}_{3 \times n}^s = \begin{bmatrix} w_{\text{opt},1}^s & w_{\text{neu},1}^s & w_{\text{pes},1}^s \\ w_{\text{opt},2}^s & w_{\text{neu},2}^s & w_{\text{pes},2}^s \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{\text{opt},n}^s & w_{\text{neu},n}^s & w_{\text{pes},n}^s \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

式中: $w_{k,i}^s (i=1, 2, \dots, n; k \in \{\text{opt}, \text{neu}, \text{pes}\})$, opt、neu、pes 分别表示乐观、中立、悲观的主观态度)为当决策者的主观态度为 k 时指标 a_i 的主观权重。

2.1.2 基于融合数据特征的客观赋权法

客观赋权采用基于融合数据特征的客观赋权法。融合数据特征是指该方法中同时考虑了熵值、相关系数、标准差3种数据特征量,分别用于体现数据的离散程度、冲突程度、对比强度,具体方法可参考文献[14-15]。本文针对问题的特殊性,对该方法进行了合理的改进,具体说明如下。

1) 标准评价矩阵。

对设备的 n 个评价指标 a_1, a_2, \dots, a_n 进行定期测定得到 m 组数据,这些数据构成了原始评价矩阵 $\mathbf{X}_{m \times n}$,其第 j 行第 i 列元素 x_{ji} 为指标 a_i 的第 j 组测定数据。对矩阵 $\mathbf{X}_{m \times n}$ 进行归一化处理,得到标准评价矩阵 $\mathbf{Y}_{m \times n}$,其第 j 行第 i 列元素元素 y_{ji} 为数据 x_{ji} 的归一化数值。归一化方法可表示为^[14]:

$$y_{ji} = \left| \frac{x_{ji} - x_{i,\min}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}} \right| \quad (2)$$

式中: $x_{i,\max}, x_{i,\min}$ 分别为 m 组指标 a_i 数据中的最大值、最小值。这是应用于工程方案评价的方法,指标值通常为工程方案的效益指标,其值越大越好(即越大越好型指标)。根据附录A表A1—A4中的指标类型可知,设备运行状态评价指标有越大越好型、越小越好型以及中间最优型3类,则归一化方法可改进为:

$$y_{ji} = \left| \frac{x_{ji} - x_{i,\text{worst}}}{x_{i,\text{best}} - x_{i,\text{worst}}} \right| \quad (3)$$

式中: $x_{i,\text{best}}, x_{i,\text{worst}}$ 分别为 m 组指标 a_i 数据中最理想、最不理想的数据,若 $x_{i,\text{best}} = x_{i,\text{worst}}$,说明这 m 组数据相同,则有 $y_{ji} = 1 (j=1, 2, \dots, m)$ 。

2) 客观权重矩阵。

假设上述 n 个评价指标的客观权重矩阵为 $\mathbf{W}_{1 \times n}^o$,其第 i 个元素 w_i^o 为指标 a_i 的客观权重,文献[14]中计算客观权重的方法为:

$$w_i^o = \frac{(\sigma_i + E_i) \sum_{j=1}^n (1 - |r_{ij}|)}{\sum_{i'=1}^n \left[(\sigma_{i'} + E_{i'}) \sum_{j=1}^n (1 - |r_{i'j}|) \right]} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中: E_i 为指标 a_i 的熵值; σ_i 为指标 a_i 的标准差; r_{ij} 为指标 a_i 与指标 a_j 之间的相关系数。当指标 a_i 的 m 组数据完全相同时,指标 a_i 不存在离散性,其对应的熵值 E_i 达到最大值1。此时,指标 a_i 不会向决策者提供任何关于数据离散程度的信息,其对应的权重 w_i^o 应为0。但由式(4)可知,此时 $w_i^o \neq 0$,这有悖于熵的含义。

因此,本文对客观权重计算方法进行如下改进:

$$w_i^o = \frac{\sigma_i (1 - E_i) \sum_{j=1}^n (1 - |r_{ij}|)}{\sum_{i'=1}^n \left[\sigma_{i'} (1 - E_{i'}) \sum_{j=1}^n (1 - |r_{i'j}|) \right]} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

分析式(5)可知,当指标 a_i 的 m 组数据完全相同时,熵值 E_i 达到最大值1,标准差 $\sigma_i = 0$,此时计算所得指标 a_i 的客观权重 $w_i^o = 0$,符合预期。

2.1.3 基于矩估计理论的组合赋权法

基于上述方法得到各指标的主观权重与客观权重后,采用基于矩估计理论的组合赋权法,计算得到组合权重矩阵 $\mathbf{W}_{3 \times n}^c$,其第 k 行第 i 列元素 $w_{k,i}^c$ 如式(6)所示。

$$w_{k,i}^c = \frac{\alpha_{k,i} w_{k,i}^s + \beta_{k,i} w_i^o}{\sum_{i'=1}^n (\alpha_{k,i'} w_{k,i'}^s + \beta_{k,i'} w_{i'}^o)} \quad i=1, 2, \dots, n; k \in \{\text{opt}, \text{neu}, \text{pes}\} \quad (6)$$

$$\alpha_{k,i} = \frac{w_{k,i}^s}{w_{k,i}^s + w_i^o} \quad i=1, 2, \dots, n; k \in \{\text{opt}, \text{neu}, \text{pes}\} \quad (7)$$

$$\beta_{k,i} = \frac{w_i^o}{w_{k,i}^s + w_i^o} \quad i=1, 2, \dots, n; k \in \{\text{opt}, \text{neu}, \text{pes}\} \quad (8)$$

式中: $w_{k,i}^c$ 为当决策者的主观态度为 k 时指标 a_i 的组合权重; $\alpha_{k,i}, \beta_{k,i}$ 分别为当决策者的主观态度为 k 时指标 a_i 主观权重、客观权重的相对重要程度。

2.2 基于属性识别模型的运行状态综合评价方法

属性识别模型理论通常用于解决有序分割问题,例如大气环境质量评价、工程方案效益评价等,且成效显著。本文涉及的3种类型设备运行状态指

标均属于有序样本,可通过属性识别模型对指标的优劣程度进行有序分割。应用属性识别模型计算可得到设备的评分矩阵 S 为:

$$S = [s_{\text{opt}}, s_{\text{neu}}, s_{\text{pes}}] \quad (9)$$

$$s = \min \{ S \} \quad (10)$$

式中: $s_{\text{opt}}, s_{\text{neu}}, s_{\text{pes}}$ 分别为当决策者的主观态度为乐观、中立、悲观时设备的综合评分; s 为该设备在 3 种主观态度下的最小综合评分。

为了能将综合评分 s 应用于检修优化模型,需先将其转化为设备故障率,本文采用指数模型^[7]进行转化,如式(11)所示。

$$p(s) = \begin{cases} p_{\max} & s_{\min} \leq s < s_{\text{lower}} \\ ae^{-Bs} & s_{\text{lower}} \leq s < s_{\text{upper}} \\ p_{\min} & s_{\text{upper}} \leq s \leq s_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中: a, B 为指数模型的形状参数; p_{\min}, p_{\max} 分别为设备的最小、最大故障率; s_{\min}, s_{\max} 分别为综合评分可能达到的最小、最大值; $s_{\text{upper}}, s_{\text{lower}}$ 分别为故障率指数模型中综合评分的上、下界。

本文的评价方法中设置最劣、较劣、较优、最优 4 个等级,对应的评分范围分别为 $[0, 5)$ 、 $[5, 15)$ 、 $[15, 25)$ 、 $[25, 30]$ 分。设备故障率与综合评分的对应关系可表示为:

$$p(s) = \begin{cases} 90\% & 0 \leq s < 5 \text{ 分} \\ 1.56 e^{-0.11s} \times 100\% & 5 \text{ 分} \leq s < 25 \text{ 分} \\ 10\% & 25 \text{ 分} \leq s \leq 30 \text{ 分} \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可知,最优等级下的设备故障率为 10%,较优等级下的设备故障率为 $(10\%, 30\%)$,较劣等级下的设备故障率为 $(30\%, 90\%)$,最劣等级下的设备故障率为 90%。

得到储能系统关键设备运行状态评价指标体系和指标组合权重后,采用基于属性识别模型的综合评价方法可获得各类型储能系统关键设备的综合评分,具体流程图如附录 A 图 A1 所示。将最终获得的设备综合评分及相关结果作为检修优化模型的输入参数。

3 多类型储能系统的检修优化模型

3.1 目标函数

本文以检修时间窗内的检修实际成本 C_{real} 与检修风险成本 C_{risk} 之和最小为优化目标,目标函数如式(13)所示。

$$\min F = C_{\text{real}} + C_{\text{risk}} \quad (13)$$

式中:检修实际成本 C_{real} 是指待检修设备进行停机检修时所带来的设备状态检修费用和系统运行成本增量,检修风险成本 C_{risk} 是指设备在等待检修时可能发生故障而导致的故障维修费用和系统运行成本增量,其具体说明如下。

3.1.1 检修实际成本

检修实际成本 C_{real} 的计算公式为:

$$C_{\text{real}} = C_{\text{maintain}} + C_{\text{increment}} \quad (14)$$

$$\begin{cases} C_{\text{maintain}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{maintain}}} k_i^{\text{maintain}} C_i^{\text{overhaul}} \\ C_i^{\text{overhaul}} = c_i^{\text{overhaul}} \lambda_i^{\text{PE}} \end{cases} \quad (15)$$

$$C_{\text{increment}} = C_{G, \text{run}} + C_{G, \text{reserve}} + C_{G, \text{start}} + C_{G, \text{env}} + C_{w, \text{waste}} + C_{\text{ESS, rm}} - C_{\text{normal}} \quad (16)$$

式中: C_{maintain} 为设备固定状态检修费用; $C_{\text{increment}}$ 为在检修时间窗内因设备检修退出运行所带来的系统运行成本的增量; N_{maintain} 为待检修设备的数量; k_i^{maintain} 为待检修设备 i 的状态检修费用与故障维修费用之比; C_i^{overhaul} 为待检修设备 i 的故障维修费用; c_i^{overhaul} 为待检修设备 i 单位功率(或容量)的故障维修费用; λ_i^{PE} 为待检修设备 i 的额定功率(或容量),若待检修设备 i 为水泵水轮机、压缩机、膨胀机,则 λ_i^{PE} 为额定功率,若待检修设备 i 为电池簇,则 λ_i^{PE} 为额定容量; $C_{G, \text{run}}, C_{G, \text{reserve}}, C_{G, \text{start}}, C_{G, \text{env}}$ 分别为常规机组的运行成本、备用成本、开机成本、环境成本, $C_{w, \text{waste}}$ 为系统弃风成本, $C_{\text{ESS, rm}}$ 为储能系统的运行管理成本,计算式如式(17)所示; C_{normal} 为考虑无储能设备退出运行情况下的系统最优成本,本文引入 C_{normal} 的目的是以该成本作为对比基础,分析不同储能设备退出运行时所带来的系统运行成本增量,使对比结果更加直观,计算式如式(18)所示,并假设计算过程中所有储能设备正常运行。

$$\begin{cases} C_{G, \text{run}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (a_i^G P_{i,t}^G + b_i^G) \\ C_{G, \text{reserve}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (c_i^G R_{i,t}^{G, \text{up}} + d_i^G R_{i,t}^{G, \text{down}}) \\ C_{G, \text{start}} = \sum_{t=1}^{T-1} \sum_{i=1}^{N_G} S_i^G u_{i,t+1}^G (1 - u_{i,t}^G) + \sum_{i=1}^{N_G} S_i^G u_{i,1}^G (1 - u_{i,T}^G) \\ C_{G, \text{env}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} e_i^G P_{i,t}^G \\ C_{w, \text{waste}} = \sum_{t=1}^T C_{\text{penalty}} (P_t^{\text{forecast}} - P_t^{\text{wind}}) \\ C_{\text{ESS, rm}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{ESS}}} c_j^{\text{rm}} P_j^{\text{ESS, r}} \end{cases} \quad (17)$$

$$C_{\text{normal}} = \min \{ C_{G, \text{run}} + C_{G, \text{reserve}} + C_{G, \text{start}} + C_{G, \text{env}} + C_{w, \text{waste}} + C_{\text{ESS, rm}} \} \quad (18)$$

式中: T 为检修时间窗时长,需根据各待检修设备的评分情况进行设置; N_G 为系统内常规机组的数量; a_i^G, b_i^G 为常规机组 i 的购电成本系数; $P_{i,t}^G$ 为 t 时段常规机组 i 的出力; c_i^G, d_i^G 分别为常规机组 i 的正、负备

用成本系数; $R_{i,t}^{G,up}$ 、 $R_{i,t}^{G,down}$ 分别为 t 时段常规机组 i 的正、负备用容量; S_i^G 为常规机组 i 的开机成本; $u_{i,t}^G$ 为 t 时段常规机组 i 的运行状态, 处于运行状态则取值为 1, 处于停机状态则取值为 0; e_i^G 为常规机组 i 的环境成本系数; $C_{penalty}$ 为弃风成本系数; $P_t^{forecast}$ 、 P_t^{wind} 分别为 t 时段风电机组的预测出力、实际出力; N_{ESS} 为系统内储能系统的数量; c_j^m 为储能系统 j 的单位功率日运行管理成本; $P_j^{ESS,r}$ 为储能系统 j 的额定功率。

3.1.2 检修风险成本

检修风险成本 C_{risk} 的计算式为:

$$\begin{cases} C_{risk} = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^{N_{maintain}} p_i u_{i,t}^{wait} C_i^{fault} \\ C_i^{fault} = \frac{C_i^{overhaul} + C_i^{exit} - C_{normal}}{T} \end{cases} \quad (19)$$

式中: p_i 为待检修设备 i 的故障率; $u_{i,t}^{wait}$ 为 t 时段待检修设备 i 的待检修状态, 等待检修时取值为 1, 否则取值为 0; C_i^{fault} 为待检修设备 i 的单位时长风险成本; C_i^{exit} 为待检修设备 i 在检修时间窗内退出运行时的系统最优成本, 其计算方法与 C_{normal} 类似, 区别在于 C_i^{exit} 考虑了对应储能设备退出运行, 而 C_{normal} 假设所有储能设备均正常运行。

3.2 约束条件

本文所建立的多类型储能系统检修优化模型的约束条件主要包括检修计划约束^[6-9]、系统运行约束两大类。

3.2.1 检修计划约束

1) 检修资源约束。

在同一时段内检修消耗的人力、物力等检修资源不应超过可提供的最大资源量, 即:

$$\sum_{i=1}^{N_{maintain}} u_{i,t}^{maintain} \leq Z \quad t=1, 2, \dots, T \quad (20)$$

式中: $u_{i,t}^{maintain}$ 为 t 时段待检修设备 i 的检修状态, 处于检修状态则取值为 1, 不处于检修状态则取值为 0; Z 为最大检修资源数量。

2) 检修时长约束。

待检修设备 i 开始检修后应保持为检修状态直至完成检修, 其检修状态持续时段数应等于待检修设备 i 的检修时长, 即:

$$u_{i,t}^{maintain} = \begin{cases} 0 & t < t_i^{start}, t \geq t_i^{finish} \\ 1 & t_i^{start} \leq t < t_i^{finish} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N_{maintain} \quad (21)$$

$$\sum_{t=1}^T u_{i,t}^{maintain} = t_i^{maintain} \quad i=1, 2, \dots, N_{maintain} \quad (22)$$

式中: t_i^{start} 、 t_i^{finish} 分别为待检修设备 i 的检修开始时段、检修完成时段; $t_i^{maintain}$ 为待检修设备 i 的检修时长。

3) 待检修状态约束。

待检修设备 i 在开始检修前处于待检修状态, 则

其待检修状态 $u_{i,t}^{wait}$ 满足:

$$u_{i,t}^{wait} = \begin{cases} 0 & t \geq t_i^{start} \\ 1 & t < t_i^{start} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N_{maintain} \quad (23)$$

4) 检修班组约束。

检修班组约束包括工作状态约束、工作时间约束、休整时间约束。

(1) 工作状态约束。

$$\sum_{i=1}^{N_{maintain}} u_{j,i,t}^{team} \leq 1 \quad j=1, 2, \dots, N_{team}; t=1, 2, \dots, T \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^{N_{team}} u_{j,i,t}^{team} = u_{i,t}^{maintain} \quad i=1, 2, \dots, N_{maintain}; t=1, 2, \dots, T \quad (25)$$

式中: $u_{j,i,t}^{team}$ 为 t 时段班组 j 对于检修设备 i 的工作状态, 若班组 j 正在检修设备 i 则 $u_{j,i,t}^{team} = 1$, 否则 $u_{j,i,t}^{team} = 0$; N_{team} 为班组总数。式(24)表示每个班组在各时段最多检修 1 台设备。式(25)表示当设备 i 处于检修状态时, 有且仅有一个班组执行该设备的检修工作; 而当设备 i 不处于检修状态时, 任何班组都没有对设备 i 进行检修。

(2) 工作时间约束。

检修班组开始执行检修任务后将持续工作, 直至完成检修或达到最大持续工作时间, 即:

$$t_{j,i}^{working} = \min\{t_{j,i}^{m,left}, t_{j,i}^{max}\} \quad j=1, 2, \dots, N_{team} \quad (26)$$

式中: $t_{j,i}^{working}$ 为班组 j 检修设备 i 的持续工作时间; $t_{j,i}^{m,left}$ 为班组 j 开始检修设备 i 时, 设备 i 的剩余所需检修时长; $t_{j,i}^{max}$ 为班组 j 的最大持续工作时间。

(3) 休整时间约束。

检修班组完成检修任务或达到最大持续工作时间后将进入休整时间, 即:

$$t_j^{rest} \geq t_{j,min}^{rest} = f_{pc}(t_{j,i}^{working}) \quad (27)$$

式中: t_j^{rest} 为班组 j 的休整时间; $t_{j,min}^{rest}$ 为班组 j 的最小休整时间; $f_{pc}(\cdot)$ 为正相关函数。

3.2.2 系统运行约束

1) 系统功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t}^G + \sum_{j=1}^{N_{ESS}} P_{j,t}^{ESS,G} + P_t^{wind} = P_t^{load} + \sum_{j=1}^{N_{ESS}} P_{j,t}^{ESS,C} \quad t=1, 2, \dots, T \quad (28)$$

式中: $P_{j,t}^{ESS,G}$ 、 $P_{j,t}^{ESS,C}$ 分别为 t 时段储能系统 j 的放电、充电功率; P_t^{load} 为 t 时段系统的负荷预测值。

2) 直流潮流约束。

$$P_{input} = B_{DC} \theta \quad (29)$$

式中: P_{input} 为节点注入有功功率列向量; B_{DC} 为直流潮流节点导纳矩阵; θ 为节点电压相位列向量。

3) 系统备用约束。

由于风电与负荷的预测结果存在一定的误差, 为了保证系统运行安全稳定, 需要为系统预留一定

量的正备用容量和负备用容量,如式(30)所示。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_G} R_{i,t}^{G,up} + \sum_{j=1}^{N_{ESS}} R_{j,t}^{ESS,up} \geq \varepsilon_{load} P_t^{load} + \varepsilon_{wind} P_t^{wind} \\ \sum_{i=1}^{N_G} R_{i,t}^{G,down} + \sum_{j=1}^{N_{ESS}} R_{j,t}^{ESS,down} \geq \varepsilon_{load} P_t^{load} + \varepsilon_{wind} P_t^{wind} \end{cases} \quad (30)$$

式中: $R_{j,t}^{ESS,up}$ 、 $R_{j,t}^{ESS,down}$ 分别为 t 时段储能系统 j 的正、负备用容量; ε_{load} 、 ε_{wind} 分别为负荷、风电的预测误差。

4) 常规机组运行约束。

常规机组运行约束主要包括出力上下限约束、启停时间约束、备用容量约束、爬坡率约束^[2,16],分别如式(31)–(34)所示。

$$u_{i,t}^G P_i^{G,min} \leq P_{i,t}^G \leq u_{i,t}^G P_i^{G,max} \quad (31)$$

$$\begin{cases} T_{i,t}^{G,start} \geq T_i^{G,start,min} \\ T_{i,t}^{G,stop} \geq T_i^{G,stop,min} \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} P_{i,t}^G + R_{i,t}^{G,up} \leq u_{i,t}^G P_i^{G,max} \\ P_{i,t}^G - R_{i,t}^{G,down} \geq u_{i,t}^G P_i^{G,min} \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{cases} -u_{i,t}^{G,up} v_i^{G,down} \leq P_{i,t}^G - P_{i,t-1}^G \leq u_{i,t}^{G,up} v_i^{G,up} \\ 0 \leq R_{i,t}^{G,up} \leq u_{i,t}^{G,up} v_i^{G,up} \\ 0 \leq R_{i,t}^{G,down} \leq u_{i,t}^{G,down} v_i^{G,down} \end{cases} \quad (34)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N_G$; $t=1, 2, \dots, T$; $P_i^{G,max}$ 、 $P_i^{G,min}$ 分别为常规机组 i 的出力上、下限; $T_{i,t}^{G,start}$ 、 $T_{i,t}^{G,stop}$ 分别为 t 时段常规机组 i 开、关机后的状态保持时间; $T_i^{G,start,min}$ 、 $T_i^{G,stop,min}$ 分别为常规机组 i 的最小开机、关机时间; $v_i^{G,up}$ 、 $v_i^{G,down}$ 分别为常规机组 i 的上、下爬坡率。

5) PS 系统运行约束。

PS 系统运行约束主要包括运行状态约束、功率约束、备用容量约束、库容约束、启停转换约束^[17],由于 PS 机组的动态响应特性明显优于常规机组,故可忽略 PS 机组的爬坡率约束。

(1) 运行状态约束。

PS 系统内机组不能同时处于发电和抽水工况,故需满足式(35)所示约束条件。

$$\begin{cases} u_i^{PS,G} + u_i^{PS,P} \leq 1 \\ u_{p,t}^{TP,G} \leq u_t^{PS,G} \\ u_{p,t}^{TP,P} \leq u_t^{PS,P} \end{cases} \quad p=1, 2, \dots, N_{TP}; t=1, 2, \dots, T \quad (35)$$

式中: N_{TP} 为 PS 系统内水泵水轮机数量,等于 PS 机组数量; $u_i^{PS,G}$ 、 $u_i^{PS,P}$ 分别为 t 时段 PS 系统整体的发电、抽水工况状态,发电工况下有 $u_i^{PS,G} = 1$ 、 $u_i^{PS,P} = 0$,抽水工况下有 $u_i^{PS,G} = 0$ 、 $u_i^{PS,P} = 1$; $u_{p,t}^{TP,G}$ 、 $u_{p,t}^{TP,P}$ 分别为 t 时段 PS 机组 p 的发电、抽水工况状态,发电工况下有 $u_{p,t}^{TP,G} = 1$ 、 $u_{p,t}^{TP,P} = 0$,抽水工况下有 $u_{p,t}^{TP,G} = 0$ 、 $u_{p,t}^{TP,P} = 1$ 。

若 PS 机组 p 的水泵水轮机为待检修设备,则有:

$$u_{p,t}^{TP,G} = u_{p,t}^{TP,P} = 0 \quad p=1, 2, \dots, N_{TP}; t_p^{start} \leq t < t_p^{finish} \quad (36)$$

(2) 功率约束。

$$\begin{cases} u_{p,t}^{TP,G} P_p^{TP,G,min} \leq P_{p,t}^{TP,G} \leq u_{p,t}^{TP,G} P_p^{TP,G,max} \\ u_{p,t}^{TP,P} P_p^{TP,P,min} \leq P_{p,t}^{TP,P} \leq u_{p,t}^{TP,P} P_p^{TP,P,max} \end{cases} \quad (37)$$

式中: $p=1, 2, \dots, N_{TP}$; $t=1, 2, \dots, T$; $P_{p,t}^{TP,G}$ 、 $P_{p,t}^{TP,P}$ 分别为 t 时段 PS 机组 p 的发电、抽水功率; $P_p^{TP,G,max}$ 、 $P_p^{TP,G,min}$ 分别为 PS 机组 p 的最大、最小发电功率; $P_p^{TP,P,max}$ 、 $P_p^{TP,P,min}$ 分别为 PS 机组 p 的最大、最小抽水功率。

(3) 备用容量约束。

PS 系统可以承担部分旋转备用任务,从而降低常规机组的备用容量,减少燃料消耗,提高经济性。备用容量约束为:

$$\begin{cases} P_{p,t}^{TP,G} + R_{p,t}^{TP,G,up} \leq u_{p,t}^{TP,G} P_p^{TP,G,max} \\ P_{p,t}^{TP,G} - R_{p,t}^{TP,G,down} \geq u_{p,t}^{TP,G} P_p^{TP,G,min} \\ P_{p,t}^{TP,P} - R_{p,t}^{TP,P,up} \geq u_{p,t}^{TP,P} P_p^{TP,P,min} \\ P_{p,t}^{TP,P} + R_{p,t}^{TP,P,down} \leq u_{p,t}^{TP,P} P_p^{TP,P,max} \end{cases} \quad (38)$$

式中: $p=1, 2, \dots, N_{TP}$; $t=1, 2, \dots, T$; $R_{p,t}^{TP,G,up}$ 、 $R_{p,t}^{TP,G,down}$ 分别为 t 时段 PS 机组 p 的发电工况正、负备用容量, $R_{p,t}^{TP,P,up}$ 、 $R_{p,t}^{TP,P,down}$ 分别为 t 时段 PS 机组 p 的抽水工况正、负备用容量,取值均不小于 0。

(4) 库容约束。

在不考虑水库水量损失的情况下,可认为一天内上、下水库水量总和不变,则上水库的库容变化与下水库的库容变化等效,可以仅考虑上水库的库容约束,如式(39)、(40)所示。

$$\begin{cases} V_{t+1} = V_t - k_{PS,G} \sum_{p=1}^{N_{TP}} P_{p,t}^{TP,G} + k_{PS,P} \sum_{p=1}^{N_{TP}} P_{p,t}^{TP,P} \\ V_{min} \leq V_t \leq V_{max} \quad t=1, 2, \dots, T \\ V_0 \leq V_T - k_{PS,G} \sum_{p=1}^{N_{TP}} P_{p,T}^{TP,G} + k_{PS,P} \sum_{p=1}^{N_{TP}} P_{p,T}^{TP,P} \leq V_{max} \end{cases} \quad (39)$$

$$\begin{cases} V_{min} \leq V_t - k_{PS,G} \sum_{p=1}^{N_{TP}} (P_{p,t}^{TP,G} + R_{p,t}^{TP,G,up}) \leq V_{max} \\ V_{min} \leq V_t - k_{PS,G} \sum_{p=1}^{N_{TP}} (P_{p,t}^{TP,G} - R_{p,t}^{TP,G,down}) \leq V_{max} \\ V_{min} \leq V_t + k_{PS,P} \sum_{p=1}^{N_{TP}} (P_{p,t}^{TP,P} - R_{p,t}^{TP,P,up}) \leq V_{max} \\ V_{min} \leq V_t + k_{PS,P} \sum_{p=1}^{N_{TP}} (P_{p,t}^{TP,P} + R_{p,t}^{TP,P,down}) \leq V_{max} \end{cases} \quad (40)$$

式中: V_t 为 t 时段 PS 系统的上水库水量; V_{max} 、 V_{min} 分别为上水库的库容上、下限; V_0 、 V_T 分别为检修时间窗始、末的上水库水量; $k_{PS,G}$ 、 $k_{PS,P}$ 分别为发电工况水量-功率、抽水工况水量-功率转换系数。式(39)表明:在检修时间窗内任意时段,上水库的水量不能超过库容限值,且不能影响第二天的使用。式(40)表明:在考虑 PS 系统提供正、负备用容量的情况下,上

水库水量仍不能超过库容限值。

(5)启停转换约束。

过于频繁地启停机组一方面会对机组造成损害,另一方面会增加水头损失,故需对日启停次数进行约束,即:

$$\begin{cases} n_p^{\text{TP,start}} = \sum_{t=1}^{T-1} (u_{p,t+1}^{\text{TP,G}} + u_{p,t+1}^{\text{TP,P}})(1 - u_{p,t}^{\text{TP,G}} - u_{p,t}^{\text{TP,P}}) \\ n_p^{\text{TP,stop}} = \sum_{t=1}^{T-1} (u_{p,t}^{\text{TP,G}} + u_{p,t}^{\text{TP,P}})(1 - u_{p,t+1}^{\text{TP,G}} - u_{p,t+1}^{\text{TP,P}}) \\ n_p^{\text{TP,start}} + n_p^{\text{TP,stop}} \leq n_p^{\text{ss}} \end{cases} \quad (41)$$

式中: $n_p^{\text{TP,start}}$ 、 $n_p^{\text{TP,stop}}$ 分别为检修时间窗内 PS 机组 p 的开、关机次数; n_p^{ss} 为 PS 机组 p 的最大启停机次数。

6) CAES 系统运行约束。

CAES 系统运行约束主要包括运行状态约束、功率约束、备用约束、储气室气压约束^[2,16], 分别与 PS 系统的运行状态约束、功率约束、备用约束、库容约束类似, 此处不再赘述。

7) BES 系统运行约束。

BES 系统运行约束主要包括运行状态约束、功率约束、备用约束、荷电状态 SOC(State Of Charge) 约束、日吞吐量(即 BES 系统的日内充放电电量总和)约束^[18], 其中前 4 种约束分别与 PS 系统的运行状态约束、功率约束、备用约束、库容约束类似, 此处不再赘述; 日吞吐量约束是指应当减小日吞吐量以延长电池寿命。以 Pb-BES 系统为例, 其日吞吐量约束如式(42)所示。

$$\begin{cases} Q_{\text{in}}^{\text{Pb}} = \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^{N_{\text{Pb,bs}}} P_{b,t}^{\text{Pb,bs,C}} \eta_{\text{Pb}} \Delta t u_{b,t}^{\text{Pb,bs,C}} \\ Q_{\text{out}}^{\text{Pb}} = \sum_{t=1}^T \sum_{b=1}^{N_{\text{Pb,bs}}} \frac{P_{b,t}^{\text{Pb,bs,D}}}{\eta_{\text{Pb}}} \Delta t u_{b,t}^{\text{Pb,bs,D}} \\ Q_{\text{in}}^{\text{Pb}} + Q_{\text{out}}^{\text{Pb}} \leq Q_{\text{max}}^{\text{Pb}} \end{cases} \quad (42)$$

式中: $Q_{\text{in}}^{\text{Pb}}$ 、 $Q_{\text{out}}^{\text{Pb}}$ 分别为 Pb-BES 系统的日充电、放电量; $N_{\text{Pb,bs}}$ 为 Pb-BES 系统内的电池簇数量; $P_{b,t}^{\text{Pb,bs,C}}$ 、 $P_{b,t}^{\text{Pb,bs,D}}$ 分别为 t 时段电池簇 b 的充电、放电功率; η_{Pb} 为 Pb-BES 系统的工作效率; Δt 为单位时段时长; $u_{b,t}^{\text{Pb,bs,C}}$ 、 $u_{b,t}^{\text{Pb,bs,D}}$ 分别为 t 时段电池簇 b 的充电、放电状态, 充电状态下有 $u_{b,t}^{\text{Pb,bs,C}} = 1$ 、 $u_{b,t}^{\text{Pb,bs,D}} = 0$, 放电状态下有 $u_{b,t}^{\text{Pb,bs,C}} = 0$ 、 $u_{b,t}^{\text{Pb,bs,D}} = 1$; $Q_{\text{max}}^{\text{Pb}}$ 为 Pb-BES 系统的日最大吞吐量。

8) 风电出力约束。

系统弃风量不得超过风电预测出力, 即:

$$0 \leq P_t^{\text{wind}} \leq P_t^{\text{forecast}} \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (43)$$

3.3 非线性约束条件的线性化

由上述建模过程可知, 检修优化模型中含有大量的非线性表达式, 其中大部分是由多个二进制变量相乘所导致的。为此, 本文采用大“M”法将非线性表达式转化为线性表达式, 具体方法可参考文献

[2]。本文给出了检修计划约束(即式(20)–(27))的线性化推导过程, 具体见附录 B 式(B1)–(B11)。

基于大“M”法, 本文所建多类型储能系统的检修优化模型被简化为一个混合整数线性规划问题, 可采用常用优化求解器进行计算, 本文选用 CPLEX12.6.3 商业求解器进行求解。

4 算例分析

4.1 网络拓扑及算例参数

4.1.1 网络拓扑及负荷、风电参数

本文基于改进的 IEEE 30 节点系统进行算例分析, 系统拓扑结构如附录 C 图 C1 所示。其中, PS 电站接入节点 24, 风电场和 CAES 电站接入节点 23, Pb-BES、Li-BES 电站分别接入节点 29、10。网络拓扑参数见附录 C 表 C1 和表 C2, 常规机组参数见附录 C 表 C3, PS 电站、CAES 电站、BES 电站参数分别见附录 C 表 C4–C6。

本文负荷及风电数据选取我国某地区典型日 24 h 的负荷及风电数据, 预测曲线如附录 C 图 C2 所示。假设负荷、风电的最大预测误差分别为 5%、40%。为了尽可能地提高风电消纳率, 本文设置弃风成本系数 $C_{\text{penalty}} = 1300$ 元 / MW^[2]。

4.1.2 待检修设备成本参数

本文算例设置了 5 台待检修设备, 设备类型与设备编号如表 1 所示。待检修设备的综合评分均通过多类型储能系统关键设备运行状态评价方法生成, 相关检修成本参数见附录 C 表 C7。

表 1 待检修设备的编号及类型

Table 1 Number and type of equipments to be repaired

设备编号	设备类型	设备编号	设备类型
1	PS 机组 1-水泵水轮机	4	Pb-BES 电池簇 1
2	CAES-1 级压缩机	5	Li-BES 电池簇 1
3	CAES-1 级膨胀机		

由式(16)和式(19)可知, 除了上述初始参数外, 本文所建模型还需优先计算不同的待检修设备在整个检修时间窗内退出运行情况下的系统最优成本 (C_{normal} 、 C_i^{exit}), 结果见附录 C 表 C8。

4.1.3 待检修设备时间参数

关于状态评估的工作周期, 通常设备的综合评分从 100% 下降至 83.3% 需要 45 周^[4], 因此本文设定储能系统关键设备的状态评估工作周期为 0.5 a。

关于设备的检修工期以及本文所述检修时间窗长度, 以 PS 系统的检修工作为例加以说明。根据文献[10], PS 电站的定期检修按工程规模分为 A、B、C、D 4 级, 其中工程规模最小的 D 级检修周期为 1 a, 工期不超过 7 d。而本文的检修工作仅针对 PS 电站中的关键设备——水泵水轮机, 且评估指标数量明显少于 D 级检修的指标数量, 主要对设备异常

状况进行消缺性工作,因此本文假设水泵水轮机的检修工期小于D级检修的检修工期。类似地,CAES系统及BES系统关键设备的检修也具有同样的特点。考虑到本文的状态评估周期设置为0.5 a,在此期间设备的状态评分降幅较小,因此本文假设多类型储能系统关键设备检修工作的最大检修时间窗为3 d。实际所需的检修时间窗根据待检修设备的数量和状态评分确定,待检修设备数量越多,状态评分越低,则检修时间窗越长;反之,则检修时间窗越短。

鉴于设备状态评分在运行状态评估周期内降幅较小,本文考虑以设备评分属于较优等级的情况为代表进行算例分析。对于较劣、最劣的情况,本文方法同样适用,只需调整检修时间窗长度及相关检修参数即可。

根据上述分析,设备检修时间参数设置如附录C表C9所示。本文设置了3个检修班组,单位排班时长为1 h,相关参数见附录C表C10。根据表C7、表C9、表C10,可设置检修时间窗为1 d。

4.2 算例结果分析

为了验证本文所提多类型储能系统检修优化策略的优越性和有效性,设置如下3种场景:场景A以检修风险成本为优化目标,场景B以检修实际成本为优化目标,场景C以检修总成本为优化目标。3种场景除优化目标不同外,其余参数均保持一致。3种场景下系统的各项检修成本对比如表2所示。

表2 3种场景下系统检修成本对比

Table 2 Comparison of system maintenance cost among three scenes

场景	单位:元		
	检修风险成本	检修实际成本	检修总成本
A	11 545.81	468 993.47	480 539.28
B	252 369.92	212 732.92	465 102.84
C	83 155.28	220 127.74	303 283.02

分析表2可知,场景A的检修风险成本最低,场景B的检修实际成本最低,与这2种场景的优化目标基本吻合,相应的优化目标检修成本降为最低。然而,优化目标未涉及的另一项检修成本则较不理想,场景A的检修实际成本最高,场景B的检修风险成本最高。场景C在检修优化目标中综合考虑了检修实际成本和检修风险成本,其对应的2种检修成本均介于场景A和场景B之间,使得其检修总成本最低。相较于场景A和场景B,场景C的检修总成本分别下降了36.89%、34.79%,这说明综合考虑检修风险成本和检修实际成本,可以有效降低检修总成本。

3种场景下多类型储能系统的检修计划如图1所示。分析图1(a)并结合附录C表C7和表C8可知,所有待检修设备的检修计划都尽可能地安排在检修开始时刻,设备的检修顺序与其检修风险成本

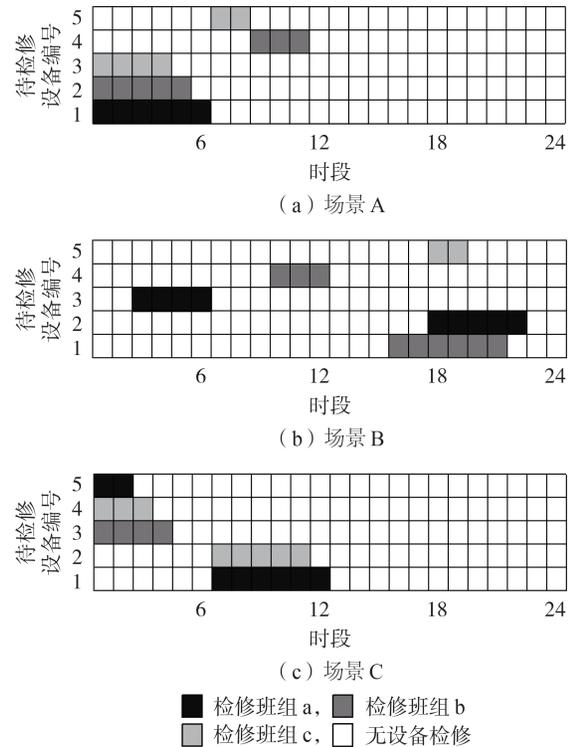


图1 3种场景下的检修计划

Fig.1 Maintenance plan of three scenes

的大小密切相关。检修风险成本较高的设备被优先检修,以尽可能避免因时间累积所造成的检修风险成本的增加。检修计划安排与系统优化检修风险成本的目标相吻合。分析图1(b)并结合附录C图C2可知,PS系统、BES系统的检修计划均安排在负荷高峰时段,即风电低谷时段。这主要是因为风电具有反调峰特性,在负荷低谷时段风电往往大发,若此时安排储能设备检修会大幅增加系统的弃风成本,并导致系统常规机组的运行成本增加。因此PS系统和BES系统的设备检修计划大多集中在负荷高峰时段。对于CAES系统的膨胀机,由于CAES系统在负荷低谷时段与风电高峰时段工作于压缩工况,膨胀机处于停机状态,故膨胀机的检修计划安排在负荷低谷时段。相对地,CAES系统压缩机的检修计划则安排在负荷高峰时段。分析图1(c)可知,综合考虑检修实际成本和检修风险成本作为优化目标时,BES系统电池簇和CAES系统膨胀机的检修计划仍安排在检修时间窗的初始时段,以尽可能降低检修风险成本。而PS系统水泵水轮机和CAES系统压缩机的检修计划则紧随在风电高峰时段之后,既避免了风电高峰时段大容量储能设备停运造成的弃风成本增加,又避免了待检修设备长时间不检修所导致的检修风险成本累积。

4.3 设备综合评分对检修计划的影响

由4.2节分析可知,场景C的目标函数能兼顾检修风险成本与检修实际成本,有效降低检修总成本,

因此本节以场景C为基准场景。为了说明储能系统关键设备运行状态对储能检修计划制定的影响,补充2种场景与场景C进行对比:场景C—E中PS系统水泵水轮机的综合评分分别设置为24.5、23.5、22.5分,除综合评分设置不同之外,场景D和场景E的其他参数设置与场景C保持一致。场景C—E的各项检修成本的对比如表3所示,场景D和场景E的检修计划安排如图2所示。

表3 场景C—E下系统检修成本对比
Table 3 Comparison of system maintenance cost among Scene C-E

场景	检修风险成本	检修实际成本	检修总成本
C	83 155.28	220 127.74	303 283.02
D	74 486.25	239 013.66	313 499.91
E	109 704.10	245 004.92	354 709.02

单位:元

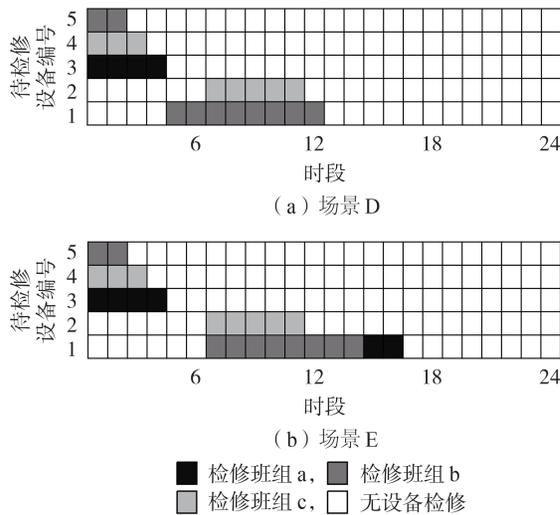


图2 场景D和场景E的检修计划

Fig.2 Maintenance plan of Scene D and E

分析表3可知,系统检修总成本随着储能设备综合评分的减少而逐渐增加,说明设备运行状态越恶劣,系统检修的代价越高。进一步结合图2可以看出,BES系统和CAES系统的检修计划安排基本保持不变,而PS系统水泵水轮机的检修计划安排则受到一定的影响。随着水泵水轮机综合评分的不断降低,一方面PS系统水泵水轮机的检修时长会增加,另一方面具体安排的检修时段也有所不同。但3种场景下PS系统水泵水轮机的检修计划基本都安排在第一个风电高峰时段之后,原因与场景C的分析类似。综上可知,储能系统设备运行状态的评估结果对多类型储能系统检修优化策略的制定具有直接的影响。

5 结论

本文综合考虑了不同类型储能系统的关键部件和典型故障,建立了多类型储能系统关键设备运行

状态评价指标体系,提出了一种综合考虑检修风险成本和检修实际成本的储能系统检修优化策略,最后进行了仿真验证,所得结论如下:

1)本文所提多类型储能系统关键设备运行状态评价指标体系及评价方法,可以反映多类型储能系统关键设备的运行状态,诊断并筛选出需要开展检修工作的设备,并为后续检修计划的制定奠定了数据基础;

2)本文所提多类型储能系统检修优化策略在降低检修实际成本的同时,可以尽可能减少因设备检修不及时所带来的风险成本,具有较好的工程实践意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 郭伟,唐人虎. 2060碳中和目标下的电力行业[J]. 能源,2020(11):19-26.
- [2] 蔡杰,张松岩,杜治,等. 含光热集热模块的先进绝热压缩空气储能系统容量配置策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(7):165-173.
CAI Jie, ZHANG Songyan, DU Zhi, et al. Capacity allocation strategy of advanced adiabatic compressed air energy storage system with solar thermal collector module[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 165-173.
- [3] 万俊毅. 水泵水轮机综合状态评估研究与应用[D]. 武汉:华中科技大学,2018.
WAN Junyi. Research and application of pump-turbine synthetic state assessment[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [4] 杨春波,陶青,张健,等. 基于综合健康指数的设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(10):104-109.
YANG Chunbo, TAO Qing, ZHANG Jian, et al. Equipment status evaluation based on comprehensive health index[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 104-109.
- [5] 刘丝雨. 电化学储能系统并网/离网特性表征量及综合评估方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2018.
LIU Siyu. Research on characteristic quantity and comprehensive evaluation method of on/off network characteristics of electrochemical energy storage system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [6] 许易经,韩学山,王勇,等. 关联设备时变性能的状态检修决策模型[J]. 中国电机工程学报,2018,38(5):1457-1466.
XU Yijing, HAN Xueshan, WANG Yong, et al. Electrical equipment condition-based maintenance decision model considering decision adjusted with performance[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1457-1466.
- [7] 潘乐真,张焰,俞国勤,等. 状态检修决策中的电气设备故障率推算[J]. 电力自动化设备,2010,30(2):91-94.
PAN Lezhen, ZHANG Yan, YU Guoqin, et al. Prediction of electrical equipment failure rate for condition-based maintenance decision-making[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 91-94.
- [8] 袁野,王慧芳,应高亮,等. 基于最小累积风险度的电网等风险检修决策[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):151-155.
YUAN Ye, WANG Huifang, YING Gaoliang, et al. Equal risk maintenance decision for power grid based on minimum cumulative risk[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 151-155.

- [9] XU B, HAN X S, WANG Y, et al. Risk-based optimization model for system maintenance scheduling[C]//2012 IEEE International Conference on Power System Technology. Auckland, New Zealand: IEEE, 2012: 1-6.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 抽水蓄能电站检修导则: GB/T 32574—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [11] 全国气体分离与液化设备标准化技术委员会. 透平膨胀机技术条件: JB/T 11847—2014[S]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [12] 全国电力储能标准化技术委员会. 电力储能用铅炭电池: GB/T 36280—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [13] 全国电力储能标准化技术委员会. 电力储能用锂离子电池: GB/T 36276—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [14] 宋冬梅, 刘春晓, 沈晨, 等. 基于主客观赋权法的多目标多属性决策方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2015, 45(4): 1-9.
SONG Dongmei, LIU Chunxiao, SHEN Chen, et al. Multiple objective and attribute decision making based on the subjective and objective weighting[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2015, 45(4): 1-9.
- [15] 潘险险, 余梦泽, 隋宇, 等. 计及多关联因素的电力行业碳排放权分配方案[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 35-42.
PAN Xianxian, YU Mengze, SUI Yu, et al. Allocation scheme of carbon emission rights for power industry considering multiple correlated factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 35-42.
- [16] LI Y W, MIAO S H, LUO X, et al. Optimization model for the power system scheduling with wind generation and compressed air energy storage combination[C]//2016 22nd International Conference on Automation and Computing. Colchester, UK: IEEE, 2016: 300-305.
- [17] ZHANG Q W, WANG X L, YANG T T, et al. Research on scheduling optimisation for an integrated system of wind-photovoltaic-hydro-pumped storage[J]. The Journal of Engineering, 2017(13): 1210-1214.
- [18] 钟宇峰, 黄民翔, 叶承晋. 基于电池储能系统动态调度的微电网多目标运行优化[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 114-121.
ZHONG Yufeng, HUANG Minxiang, YE Chengjin. Multi-objective optimization of microgrid operation based on dynamic dispatch of battery energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 114-121.

作者简介:



王廷涛

王廷涛(1997—), 男, 山东高密人, 硕士研究生, 主要研究方向为压缩空气储能系统、电力系统优化规划(**E-mail**: hustwt@hust.edu.cn);

苗世洪(1963—), 男, 湖北随州人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 通信作者, 主要研究方向为电力系统保护与控制、压缩空气储能系统等(**E-mail**: shmiao@hust.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Maintenance optimization strategy of multi-type energy storage systems based on state evaluation

WANG Tingtao, MIAO Shihong, ZHANG Songyan, ZHANG Di, YAO Fuxing, ZHENG Zhong

(Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the power system, various types of energy storage devices are usually equipped to meet the various operation requirements of the system. With the increase of operation time, the health condition of multi-type energy storage systems is gradually deteriorating, so it is necessary to take into account the importance and deterioration degree of each energy storage system, and work out a reasonable maintenance plan. Therefore, a maintenance optimization strategy of multi-type energy storage systems based on state evaluation is proposed by comprehensively considering the key equipment of multi-type energy storage system and its operation state. Considering the operation characteristics and technical characteristics of multi-type energy storage systems, the evaluation index system of key equipment operation state of multi-type energy storage systems is established. Based on the improved objective and subjective weighting method and attribute recognition model, the operation state of key equipment is evaluated, and the maintenance plan is made according to the evaluation results. Comprehensively considering the constraints of maintenance plan and system operation, the maintenance optimization model of multi-type energy storage systems is constructed considering maintenance risk cost and actual maintenance cost, and the nonlinear terms in the model are linearized by large “M” method. Based on the typical daily data of a certain region and the improved IEEE 30-bus system, the simulation example is carried out, and the simulative results verify the rationality and effectiveness of the proposed model.

Key words: multi-type energy storage systems; operation state evaluation; objective and subjective weighting method; attribute recognition model; maintenance optimization model; mixed integer linear programming model

附录 A

表 A1 水泵水轮机运行状态评价指标

Table A1 Evaluation index for operation state of pump-turbine

部件	指标	类型
主轴	X 轴向位移/ μm	越小越好
	Y 轴向位移/ μm	越小越好
	X 轴向振动速度/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	越小越好
	Y 轴向振动速度/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	越小越好
	Z 轴向振动速度/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	越小越好
水导轴承	水导轴承温度/ $^{\circ}\text{C}$	越小越好
	油冷却系统油温/ $^{\circ}\text{C}$	越小越好
	油冷却系统油位/ mm	中间最优
	油冷却系统油杂质率/%	越小越好
主轴密封	主轴密封磨损程度/ mm	越小越好
	供水系统温度/ $^{\circ}\text{C}$	越小越好
	供水系统供水压力/ bar	中间最优

表 A2 压缩机运行状态评价指标

Table A2 Evaluation index for operation state of compressor

部件	指标	类型
转子系统	轴径向位移/ μm	越小越好
	轴径向振动速度/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	越小越好
油路系统	油压/ bar	中间最优
	油温/ $^{\circ}\text{C}$	越小越好
气路系统	排气压力/ MPa	中间最优
	排气温度/ $^{\circ}\text{C}$	越小越好
	排气量/ $(\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1})$	中间最优
冷却水系统	冷却水压/ bar	中间最优
	冷却水温/ $^{\circ}\text{C}$	越小越好

表 A3 膨胀机运行状态评价指标

Table A3 Evaluation index for operation state of expander

部件	指标	类型
转子主轴	轴径向位移/ μm	越小越好
	轴径向振动速度/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	越小越好
气体轴承	供气压力/ MPa	中间最优
	供气杂质率/%	越小越好
	径向振幅/ μm	越小越好
	振动速度/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	越小越好
气路系统	等熵效率/%	越大越好
	进气温度/ $^{\circ}\text{C}$	中间最优
	出气温度/ $^{\circ}\text{C}$	中间最优

表 A4 电池簇运行状态评价指标

Table A4 Evaluation index for operation state of battery string

部件	指标	类型
电池簇	充电电压变化率/(V·s ⁻¹)	中间最优
	放电电压变化率/(V·s ⁻¹)	中间最优
	放电时电池单体电压极差/mV	越小越好
	开路时电池单体电压极差/mV	越小越好
	电池单体温度极差/℃	越小越好
	健康状态 SOH/%	越大越好
	绝缘状态/(Ω·V ⁻¹)	越大越好

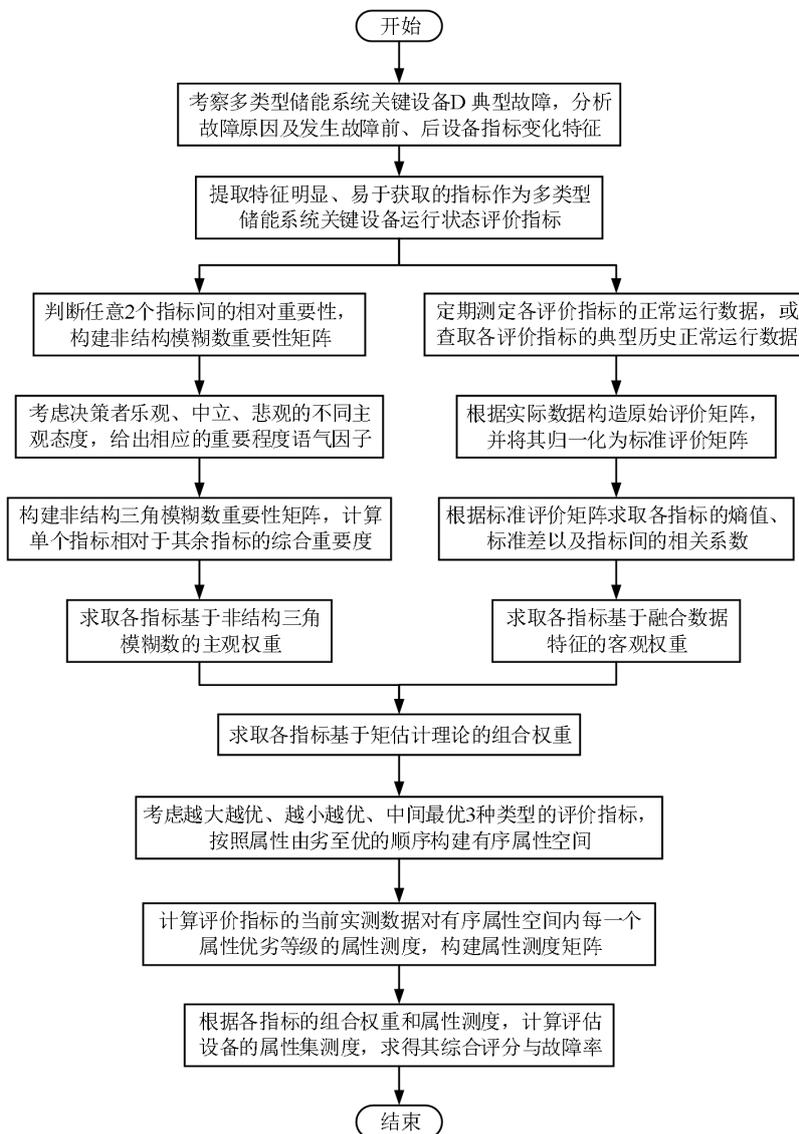


图 A1 储能系统关键设备运行状态评价流程图

Fig.A1 Flowchart for operation status evaluation of key equipment in energy storage system

附录 B

(1) 设备检修状态与待检修状态约束。

a. 设备在检修时间窗内的检修状态之和等于设定检修时长，即：

$$\sum_{t=1}^T u_{i,t}^{\text{maintain}} = T_i^{\text{maintain}} \quad i = 1, 2, \dots, N_{\text{maintain}} \quad (\text{B1})$$

其中， T_i^{maintain} 为待检修设备 i 的设定检修时长。

b. 设备的检修状态发生 $0 \rightarrow 1$ 变化后，保持为 1，且持续时长等于设定检修时长，即：

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_i^{\text{maintain}}-1} u_{i,\tau}^{\text{maintain}} \geq T_i^{\text{maintain}} (u_{i,t}^{\text{maintain}} - u_{i,t-1}^{\text{maintain}}) \quad (\text{B2})$$

$$i = 1, 2, \dots, N_{\text{maintain}}; t = 2, 3, \dots, T - T_i^{\text{maintain}} + 1$$

$$\sum_{t=1}^{T_i^{\text{maintain}}} u_{i,t}^{\text{maintain}} \geq T_i^{\text{maintain}} u_{i,1}^{\text{maintain}} \quad i = 1, 2, \dots, N_{\text{maintain}} \quad (\text{B3})$$

c. 设备处于检修状态时，其待检修状态为 0，即：

$$\begin{cases} u_{i,t}^{\text{wait}} \leq (1 - u_{i,t}^{\text{maintain}})M \\ u_{i,t}^{\text{wait}} \geq -(1 - u_{i,t}^{\text{maintain}})M \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N_{\text{maintain}}; t = 1, 2, \dots, T \quad (\text{B4})$$

其中， M 为一个足够大的常数。

d. 设备的检修状态发生 $0 \rightarrow 1$ 变化前，待检修状态保持为 1，即：

$$u_{i,\tau}^{\text{wait}} \geq u_{i,t}^{\text{maintain}} - u_{i,t-1}^{\text{maintain}} \quad (\text{B5})$$

$$i = 1, 2, \dots, N_{\text{maintain}}; \tau = 1, 2, \dots, t-1; t = 2, 3, \dots, T - T_i^{\text{maintain}} + 1$$

e. 设备的检修状态发生 $1 \rightarrow 0$ 变化后，待检修状态保持为 0，即：

$$u_{i,\tau}^{\text{wait}} \leq 1 - (u_{i,t}^{\text{maintain}} - u_{i,t+1}^{\text{maintain}}) \quad (\text{B6})$$

$$i = 1, 2, \dots, N_{\text{maintain}}; \tau = t+1, t+2, \dots, T; t = T_i^{\text{maintain}},$$

(2) 检修班组约束。

a. 每个检修班组同一时段最多检修 1 台设备，见式 (24)。

b. 当某设备处于检修状态时，必存在唯一的检修班组，正在进行该设备的检修工作；当某设备不处于检修状态时，任何检修班组都没有对其进行检修，见式 (25)。

c. 检修班组开始检修某一台设备后，持续检修该设备，直至完成检修，或者达到最大工作时间，即：

$$\begin{cases} \sum_{\tau=t}^{t+t_j^{\text{max}}-1} u_{j,i,\tau}^{\text{team}} \leq \sum_{\tau=t}^{t+t_j^{\text{max}}-1} u_{i,\tau}^{\text{maintain}} + [1 - (u_{j,i,t}^{\text{team}} - u_{j,i,t-1}^{\text{team}})]M \\ \sum_{\tau=t}^{t+t_j^{\text{max}}-1} u_{j,i,\tau}^{\text{team}} \geq \sum_{\tau=t}^{t+t_j^{\text{max}}-1} u_{i,\tau}^{\text{maintain}} - [1 - (u_{j,i,t}^{\text{team}} - u_{j,i,t-1}^{\text{team}})]M \\ j = 1, 2, \dots, N_{\text{team}}; i = 1, 2, \dots, N_{\text{maintain}}; t = 2, 3, \dots, T - t_j^{\text{max}} + 1 \end{cases} \quad (\text{B7})$$

$$\begin{cases} \sum_{\tau=t}^T u_{j,i,\tau}^{\text{team}} \leq \sum_{\tau=t}^T u_{i,\tau}^{\text{maintain}} + [1 - (u_{j,i,t}^{\text{team}} - u_{j,i,t-1}^{\text{team}})]M \\ \sum_{\tau=t}^T u_{j,i,\tau}^{\text{team}} \geq \sum_{\tau=t}^T u_{i,\tau}^{\text{maintain}} - [1 - (u_{j,i,t}^{\text{team}} - u_{j,i,t-1}^{\text{team}})]M \\ j = 1, 2, \dots, N_{\text{team}}; i = 1, 2, \dots, N_{\text{maintain}}; t = T - t_j^{\text{max}} + 2, T - t_j^{\text{max}} + 3, \dots, T \end{cases} \quad (\text{B8})$$

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{t_j^{\max}} u_{j,i,t}^{\text{team}} \leq \sum_{t=1}^{t_j^{\max}} u_{i,t}^{\text{maintain}} + (1-u_{j,i,1}^{\text{team}})M \\ \sum_{t=1}^{t_j^{\max}} u_{j,i,t}^{\text{team}} \geq \sum_{t=1}^{t_j^{\max}} u_{i,t}^{\text{maintain}} - (1-u_{j,i,1}^{\text{team}})M \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, N_{\text{team}}; i = 1, 2, \dots, N_{\text{maintain}} \quad (\text{B9})$$

d. 检修班组工作状态发生 $1 \rightarrow 0$ 变化后, 开始休整, 持续工作时间越长, 所需的最小休整时间越长, 即:

$$\begin{cases} \sum_{\tau=t}^{t+t_{j,\min}^{\text{rest}}-1} \left(1 - \sum_{l=1}^{N_{\text{maintain}}} u_{j,l,\tau}^{\text{team}} \right) \leq t_{j,\min}^{\text{rest}} + [1 - (u_{j,i,t-1}^{\text{team}} - u_{j,i,t}^{\text{team}})]M + \sum_{v=t-t_{j,i}^{\text{working}}-1}^{t-1} (1-u_{j,i,v}^{\text{team}})M \\ \sum_{\tau=t}^{t+t_{j,\min}^{\text{rest}}-1} \left(1 - \sum_{l=1}^{N_{\text{maintain}}} u_{j,l,\tau}^{\text{team}} \right) \geq t_{j,\min}^{\text{rest}} - [1 - (u_{j,i,t-1}^{\text{team}} - u_{j,i,t}^{\text{team}})]M - \sum_{v=t-t_{j,i}^{\text{working}}}^{t-1} (1-u_{j,i,v}^{\text{team}})M \\ t_{j,\min}^{\text{rest}} = f_{\text{pc}}(t_{j,i}^{\text{working}}) \\ t_{j,i}^{\text{working}} = 1, 2, \dots, t_j^{\max} \\ t = t_{j,i}^{\text{working}} + 1, t_{j,i}^{\text{working}} + 2, \dots, T - t_{j,\min}^{\text{rest}} + 1 \\ j = 1, 2, \dots, N_{\text{team}}; i = 1, 2, \dots, N_{\text{maintain}} \end{cases} \quad (\text{B10})$$

e. 检修班组持续工作达到最大持续工作时间后, 下个时段强制休息, 即:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_{\text{maintain}}} u_{j,i,t}^{\text{team}} \leq \left(t_j^{\max} - \sum_{\tau=t-t_j^{\max}}^{t-1} \sum_{i=1}^{N_{\text{maintain}}} u_{j,i,\tau}^{\text{team}} \right) M \\ \sum_{i=1}^{N_{\text{maintain}}} u_{j,i,t}^{\text{team}} \geq - \left(t_j^{\max} - \sum_{\tau=t-t_j^{\max}}^{t-1} \sum_{i=1}^{N_{\text{maintain}}} u_{j,i,\tau}^{\text{team}} \right) M \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, N_{\text{team}}; t = t_j^{\max} + 1, t_j^{\max} + 2, \dots, T \quad (\text{B11})$$

附录 C

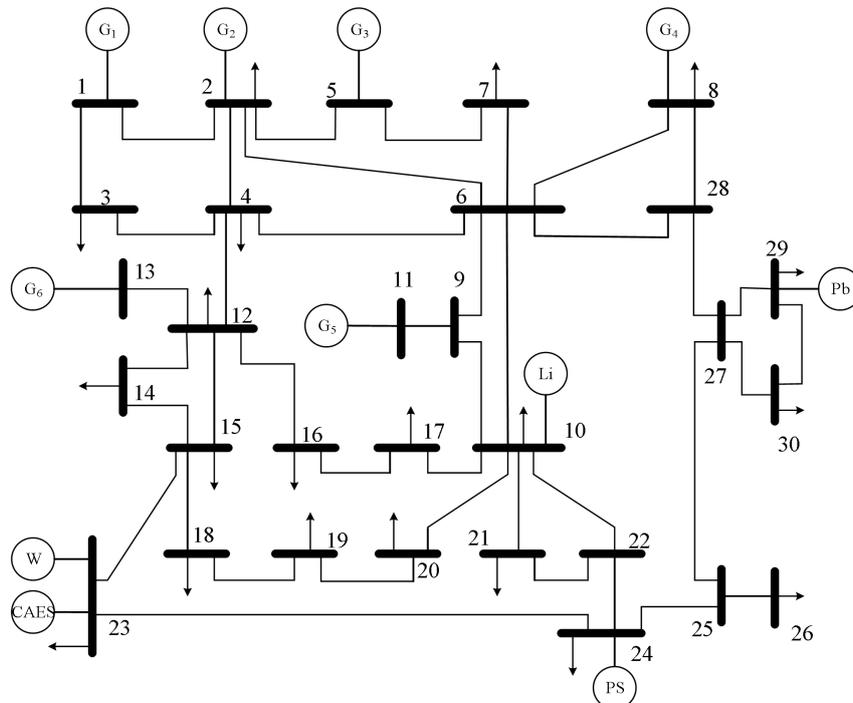


图 C1 改进 IEEE 30 节点系统结构图

Fig.C1 Structure diagram of improved IEEE 30-bus system

表 C1 IEEE 30 节点系统标准负荷参数

Table C1 Standard load parameters of IEEE 30-bus system

节点	节点类型	有功/MW	无功/Mvar	节点	节点类型	有功/MW	无功/Mvar
1	平衡节点	0	0	16	PQ 节点	3.5	1.8
2	PV 节点	21.7	12.7	17	PQ 节点	9	5.8
3	PQ 节点	2.4	1.2	18	PQ 节点	3.2	0.9
4	PQ 节点	7.6	1.6	19	PQ 节点	9.5	3.4
5	PQ 节点	0	0	20	PQ 节点	2.2	0.7
6	PQ 节点	0	0	21	PQ 节点	17.5	11.2
7	PQ 节点	22.8	10.9	22	PV 节点	0	0
8	PQ 节点	30	30	23	PV 节点	3.2	1.6
9	PQ 节点	0	0	24	PQ 节点	8.7	6.7
10	PQ 节点	5.8	2	25	PQ 节点	0	0
11	PQ 节点	0	0	26	PQ 节点	3.5	2.3
12	PQ 节点	11.2	7.5	27	PV 节点	0	0
13	PV 节点	0	0	28	PQ 节点	0	0
14	PQ 节点	6.2	1.6	29	PQ 节点	2.4	0.9
15	PQ 节点	8.2	2.5	30	PQ 节点	10.6	1.9

表 C2 IEEE 30 节点系统支路参数
Table C2 Branch parameters of IEEE 30-bus system

始节点	末节点	电阻	电抗	始节点	末节点	电阻	电抗
1	2	0.02	0.06	15	18	0.11	0.22
1	3	0.05	0.19	18	19	0.06	0.13
2	4	0.06	0.17	19	20	0.03	0.07
3	4	0.01	0.04	10	20	0.09	0.21
2	5	0.05	0.2	10	17	0.03	0.08
2	6	0.06	0.18	10	21	0.03	0.07
4	6	0.01	0.04	10	22	0.07	0.15
5	7	0.05	0.12	21	22	0.01	0.02
6	7	0.03	0.08	15	23	0.1	0.2
6	8	0.01	0.04	22	24	0.12	0.18
6	9	0	0.21	23	24	0.13	0.27
6	10	0	0.56	24	25	0.19	0.33
9	11	0	0.21	25	26	0.25	0.38
9	10	0	0.11	25	27	0.11	0.21
4	12	0	0.26	28	27	0	0.4
12	13	0	0.14	27	29	0.22	0.42
12	14	0.12	0.26	27	30	0.32	0.6
12	15	0.07	0.13	29	30	0.24	0.45
12	16	0.09	0.2	8	28	0.06	0.2
14	15	0.22	0.2	6	28	0.02	0.06
16	17	0.08	0.19				

注：电阻、电抗为标么值。

表 C3 常规机组参数
Table C3 Parameters of conventional generators

参数	取值					
	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆
额定出力/MW	350	240	200	250	350	230
最小技术出力/MW	100	30	20	50	50	30
购电成本系数 a /[元·(MW·h) ⁻¹]	251.16	319.28	382.46	299	275.34	355.42
购电成本系数 b /[元·(MW·h) ⁻¹]	790.92	724.1	659.36	741.26	768.04	687.18
正备用成本系数/[元·(MW·h) ⁻¹]	244.66	177.58	113.1	196.56	222.04	140.92
负备用成本系数/[元·(MW·h) ⁻¹]	202.8	151.32	92.3	135.98	153.4	120.38
环境成本系数/[元·(MW·h) ⁻¹]	5.2	5.85	5.85	5.85	5.2	5.85
开机成本/元	9750	5785	3250	5850	9425	4680
最小启停机时间/h	4	2	2	2	4	2
爬坡率/(MW·min ⁻¹)	2.3	4.5	8.2	4.6	2.7	7.9

表 C4 PS 系统参数
Table C4 Parameters of PS system

参数	取值	参数	取值
机组数量	4	上水库最小库容/m ³	63033.33
机组额定发电功率/MW	50	上水库初始水量/m ³	523791.7
机组最小发电功率/MW	20	抽水工况水量-功率转换系数/[m ³ ·(MW·h) ⁻¹]	749
机组额定抽水功率/MW	50	发电工况水量-功率转换系数/[m ³ ·(MW·h) ⁻¹]	998
机组最小抽水功率/MW	44	系统日运行管理成本/(元·MW ⁻¹)	101.53
上水库最大库容/m ³	1110617	机组日最大启停机次数	10

表 C5 CAES 系统参数
Table C5 Parameters of CAES system

参数	取值	参数	取值
压缩机级数	4	机组最小压缩功率/MW	20
膨胀机级数	4	储气室初始气压/bar	50
机组额定发电功率/MW	80	发电工况气压-功率转换系数/[bar·(MW·h) ⁻¹]	8.58×10^{-3}
机组最小发电功率/MW	32	压缩工况气压-功率转换系数/[bar·(MW·h) ⁻¹]	4.83×10^{-3}
机组额定压缩功率/MW	50	系统日运行管理成本/(元·MW ⁻¹)	32.5

表 C6 BES 系统参数
Table C6 Parameters of BES system

参数	取值		参数	取值	
	Pb-BES	Li-BES		Pb-BES	Li-BES
电池簇数量	10	10	电池簇 SOC 上/下限	1/0.2	1/0.2
电池簇容量/(MW·h)	3.5	2	电池簇初始 SOC	0.5	0.5
电池簇额定充放电功率/MW	1	1	系统日运行管理成本/(元·MW ⁻¹)	80.80	403.85
电池簇工作效率	0.8	0.95	系统日最大吞吐量/(MW·h)	70	40



图 C2 负荷与风电典型日预测曲线
Fig.C2 Forecast curves of load and wind power in a typical day

表 C7 待检修设备的检修成本参数
Table C7 Maintenance cost parameters of equipments to be maintained

参数	取值				
	PS 机组 1-水泵水轮机	CAES-1 级压缩机	CAES-1 级膨胀机	Pb-BES 电池簇 1	Li--BES 电池簇 1
检修设备编号	1	2	3	4	5
综合评分	24.50	23.52	24.51	23.50	24.48
故障率	0.11	0.12	0.11	0.12	0.11
单位功率或容量故障维修费用	34793.88 元/MW	75806.84 元/MW	56654.26 元/MW	45117.48 元/(MW·h)	93011.75 元/(MW·h)
额定功率或容量	50 MW	12.5 MW	20 MW	3.5 MW·h	2 MW·h
状态检修费用与故障维修费用之比	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
状态检修费用/元	86984.70	47379.28	56654.26	7895.55	9301.18

表 C8 系统最优成本参数
Table C8 Parameters of optimal system cost

退出的待检修设备编号	系统最优成本/元	退出的待检修设备编号	系统最优成本/元
无设备退出	7302430.07	3	7469475.47
1	7413418.65	4	7306152.56
2	7469475.47	5	7306286.67

表 C9 待检修设备的检修时长参数
Table C9 Maintenance duration parameters of equipmentS to be maintained

评分范围	检修时长/h				评分范围	检修时长/h			
	设备 1	设备 2	设备 3	设备 4 或 5		设备 1	设备 2	设备 3	设备 4 或 5
[24,25)	6	3	4	2	[19,20)	17	14	15	8
[23,24)	8	5	6	3	[18,19)	20	17	18	10
[22,23)	10	7	8	4	[17,18)	23	20	21	12
[21,22)	12	9	10	5	[16,17)	26	23	24	14
[20,21)	14	11	12	6	[15,16)	29	26	27	16

表 C10 检修班组参数
Table C10 Parameters of maintenance team

参数	取值		
	a 组	b 组	c 组
最大持续工作时间/h	8	8	8
工作 1~2 h 完成检修后的休整时间/h	1	1	1
工作 3~4 h 完成检修后的休整时间/h	2	2	2
工作 5~6 h 完成检修后的休整时间/h	3	3	3
工作 7~8 h 完成检修或达到最大持续工作时间后的休整时间/h	4	4	4