

# 控制与决策

Control and Decision

## 集中式超大规模储能电站信息物理系统建模与可靠性评估

高夏翔, 李相俊, 杨锡运

引用本文:

高夏翔, 李相俊, 杨锡运. 集中式超大规模储能电站信息物理系统建模与可靠性评估[J]. *控制与决策*, 2022, 37(5): 1309–1319.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1234>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 工业信息物理系统安全风险动态表现分析量化评估模型

Quantitative evaluation model for dynamic performance analysis of security risk in industrial cyber physics systems

控制与决策. 2021, 36(8): 1939–1946 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1479>

#### 不确定语言信息下的大规模群体DEMATEL决策方法

Large-scale group DEMATEL decision making method under uncertain linguistic information

控制与决策. 2021, 36(8): 2023–2033 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1486>

#### 基于深度学习的仿生集群运动智能控制

Intelligent control of bionic collective motion based on deep learning

控制与决策. 2021, 36(9): 2195–2202 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0071>

#### 双层相依网络化指挥信息系统级联失效研究

Cascading failure of double layer networked command information system

控制与决策. 2020, 35(12): 3017–3025 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0696>

#### 基于协同控制的串联超级电容电压均衡策略

Voltage equalization strategy for series-connected ultracapacitors based on cooperative control

控制与决策. 2021, 36(8): 1997–2001 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1736>

# 集中式超大规模储能电站信息物理系统建模与可靠性评估

高夏翔<sup>1</sup>, 李相俊<sup>2</sup>, 杨锡运<sup>1†</sup>

(1. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206;

2. 中国电力科学研究所有限公司 新能源与储能运行控制国家重点实验室, 北京 100192)

**摘要:** 集中式超大规模储能电站与其控制系统逐渐发展成为信息物理系统 (cyber physical system, CPS), 信息技术和监控系统能够使超大规模储能电站应对多样化场景和满足不同的需求, 但也带来一定程度的安全运行风险, 因此对其进行可靠性建模和分析具有非常重要的意义. 首先, 建立超大规模储能电站的 CPS 模型, 并分析物理侧与信息侧的交互影响; 其次, 对信息系统中多种信息扰动的可靠性状态进行建模分析, 并提出储能电站 CPS 可靠性评估指标; 然后, 分别采用非序贯和序贯蒙特卡洛方法对超大规模储能电站的信息层和物理层元件进行抽样, 并量化分析多信息扰动因素对超大规模储能电站 CPS 可靠性的影响; 最后, 通过算例仿真结果验证所提模型和方法的有效性, 结果表明所提模型可为超大规模储能电站规划和运行提供有效技术支持.

**关键词:** 超大规模储能电站; 信息物理系统; 蒙特卡洛方法; 可靠性评估

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1234

引用格式: 高夏翔, 李相俊, 杨锡运. 集中式超大规模储能电站信息物理系统建模与可靠性评估 [J]. 控制与决策, 2022, 37(5): 1309-1319.

## Modeling and reliability assessment of centralized ultra large scale energy storage power station cyber physical system

GAO Xia-xiang<sup>1</sup>, LI Xiang-jun<sup>2</sup>, YANG Xi-yun<sup>1†</sup>

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Key Laboratory of Control and Operation of Renewable Energy and Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The centralized ultra large scale energy storage power station (ULSESPS) and its control system have gradually developed into a cyber physical system (CPS). Information technologies and monitoring systems can not only enable the ULSESPS to cope with diversified scenes and meet different demands, but also bring a certain degree of safe operational risks. Therefore, reliability modeling and analysis of the ULSESPS are of great significance. Firstly, this paper proposes the cyber physical system model of the ULSESPS, and analyzes the interaction between physical side and information side. Then, the probabilistic mode of various information disturbances in the cyber system is modeled and analyzed, and the CPS reliability evaluation index of the ULSESPS is proposed. Finally, the non-sequential and sequential Monte Carlo method is used for cyber and physical layer components simulation respectively, and the influence of multi-information disturbance factors on CPS reliability of the ULSESPS is analyzed quantitatively. The effectiveness of the proposed model and method is verified by simulation examples, which can provide technology support on ultra large scale energy storage power station planning and operation.

**Keywords:** ultra large-scale energy storage power station; cyber physical system; Monte Carlo method; reliability assessment

## 0 引言

目前, 电池储能电站已经向百兆瓦级、吉瓦级的超大规模储能电站发展, 吉瓦级的集中式超大规模储能电站在大规模可再生能源电力的消纳和区域电网

的调峰调压等方面能够发挥积极的辅助作用<sup>[1]</sup>. 超大规模储能电站面对多样化的应用场景, 可能同时需要满足紧急控制和平滑波动等不同时间尺度和不同处理精度的需求<sup>[2]</sup>. 因此, 超大规模储能电站依赖先进

收稿日期: 2020-09-05; 录用日期: 2021-03-17.

基金项目: 国家电网公司总部科技项目 (DG71-18-009).

责任编辑: 郭庆来.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: yangxiyun916@sohu.com.

的通讯技术和监控系统才能够实现多样化功能.而在超大规模储能系统中,它的通讯和监控系统的拓扑结构会变得更加庞大和复杂,如果通讯和监控设备出现随机故障,则会增加控制中心获取和处理数据的难度,极大地降低其运行效率,甚至会造成电站停运的危险.由此可见,超大规模储能电站是典型的信息物理系统.因此,信息系统的安全运行对超大规模储能电站的可靠性起着至关重要的作用.

目前,信息物理系统的可靠性评估在输电网<sup>[3]</sup>、配电网<sup>[4-8]</sup>、微电网<sup>[9]</sup>、综合能源<sup>[10]</sup>、光伏电站<sup>[11-13]</sup>等方面都有了一定的研究.目前,学者在主动配电网方面的研究较多,文献[5]针对主动配电网的元件可靠性建模、信息物理系统交互作用分析、可靠性评估指标和评估方法等4个主要方面的成果进行了综述;在光伏电站方面,文献[11]针对元件故障的光伏电站,采用马尔科夫链蒙特卡洛方法对光伏电站的可靠性进行了评估,但并未研究光伏电站信息系统对其可靠性的影响;文献[12]提出了一个数学框架来评估系统的可靠性,同时考虑了基于合并单元、以太网交换机和ICT子系统内的保护面板的可靠性的多种光伏系统配置;文献[13]主要研究了光伏发电出力的随机特性与高渗透率可能给电网可靠性带来的影响.而目前在超大规模储能电站自身信息物理系统的可靠性评估方面国内还鲜有研究,因此,建立超大规模储能电站的可靠性评估体系对于超大规模储能电站的发展是非常重要的.

在信息物理系统中,物理系统包含大量的设备和开关装置等物理元件,信息系统包含大量的智能设备和通信装置等信息元件.信息物理系统相互耦合影响,任何一侧元件故障都会影响整个系统的可靠性,因此建立信息物理系统的可靠性耦合模型和元件故障后的分析是十分重要的.一般信息系统对物理系统的作用简单分为直接作用和间接作用<sup>[6]</sup>.直接作用指的是信息系统元件或功能失效直接导致对应物理元件失效;间接作用则指的是信息系统失效导致物理系统性能恶化.当信息物理系统的元件规模较小时,研究方向以直接作用为主,采用解析法进行可靠性评估比较精准;而当信息物理系统的元件规模较大时,研究方向从直接作用转向到间接作用,解析法的计算过程比较复杂,一般模拟法比较适用<sup>[8]</sup>.

本文将非序贯和序贯蒙特卡洛方法应用到超大规模储能电站的信息物理系统可靠性评估中,提出超大规模储能电站信息物理系统模型,分析物理元件故

障、电池单元过充过放误检、信息系统多类型扰动(信息攻击可靠性、信息链路可靠性和信息传输可靠性)对超大规模储能电站可靠性的影响,利用所提出的超大规模储能电站信息物理系统的可靠性评估指标进行算例分析,仿真成果可为超大规模储能电站规划和运行提供有效技术支撑.

## 1 超大规模储能电站的CPS模型

### 1.1 CPS结构模型

储能电站CPS的结构如图1所示,将储能电站分为信息层和物理层.

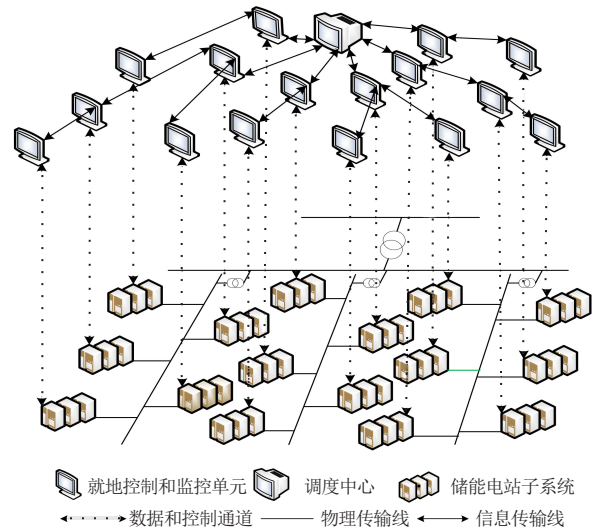


图1 储能电站CPS结构模型

信息层由就地控制和监控单元(local controlling and monitoring unit, LCMU)及调度中心(dispatching center, DC)组成,就地控制和监控单元包括交换机(ethernet switch, ES)、路由器(router, R)和服务端(server, S)等通讯设备.各个LCMU与DC之间通过结合多种通信方式(以太网、电力线载波和无线网络等)提供正常运行的实时数据传输通道、快速故障响应和功率分配等.物理层是由储能电站子系统的一、二次设备组成.储能电站子系统一、二次设备拓扑图如图2所示,储能电站子系统的一次设备是由电池组(battery packs, BP)、储能交流器(power converter system, PCS)、电流检测装置(current detection device, CDD)、直/交流接触器(DC/AC contactor, DCC/ACC)、熔断器(fuse, F)、直/交流断路器(DC/AC circuit breaker, DCCB/ACCB)、变压器(transformer, T)等元件组成,是由电缆连接;二次设备是由电池管理单元(battery management unit, BMU)、电池管理系统(battery management system, BMS)等元件组成,是由通讯线连接.储能电站详细介绍可参考文献[14].

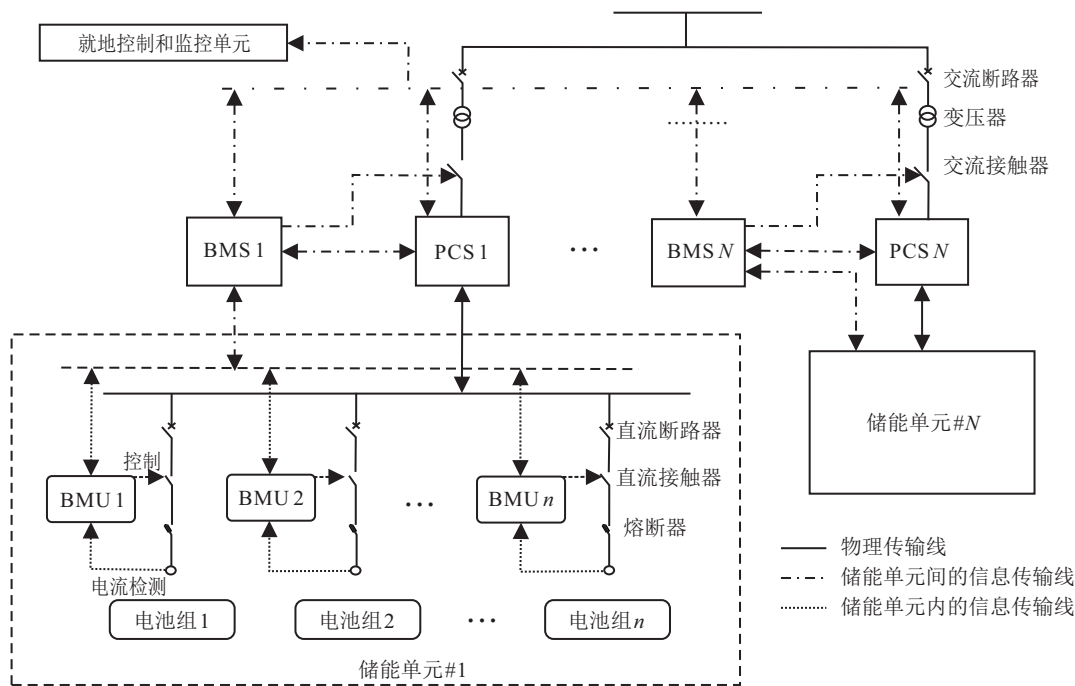


图2 储能电站子系统一、二次设备拓扑

### 1.2 储能电站信息物理系统交互影响

在储能电站信息物理系统中,物理层是上传储能电站子系统所有一次设备的运行信息,如实际发电功率、出口功率、电池容量、电池状态、线路状态、电流、有功功率、无功功率等,通过信息层中的就地控制和监控单元传输到调度中心,调度中心根据各个子系统的运行信息分配调度任务,把调度任务处理、转换后,形成控制信息,通过信息网络再下发到各个子系统进行控制.即信息系统中的控制命令取决于物理系统的状态,而物理系统状态又将影响信息系统的决策,这种结构对信息网络有很高的要求,在运行控制过程中,信息系统与物理系统之间相互耦合运行.

信息系统对物理系统的影响:储能电站中每个储能子系统内所有储能单元的状态信息与LCMU进行通信,然后DC依据各个LCMU的测量信息进行下发控制指令.在上述通信和处理过程中,任何环节失效都可能影响储能电站子系统的正常通讯工作,进而影响整个储能电站的可靠运行,而信息网络中通信链路及设备故障或网络攻击导致的数据包延迟、丢包、通信中断、测量状态信息或控制命令错误是导致上述控制过程失效的主要因素.

物理系统对信息系统的影响:在储能电站放电过程中,将储能电站子系统内的直流电转换成交流电,通过交流母线升压到主网电压等级,充电过程与之相反.在上述充放电过程中,充放电调度指令由调度中心通过就地控制和监控单元发送到各个PCS进

行相关电池组的充/放电控制.在其调度过程中,任何开关、输电线路和设备故障都可能导致调度任务的失效,进而影响整个储能电站的可靠运行.

综上所述,储能电站中,综合对信息系统与物理系统的交互影响进行分析,不管是物理侧的输电可靠性影响还是信息侧的信息传输可靠性影响,过程中任何故障都会影响储能电站的安全可靠运行.因此,有必要建立储能电站信息物理耦合模型,从机理上量化对储能电站信息物理系统的可靠性分析.

### 1.3 信息网络拓扑模型

将储能电站信息层的就地控制和监控单元抽象成信息节点,调度中心抽象成控制节点,信息层的物理连接线抽象成边,可以采用图论对储能电站信息网络拓扑结构进行建模.储能电站的信息网络结构在本文中被抽象成为一个无向图 $G = (V, E, A)$ .其中: $V = (1, 2, \dots, N)$ 表示含有 $N$ 个节点的非空集合; $E \in V \times V$ 表示边集, $(i, j) \in E$ 表示节点 $i$ 与节点 $j$ 之间存在连接边; $A$ 表示邻接矩阵.节点 $i$ 的邻居节点集为 $N_i = \{j | (i, j) \in E\}$ .如果 $(i, j)$ 存在,则 $a_{ij} = 1$ ,反之 $a_{ij} = 0$ .图3为本文建立的超大规模储能电站信息网络拓扑模型.

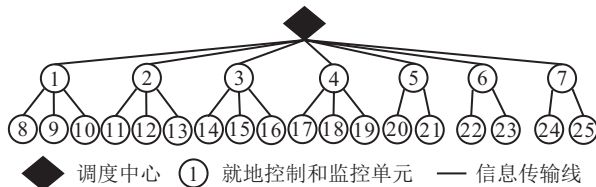


图3 信息网络拓扑模型

## 2 计及信息扰动的超大规模储能电站CPS可靠性建模

### 2.1 储能电站子系统可靠性建模

本文首先建立一个储能电站子系统一、二次设备的通用可靠性模型. 储能电站子系统的一、二次设备拓扑图如图2所示,其内部每个相互独立的元件都可用两状态模型表示:正常和故障状态. 储能电站子系统是由 $N$ 个储能单元串(energy storage unite string, ESUS)组成,一个ESUS是由1个PCS、BMS、T、ACC、ACCB和储能单元(energy storage unite, ESU)组成;一个ESU是由 $n$ 个储能单元子串组成,1个储能单元子串是由BP、CDD、F、DCC、DCCB和BMU组成. 其中,ESUS的二次设备BMS、BMU虽然分别与ESU、BP并联连接,但是二次设备的故障让一次设备不能工作,反之亦然,因此本文将ESUS的一、二次设备假定为串联连接. 根据系统元件的故障率 $\lambda_i$ 和修复率 $\mu_i$ ,采用串并联元件的可靠性建模方法计算出ESUS故障状态概率 $P_f^{\text{ESUS}}$ 和修复状态概率 $P_r^{\text{ESUS}}$ .

通过串联元件可靠性建模方法计算故障状态概率 $P_s^f$ 和修复状态概率 $P_s^r$ ,即

$$P_s^r = \prod_{i=1}^I \frac{\mu_i}{\lambda_i + \mu_i}, \quad (1)$$

$$P_s^f = 1 - P_s^r, \quad (2)$$

其中 $I$ 为串联元件的个数.

通过并联元件可靠性建模方法计算故障状态概率 $P_p^f$ 和修复状态概率 $P_p^r$ ,即

$$P_p^f = \prod_{i=1}^W \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i}, \quad (3)$$

$$P_p^r = 1 - P_p^f, \quad (4)$$

其中 $W$ 为并联元件的个数.

储能电站子系统是由 $N$ 个相同类型的ESUS组成的,部分ESUS的失效不会导致整个储能电站子系统全部故障,因此储能电站子系统的整体运行状态为多状态模型,如图4所示.

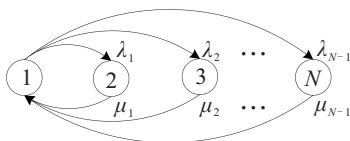


图4 储能电站子系统的多状态模型

图4中每个状态代表依据故障ESUS的数量进行划分,如:状态1是储能电站子系统内的ESUS全部为

正常;状态2是1个ESUS出现故障,其他ESUS正常;其余状态依次排序直至状态 $N$ 为ESUS全部故障. 本文假设不管储能子系统处于任何运行状态,在维修后的状态都恢复到状态1正常运行. 假设 $n_f$ 为同时故障ESUS的数量,由于每个ESUS的状态故障概率相同, $n_f$ 服从二项分布,即( $n_f = g$ ). 将储能子站到达每个状态( $n_f = g$ )记为 $g$ 状态,则 $g$ 状态转换的故障率和修复率 $^{[15]}$ 为

$$\lambda_g = C_n^g \times (P_f^{\text{ESUS}})^g \times (P_r^{\text{ESUS}})^{n-g}, \quad (5)$$

$$\mu_g = \prod_{g=1}^{n_f} \mu^{\text{ESUS}}. \quad (6)$$

### 2.2 储能电站充放电可靠性建模

储能电站是由 $M$ 个储能子系统组成的,储能子系统又由 $N$ 个ESUS组成. 每个储能子系统存在多个运行状态,第 $i$ 个储能子系统内有 $c$ 个ESUS发生故障的最大可用容量和最大输出功率为

$$E_{N-c} = \sum_{i=1}^M (N-c) \times E_B, \quad (7)$$

$$P_{N-c} = \sum_{i=1}^M (N-c) \times P_B. \quad (8)$$

其中: $E_B$ 为ESUS的额定容量; $P_B$ 为ESUS的额定功率.

储能电站在 $t$ 时刻的可用容量 $E_{N-c}(t)$ 为

$$E_{N-c}(t) = E_{N-c}(t-1) + \int_{t-1}^t P_{N-c}(t) \times \gamma dt. \quad (9)$$

其中: $\gamma$ 为充放电系数,充电时为 $-1$ ,放电时为 $1$ .

储能电站的边界约束为

$$E_{N-c}^{\min} \leq E_{N-c}(t) \leq E_{N-c}^{\max}, \quad (10)$$

$$P_{N-c}^{\min} \leq P_{N-c}(t) \leq P_{N-c}^{\max}. \quad (11)$$

其中: $E_{N-c}^{\min}$ 和 $E_{N-c}^{\max}$ 分别为储能电站最小和最大可用容量; $P_{N-c}^{\min}$ 和 $P_{N-c}^{\max}$ 分别为储能电站最小和最大可用功率.

### 2.3 信息系统多类型扰动建模

超大规模储能电站具有在时空上的多尺度特征,使得信息与物理的耦合关系更加紧密,整个控制周期可被分为5个阶段:信息收集、信息上传、信息处理、命令传输和命令执行. 在整个控制周期内,任何一个阶段发生扰动,都会影响储能电站运行的可靠性. 本文对信息攻击可靠性、信息链路的可靠性(节点和边路失效)、传输可靠性(路由错误、传输错误、传输延迟)这5种常见信息扰动进行建模分析.

1)信息攻击可靠性建模 $^{[4]}$ :信息攻击通常会利用信息设备存在的安全漏洞通过注入虚假数据对原始

数据进行篡改,从而破坏信息的完整性.在储能电站中,调度中心的服务器以及就地控制和监控单元为信息攻击对象.基于攻击者的选择及信息设备的攻击难度,每个信息设备遭受攻击是服从一定的随机概率分布的,故本文采用随机抽样模型表示攻击点遭受信息攻击的状态.

$$R_a = \begin{cases} 0, & \delta < P_{Z,i}, i \in S_{ac}; \\ 1, & \delta > P_{Z,i}, i \in S_{ac}. \end{cases} \quad (12)$$

其中:  $R_a$  为信息元件遭受信息攻击状态,  $R_a = 1$  表示遭受攻击,  $R_a = 0$  表示没有遭受攻击;  $P_{Z,i}$  为攻击点  $i$  被攻击者利用的概率;  $S_{ac}$  为信息系统中可选的攻击接入点的集合;  $\delta$  为服从  $[0, 1]$  平均分布的随机数.

某个攻击点被攻击者利用的概率为

$$P_{Z,i} = p_{ac,i} p_{r,i}. \quad (13)$$

其中:  $p_{ac,i}$  为攻击点  $i$  被选择的概率,与该攻击点  $i$  的社会关注度  $w_i$  和攻击接入难度  $\zeta_i$  有关,即  $p_{ac,i} = w_i \zeta_i / \sum_{j \in S_{ac}} w_j \zeta_j$ ;  $p_{r,i}$  为攻击点被攻击成功的概率,与攻击点  $i$  的安全等级  $\alpha_i$  以及攻击者侵入漏洞所付出的代价  $C_i$  有关,即  $p_{r,i} = e^{-\alpha_i C_i}$ .

2) 信息链路可靠性模型<sup>[8]</sup>:在超大规模储能电站信息链路模型中,1.3节建立的信息静态拓扑邻接矩阵  $A$  常用来描述信息节点之间的连接关系,如果一个或多个信息节点/边路故障,则就地控制和监控单元采集到的信息将不能通过链路传输到调度中心.若就地控制和监控单元与调度中心之间有多条冗余传输链路,则不会影响信息的传输.采用Dijkstra路由算法寻找信息传输的链路,则某一链路  $l$  的连通性是由该路径上的信息节点可靠性和信息连接边可靠性进行判断.

$$R_l = \begin{cases} 0, & \prod_{i=1}^V S_{l,i} \prod_{k=1}^L S_{l,k} = 0; \\ 1, & \prod_{i=1}^V S_{l,i} \prod_{k=1}^L S_{l,k} = 1. \end{cases} \quad (14)$$

其中:  $V$  和  $L$  分别为信息链路  $l$  所经过的节点数和连接边数;  $S_{l,i}$  和  $S_{l,k}$  分别为信息链路  $l$  上节点  $i$  和边路  $k$  的状态,其值为1表示正常,其值为0表示故障.只有信息链路上所有的节点和边路都正常,才能说明此链路正常连通.

3) 信息传输可靠性建模<sup>[16]</sup>:在某一链路  $l$  的信息传输过程中,考虑动态传输错误、传输延迟和路由错误对信息传输可靠性进行建模.假设在时间  $t$  信息包需要从链路  $l$  的信息源点  $i$  经过其他信息节点  $j$  传

输到调度中心  $d$ ,可表示为  $S[S_{st}^{l,(i,j)}(t), d]$ ,信息包是由两部分组成,第1部分为需要传输的数据信息,第2部分为传输到的目的地址信息.在信息链路传输过程中,如果存在任何扰动,则都会导致信息包内信息发生改变,信息包  $S[S_{st}^{l,(i,j)}(t), d]$  在传输后改变为  $\tilde{S}[\tilde{S}_{st}^{l,(i,j)}(\tilde{t}), \tilde{d}]$ .本文主要对信息包在传输过程中受传输错误、传输延迟和路由错误的影响进行建模分析.

传输错误和路由错误建模:假设信息包在传输过程中需要传输的数据信息发生错误的概率为  $P_{error1}$ (即传输错误),目的地址信息发生错误的概率为  $P_{error2}$ (即路由错误),相应的错误数量分别为  $e_1(t)$  和  $e_2(t)$ ,其分别表示数据信息和目的地址信息错误的比重.在通过链路传输后,存在传输误码的信息包可表示为

$$\tilde{S}_{end}^{l,(i,j)}(t) = S_{st}^{l,(i,j)}(t) - \text{int}[\text{rand}(0, 1) - P_{error1}]e_1(t), \quad (15)$$

$$\tilde{d} = d - \text{int}[\text{rand}(0, 1) - P_{error2}]e_2(t). \quad (16)$$

其中:  $\text{rand}(0, 1)$  为产生介于0和1之间的随机数;  $\text{int}[\cdot]$  为整数函数.

传输延迟建模:边路的传输延迟可计算为

$$S_{end}^{l,(i,j)}(\tilde{t}) = S_{st}^{l,(i,j)}[t + e_t(t)]. \quad (17)$$

其中:  $e_t(t)$  为在仿真控制周期  $t$  内的延迟时间,通常服从高斯分布<sup>[17]</sup>.

结合传输错误、路由错误和传输延迟所建立的数学模型,信息包在通过链路  $l$  传输后可表示为

$$\tilde{S}_{end}^{l,(i,j)}(t) = R_l(S_{st}^{l,(i,j)}[t + e_t(t)] - \text{int}[\text{rand}(0, 1) - P_{error1}]e_1(t)), \quad (18)$$

$$\tilde{d} = R_l(d - \text{int}[\text{rand}(0, 1) - P_{error2}]e_2(t)). \quad (19)$$

## 2.4 储能电站CPS可靠性建模

为了模拟储能电站出力的时序性,采用序贯蒙特卡洛方法根据各个储能子系统不同状态的持续运行时间可以精准地获得一个具有时间序列的储能电站物理系统状态;信息系统的通信装置是非时序的,通过采用非序贯蒙特卡洛方法对信息系统状态抽样可提高计算效率<sup>[8]</sup>.

根据式(5)、(6)可求出储能子系统在不同运行状态下的故障率和修复率,对储能子系统的运行状态采用序贯蒙特卡洛方法抽样,由于不同状态下的储能子系统的状态持续运行时间服从指数分布,其平均持续

运行时间和修复时间为

$$\begin{cases} \text{MTTF}_c = -\frac{1}{\lambda_c} \times \ln R_1, \\ \text{MTTR}_c = -\frac{1}{\mu_c} \times \ln R_2. \end{cases} \quad (20)$$

其中:  $\text{MTTF}_c$  为储能电站子系统在不同状态下的平均工作持续时间,  $\text{MTTR}_c$  为平均修复时间,  $R_1$  和  $R_2$  为  $[0, 1]$  区间内的随机数.

这里假设每个储能子系统有3个ESUS, 运行状态为4状态模型, 如图5所示.

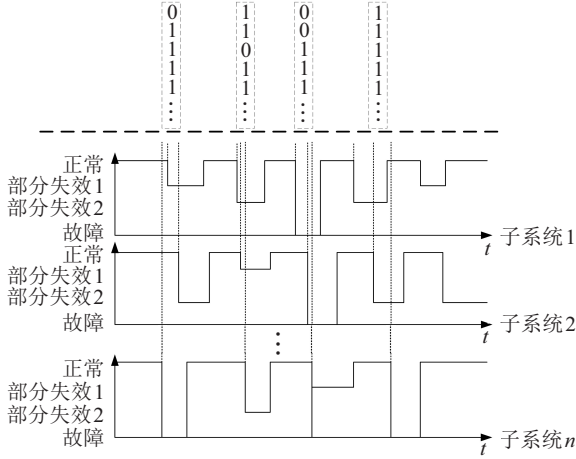


图5 储能电站CPS状态抽样

根据式(20)得到下一时刻为失效状态的储能子系统的平均工作持续时间  $\text{MTTF}_c$ , 根据  $\text{MTTF}_c$  最小来确定第  $i$  个储能子系统的运行状态, 即

$$\text{MTTF}^i = \min\{\text{MTTF}_1, \text{MTTF}_2, \text{MTTF}_3\}. \quad (21)$$

根据各个储能子系统的  $\text{MTTF}^i$  确定储能电站的运行状态, 先根据下式计算  $\text{MTTF}^i$  最小时储能电站的持续运行时间  $\text{MTTF}_{\min}^i$ :

$$\begin{aligned} & \text{MTTF}_{\min}^i \\ & \min\{\text{MTTF}^1, \text{MTTF}^2, \dots, \text{MTTF}^M\}. \end{aligned} \quad (22)$$

再根据下式得到其他储能子系统的状态持续运行时间  $\text{MTTF}^j$  与  $\text{MTTF}_{\min}^i$  的差小于  $T$  的集合  $\{\text{MTTF}^j\}$ :

$$\{\text{MTTF}^j\} = \text{MTTF}^j - \text{MTTF}_{\min}^i \leq T, \quad (23)$$

其中  $T$  为储能电站一天的运行时长. 上式表明第  $j$  个储能子系统与第  $i$  个储能子系统在同一天出现失效状态, 并用下式表示同一天内发生失效的储能子系统的集合  $F$ :

$$F = \{\text{MTTF}_{\min}^i, \{\text{MTTF}^j\}\}. \quad (24)$$

把集合  $F$  内的状态运行持续时间正向无穷大取整后得到集合  $F_{\text{ceil}}$ , 根据下式计算同一天内储能子系统的

发生失效时刻集合  $\{\Delta t_i\}$ :

$$\{\Delta t_i\} = F_i - (F_{\text{ceil}}^i - 1). \quad (25)$$

在得到处于运行失效状态的储能子系统时间后, 在当前时间断面下, 采用非序贯蒙特卡洛法对储能子系统的就地控制和监控单元(通信节点)进行抽样, 每个通信节点都服从正常和故障两种运行状态. 信息系统有  $M$  个通信节点, 其状态集  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_M\}$ , 对于通信节点  $k$ , 从区间  $[0, 1]$  之间得到一个随机数  $U_k$ , 则通信节点  $k$  的抽样状态  $S_k$  为

$$S_k = \begin{cases} 0, & \text{FOR}_k < U_k; \\ 1, & \text{FOR}_k > U_k. \end{cases} \quad (26)$$

其中: 0 为故障, 1 为正常;  $\text{FOR}_k$  为通信节点  $k$  的强迫不可用率, 可表示为

$$\text{FOR}_k = \frac{\lambda_k^c}{\lambda_k^c + \mu_k^c}. \quad (27)$$

这里:  $\lambda_k^c$  为通信节点  $k$  的故障率;  $\mu_k^c$  为通信节点  $k$  的修复率.

储能电站充放电可靠性会受ESUS的故障率影响, 此外电池组过充过放的误检诊断导致电池组过早停止充放电也会影响储能电站的出力. 因此本文同样采用非序贯蒙特卡洛方法对电池组的过充过放状态进行抽样. 对于电池组  $b$ , 从区间  $[0, 1]$  之间得到一个随机数  $U_b$ , 则电池组  $b$  的抽样状态  $S_b$  为

$$S_b = \begin{cases} 0, & P_b < U_b; \\ 1, & P_b > U_b. \end{cases} \quad (28)$$

其中: 0 为故障, 1 为正常;  $P_b$  为电池组过充过放误检的概率.

### 3 超大规模储能电站CPS可靠性评估方法

#### 3.1 可靠性评估指标

1) 储能电站功率缺失值 (expected value of power loss, EVPL) 表示储能电站考虑元件故障和过充过放造成的功率的缺失值, 单位为 MW/年, 计算公式为

$$\text{EVPL} = \frac{1}{N_y} \sum_{i \in \Omega} (P_c^i + P_{\text{over}}^i). \quad (29)$$

其中:  $\Omega$  为储能电站出现失效状态的集合;  $N_y$  为仿真时长, 单位为年;  $P_c^i$  和  $P_{\text{over}}^i$  分别为储能电站元件故障和电池组过充过放误检造成的功率缺失值.

2) 储能电站容量缺失值 (expected value of capacity loss, EVCL) 表示储能电站考虑元件故障和电池组过充过放误检造成的容量的缺失值, 单位为 MWh/年, 计算公式为

$$EVCL = \frac{1}{N_y} \sum_{i \in \Omega} (E_c^i + E_{\text{over}}^i), \quad (30)$$

其中  $E_c^i$  和  $E_{\text{over}}^i$  分别为储能电站元件故障和过充过放误检造成的容量缺失值。

3) 储能电站平均失效容量缺失值 (expected average value of capacity loss, EAVCL), 表示储能电站每次失效时元件故障和电池组过充过放误检造成的容量的缺失值, 单位为 MWh/次, 计算公式为

$$EAVCL = \sum_{i \in \Omega} \frac{E_c^i + E_{\text{over}}^i}{F_i}, \quad (31)$$

其中  $F_i$  为储能电站出现失效的频率。

4) 储能电站平均可用率 (expected average available rate, EAAR), 表示储能电站每次发生元件故障和电池组过充过放误检后还可正常运行的电池串的比例, 计算公式为

$$EAAR = 1 - \frac{1}{N_b} \sum_{i \in \Omega} \frac{N_c^i + N_{\text{over}}^i}{F_i}. \quad (32)$$

其中:  $N_b$  为储能电站电池组的数量,  $N_c^i$  和  $N_{\text{over}}^i$  分别为储能电站元件故障和过充过放误检造成的电池组失效的数量。

### 3.2 CPS 可靠性评估过程

本文根据储能电站可靠性指标, 采用非序贯和序贯蒙特卡洛仿真方法对储能电站 CPS 进行可靠性评估。具体的步骤如下。

step 1: 对储能电站信息物理元件的数据进行输入, 建立信息系统通信节点的邻接关系并基于深度优先搜索算法生成信息路由表。

step 2: 采用序贯蒙特卡洛方法对储能子系统的运行状态进行抽样, 采用非序贯蒙特卡洛方法对信息系统的节点和边路的状态进行随机抽样; 同时对信息网络的传输延时、路由误码和传输错误进行随机抽样, 得到整个信息网络系统的状态。

step 3: 计算同一天内储能子系统物理失效的数量, 同时根据信息路由算法确定可用的通信节点的数量。

step 4: 判断通信节点是否全部正常, 若不是, 则继续, 反之, 跳转到 step 7。

step 5: 判断物理失效的储能子系统的通信节点是否全部故障。若不是, 则计算储能电站物理失效和信息节点失效后正常运行的储能单元串数; 反之, 只计算信息节点失效后正常运行的储能单元串数。

step 6: 采用非序贯蒙特卡洛方法对正常运行的储能单元串数进行过充过放误检的随机抽样。

step 7: 计算储能子系统物理失效、电池单元过充

过放误检和信息扰动造成储能电站的缺失功率、容量和状态持续时间。

step 8: 判断是否满足仿真时间时长, 若否, 则继续 step 2 ~ step 7, 反之, 则计算储能电站可靠性指标。

### 3.3 基于链路状态的路由分析方法

3.1 节中 CPS 可靠性评估流程中的信息路由分析方法采用了基于链路状态的路由算法。通过选用通讯链路延迟时间作为链路状态信息, 基于链路状态的路由算法可以快速确定信息层的通信节点到调度中心之间的链路延迟时间最短的最优链路。具体步骤如下。

step 1: 读取路由表的节点状态信息, 把信息层的邻接矩阵  $A$  修改成链路状态矩阵  $W$ 。其中权重  $w_{ij}$  为延迟时间, 是通过对高斯分布的累计分布函数进行随机抽样获取的。

step 2: 判断网络边路延迟时间  $w_{ij}$  是否超过延时阈值  $T_F$ 。若是, 则该边路故障; 若否, 则通过深度优先搜索算法继续寻找信息节点  $x$  到调度中心之间的有效路径  $L(x)$ , 并找出最短延迟时间  $\tau(x_i)$ 。

step 3: 判断链路延迟时间  $\tau_i$  是否超过传输通道延时上限  $T_L$ 。若是, 则信息节点  $x$  不可达到调度中心; 若否, 则信息节点  $x$  可达到调度中心。

step 4: 判断是否遍历了所有通信节点。若否, 则返回 step 2; 若是, 则可用的储能电站子系统被确定。

## 4 算例研究

本文仿真实验环境为 Matlab 2019a, 处理器为 Intel(R) Core(TM) i5-9400F CPU @ 2.90 GHz; 机带 ROM 为 16 GB。

### 4.1 算例储能电站的系统介绍

本文采用的储能电站是由 50 个集装箱组成的 50 MW/100 MWh 储能系统, 每个集装箱由 1 MW/2 MWh 的子单元组成, 每套 1 MW/2 MWh 储能集装箱包含 2 套 500 kW 储能变流器 (PCS)、1 MWh 电池单元及对应的电池管理系统, 并配置 25 套就地控制和监控单元, 组成 25 个储能电站子系统, 具体数据信息可参考文献 [14]。储能电站的信息网络采用的是树形网络, 如图 3 所示。储能电站的物理层和信息层元件的故障率和修复率如表 1 所示, 本文假设电池管理单元和电池管理系统的故障率和修复时间与服务器等通信装置一样。信息传输中传输错误的概率  $P_{\text{error}1}$  为 0.000 1, 偏移误差为 1%, 路由错误的概率  $P_{\text{error}2}$  为 0.000 1; 传输延时服从  $t \sim N(5, 1)$ , 网络边路延时阈值  $T_F = 8$  ms, 系统传输链路延时上限为

$T_L = 80 \text{ ms}$ ,为了保证可靠性指标的收敛性,仿真年限设定为500 a.

表1 信息物理系统元件参数

元件	故障率/(次/年)	修复时间/h	参数来源
电池单元	$2 \times 10^{-6}$	48	文献[18]
检测装置	0.014	10	文献[19]
直/交流断路器	0.12	40	文献[19]
直/交流接触器	0.12	40	文献[19]
熔断器	0.001 37	20	文献[12]
变流器	0.05	20	文献[12]
变压器	0.03	90	文献[19]
线路	0.1	3	文献[19]
电池管理单元	0.05	12	文献[19]
电池管理系统	0.05	12	文献[19]
交换机	0.05	12	文献[19]
路由器	0.05	12	文献[19]
服务器	0.01	24	文献[19]
通讯链路	0.001	24	文献[19]

4.2 算例结果

本文采用的储能电站的应用背景是消纳光伏发电.为了方便分析,本文假设每天储能电站处在满功率充/放电运行状态,即所有的PCS都工作在额定功率状态,电池荷电状态soc限制在[0.2, 0.8].首先主要对以下3种场景进行研究:

场景1:只考虑物理节点失效,无电池过充过放误检、信息扰动.

场景2:考虑物理节点失效、电池过充过放误检率,无信息扰动.

场景3:考虑物理节点失效、电池过充过放误检率和信息扰动.

表2 可靠性指标仿真结果

场景	EVPL	EVCL	EVACL	EAAR
场景1	5.4770	6.5949	0.6120	0.9899
场景2	5.9450	7.1792	0.6746	0.9888
场景3	7.1105	8.5773	0.8191	0.9842

根据所提出的可靠性指标和表2的仿真结果可以看出:场景2、场景3在EVPL、EVCL和EAVCL三个指标上均大于场景1,而场景1在EAAR指标上均大于其他场景;场景2、场景3分别在EAVCL指标上的增加了0.062 6 MWh/次和0.207 1 MWh/次,在EAAR指标上分别降低了0.11%和0.57%,这表明电池单元过充过放误检、信息扰动均可造成储能电站可靠性不同程度地降低.

4.3 灵敏度分析

为更加直观和精确地量化不同失效因素对储能电站运行可靠性的影响程度,本文首先对静态失效因

素进行灵敏度分析,如储能子系统失效、电池过充过放误检、信息元件失效和光纤失效.将失效因素的不可用率分别增大到原来的50倍,观察储能电站可靠性的变化情况,如图6所示.

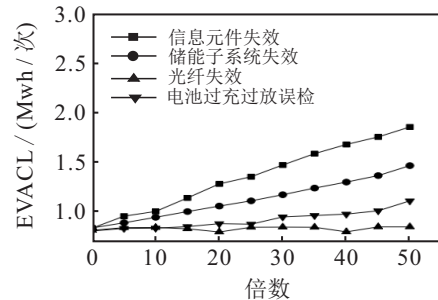


图6 静态失效因素在不同倍数下的EVACL变化趋势

从仿真结果可以看出,不同静态失效因素对储能电站运行的可靠性影响是不同的.其中:EVACL灵敏度对于信息元件的不可用率为1.020 1 MWh/次,对于储能子系统的不可用率为0.628 MWh/次,对于电池过充过放误检率为0.303 6 MWh/次,对于光纤故障率为0.03 MWh/次.可以明显看出,信息元件的不可用率对储能电站运行可靠性影响是最大的,这是因为信息元件的失效造成整个储能子系统与调度中心不能通讯导致不能进行出力;尽管光纤的失效会造成通讯链路中断,可能导致调度中心与储能子系统失去联系,但是光纤的不可用率较低对储能电站运行的可靠性影响最小.

其次再对动态失效因素进行灵敏度分析,如路由错误、传输错误、传输延迟.将路由错误和传输错误的概率从0.000 1分别以 $0.000 1 \times \eta$ 的步长增加到0.001,传输延迟时间期望值从5 ms以 $0.1 \times \eta$ 的步长增加到6 ms.观察储能电站可靠性的变化情况,如图7所示.

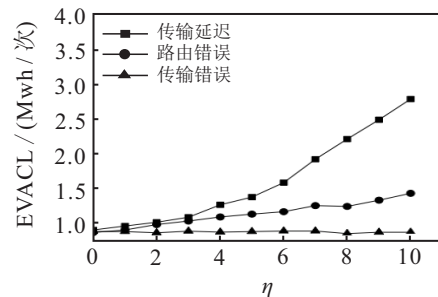


图7 动态失效因素在不同倍数下的EVACL变化趋势

从仿真结果可以看出:传输延迟对储能电站运行可靠性影响是最大的,这是因为信息边路延迟时间超出边路阈值会导致边路中断,随着边路延迟时间的增加,多条边路的中断可能造成多个储能子系统与调度中心不能通讯,导致不能进行出力;传输错误对储

能电站运行可靠性影响是最小的,将传输错误的传输误差控制在1%范围内,就不会影响信息的传输质量;路由错误是将数据信息传输到错误地址,将造成整个传输过程错误,但是传输错误概率较低,对于储能电站运行的可靠性影响仅次于传输延迟.

#### 4.4 信息冗余配置的影响分析

信息网络拓扑冗余配置在很大程度上能够缓解信息网络通讯链路延迟造成的储能电站运行可靠性的影响.本文研究环形、星型、有备用调度中心的环形和冗余线路的星型网络等拓扑结构,如图8所示.与本文采用的树形网络作对比,观察不同网络结构在不同链路延迟时间对储能电站可靠性的影响,如图9所示.

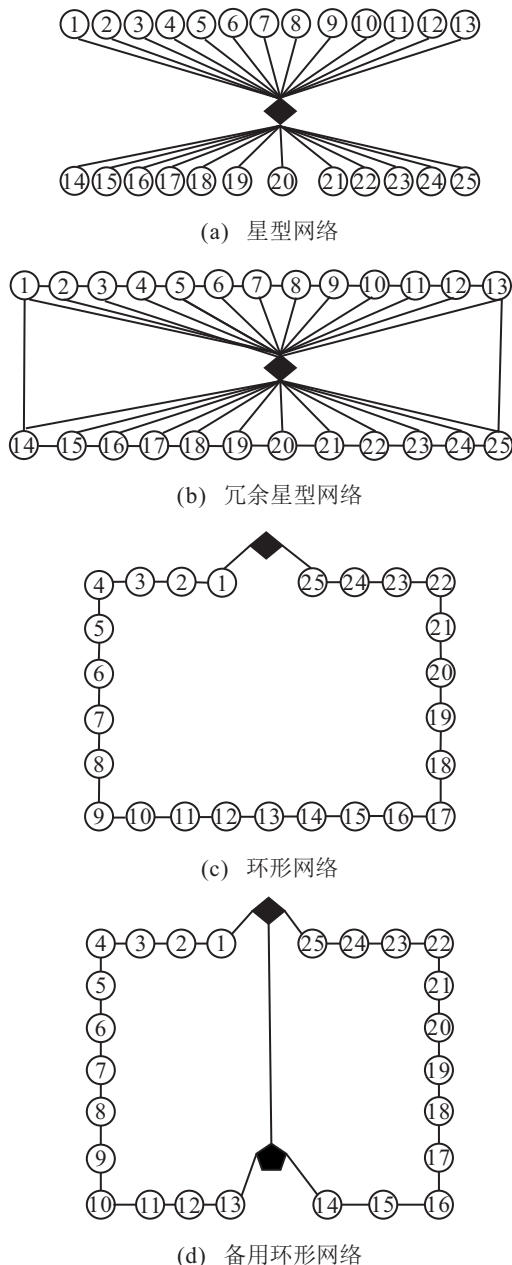


图8 4种不同信息网络拓扑结构

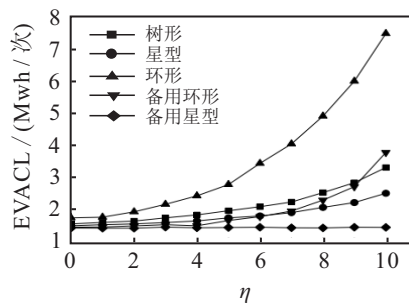


图9 不同链路延迟时间倍数下的EVACL变化趋势

从仿真结果可以看出:环形网络对储能电站运行可靠性影响最大, EVACL灵敏度对于环形网络为5.7008 MWh/次,这是由于距离调度中心较远的通信节点需要较多的路由跳数才能到达调度中心,链路传输延迟导致环形网络具有较低的可靠性;如果在环形网络上多配置一个备用调度中心,则EVACL灵敏度对于环形网络为2.3154 MWh/次,可以看出其可靠性提升了146%;星型网络对储能电站运行可靠性影响最小, EVACL灵敏度对于星型网络为1.0122 MWh/次,这是由于通信节点距离调度中心较近,低通讯链路延迟对其可靠性影响不大,在高通讯链路延迟造成链路中断导致通信节点与调度中心失效;如果在星型网络的通信节点之间增加冗余通讯线,则EVACL灵敏度对于备用星型网络几乎为0 MWh/次,可以看出其可靠性也得到大幅提高.由此可知,增加备用装置和冗余通讯线可降低通讯链路延迟,提高储能电站的运行可靠性.

在遭受信息攻击时,信息网络拓扑冗余配置同样在很大程度上能够减少对储能电站运行可靠性的影响.本文假设储能电站不同位置的信息节点被攻击的概率是一致的,采用上述5种不同的拓扑结构,观察不同网络结构中不同位置的信息节点在遭受攻击后对储能电站可靠性的影响,如图10和图11所示.

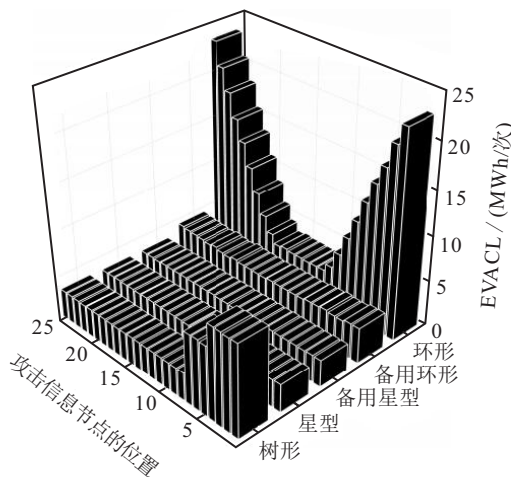


图10 攻击1个信息节点的场景

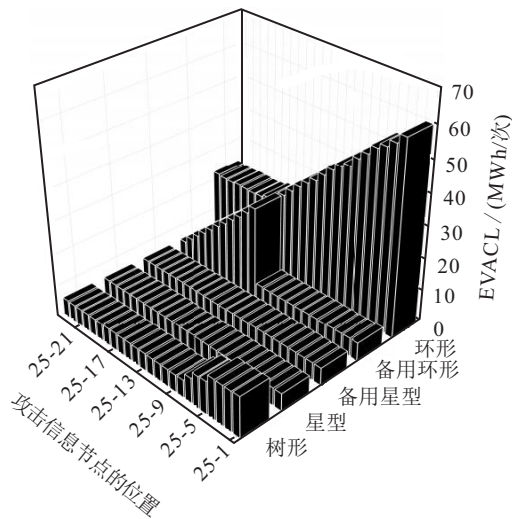


图 11 攻击2个信息节点的场景

由图 10 可知,在树形和环形网络结构中,被攻击信息节点的位置距离调度中心越远,对储能电站的运行可靠性影响越小,反之对电站运行的可靠性影响越大;由图 11 可知,在环形网络结构中,被攻击的两个信息节点位置相距越远,对储能电站的运行可靠性影响越大,反之对电站的可靠性影响越小.然而,在给环形网络增加备用调度中心后,发现储能电站的运行可靠性得到改善.在任何攻击场景中,星型网络由于与调度中心直接连接,对储能电站的可靠性影响是最小的.

## 5 结论

本文首先对集中式超大规模储能电站 CPS 进行等值建模,分别为储能子系统建模和信息系统建模.其中,信息系统建模包含信息攻击可靠性建模、信息链路可靠性建模和信息传输可靠性建模.提出了基于非序贯和序贯蒙特卡洛方法的储能电站 CPS 可靠性评估方法和相应的可靠性评估指标,通过算例分析验证了所提模型和方法对超大规模储能电站可靠性的有效性.由算例仿真结果得出以下结论:

1)除了物理系统中物理元件的可靠性,电池单元的过充过放误检率之外,信息系统中信息元件的可靠性、链路的可靠性和信息质量可靠性以及信息攻击等多个因素都会对储能电站的可靠性产生影响,需要从多个角度分析其失效的影响.

2)不同信息系统的失效因素对储能电站的运行可靠性影响是不同的,随着故障率的增加,信息元件的失效和传输延时造成链路中断对储能电站的可靠性有着比较严重的影响.因此,提高信息系统的传输质量并增加通信装置和冗余通讯线路,可有效提高储能电站的可靠性.

3)信息攻击可造成储能电站的运行可靠性降低.通过接入合适的网络结构和对关键节点进行重点关注,可提高储能电站的可靠性.

本文所提的集中式超大规模储能电站可靠性建模和评估方法可以量化各种信息扰动对储能电站的运行可靠性的影响,为超大规模储能电站的规划和管理提供了一定的参考建议.因此,针对超大规模储能电站的分布式信息物理系统的可靠性评估是下一步的研究方向.

## 参考文献(References)

- [1] 李相俊, 盛兴, 闫士杰, 等. 基于交替方向乘子法的超大规模储能系统分布式协同优化[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1681-1688.  
(Li X J, Sheng X, Yan S J, et al. Distributed cooperative optimization for ultra-large-scale storage system based on alternating direction multiplier method[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1681-1688.)
- [2] Li X J, Wang S X. A review on energy management, operation control and application methods for grid battery energy storage systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019(99): 1-15.
- [3] 刘文飞, 曾嘉志, 潘海涛, 等. 计及电力安全事故风险的输电网可靠性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(8): 126-132.  
(Liu W F, Zeng J Z, Pan H T, et al. Evaluation on the reliability of power transmission network considering risk of electric power safety accidents[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2018, 30(8): 126-132.)
- [4] 陈碧云, 陆智, 李滨. 计及多类型信息扰动的配电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 103-110.  
(Chen B Y, Lu Z, Li B. Reliability assessment of distribution network considering multiple types of information disturbances[J]. Automation of Electric Power System, 2019, 43(19): 103-110.)
- [5] 郭经, 刘文霞, 张建华, 等. 主动配电信息物理系统可靠性建模与评估方法综述[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2403-2412.  
(Guo J, Liu W X, Zhang J H, et al. A survey of reliability modeling and evaluation methods for active distribution cyber-physics systems[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2403-2412.)
- [6] Liu W, Gong Q, Han H, et al. Reliability modeling and evaluation of active cyber physical distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 7096-7108.
- [7] Cao G, Gu W, Li P X, et al. Operational risk evaluation of active distribution networks considering cyber contingencies[J]. IEEE Transactions on Industrial

- Informatics, 2020, 16(6): 3849-3861.
- [8] 刘文霞, 宫琦, 郭经, 等. 基于混合通信网的主动配电网信息物理系统可靠性评价[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1706-1718.  
(Liu W X, Gong Q, Guo J, et al. Reliability simulation of ADN cyber-physical system based on hybrid communication network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1706-1718.)
- [9] 郭经, 刘文霞, 张建华, 等. 孤岛微网信息物理系统可靠性建模与评估[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1441-1445.  
(Guo J, Liu W X, Zhang J H, et al. Reliability modeling and assessment of islanded cyber physical microgrid system[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1441-1450.)
- [10] 加鹤萍, 丁一, 宋永华, 等. 信息物理深度融合背景下综合能源系统可靠性分析评述[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 1-11.  
(Jia H P, Ding Y, Song Y H, et al. Review of reliability analysis for integrated energy systems with integration of cyber physical systems[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 1-11.)
- [11] 朱晓荣, 王羽凝, 金绘民, 等. 基于马尔科夫链蒙特卡罗方法的光伏电站可靠性评估[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 1034-1042.  
(Zhu X R, Wang Y N, Jin H M, et al. Reliability evaluation of photovoltaic power plant based on markov chain monte carlo method[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 1034-1042.)
- [12] Gunduz H, Jayaweera D. Reliability assessment of a power system with cyber-physical interactive operation of photovoltaic systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 101: 371-384.
- [13] 杨锡运, 刘玉奇, 张璜, 等. 含并网光伏电站的系统可靠性评估方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2689-2696.  
(Yang X Y, Liu Y Q, Zhang H, et al. Reliability evaluation method of grid connected with photovoltaic power station[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2689-2696.)
- [14] Li X J, Yao L Z, Hui D. Optimal control and management of a large-scale battery energy storage system to mitigate fluctuation and intermittence of renewable generations[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(4): 593-603.
- [15] 任惠, 陆海涛, 卢锦玲, 等. 考虑信息物理系统耦合和用户响应差异的负荷聚合商需求响应特性分析[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3927-3936.  
(Ren H, Lu H T, Lu J L, et al. Analysis of LA demand response characteristics considering cyber physical system coupling and user's response difference[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3927-3936.)
- [16] Wang C, Zhang T, Luo F, et al. Impacts of cyber system on microgrid operational reliability[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 10(1): 105-115.
- [17] Wang Q, Pipattanasomporn M, Kuzlu M, et al. Framework for vulnerability assessment of communication systems for electric power grids[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 40(2): 447-486.
- [18] 刘畅, 蔡旭, 李睿, 等. 超大容量链式电池储能系统容量边界与优化设计[J]. 高电压技术, 2020, 40(6): 2230-2241.  
(Liu C, Cai X, Li R, et al. Capacity boundaries and optimization design of ultra-large capacity battery energy storage system based on cascaded H-bridge Converter[J]. High Voltage Engineering, 2020, 40(6): 2230-2241.)
- [19] 陈洋荣, 李俊娥, 许昂, 等. 智能变电站信息物理融合可靠性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 102-110.  
(Chen Y R, Li J E, Xu A, et al. Reliability evaluation method for smart substation based on cyber-physical fusion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 102-110.)

## 作者简介

高夏翔(1993—),男,博士生,从事超大规模储能电站技术的研究, E-mail: xiexiang\_g@126.com;

李相俊(1979—)男,高级工程师,博士生导师,从事大规模储能技术、电力系统运行与控制等研究, E-mail: li\_xiangjun@126.com;

杨锡运(1973—)女,教授,博士生导师,从事新能源发电技术、综合能源及储能设备优化等研究, E-mail: yangxiyun916@sohu.com.

(责任编辑: 闫妍)