

基于电网脆弱性评估的储能规划选址研究

孙顺祥 李金科 甄宏宁 杨 赟 韩志锟

(中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 南京 211102)

摘要 在新型电力系统不断发展的背景下, 为提升电力系统调节能力, 满足电网调峰和顶峰需求, 全国各地均在积极开展新型储能建设。新型储能具有双向传输、响应速度快等特性, 在其接入电网后如何有效地提高主网网架的安全性, 增强电网抵御故障冲击的能力, 是储能规划选址阶段应重点考虑的问题。针对新型储能接入对分区电网脆弱性的影响, 构建储能选址问题的多目标决策模型; 考虑到传统电网脆弱性分析方法的不足, 提出基于 k -核分解的脆弱性评估方法, 并将储能接入电网后不同典型运行场景下的主网系统脆弱性指标作为决策子目标, 采用逼近理想解排序法 (TOPSIS) 综合评价储能目标接入点的最优解。以 IEEE 39 节点系统进行算例分析, 验证了所提电网脆弱性评估方法和储能优化选址方法的合理性。

关键词: 储能选址; 电网脆弱性; k -核分解; 典型运行场景; 逼近理想解排序法 (TOPSIS) 多目标决策

Research on energy storage site selection based on power grid vulnerability assessment

SUN Shunxiang LI Jinke ZHEN Hongning YANG Yun HAN Zhikun

(China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd, Nanjing 211102)

Abstract Against the backdrop of the continuous development of new power system, various regions across the country are actively carrying out new energy storage construction to enhance the regulation capacity of the power system and meet the peak shaving and demand of the power grid. With the characteristics of bidirectional transmission and fast response speed, it is a key issue that should be considered in the site selection stage of energy storage planning, which involves how to effectively improve the security of the power grid and enhance the ability to resist the impact of faults after the new energy storage is access to the power system. A multi-objective decision-making model for energy storage site selection is constructed to address the impact of new energy storage access on the vulnerability of partitioned power grids. Faced with the shortcomings of traditional power grid vulnerability analysis methods, a new vulnerability assessment method based on k -core decomposition is proposed. The system vulnerability indicators under different typical operation scenarios after energy storage access to the power grid are taken as decision-making sub-targets, and the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) decision method is used to comprehensively evaluate the optimal solution of energy storage target access point. The rationality and effectiveness of the proposed vulnerability assessment method and the energy storage site selection method are verified through the analysis of the IEEE 39-node system.

Keywords: energy storage site selection; power grid vulnerability; k -core decomposition; typical operation scenario; technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) multi-objective decision-making

0 引言

当前,在绿色低碳、可持续发展成为时代主题的背景下,如何统筹能源安全稳定供应和绿色低碳转型是重中之重。近年来,国内外越来越多大范围停电事故的发生^[1-4]表明,电力系统规划运行仍应以安全稳定为首要前提,并向互动、自愈、高安全性与高可靠性方向发展^[5-6]。储能具有双向传输、响应速度快的特性^[7-8],在规划选址阶段进行合理布局后,能够为电网可靠供电提供更多的支撑手段,有效地提高电网的安全性,增强电网抵御故障冲击的能力。

目前,各国学者针对储能的规划选址方案开展了一定的研究。文献[9]考虑系统的经济性与功角稳定性,提出了储能选址定容双层优化模型。文献[10]通过提出一种储能选址的指标体系,将结构、运行两方面作为一级指标,以此细化出功率传输分布因子等6项二级指标,综合评价储能最优接入点。文献[11]基于光伏 $P-V$ 曲线进行复杂网络下的储能电站选址,构建储能广域布局模型。文献[12]以静态电压稳定性、系统网损和储能投资成本为优化目标,构建了配电网储能定容选址的配置模型。文献[13]从提高系统稳定性的层面,研究了基于构网型逆变器的储能系统选址定容策略。文献[14]针对负荷需求的提升及用电分布不均导致的峰谷差问题,提出了计及峰谷填充效果和经济性的电池储能选址定容方法。

上述文献均基于电力系统的特定运行场景进行储能选址研究。但是,考虑到储能具备充放电双重特性,同时全网用电负荷存在高峰和低谷期,因此储能调度存在多种运行场景。集中式储能调度权限由省级电网调度部门管辖,省调通常在全省高峰负荷水平下安排储能统一放电顶峰,而在低谷负荷水平下进行充电。在全省负荷水平较低的时刻,不可避免地会出现某些负荷水平较高的分区电网的储能因受全省统一调度而进行充电的场景,导致这些分区电网供电压力较大。因此,对各典型场景下储能接入分区电网的效果进行综合考虑,才能获得储能选址的最优解。此外,目前针对储能规划选址的研究未将电网脆弱性纳入决策模型中。脆弱性能够反映电网潜伏事故隐患的危险状态,在近年来国内外大停电事故频发的背景下,储能是提升电网安全性的有效手段,在储能规划选址阶段将电网脆弱性作为衡量依据,综合考虑其对电网安全的影响是十分

必要的。

综上所述,本文综合考虑储能接入不同站址区域后,在各典型场景下对分区电网脆弱性的影响,建立储能选址的多目标决策模型。首先通过对传统的电网脆弱性分析评估指标进行完善,构建线路等效关联网,并提出 k -核分解指标作为电网脆弱性评估依据;然后综合分区电网在高峰、低谷时段的储能充放电场景,采用逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)计算储能规划选址的最优方案。

1 基于 k -核分解的电网脆弱性评估

电网的脆弱性通常是指由于人为因素、系统元件、保护控制等的影响,使系统潜藏着大范围停电隐患的危险状态,表现为系统在故障后能否保持正常供电和稳定的能力^[15]。自早期 WATTS 等学者提出 WS 小世界网络模型并指出美国西部电网属于小世界网络^[16]后,对电网脆弱性的分析大多以复杂网络理论为研究基础,以其中的度数概念(即与网络中某节点一级相连的所有节点数量)衡量电网中节点的重要性、介数概念(即网络所有节点对之间最短路径经过该节点的次数与网络中全部最短路径数量之比)衡量电网中线路的重要性,并拓展定义出多种改进方法进行脆弱性衡量,识别系统中的脆弱元件,使其更符合电网的实际特点。

为了兼顾投资经济性和系统运行可靠性,通常实际的分区电网处于负荷核心地区的网架结构紧密,位于边缘的网架结构相对稀疏。但是,基于常规保供电源的自身特性及燃料运输的难度,负荷核心地区的支撑性电源往往较少,常规火电多位于边缘地带。因此,电网相较于常规小世界网络具有其自身特征,简单地通过复杂网络理论中的度数、介数等特征参数很难反映这些特征。另外,文献[17]表示,在复杂网络结构中,度数和介数大的点不一定是对信息传播起决定影响的节点,而位于结构核心区域的点更适合表征信息传播的重要性。在复杂网络结构中越居于中心的核,连通性越高。因此,本节对传统小世界网络模型的 k -核分解方法进行改善,并应用至所提电力系统线路等效关联网模型中,以此对电网脆弱性进行评估。

1.1 线路等效关联网

在电力系统仿真中,通常将电网构造为一个有向有权网络进行研究,将变电站和发电厂母线等简

化为网络模型中的节点，将输电线路简化为网络模型中的边，以潮流流向和潮流大小作为网络中的向和权^[18]。考虑到电网脆弱性评估的目的是反映系统发生连锁事故的风险，即由单个设备故障逐步引发连锁故障的风险，其故障传播的根本在于系统潮流的转移，因此根据系统元件故障的潮流转移作用进行分析，构造线路等效关联网络与关联矩阵。线路等效关联网络示意图如图1所示。

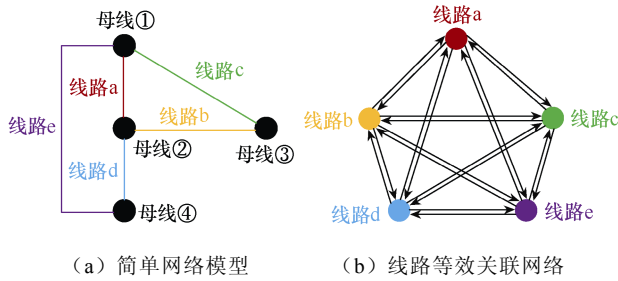


图1 线路等效关联网络示意图

将图1(a)简单电网模型中的线路转化为图1(b)等效关联网络中的节点，以每对节点之间的有向有权边表示电网线路故障方式下的潮流转移影响。若线路a故障后对线路b有较高的潮流冲击，则视为节点a存在指向节点b的边；若潮流冲击较小甚至减轻线路b的负载率，则视为无节点a指向节点b的边。由此构造关联矩阵 M 为

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & \cdots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & \cdots & m_{2n} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & \cdots & m_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & m_{n3} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， m_{ij} 为线路等效关联网络中节点 i ($i=1, 2, \dots, n$) 指向节点 j ($j=1, 2, \dots, n$) 的边的权值，以 $N-1$ 静态安全扫描结果进行衡量。

$$m_{ij} = \begin{cases} 0 & i = j \\ \alpha \times \frac{|P_j^i|}{S_j} & i \neq j, |P_j^i| > |P_{j0}| \\ 0 & i \neq j, |P_j^i| \leq |P_{j0}| \end{cases} \quad (2)$$

式中： α 为关联因子，当线路 j 受潮流转移影响后负载率大于指定阈值时为1，否则为0； $|P_j^i|$ 为线路 i 故障断开后线路 j 上的潮流； S_j 为线路 j 的热稳极限输送容量； $|P_{j0}|$ 为正常运行方式下线路 j 的潮流。

当 $i=j$ 时，不考虑线路故障断开后对自身的影响，即线路等效关联网络不存在自环， m_{ij} 置为0；当线路 i 故障后线路 j 负载率降低，即对线路 j 有潮流缓解作用， m_{ij} 也置为0。

将关联矩阵 M 的各元素值赋于图1(b)等效关联网络模型作为各条边的权重，即可得到一张完整的有权线路等效关联网络。

1.2 基于 k -核分解的电网脆弱性评估

通过等效关联网络的构造，以输电线路作为节点定义了新的复杂网络，基于该网络进一步挖掘其中各节点位置的核心程度，搜索出不同节点对整个复杂网络连通性的贡献，从而判断对全网潮流传播起关键作用的线路，作为脆弱性指标的评估依据。因此，可以采用复杂网络的 k -核分解方法，评价等效关联网络中各节点的核心程度。

对于一张复杂网络图，其 k -核定义为在图中反复移除度数不大于 k 的节点后所剩余的子图^[19]。若网络中某节点存在于 k -核，但在 $(k+1)$ -核中被移除，将该节点的核数认定为 k 。这种反复移除度数不大于 k 的节点进而分解网络的过程，就是复杂网络的 k -核分解。复杂网络 k -核分解示意图如图2所示，网络内越靠近核心位置的节点，其核值越大。图2中节点10和11具有相同度数，但节点11比节点10处于更深的核层内，其对整个复杂网络的重要性等级更高。度数更多的是反映节点对周边局部范围的影响力，难以表征节点对网络全局的重要性，而核数更能反映节点在全网中的核心程度，因此更适合类比至电力系统中判断元件在区域电网中的重要性和脆弱性。

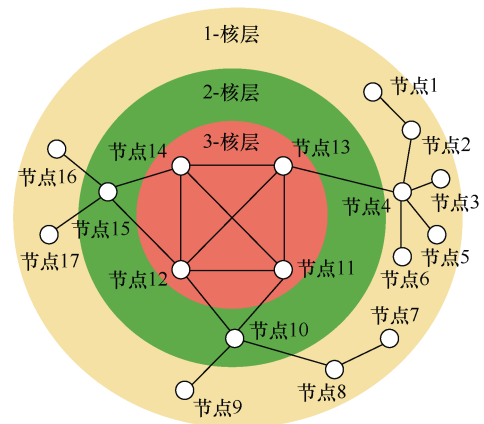


图2 复杂网络 k -核分解示意图

进一步地，考虑到在常规复杂网络理论的度数概念中，将与节点相连的所有边视为同等重要，而

线路等效关联网络将区域电网构造为有权网络，将电网中的输电线路等效为关联网络中的虚拟节点，将潮流转移影响因素等效为关联网络中边的权重，与每个虚拟节点相连的边的影响力是不同的，因此可定义关联网络中各虚拟节点的潮流转移度数为：与该虚拟节点相连的所有边的权重之和。考虑基于潮流转移度数对线路等效关联网络进行 k -核分解，进而搜索对全网潮流传播起关键作用的虚拟节点，作为脆弱性高的输电线路。基于 k -核分解的电网脆弱性评估流程如图 3 所示。

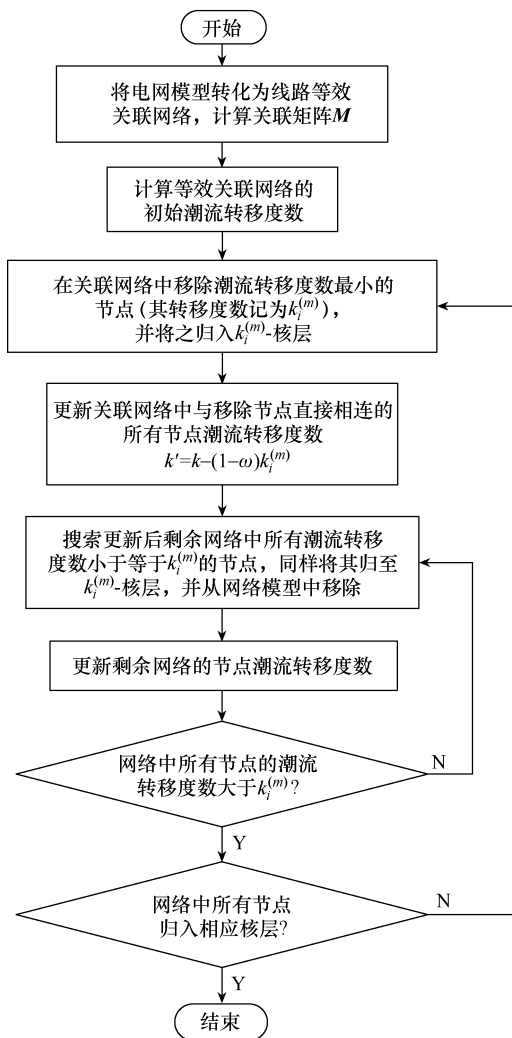


图 3 基于 k -核分解的电网脆弱性评估流程

通过等效关联网络的 k -核分解，将虚拟节点的核层值作为对应输电线路的脆弱指标值，能合理反映对系统大停电事故隐患影响面较广的线路。整个分区电网的系统脆弱性指标定义为所有线路脆弱值之和。

2 基于多目标决策的储能选址

作为促进新能源消纳、提升电网运行可靠性的电源，储能接入电网后，其灵活的充放电特性会对不同系统运行方式下 220kV 分区电网的脆弱性产生不同影响。因此，综合考虑各运行方式下电网脆弱性指标的高低，采用 TOPSIS 多目标方法选择储能接入点的最优解。

2.1 子目标指标

1) 高峰放电脆弱性

在区域电网内规划新增储能，可支撑负荷尖峰时段供电，起到保障电力供应的作用，有利于缓解系统发电 h 级顶峰压力。针对 220kV 分区电网高峰负荷时段的储能放电状态，计算全系统脆弱性指标，作为不同储能接入位置下的分区电网高峰放电脆弱性评估结果。

2) 低谷充电脆弱性

在区域电网内规划新增储能，可增强系统的调峰能力，弥补全网的调峰缺口，起到削峰填谷作用，提高系统调节的灵活性。针对 220kV 分区电网低谷负荷时段的储能充电状态，计算全系统脆弱性指标，作为不同储能接入位置下的分区电网低谷充电脆弱性评估结果。

3) 高峰充电脆弱性

通常集中式储能接入电网后，其运行状态由省调进行统一调度。考虑到全省储能的充放电需求时段与局部 220kV 分区电网内的充放电需求时段无法完全重合，调度部门对储能接入电网的要求须充分考虑分区电网内应满足供电压力最大工况下的系统安全稳定校验要求，即 220kV 分区电网在高峰负荷时段的储能充电状态。因此，针对该状态，计算全系统脆弱性指标，作为不同储能接入位置下的分区电网高峰充电脆弱性评估结果。

以上 3 种子目标指标针对不同的 220kV 分区电网运行工况，新增储能接入电网后，其优化方向应使高峰放电、低谷充电、高峰充电工况下的脆弱性指标降低。然而，多目标指标无法同时达到理想解，故考虑采用 TOPSIS 方法进行多目标决策，搜索各接入点方案下的脆弱性与理想解的相似程度，进而通过顺序优选得出最优解。

2.2 TOPSIS 多目标决策

TOPSIS 多目标决策法的核心在于搜索各评估对象与正理想解（待评估对象指标最优值）及负理想解（待评估对象指标最劣值）之间的距离，从而

进行方案的优劣决策^[20]。

采用 TOPSIS 多目标决策法规划储能接入电网选址位置的步骤如下:

1) 根据储能可能存在的接入点位置确定各评价对象。设储能接入的上级变电站有 m 个, 则可确定 m 个方案。

2) 根据 m 个方案对应的 3 种系统评价指标 (高峰放电脆弱性、低谷充电脆弱性、高峰充电脆弱性) 计算结果, 构造多目标决策矩阵 $\mathbf{X}_{m \times 3}$ 。

3) 针对构造的决策矩阵, 将各项评价指标的单调性进行统一。对于电网而言, 储能接入的优化方向尽可能使系统脆弱性指标降低。本文考虑采用高优型指标, 即指标数值越高评估对象方案越优, 因此对 $\mathbf{X}_{m \times 3}$ 各列分量中的元素均取倒数, 构造新的高优型决策矩阵 $\mathbf{X}'_{m \times 3}$ 。

4) 对高优型决策矩阵 $\mathbf{X}'_{m \times 3}$ 中各元素进行归一化处理, 形成规范化决策矩阵 $\mathbf{A}_{m \times 3}$, 其元素 a_{ij} 为

$$a_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x'_{ij}{}^2}} \quad (3)$$

式中, x'_{ij} 为高优型决策矩阵 $\mathbf{X}'_{m \times 3}$ 的元素, 表示第 i 个选址方案在第 j 个运行场景下分区电网脆弱值的倒数。

5) 对每类子目标评价指标设置相应的权重为 $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$, 构造权重规范化决策矩阵 $\mathbf{Z}_{m \times 3}$, 其元素为

$$z_{ij} = \omega_j a_{ij} \quad (4)$$

6) 计算各评价方案的正理想解和负理想解, 分别确定为 \mathbf{Z}^+ 和 \mathbf{Z}^- 。由于本文采用高优型指标, 因此有

$$\begin{cases} \mathbf{Z}^+ = (z_{i1}^+, z_{i2}^+, z_{i3}^+) = \left(\max_i z_{i1}, \max_i z_{i2}, \max_i z_{i3} \right) \\ \mathbf{Z}^- = (z_{i1}^-, z_{i2}^-, z_{i3}^-) = \left(\min_i z_{i1}, \min_i z_{i2}, \min_i z_{i3} \right) \end{cases} \quad (5)$$

7) 计算各评价方案的距离尺度 D_i^+ 和 D_i^- , 即每个方案相对于正理想解、负理想解的距离。考虑采用欧氏距离进行计算, 即

$$\begin{cases} D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (z_{ij} - z_{ij}^+)^2} \\ D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^3 (z_{ij} - z_{ij}^-)^2} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

8) 计算各评价方案的理想解贴近度 C_i 为

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

9) 对各评价方案的理想解贴近度进行排序, 选取 C_i 最大值对应的储能接入点方案作为多目标决策的最优方案, 即为规划储能的最优选址供区。

3 算例分析

本文提出基于 k -核分解的电网脆弱性评估方法, 并将不同典型场景下的系统脆弱性作为储能规划选址评估指标, 形成多目标决策模型。为了对所提方法进行验证, 采用图 4 所示的 IEEE 39 节点系统模型, 并对储能优化选址进行应用分析。IEEE 39 节点系统为新英格兰 39 节点系统, 基准网络由 10 台发电机、39 个母线和 46 条线路组成, 其中包含 20 个负荷节点。

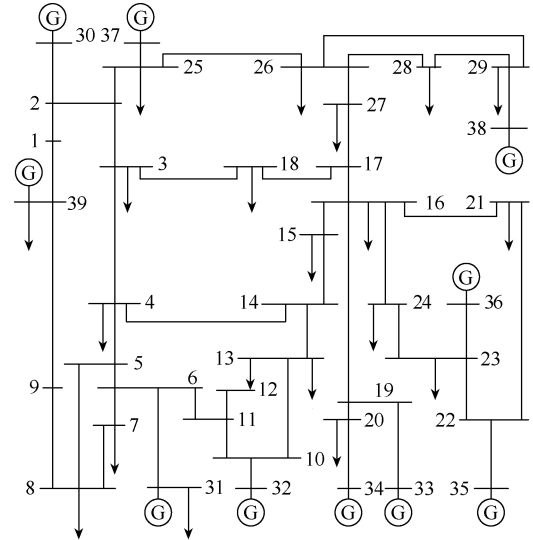


图 4 IEEE 39 节点系统模型

3.1 脆弱性评估方法验证

为验证 k -核分解方法进行系统脆弱性分析的合理性, 对算例系统进行各种方式的模拟攻击, 按不同顺序依次模拟线路故障, 并计算系统可供电范围的变化。其中, 模拟攻击故障方式包括: ①随机选择系统中的线路依次模拟故障; ②按本文提出的 k -核分解指标高低依次模拟故障; ③按文献[21]的最大流传输贡献度指标高低依次模拟故障; ④按文献[22]的源荷介数指标高低依次模拟故障; ⑤按文献[23]的拓扑结构和运行状态指标高低依次模拟故障; ⑥按文献[24]的电气介数指标高低依次模拟故障。

不同攻击方式下系统供电区域评估结果按故障后各子系统能供电的最大负荷之和考虑，即

$$G_S(t) = \frac{F(t)}{F_0} \times 100\% \quad (8)$$

式中： $G_S(t)$ 为第 t 次线路故障后供电范围占初始供电范围的百分比； $F(t)$ 为第 t 次线路故障后各子系统的供电负荷之和； F_0 为初始系统供电总负荷。

不同攻击方式下系统最大供电范围变化如图 5 所示。由图 5 可知，在不同的模拟故障下，随着攻击次数的增加，算例系统供电范围降低的情况存在明显差异。对比随机攻击及目前已有研究的脆弱性评估指标，采用本文提出的基于 k -核分解评估方法所评估的脆弱线路进行依次攻击时，系统最大供电区域的下降速度最快，表明核值高的线路故障后将对系统产生更严重的影响。因此，采用 k -核分解方法计算出的线路脆弱性更合理。

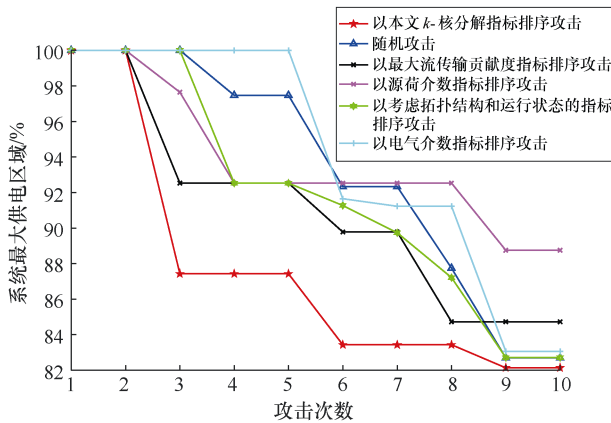


图 5 不同攻击方式下系统最大供电范围变化

3.2 储能选址方法应用

假定 IEEE 39 节点系统为一片分区电网，其中每个节点对应一座 220kV 变电站。现拟在该区域电网内部投资建设一座 50MW/100MW·h 的储能电站。根据常规电力系统规划边界条件，考虑 220kV 分区电网低谷负荷水平为高峰负荷的 60%，各运行场景下常规机组等备用出力，拟规划的储能充放电按满充满放功率进行计算。基于 k -核分解方法对该区域电网进行计算，储能接入前全系统脆弱值为 298.16。在选址规划时，考虑储能具备接入每一座变电站下级供区的条件，分别在算例系统中各节点模拟储能接入，仿真分析各座变电站下级接入储能后，整片区域电网在各典型场景方式下的系统脆弱性变化情况。储能不同接入点下系统各典型场景脆弱性如图 6 所示。

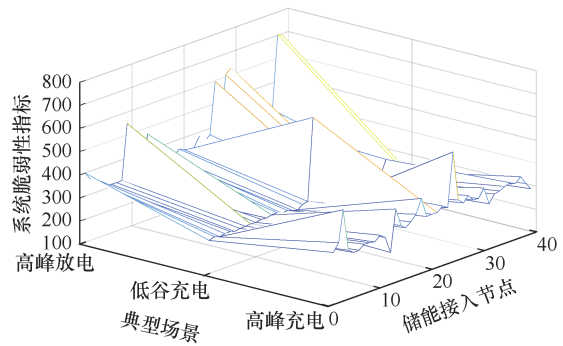


图 6 储能不同接入点下系统各典型场景脆弱性

由图 6 可知，在不同的典型场景下，储能接入同一座变电站下级对全系统的脆弱性影响不同，同一场景下储能从不同接入点接入后对系统的脆弱性影响也不相同。某些场景和某些接入点下，区域电网的系统脆弱性较储能接入前反而会提高。因此，高峰放电、低谷充电、高峰充电 3 个子目标指标无法同时达到理想情况，进一步采用 TOPSIS 多目标决策方法进行评估，确定储能的最佳接入点。其中，各子目标指标的权重设置均相等即 $\omega = \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}\right)$ 。经计算，各评估方案的正理想解对应的脆弱值向量为 $Z^+ = (241.9, 173.9, 238.2)$ ，负理想解对应的脆弱值向量为 $Z^- = (702.7, 617.2, 578.9)$ 。

针对每个方案，计算其到正理想解、负理想解的距离，并根据式 (7) 得到该方案的理想解贴近度。39 个接入方案的理想解贴近度如图 7 所示。

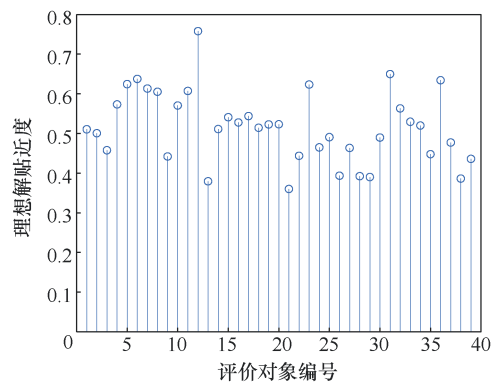


图 7 各接入方案的 TOPSIS 理想解贴近度

在 TOPSIS 多目标决策法中，不同决策方案的理想解贴近度取值为 0~1，最佳决策为理想解贴近度最接近 1 的方案。因此，根据理想解贴近度对评价对象进行优劣排序，本次规划的 50MW/100MW·h 储能最佳接入位置为节点 12 变电站供区，此时的理

想解贴近度为 0.758。为了对比分析决策结果，表 1 列出了几种储能接入方案的各子目标脆弱性。

表 1 几种储能接入方案的各子目标脆弱性

方案	储能接入位置	理想解贴近度	高峰放电脆弱性	低谷充电脆弱性	高峰充电脆弱性
1	无		储能接入前系统脆弱性为 298.16		
2	12	0.758	241.87	253.77	238.20
3	31	0.650	298.16	246.03	298.16
4	6	0.637	310.56	244.19	297.15
5	36	0.634	375.40	173.89	343.62
6	5	0.624	313.42	251.59	294.83
7	23	0.623	384.49	174.90	345.84
8	7	0.613	311.49	246.22	315.11

从 IEEE 39 节点系统的特点来看，系统内的发电机组大多集中分布于分区电网东南侧，负荷较大的节点大多位于分区电网南侧，规划储能接入电源和负荷集中的区域可充分发挥其削峰填谷作用，本算例计算得到的理想解贴近度较大的几个方案，对应接入节点 12、31、6、36，也反映了这个趋势。由表 1 可知，在储能以理想解贴近度最大的方案 2 接入节点 12 的变电站后，3 种典型场景下，整个区域电网的系统脆弱性较接入前均降低。对比方案 2 和其他方案可知，虽然方案 2 的低谷充电脆弱性较其他方案偏高，但高峰放电脆弱性和高峰充电脆弱性均比其他方案低得多，综合来看方案 2 最佳，这是 TOPSIS 多目标决策的结果，可以表明该决策方案的合理性。

4 结论

本文提出了基于电网脆弱性评估的储能规划选址方法。首先针对电网元件故障后的潮流转移特性，构造了线路等效关联网络，并对等效关联网络进行 k -核分解，进而搜索到对全网潮流传播起关键作用的虚拟节点，即脆弱性高的输电线路；然后以高峰放电、低谷充电、高峰充电 3 种工况下分区电网的脆弱性为决策子目标，利用 TOPSIS 多目标决策方法进行优选，获得储能接入位置的最优解。

目前，本文考虑的子目标场景是现阶段调度运行部门重点关注的场景，未来随着新型电力系统的发展，须关注更多典型场景，可据此对 TOPSIS 子目标进行调整。同时，未来还可进一步探索储能规划接入对所属 500kV 主干电网的影响。

参考文献

- [1] 王国春, 董昱, 许涛, 等. 巴西“8.15”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9461-9470.
- [2] 顾雪平, 白岩松, 李少岩, 等. 电力系统黑启动恢复问题的研究评述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3183-3200.
- [3] 顾雪平, 魏佳俊, 白岩松, 等. 基于分层模型预测控制的含风电电力系统恢复在线决策方法[J/OL]. 电工技术学报, 1-16 [2024-11-14]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240331>.
- [4] 刘士亚, 郭静, 岑钊华. 城市电网监控应急系统的设计[J]. 电气技术, 2021, 22(2): 11-16.
- [5] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
- [6] 商立群, 张建涛. 计及储能电池寿命衰减的居民小区光储优化配置[J]. 电气技术, 2024, 25(2): 1-11.
- [7] 杨天鑫, 黄云辉, 何珍玉, 等. 基于多时间尺度调节的构网型储能电站定容选址优化配置[J/OL]. 电力系统自动化, 1-18 [2024-11-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240718.1759.006.html>.
- [8] 张光儒, 任浩栋, 马振祺, 等. 提升配电网承载力和调节能力的整县分布式光伏储能配置方法[J]. 电气技术, 2022, 23(11): 49-55, 61.
- [9] 程浩, 秦文萍, 韩肖清, 等. 基于功角稳定性的区域电网储能选址定容方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 21-29.
- [10] 李滨, 谢旭槟, 梁振成, 等. “双高”电力系统集中式储能选址定容规划策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(9): 31-43.
- [11] 徐吉智, 张新燕, 常喜强, 等. 基于 PV 曲线和改进遗传算法储能选址定容研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(1): 263-268.
- [12] 马一然, 彭乔, 刘天琪, 等. 基于质心理论的光伏配电网电池储能选址定容方法[J/OL]. 现代电力, 1-11 [2024-11-02]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0271>.
- [13] 吴琛, 刘晨曦, 黄伟, 等. 提升新能源电力系统稳定性的构网型变流器选址定容方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 130-136.
- [14] 王瑜, 王浩. 电池储能削峰填谷选址定容方法研究[J]. 电气应用, 2024, 43(7): 99-106.
- [15] 严奕陆, 刘文霞, 石庆鑫, 等. 基于电-水跨层耦合

- 模型的城市电网脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5075-5090.
- [16] WATTS D J, STRONGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393: 440-442.
- [17] KITSAK M, GALLOS L K, HAVLIN S, et al. Identification of influential spreaders in complex networks[J]. Nature Physics, 2010, 6: 888-893.
- [18] 丁明, 韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 7-10.
- [19] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [20] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [21] 鞠文云, 李银红. 基于最大流传输贡献度的电力网关键线路和节点辨识[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 6-12.
- [22] 刘利民, 刘俊勇, 魏震波, 等. 基于协同效应分析的输电线路脆弱评估方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 30-37.
- [23] 蔡晔, 曹一家, 李勇, 等. 考虑电压等级和运行状态的电网脆弱线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2124-2131.
- [24] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 33-39.
-
- 收稿日期: 2024-11-14
修回日期: 2024-12-01
- 作者简介
孙顺祥(1994—), 男, 安徽省蚌埠市人, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统规划设计方面的研究工作。
-
- (上接第6页)
- [11] SHI Dongyu, YAN Jianfeng, GAO Bo, et al. Study on quick judgement of small signal stability using CNN[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 826-829.
- [12] 李洋麟, 江全元, 颜融, 等. 基于卷积神经网络的电力系统小干扰稳定评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 50-57.
- [13] 郭梦轩, 管霖, 苏寅生, 等. 基于改进边图卷积网络的电力系统小干扰稳定评估模型[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2095-2103.
- [14] SHI Dongyu, ZHANG Lulu. Research on quick judgment of power system stability using grid hierarchy net[J]. Energy Reports, 2021, 7: 25-32.
- [15] SHI D Y, LÜ Y, YU Z H, et al. Study on stability feature extraction of power system using deep learning[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 431(1): 012031.
- [16] AZMAN S K, ISBEIH Y J, EI MOURSI M S, et al. A unified online deep learning prediction model for small signal and transient stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4585-4598.
- [17] 于之虹, 李芳, 孙璐, 等. 小干扰稳定调度控制策略在线计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6191-6198.
- [18] TIAN Fang, ZHOU Xiaoxin, YU Zhihong. A coordinated preventive control optimization method of small signal and transient stability based on sensitivity analysis[C]//2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Chengdu, China, 2020.
- [19] ASVAPOOSITKUI S, PREECE R. Decision tree-based prediction model for small signal stability and generation-rescheduling preventive control[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 196: 107200.
- [20] FU Yiwei, CHEN Lei, YU Zhe, et al. Data-driven low frequency oscillation mode identification and preventive control strategy based on gradient descent[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 189: 106544.
- [21] 田芳, 周孝信, 史东宇, 等. 基于卷积神经网络的电力系统暂态稳定预防控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 1-8.
-
- 收稿日期: 2024-09-04
修回日期: 2024-10-16
- 作者简介
田芳(1973—), 女, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与控制、电力系统数字仿真、人工智能应用等方面的研究工作。