

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.04.006

计及经济性与可靠性的台区储能优化配置

解良彬¹, 向月¹, 王世谦², 李秋燕², 刘方³

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052; 3. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 分布式光伏装机量猛增影响了台区的安全可靠运行, 台区储能成为消纳分布式光伏的关键, 但台区储能项目投资的经济性与电网可靠性之间难以平衡。对此, 提出一种基于台区储能反配新能源模式的综合考虑经济性与可靠性的台区储能优化配置方法。首先, 建立台区储能容量优化经济模型; 其次, 基于台区储能经济性优化结果进行电网可靠性模拟仿真; 最后, 考虑经济性与可靠性等综合指标, 运用优劣解距离法对各节点进行选址评估, 通过累积分布曲线确定台区储能配置方案。算例仿真结果表明, 文中所提方法可以有效提升配电网分布式光伏消纳能力, 更好地平衡了台区储能投资的经济性与电网可靠性, 相关结果可为新能源配储比例的合理设置提供借鉴。

关键词: 可靠性; 经济性; 台区储能; 选址定容; 配储比例; 光伏消纳

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)04-0056-11

0 引言

新型电力系统中分布式资源得到了规模化快速发展, 其中分布式光伏装机量猛增, 已远超配电网台区的可承载能力, 各地市分布式光伏并网容量紧缺^[1-4]。电网消纳能力成为大规模分布式光伏发展的“卡脖子”问题^[5-6]。储能作为一种灵活性资源, 可提高分布式光伏就近消纳能力^[7], 提升电网可靠性^[8], 近年来得以快速发展。自2017年来, 我国新能源配储比例呈现明显上升趋势^[9], 这一举措会大幅提高新能源企业的成本, 可见新能源配储比例的合理设置问题亟需解决。结合上述技术难题, 在保证配电网分布式光伏有效消纳的前提下, 如何合理优化台区储能资源配置, 如何平衡台区储能项目投资的经济性与电网可靠性成为亟待研究的难点。

目前, 已有针对配电网台区储能的研究。文献[10]提出一种台区可调控资源聚合方法及协调调度策略, 有效提升了台区对可调控资源的管控能力; 文献[11]针对新能源高渗透及负荷多样化的台区, 提出了基于共享储能的台区多元负荷协同控制策略, 可以有效保证新能源的消纳, 降低峰值负荷, 并协助用户参与电力辅助服务市场。以上研究侧重于台区资源的调度控制策略, 在台区储能的配置方面不够深入。文献[12]在对低压配电台区多目标场景下储能系统应用模式分析的基础上, 提出了适合低压配电台区应用的模块化储能系统典型容

量配置和系统结构设计方案; 文献[13]建立了低压台区分布式储能接入的数学模型, 研究储能接入及其充放电机制对低压台区分布式光伏接入的影响。以上研究在台区储能的优化配置方面进行了初步探索, 但并未分析储能配置的经济性及后续对电网造成的影响。在储能投资的经济性研究中, 文献[14]从储能全生命周期收益和风光综合利用率角度对储能的容量和功率进行配置; 文献[15]基于实时状态的电网能量管理系统, 通过控制储能系统充放电策略调节电网的用电量, 实现电网的净收益最大化; 文献[16]提出一种计及负荷转移需求响应的数据中心低碳转型光储容量优化配置方法; 文献[17]构造双层优化配置模型, 上层考虑光储微电网总成本、配电网总经济成本, 下层考虑光储微电网运行成本。以上研究仅从经济性考虑, 得到的储能配置结果虽然能够获得更高的经济收益, 但并未量化建设储能对电网可靠性的影响。在配电网可靠性评估的研究中, 文献[18]建立了基于时变随机负荷需求的故障恢复优化算法, 对混合分布式发电系统进行可靠性评估; 文献[19]提出一种适用于规划-运行两阶段的配电网可靠性评估方法, 实现了对配电网不同阶段多维度的量化评估; 文献[20]提出利用二进制矩阵运算集, 将所有故障即切换时间信息与负荷点进行映射关联, 从而实现采用直接法进行配电网可靠性的高效评估; 文献[21]考虑故障与计划检修下配电网重构策略, 建立了可靠性增值服务体系的双层博弈模型; 文献[22]针对现有有源配电网的可靠性评估困境, 提出一种基于优化模型的有源配电网可靠性评估方法; 文献[23]使用概率工

收稿日期: 2024-01-12; 修回日期: 2024-03-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177103)

具处理负载与储能相关的不确定性,提出主动配电系统的双侧规划模型。以上研究仅从可靠性角度分析,为储能的优化配置提供借鉴,但无法兼顾经济性与可靠性。文献[24]计及配电网可靠性与运行经济性,建立含储能系统单点接入、多点接入结构下的供电可靠性模型,通过两阶段优化决策储能的选址定容及新增供电线路规划方案;文献[25]提出一种含储能及分布式电源的配电网可靠性简化计算方法,建立考虑经济性和可靠性的储能优化配置模型,采用改进的强度帕累托算法进行求解。以上研究虽然考虑了可靠性与经济性,但无法适用于我国配电网台区的实际情况。

针对上述台区储能配置方法的不足,文中提出台区储能反配新能源模式与一种综合考虑经济性与可靠性的台区储能优化配置方法。首先,基于台区储能经济性优化结果进行电网可靠性模拟仿真;然后,结合经济性和可靠性多维度指标对全部台区储能配置方案评分;最后,基于累积分布曲线形成台区储能最佳选址定容方案,通过台区储能反配新能源模式确定分布式光伏容量。通过算例仿真验证该方法的有效性与优越性,为我国新能源合理设置储能配置比例与时长提供思路。

1 数学模型的建立

建立台区储能容量优化经济模型,优化得到储能投资的经济性指标;通过序贯蒙特卡洛法故障状态抽样及马尔可夫状态转移模型评估,得到电网可靠性指标。

1.1 台区储能反配新能源模式分析

在配电网中,储能可以接入不同电压等级,安装在不同位置。现阶段我国多地光伏并网容量紧缺,台区储能反配新能源模式可提供有效解决方案。该模式是基于传统台区储能模式提出的新思路。传统台区储能通常是指安装在配电台区,用于动态扩容、平抑负荷波动和平滑台区内新能源发电输出的储能系统。通过电网、负荷和储能的友好互动,提升台区的电能质量和电网安全。投资主体主要是电网投资建设、调度管理。

与传统的台区储能模式不同,台区储能反配新能源模式由分布式光伏企业投资备案,储能通过电缆并入低压母线,安装独立电表直接接入市电。台区储能不接受电网调度,通过跟当地电网约定储能充放电策略,减少光伏发电对台区电压的抬升和电网的冲击,并减轻电力反送时电网调峰的压力。在台区储能项目完成备案后,投资企业依据当地的光

伏配置储能比例政策要求获得相应的光伏开发容量,以储能容量获取分布式光伏项目指标,提前抢占未来的并网空间资源。

1.2 台区储能容量优化经济模型

为考虑企业投资台区储能的经济效益,建立台区储能容量优化经济模型,优化得到储能容量、运行策略及相应经济性指标。

1.2.1 目标函数

投资台区储能的经济性目标函数包括储能年均建设成本、储能年均运维成本、储能寿命损耗成本及向电网释放电能的收益,具体表示为:

$$\min C_{\text{ESS}} = C_{\text{con}}^{\text{ESS}} + C_{\text{op}}^{\text{ESS}} + C_{\text{life}}^{\text{ESS}} - R_{\text{dis}}^{\text{ESS}} \quad (1)$$

式中: C_{ESS} 为台区储能项目年均成本; $C_{\text{con}}^{\text{ESS}}$ 为储能年均建设成本; $C_{\text{op}}^{\text{ESS}}$ 为储能年均运维成本; $C_{\text{life}}^{\text{ESS}}$ 为储能寿命损耗成本; $R_{\text{dis}}^{\text{ESS}}$ 为每年储能向电网释放电能的收益。

(1) 储能设备投资成本。

储能设备的投资成本主要包括储能建设成本及储能运维成本:

$$C_{\text{inv}}^{\text{ESS}} = C_{\text{con}}^{\text{ESS}} + C_{\text{op}}^{\text{ESS}} \quad (2)$$

$$C_{\text{inv}}^{\text{ESS}} = \beta_{\text{ESS}} (1 + \lambda_{\text{op}}) \sum_{i \in \Omega_{\text{ESS}}} (P_i^{\text{ESS}} c_{\text{inv}}^{\text{P}_{\text{ESS}}} + E_i^{\text{ESS}} c_{\text{inv}}^{\text{E}_{\text{ESS}}}) \quad (3)$$

$$\beta_{\text{ESS}} = \frac{r(1+r)^{T_{\text{ESS}}}}{(1+r)^{T_{\text{ESS}}} - 1} \quad (4)$$

式中: $C_{\text{inv}}^{\text{ESS}}$ 为储能设备投资成本; β_{ESS} 为储能成本等年值系数; λ_{op} 为运维与投资费用比例系数; Ω_{ESS} 为储能备选节点集合; $c_{\text{inv}}^{\text{P}_{\text{ESS}}}$ 、 $c_{\text{inv}}^{\text{E}_{\text{ESS}}}$ 分别为储能额定功率单位成本、储能额定容量单位成本; P_i^{ESS} 、 E_i^{ESS} 分别为节点 i 处储能的额定功率、额定容量; r 为折现率; T_{ESS} 为储能投资回收年限。

(2) 储能寿命损耗成本。

储能寿命损耗与储能的充放电量成正比。同时,当储能处于较高的荷电状态放电时,对其寿命影响较小,反之则会加快其寿命衰减,可用寿命损耗系数 λ_{loss} 进行表征。

$$\lambda_{\text{loss}} = \begin{cases} \lambda_1 & 0 \leq E_i(t) \leq 0.5 \\ \lambda_2 & 0.5 < E_i(t) \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $E_i(t)$ 为节点 i 处储能 t 时段的荷电状态; λ_1 、 λ_2 为不同荷电状态时的寿命损耗系数。

储能寿命损耗成本计算公式为:

$$C_{\text{life}}^{\text{ESS}} = 365 \sum_{t=1}^{24} C_{\text{life}}(t) \quad (6)$$

$$C_{\text{life}}(t) = \begin{cases} \delta_1(t) & 0 \leq E_i(t) \leq 0.5 \\ \delta_2(t) & 0.5 < E_i(t) \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\delta_1(t) = c_{\text{life}} \lambda_1 (P_{i,\text{ch}}^{\text{ESS}}(t) + P_{i,\text{dis}}^{\text{ESS}}(t)) \Delta t \quad (8)$$

$$\delta_2(t) = c_{\text{life}} \lambda_2 (P_{i,\text{ch}}^{\text{ESS}}(t) + P_{i,\text{dis}}^{\text{ESS}}(t)) \Delta t \quad (9)$$

式中: $C_{\text{life}}(t)$ 为储能 t 时段的寿命损耗成本; $\delta_1(t)$ 、 $\delta_2(t)$ 为不同荷电状态时的寿命损耗费用; c_{life} 为储能单位充放电寿命损耗成本; $P_{i,\text{ch}}^{\text{ESS}}(t)$ 、 $P_{i,\text{dis}}^{\text{ESS}}(t)$ 分别为节点 i 处储能 t 时段充、放电功率; Δt 为储能充放电时间间隔。

利用大 M 法可将式(7)写为:

$$-(1 - L_1(t))M \leq E_i(t) \leq 0.5 + (1 - L_1(t))M \quad (10)$$

$$-(1 - L_2(t))M + 0.5 \leq E_i(t) \leq 1 + (1 - L_2(t))M \quad (11)$$

$$\delta_1(t) - (1 - L_1(t))M \leq C_{\text{life}}(t) \leq \delta_1(t) + (1 - L_1(t))M \quad (12)$$

$$\delta_2(t) - (1 - L_2(t))M \leq C_{\text{life}}(t) \leq \delta_2(t) + (1 - L_2(t))M \quad (13)$$

$$L_1(t) + L_2(t) = 1 \quad (14)$$

式中: $L_1(t)$ 、 $L_2(t)$ 为 0-1 变量; M 为一个足够大的数; 当 $L_1(t) = 1$ 时, $0 \leq E_i(t) \leq 0.5$ 且 $C_{\text{life}}(t) = \delta_1(t)$; 反之, 当 $L_2(t) = 1$ 时, $0.5 < E_i(t) \leq 1$ 且 $C_{\text{life}}(t) = \delta_2(t)$ 。

(3) 储能向电网释放电能的收益。

台区储能就近消纳用户光伏装机量过多而产生的过剩电量, 和当地电网约定白天谷时存储过剩电量, 在晚上光伏发电不足的用电负荷高峰时段, 按照燃煤电价的标准, 将存储的电能释放至电网, 每年的收益为:

$$R_{\text{dis}}^{\text{ESS}} = 365 \sum_{t=1}^{24} \lambda_{\text{coal}} P_{i,\text{dis}}^{\text{ESS}}(t) \quad (15)$$

式中: λ_{coal} 为燃煤电价。

1.2.2 约束条件

(1) 配电网功率平衡约束。

配电网不同节点间的供电线路上输送的功率应保持平衡状态:

$$P_{ij} - r_{ij} I_{ij}^2 = \sum_{v \in \omega(j)} (P_{jv} + Q_{jv}) \quad (16)$$

$$Q_{ij} - x_{ij} I_{ij}^2 = \sum_{v \in \omega(j)} (Q_{jv} + Q_j) \quad (17)$$

$$U_j^2 = U_i^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij}^2 \quad (18)$$

$$(U_i I_{ij})^2 = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad (19)$$

式中: 节点 i 为节点 j 到根节点路径上与节点 j 相邻的节点; P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为节点 i 流向节点 j 的有功和无功功率; P_{jv} 、 Q_{jv} 分别为节点 j 流向节点 v 的有功和无功功率; r_{ij} 、 x_{ij} 分别为线路 ij 上的电阻、电抗; I_{ij} 为线路 ij 上的电流幅值; $\omega(j)$ 为与节点 j 相邻但

不在节点 j 到根节点路径上的节点集合; P_j 、 Q_j 分别为节点 j 的有功和无功注入功率; U_i 、 U_j 分别为节点 i 和 j 的电压幅值。

节点 i 的有功注入功率 P_i 表达式为:

$$P_i = P_i^{\text{B}} + P_i^{\text{PV}} + P_i^{\text{ESS}} - P_i^{\text{L}} \quad (20)$$

式中: P_i^{B} 为节点 i 向上级电网购买的有功功率; P_i^{PV} 为节点 i 的分布式光伏出力; P_i^{L} 为节点 i 的有功负荷。

(2) 节点电压约束。

每个节点电压波动不超限值:

$$U_i^{\text{min}} \leq U_i \leq U_i^{\text{max}} \quad (21)$$

式中: U_i^{max} 、 U_i^{min} 分别为节点 i 电压幅值上、下限。

(3) 线路电流约束。

每条供电线路电流不超限值:

$$I_{ij} \leq I_{ij}^{\text{max}} \quad (22)$$

式中: I_{ij}^{max} 为线路 ij 电流最大值。

(4) 储能投资约束。

$$0 \leq P_i^{\text{ESS}} \leq P_{\text{max}}^{\text{ESS}} \quad (23)$$

$$0 \leq E_i^{\text{ESS}} \leq E_{\text{max}}^{\text{ESS}} \quad (24)$$

$$P_i^{\text{ESS}} \leq \varepsilon_{\text{max}} E_i^{\text{ESS}} \quad (25)$$

式中: $P_{\text{max}}^{\text{ESS}}$ 、 $E_{\text{max}}^{\text{ESS}}$ 分别为储能允许安装的额定功率与额定容量最大值; ε_{max} 为额定功率与额定容量的最大比值。

(5) 储能充放电约束。

$$S_{\text{min}}^{\text{SOC}} E_i^{\text{ESS}} \leq E_i(t) \leq S_{\text{max}}^{\text{SOC}} E_i^{\text{ESS}} \quad (26)$$

式中: $S_{\text{max}}^{\text{SOC}}$ 、 $S_{\text{min}}^{\text{SOC}}$ 分别为储能荷电状态上、下限系数。

(6) 储能荷电状态连续性约束。

$$E_i(t) = E_i(t-1) + \left(\eta_{\text{ch}} P_{i,\text{ch}}^{\text{ESS}}(t) - \frac{1}{\eta_{\text{dis}}} P_{i,\text{dis}}^{\text{ESS}}(t) \right) \Delta t \quad (27)$$

式中: η_{ch} 、 η_{dis} 分别为储能充、放电效率。

(7) 储能出力约束。

$$0 \leq P_{i,\text{ch}}^{\text{ESS}}(t) \leq U_{\text{ch}}(t) P_i^{\text{ESS}} \quad (28)$$

$$0 \leq P_{i,\text{dis}}^{\text{ESS}}(t) \leq U_{\text{dis}}(t) P_i^{\text{ESS}} \quad (29)$$

$$U_{\text{ch}}(t) + U_{\text{dis}}(t) \leq 1 \quad (30)$$

式中: $U_{\text{ch}}(t)$ 、 $U_{\text{dis}}(t)$ 为 0-1 变量, 分别表征 t 时段储能充、放电状态。

1.3 台区储能配置对可靠性的影响机理

配电网在发生故障后, 分布式光伏与台区储能等分布式资源可为孤岛内的负荷恢复供电, 减少了电力系统的停电时间, 降低了电力系统停电损失的负荷与费用, 有效提高了有源配电网孤岛运行的能力, 配电网的可靠性可获得一定程度的提高。在故

障持续过程中,分布式光伏与台区储能持续向孤岛内的用户供电,储能的充放电功率由分布式光伏出力与孤岛内负荷缺口决定。

配电网台区增加储能设备后,由于故障时间的随机性与储能设备自身并不是绝对可靠,配电网发生故障时刻储能可能会出现不能有效利用的情况,主要有以下2种情况:(1)配电网发生故障时,储能设备的荷电状态处在较低的状态,剩余电量较低,难以维持孤岛负荷的运行。(2)配电网发生故障时,储能设备自身发生故障。在故障发生时刻,储能设备的容量、充放电功率与荷电状态决定了故障后形成的孤岛范围与孤岛持续时间。其中,储能设备的荷电状态与容量决定了孤岛持续时间,而储能的充放电功率决定了所能维持的孤岛范围。

此外,分布式光伏大量接入配电网会引发电压越限,可利用储能对中压配电线路、台区等存在的电压越限进行改善。

1.4 计及台区储能的配电网可靠性评估

基于台区储能容量经济性优化结果,对配电网进行可靠性评估,得到可靠性指标。

1.4.1 确定元件状态

(1) 分布式光伏出力。分布式光伏发电主要受光照强度的影响,光照强度可用贝塔分布良好拟合,概率密度函数 $f(I)$ 为:

$$f(I) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{I}{I_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{I}{I_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (31)$$

式中: I 为光照强度; I_{\max} 为光照强度的最大值; $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数; α 、 β 为形状参数。

基于不同季节的光照强度数据得到光伏发电出力的时序模型,时间间隔为1h。光伏发电输出功率 P_{PVG} 与光照强度 I 的关系可用分段函数表示。

$$P_{\text{PVG}} = \begin{cases} P_{r,\text{PVG}} \frac{I}{I_r} & I \leq I_r \\ P_{r,\text{PVG}} & I > I_r \end{cases} \quad (32)$$

式中: $P_{r,\text{PVG}}$ 为光伏发电的额定输出功率; I_r 为额定光照强度。

(2) 故障元件抽样。元件存在2种状态:正常运行状态和维修状态,分别使用平均无故障时间 T_{MTTF} 及平均故障修复时间 T_{MTTR} 表示。通过随机抽样记录电网元件的故障与修复时间,多次重复可得到元件状态随时间变化的序列,即元件的状态时间序列,反映元件运行和维修的交替状态。根据已知的故障率 λ 和修复率 μ 在2个状态间切换。故障率 λ 代表从正常运行状态转换到故障状态的比率,修复率 μ 代表从故障状态转换到正常运行状态的比

率。一般无故障工作时间 T_{MTTF} 以及故障修复时间 T_{MTTR} 服从指数分布:

$$\begin{cases} T_{\text{MTTF}} = -T_{\text{MTTF}} \ln \tau_1 \\ T_{\text{MTTR}} = -T_{\text{MTTR}} \ln \tau_2 \end{cases} \quad (33)$$

式中: τ_1 、 τ_2 为在 $[0,1]$ 之间均匀分布的随机数。

(3) 马尔可夫负荷状态转换模型。

通过K-means聚类算法对一年内负荷数据进行聚类,得到12个典型负荷特征。配电网负荷用电通常具有连续性,因此使用马尔可夫状态转换模型表征负荷在不同聚类中心之间的转换。

1.4.2 可靠性评估方法

由于配电网已大量接入分布式光伏、储能等时序特征非常明显的设备,因此选用序贯蒙特卡洛法进行配电网可靠性的评估。文中重点研究台区储能安装前后,由于电网元件故障所导致的停电时间变化情况,因此选用系统平均停电持续时间指标(system average interruption duration index, SAIDI)来表征配电系统可靠性。可靠性指标计算表达式为:

$$R_{\text{SAIDI}} = \frac{\sum_{n=1}^{N_c} r_n N_n}{N_T} \quad (34)$$

式中: R_{SAIDI} 为系统平均停电持续时间指标; N_n 为一年内由第 n 次系统故障导致的用户停电数目; N_T 为一年内供电的总用户数目; r_n 为一年中第 n 次停电的持续时间; N_c 为停电总次数。

2 基于优劣解距离法的台区储能选址定容

由经济性优化和电网可靠性评估形成的多指标集合后,考虑到不同指标在物理意义、量纲上区别较大,采用优劣解距离法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)进行综合评估分析,基于各节点评分结果确定最佳台区储能安装位置。综合评估流程概述如下。

(1) 数据正向化处理。

综合选取评估指标及其类型,如表1所示。

表1 指标类型

Table 1 Indicator types

序号	指标	类型
1	储能经济性	极小型
2	电网可靠性	极小型
3	光伏就地消纳率	极大型
4	网损	极小型
5	电压合格率	极大型
6	电压波动	极小型

光伏就地消纳率计算为:

$$K_{PV} = 1 - \frac{\sum_{t \in \varphi} |P_{t,0-1}|}{\sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^{N_{PV}} P_s(t)} \quad (35)$$

式中： K_{PV} 为光伏就地消纳率指标，表示配电网消纳光伏的能力，该指标值越大，意味着分布式光伏出力倒送上级电网越少； $P_{t,0-1}$ 为 t 时段首端支路的有功功率； φ 为首端支路发生功率倒送时间段集合； $P_s(t)$ 为 t 时段分布式光伏 s 的有功出力； N_{PV} 为分布式光伏总数量； T 为指标评估周期。

(2) 数据标准化处理。

经济性指标与可靠性指标的量纲不同，物理含义不同，为了消除不同量纲的影响，还需要对正向化的数据进行标准化处理，保证不同指标在综合评估中具备一致的量纲。

(3) 最优解与最劣解计算。

从经过正向化、标准化的评分矩阵中选取理想最优解和理想最劣解。在单次计算中，选取全部节点中各个指标的最大值作为最优解，最小值作为最劣解，形成最优指标集和最劣指标集，在此基础上进行各节点评分。

(4) TOPSIS 评分计算。

计算各节点指标集与最优指标集及最劣指标集的欧氏距离。

$$D_{i,max}(k) = \sqrt{\sum_{w=1}^q (d_{i,w}(k) - d_{max,w}(k))^2} \quad (36)$$

式中： $D_{i,max}(k)$ 、 $d_{max,w}(k)$ 、 $d_{i,w}(k)$ 分别为在第 k 次迭代中，节点 i 指标集与最优指标集的欧氏距离、第 w 个指标的最优解以及节点 i 的第 w 个指标； q 为指标总数。

$$D_{i,min}(k) = \sqrt{\sum_{w=1}^q (d_{i,w}(k) - d_{min,w}(k))^2} \quad (37)$$

式中： $D_{i,min}(k)$ 、 $d_{min,w}(k)$ 分别为在第 k 次迭代中，节点 i 指标集与最劣指标集的欧氏距离以及第 w 个指标的最劣解。

在节点 i 建设储能方案的综合评分为：

$$S_i(k) = \frac{D_{i,max}(k)}{D_{i,max}(k) + D_{i,min}(k)} \quad (38)$$

式中： $S_i(k)$ 为第 k 次迭代中节点 i 的 TOPSIS 综合评分。

(5) 台区储能选址定容。

在全部仿真次数中，记录节点 i 在单次计算中评分最高的频次 $N_{i,b}$ ，频次最高的节点则为最佳的储能安装节点。

鉴于所用方法涉及大量仿真次数，为方便后续

算例分析，通过储能改善电网可靠性百分比来直观描述储能对多场景下可靠性的提升：

$$R = \frac{r_{be}^{ESS} - r_{af}^{ESS}}{r_{be}^{ESS}} \quad (39)$$

式中： R 为建设储能后可靠性指标改善百分比； r_{be}^{ESS} 、 r_{af}^{ESS} 分别为储能建设前、后可靠性指标数值。

3 台区储能优化配置方法

计及经济性和可靠性的台区储能优化配置方法分为 3 个步骤，整体流程如图 1 所示，其中 N 为节点总数， K 为场景总数。

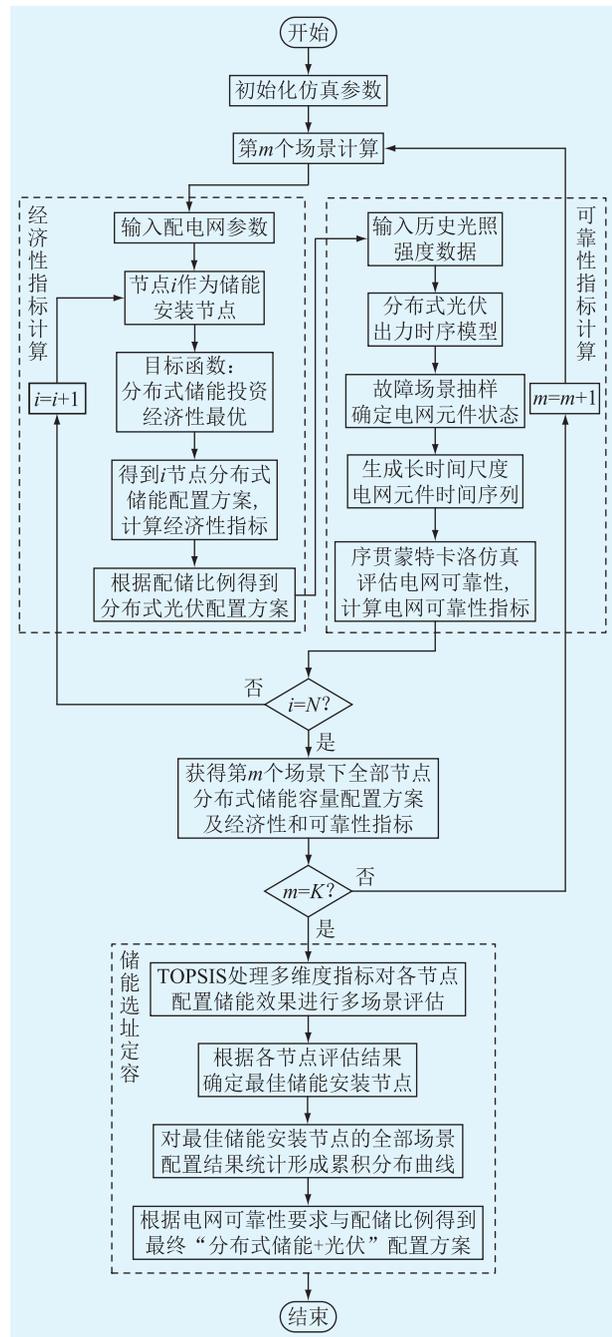


图 1 优化配置流程

Fig.1 Optimization configuration process

(1) 经济性指标计算。以光伏企业投资台区储能的经济性最优建立目标函数,建立台区储能容量优化经济模型,优化得到台区储能的功率、容量及光伏企业投资储能的经济性指标。

(2) 可靠性指标计算。基于四季光照强度数据生成分布式光伏出力时序模型,基于马尔可夫负荷状态转移模型表示典型负荷聚类中心的转换过程,使用序贯蒙特卡洛模拟法进行元件故障场景抽样,评估配电网可靠性,得到该场景的可靠性指标。

(3) 基于 TOPSIS 的储能选址定容。综合考虑经济性和可靠性多维度指标,对各节点配置台区储能效果进行多场景评估,根据评分结果选取最佳储能安装节点。然后根据全部场景下最佳储能安装节点的配置结果,拟合生成储能功率及容量累积分布曲线,再结合不同地区电网可靠性要求、配储比例形成最终“分布式储能+光伏”配置方案,实现可靠性经济性二者的寻优。

4 算例分析

4.1 算例参数说明

基于 IEEE 33 节点配电系统进行算例分析,设备可靠性参数、各节点支路数据见文献[21],拓扑结构如图 2 所示。

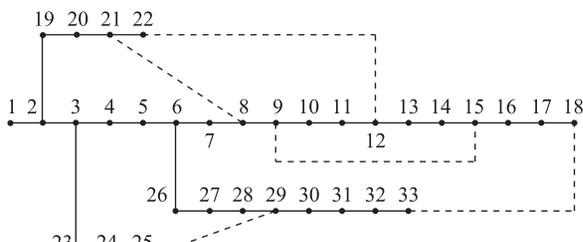


图 2 IEEE 33 节点拓扑结构
Fig.2 IEEE 33-node topology

台区储能的相关经济性参数如表 2 所示,其中燃煤电价选用山东省燃煤发电基准价^[26],光伏组件单价取 2023 年 11 月的光伏组件市场定标均价,储能变流器单价和锂电池单价均参考多个行业龙头企业中标价格选取,其他成本包括相关设备、辅材、人工、运输等成本。

表 2 储能相关经济性参数

Table 2 Economic parameters of energy storage

参数	数值
燃煤电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	0.394 9
光伏组件单价/(元·W ⁻¹)	1.098
储能变流器单价/(元·W ⁻¹)	0.15
锂电池单价/[元·(W·h) ⁻¹]	0.5
其他成本/[元·(W·h) ⁻¹]	0.695

4.2 台区储能配置结果分析

4.2.1 计及经济性与可靠性的台区储能配置

为了综合考虑不同类型指标的影响,使用 TOPSIS 对每次计算中各节点指标情况进行评分,计算节点平均评分 S_{ave} 、节点评分方差 S_s 、节点评分最高场景下的储能功率均值 P_{ave} 及容量均值 E_{ave} ,取排名前 5 的节点统计结果,如表 3 所示。

表 3 计及经济性和可靠性的储能选址统计结果

Table 3 Energy storage site selection statistical results considering economy and reliability

节点	S_{ave}	S_s	$N_{i,b}$	P_{ave}/kW	$E_{ave}/(\text{kW}\cdot\text{h})$
6	0.660	0.133	281	215	474
3	0.622	0.137	155	188	424
2	0.539	0.132	81	174	376
24	0.411	0.125	45	192	435
25	0.382	0.129	38	196	443

由表 3 可知,(1) 综合考虑全部仿真结果,节点 6 的综合评分均值最高,表明综合考虑可靠性与经济性时,节点 6 配置储能能够满足更多场景下的需求,因此选择节点 6 为台区储能最佳安装节点;(2) 节点 24 评分方差最小,在不同场景下节点 24 配置储能时对各个指标改善效果较为稳定,不易受外界因素变化影响。

综合评估选择节点 6 安装储能,统计全部场景下储能功率及容量配置结果,形成直方图直观表示不同功率及容量区间分布情况。为了获取更加精确的储能功率及容量配置结果,使用对数正态分布对全部场景下储能的功率及容量数据进行拟合,所得直方图与概率密度曲线结果如图 3、图 4 所示。

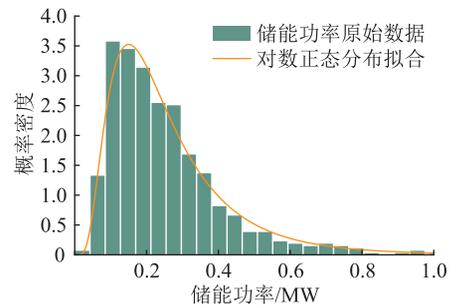


图 3 储能功率直方图与拟合曲线

Fig.3 Energy storage power histogram and fitting curve

可见,通过对数正态分布形式可以精确拟合得到容量及功率概率密度曲线,对应的储能功率及容量的累积分布曲线见图 5。累积分布曲线值为 0.9 时的储能配置结果为 0.468 MW/1.410 MW·h,其意义为该储能配置方案能够满足 90% 电网不同场景的需求。此时按照山东省“分布式光伏项目须按照不低于 15%、2 h 的比例配建或租赁储能容量”政策要

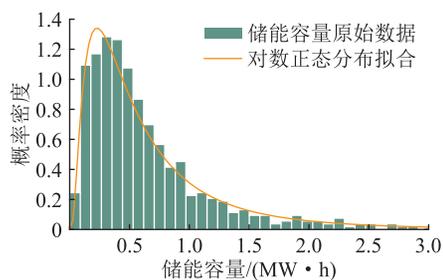
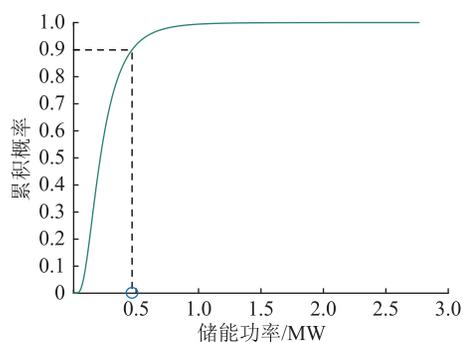


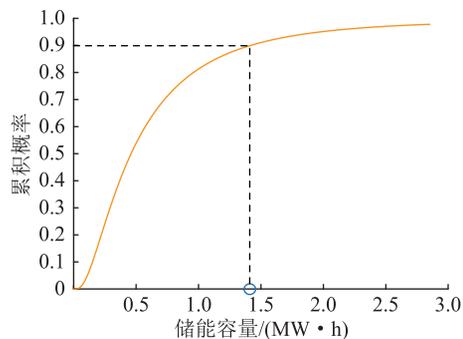
图4 储能容量直方图与拟合曲线

Fig.4 Energy storage capacity histogram and fitting curve

求,可以获得 3 120 kW 的分布式光伏并网容量,即光伏企业可在此节点建设容量为 3 120 kW 的分布式光伏。



(a) 储能功率累计分布曲线



(b) 储能容量累计分布曲线

图5 储能配置结果累积分布曲线

Fig.5 The energy storage configuration results by the cumulative distribution curve

4.2.2 台区光储系统投资经济性分析

光伏企业投资储能的经济性必须得以保证才能加大对储能设备的投资。在台区储能反配新能源模式下,光伏企业多出的储能设备投资成本可以利用成本转移保证投资收益率。

2023 年 11 月光伏组件招投标市场均价已降至 1.098 元/W,但设备制造端大幅下降的成本并未传导至终端用户,绝大多数补贴给了光伏企业终端开发的业务费。同时锂电池储能系统的硬件采购成本大幅下降,光伏企业为了提前抢占紧缺的并网容量,可将一部分终端业务费转移出来配置台区储

能。具体计算如下:

综合考虑经济性和可靠性的台区储能配置功率及容量为 0.468 MW/1.410 MW·h、3 h 储能系统,结合表 2 中的台区储能经济性数据,计算得到该台区储能配置方案成本为 175.51 万元。储能在晚上光伏发电不足的用电高峰时段,按照燃煤电价的标准向电网释放电能每年可获得 19.94 万元,在寿命周期内不能完成成本回收。

可见目前我国配电网储能商业模式不成熟,单独投资储能项目经济性较差。但该配置方案可为光伏企业换来 3 120 kW 的光伏并网容量,将储能折算至光伏系统中的成本为 0.573 元/W,光伏组件成本降低为光伏企业终端业务费带来约 1 元/W 的盈利空间,可见投资储能增加的成本完全可以被光伏企业终端业务费的盈利空间所覆盖,光伏企业的收益率可以得到保证。

4.2.3 台区配储可靠性改善效果分析

在不配置台区储能时,配电网 SAIDI 为 11.04 h/(a·户)。为评估配置储能对电网可靠性的影响,选取全部场景下储能改善电网可靠性百分比的最大值 R_{max} 、最小值 R_{min} 、均值 R_{ave} 以及方差 R_s ,取排名前 5 的节点结果,如表 4 所示。

表4 电网可靠性改善结果

Table 4 Results of power grid reliability improvement %

节点	R_{max}	R_{min}	R_{ave}	R_s
3	3.90	0.44	1.40	0.82
6	3.71	0.37	1.34	1.07
2	3.19	0.33	1.13	0.89
24	2.48	0.43	0.92	0.23
25	2.42	0.31	0.88	0.21

由表 4 可知:(1) 结合 R_{ave} 、 R_{max} 及 R_{min} 指标可以看出节点 3 配置储能对电网可靠性改善效果最佳,原因为节点 3 处在配电网公共连接点处,与节点 2、节点 4、节点 23 相连,且向下分支处连接有用电负荷较高的节点,可见节点 3 与电网友好程度最高,在附近节点供电不足时能够积极响应电网的协调工作,及时提供电力支撑;(2) 节点 2 与节点 6 作为公共连接点,其对于电网可靠性的改善效果同样较好。但节点 3 在 R_{ave} 和 R_s 指标上均表现最好,表明节点 3 在所有场景下都稳定地改善了电网可靠性;(3) 虽然节点 24、节点 25 配置储能对电网可靠性的改善效果不如公共连接点,但通过 R_s 指标可以看出其对改善电网可靠性效果更加稳定。尽管节点 24、节点 25 处在电网线路末端,但因其负荷水平较

高,储能得以充分发挥其特性,保障附近居民用户供电可靠性。

4.2.4 台区储能对分布式光伏消纳影响分析

在不配置台区储能时,配电网光伏就地消纳率指标为 92.83%。为了分析配置台区储能对配电网消纳能力的影响,计算配置台区储能后光伏就地消纳率的变化情况,选取全部场景下光伏就地消纳率最大值 K_{\max} 、最小值 K_{\min} 、均值 K_{ave} 以及方差 K_s 进行分析,取排名前 5 的节点结果,如表 5 所示。

表 5 光伏就地消纳率结果

Table 5 Results of local consuming photovoltaic rate %

节点	K_{\max}	K_{\min}	K_{ave}	K_s
3	100	98.2	99.3	0.04
6	100	97.7	98.9	0.05
2	100	97.1	98.7	0.06
24	100	98.4	99.0	0.03
25	100	98.5	99.1	0.03

由表 5 可知,各节点配置台区储能后,有效促进了配电网分布式光伏的消纳能力,已基本实现分布式光伏的就地消纳,提高光伏自发利用率,优化光伏输出曲线,减少因弃光限电造成的电能浪费。

综上,台区储能反配新能源模式具体有以下优势:(1) 增强配电网消纳分布式光伏的能力;(2) 实现配电网台区的弹性增容,提高电网可靠性;(3) 扩大储能行业市场空间,实现各省储能装机目标;(4) 光伏企业的投资收益率得以保证。

4.3 文中方法有效性与优越性分析

文中综合考虑可靠性与经济性的台区储能配置方法,利用 TOPSIS 方法得到计及台区储能投资的经济性模型(确定性系统)和电网可靠性模型(不确定性系统)综合指标的台区储能配置方案,为配电网台区储能的优化配置提供一条新思路。将文中方法与主流文献方法进行比较与分析。

方法 A:文献[24]建立多目标规划运行双层模型,考虑储能对系统可靠性和经济性的影响,使用 Gurobi 工具包进行优化问题的求解;

方法 B:文献[25]建立计及配电网可靠性与经济性的多目标电池储能系统优化配置模型,使用改进的强度帕累托算法进行求解。

使用方法 A 与方法 B 对储能进行选址定容,各方法储能配置结果对比如表 6 所示。

由表 6 可知,方法 A 得到的储能配置结果对电网可靠性的改善效果最小,因方法 A 在储能选址定容过程中并未充分考虑配电网可靠性的影响,对于

表 6 主流文献方法与文中方法对比

Table 6 Comparison of mainstream literature methods and methods in the paper

方法	储能接入点	功率/kW	容量/(kW·h)	可靠性改善结果/%	投资成本/万元	光伏消纳率/%
方法 A	3	415	1 290	2.31	160.38	96.2
方法 B	6	471	1 923	3.14	236.86	99.3
文中方法	6	468	1 410	2.92	175.51	99.0

可靠性的提升重点在于新增供电线路的规划。方法 A 与方法 B 无法将可靠性评估与储能运行的经济性一同实现优化,无法计算配电网可靠性指标的准确值。文中方法将可靠性评估纳入台区储能选址定容的过程中,通过计算不同场景下的可靠性指标,实现台区储能对于电网可靠性改善效果的定量分析。方法 B 得到的储能配置结果对电网的可靠性改善效果最佳,但会带来高额的储能投资成本。

根据表 6 可知,文中方法得到的台区储能配置方案对光伏的就地消纳率提升效果最佳,投资项目的经济性适中,可进一步提高台区供电可靠性。此外,文中方法可根据电网对可靠性的要求来调整储能配置方案,无须重复计算。例如不同区域电网对可靠性的要求不同时,可将累积分布曲线值设为 0.95 或 0.85,能够灵活配置台区储能的功率及容量,适用于大部分配电网台区的实际情况。因此文中方法更适合我国配电网台区的储能优化配置。

4.4 不同目标下台区储能配置方案对比分析

4.4.1 仅考虑可靠性的储能配置分析

在 TOPSIS 评估中仅考虑可靠性指标对各个节点进行评估,计算评分统计指标如表 7 所示。

表 7 基于可靠性的储能选址统计结果

Table 7 Statistical results of energy storage site selection based on reliability

节点	S_{ave}	S_s	$N_{i,b}$	P_{ave}/kW	$E_{\text{ave}}/(\text{kW}\cdot\text{h})$
3	0.688	0.119	302	323	891
2	0.641	0.124	101	310	822
6	0.596	0.105	83	267	632
24	0.587	0.127	62	485	1 523
25	0.539	0.123	52	493	1 647

由表 7 可知,(1) 储能配置中若仅考虑可靠性,节点 3 基于可靠性指标评分最高,储能建设节点为节点 3。节点 3 与源节点 1 距离较近,且作为公共节点连接节点 24、节点 25 处的大量负荷,节点 3 故障时容易出现较大电量缺口,需要储能充放电灵活调节,因此储能安装在节点 3 对于电网的可靠性提

升能力更强;(2) 节点 24、节点 25 处在电网末端且负荷水平较高,利用储能对能量的时空平移特性可以缓解重过载等问题,得到较好的电网可靠性,但需要较大容量的储能设备,储能设备的投资成本随之升高,经济性难以得到保证;(3) 仅考虑可靠性的结果相较于综合考虑经济性与可靠性的方法,在各个节点的储能配置功率及容量均有一定涨幅,可见考虑单一可靠性指标配置储能,损失了投资储能的经济性。

4.4.2 仅考虑经济性的储能配置分析

在 TOPSIS 评估中仅考虑经济性指标对各个节点进行评估,计算评分统计指标如表 8 所示。

表 8 基于经济性的储能选址统计结果
Table 8 Statistical results of energy storage site selection based on economy

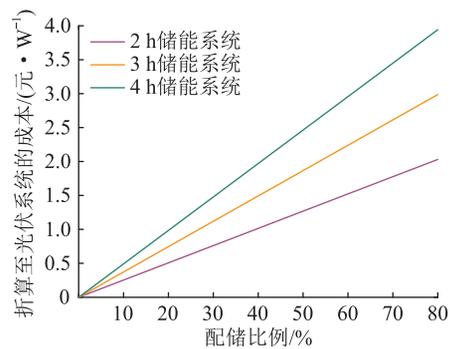
节点	S_{ave}	S_s	$N_{i,b}$	P_{ave}/kW	$E_{ave}/(kW \cdot h)$
6	0.590	0.084	207	150	304
24	0.572	0.083	136	168	353
25	0.559	0.082	110	131	256
3	0.564	0.082	85	125	241
2	0.538	0.086	62	167	352

由表 8 可知,(1) 储能配置中若仅考虑经济性,节点 6 基于经济性指标评分最高,储能建设节点为节点 6。但各节点配置储能评分均值相差不大,可见在同一场景下配电网的电力缺口相同,且目前储能盈利模式单一,因此不同节点对储能设备出力状况影响较小;(2) 仅考虑经济性时,节点 6 的储能配置功率和容量均低于综合考虑经济性和可靠性的方法和仅考虑可靠性的配置结果,表明在强调经济效益的同时牺牲了一定的可靠性,未能在可靠性和经济性之间实现良好的平衡。

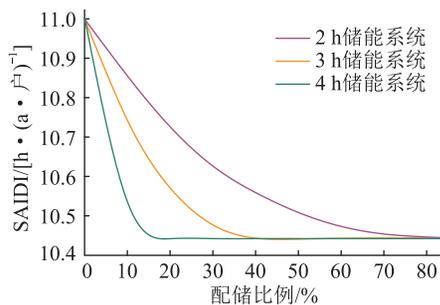
4.5 光伏配储比例与时长对储能配置的影响分析

为深入研究在储能优化配置中配储比例、时长对电网可靠性与储能经济性的影响,将配储比例按间隔 5% 从 0% 逐步增加至 80%,同时将配储时长从 2 h 延长至 5 h,分析经济性和可靠性指标变化情况,结果如图 6 和图 7 所示。

在配储比例方面,配储比例增加会直接导致光伏企业的成本增加,配置长时储能成本增加的比率更高;配储比例达到 20% 时,无论储能系统时长增加与否,储能设备对电网可靠性的改善效果已达到最大。在配储时长方面,配置 2 h 储能系统的经济性最佳,对于光伏企业的经济负担最小,但可靠性指标较差,需要增加配储比例以改善电网可靠性;配置 4 h 储能系统时,在配储比例较低的情况下已基本达到最大可靠性改善效果,但此时经济性较



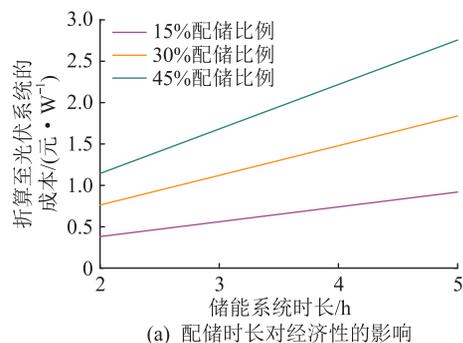
(a) 配储比例对经济性的影响



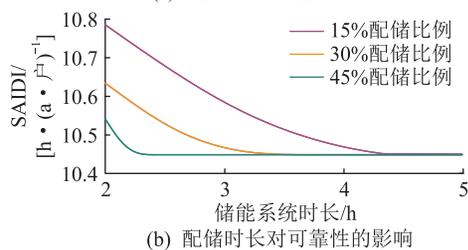
(b) 配储比例对可靠性的影响

图 6 配储比例影响分析

Fig.6 The impact of the ratios of the energy storage for renewables



(a) 配储时长对经济性的影响



(b) 配储时长对可靠性的影响

图 7 配储时长影响分析

Fig.7 The impact of the hours of the energy storage for renewables

差,对于光伏企业投资 4 h 储能系统的成本较高,抑制企业投资储能的积极性。

综合考虑以上情况,目前阶段配储比例在 20%~30%,配储时长 3 h 左右可以较好均衡电网可靠性与光伏企业配置储能的经济性。

5 结论

在配电网消纳能力不足,光伏并网容量紧缺与

新能源配储比例持续走高的背景下,文中结合我国实际配储的相关政策,在台区储能反配新能源模式的基础上,提出一种综合考虑储能投资的经济性与电网可靠性的台区储能优化配置方法,通过仿真验证所提模型与方法,得到以下结论:

(1) 通过将可靠性评估纳入台区储能选址定容过程,文中方法可准确计算电网可靠性指标,实现了台区储能改善电网可靠性效果的定量分析,为投资者提供不同场景下的决策参考。

(2) 通过对各节点配置台区储能效果进行多场景评估生成累积分布曲线,文中方法可根据差异化可靠性需求灵活配置台区储能的功率及容量。

(3) 文中方法可有效提升配电网分布式光伏消纳能力,在保证企业投资收益率的前提下改善电网可靠性,平衡投资储能的经济性与电网可靠性。

配电网可靠性影响因素众多,后续可进一步考虑更多因素对台区储能优化配置过程中的影响,实现我国配电网台区储能的科学配置。

参考文献:

- [1] 孙乐平,郭小璇,潘暉,等. 考虑政策效力影响的分布式光伏装机容量预测[J]. 供用电,2023,40(7):73-81.
SUN Leping, GUO Xiaoxuan, PAN Hui, et al. Distributed photovoltaic installed capacity forecast considering the impact of policy validity [J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(7): 73-81.
- [2] 董逸超,王守相,闫秉科. 配电网分布式电源接纳能力评估方法与提升技术研究综述[J]. 电网技术,2019,43(7):2258-2266.
DONG Yichao, WANG Shouxiang, YAN Bingke. Review on evaluation methods and improvement techniques of DG hosting capacity in distribution network [J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2258-2266.
- [3] 郭勇,李秋燕,马杰,等. 新基建负荷与光伏接入下配电网可开放容量评估及优化[J]. 电力工程技术,2023,42(6):64-73.
GUO Yong, LI Qiuyan, MA Jie, et al. Evaluation and optimization of available capacity of distribution network under new infrastructure load and photovoltaic access [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 64-73.
- [4] 刘文龙,吕志鹏,刘海涛. 电力电子化配电台区形态发展以及运行控制技术综述[J]. 中国电机工程学报,2023,43(13):4899-4922.
LIU Wenlong, LYU Zhipeng, LIU Haitao. An overview of morphological development and operation control technology of power electronics dominated distribution area [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(13): 4899-4922.
- [5] 胡江溢,杨高峰,宋兆欧,等. 支持新型储能发展的国际政策与中国发展模式探讨[J]. 电网技术,2024,48(2):469-480.
HU Jiangyi, YANG Gaofeng, SONG Zhaou, et al. Preliminary discussion on the supporting policies and the China's development model of the new energy storage [J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 469-480.
- [6] 丁浩然,张博,唐巍,等. 考虑源-网-荷-储协同的配电台区分布式光伏消纳能力评估[J]. 供用电,2023,40(3):1-8,31.
DING Haoran, ZHANG Bo, TANG Wei, et al. Evaluation of distributed photovoltaic consumption capacity of distribution station area considering source-network-load-storage collaboration [J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(3): 1-8, 31.
- [7] XIANG Y, GUO Y T, WU G, et al. Low-carbon economic planning of integrated electricity-gas energy systems [J]. Energy, 2022, 249: 123755.
- [8] 郭咏涛,向月,刘俊勇. 面向高比例清洁能源消纳的含灵活性资源电力系统规划方案优选[J]. 上海交通大学学报,2023,57(9):1146-1155.
GUO Yongtao, XIANG Yue, LIU Junyong. Optimal planning of power systems with flexible resources for high penetrated renewable energy accommodation [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(9): 1146-1155.
- [9] 山东省能源局. 关于印发《鲁北盐碱滩涂地风光储输一体化基地“十四五”开发计划》的通知 [EB/OL]. [2024-01-16]. http://nyj.shandong.gov.cn/art/2023/6/29/art_59960_10298854.html.
Energy Administration of Shandong Province. Notice on issuing the "14th five-year plan" development plan for the "Lubei Saline-alkali marshland integrated base of wind, solar, energy storage, and transmission" [EB/OL]. [2024-01-16]. http://nyj.shandong.gov.cn/art/2023/6/29/art_59960_10298854.html.
- [10] 汪锋,刘智强,张克勇,等. 基于分时电价与储能充放电策略的台区可调控资源聚合及调度[J]. 储能科学与技术,2023,12(4):1204-1214.
WANG Feng, LIU Zhiqiang, ZHANG Keyong, et al. Adjustable resource aggregation and scheduling in distribution transformer station areas based on time-of-use price and charge-discharge strategy of energy storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(4): 1204-1214.
- [11] 吕斌,黄丹,丁宏,等. 基于共享储能的台区多元负荷协同控制策略[J]. 电力自动化设备,2024,44(1):32-39.
LÜ Bin, HUANG Dan, DING Hong, et al. Multivariate load collaborative control strategy in transformer district based on shared energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 32-39.
- [12] 易斌,赵伟,张科杰,等. 锂电池储能在配电网低压台区的应用[J]. 储能科学与技术,2019,8(4):671-677.
YI Bin, ZHAO Wei, ZHANG Kejie, et al. Application of lithium battery energy storage in low-voltage distributed network [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(4): 671-677.
- [13] 周玉,王忠东,赵双双,等. 计及源荷时序特性的低压台区分布式光伏接入分布鲁棒优化方法[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2023,15(5):592-603.
ZHOU Yu, WANG Zhongdong, ZHAO Shuangshuang, et al.

- Distributionally robust optimization of distributed photovoltaic access in low-voltage distribution station area considering source-load timing characteristics[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2023, 15(5): 592-603.
- [14] 梅书凡,檀勤良,代美. 考虑风光出力季节性波动的储能容量配置[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 51-57.
MEI Shufan, TAN Qinliang, DAI Mei. Energy storage capacity configuration considering seasonal fluctuation of wind and photovoltaic output[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 51-57.
- [15] CHAKRABORTY S, MODI G, SINGH B. A cost optimized-reliable-resilient-realtime-rule-based energy management scheme for a SPV-BES-based microgrid for smart building applications [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(4): 2572-2581.
- [16] 刘祎泽,向月. 计及负荷转移需求响应的低碳数据中心光储容量优化配置[J/OL]. 电力自动化设备: 1-14 [2024-01-16]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202311015>.
LIU Yize, XIANG Yue. Optimal allocation of photo-voltaic and storage capacity in low carbon data center considering load transfer demand response[J/OL]. Electric Power Automation Equipment: 1-14 [2024-01-16]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202311015>.
- [17] 刘娇扬,郭力,杨书强,等. 配电网中多光储微网系统的优化配置方法[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2806-2815.
LIU Jiaoyang, GUO Li, YANG Shuqiang, et al. Optimal sizing for multi PV-ESS microgrids in distribution network[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2806-2815.
- [18] ZOU K, MOHY-UD-DIN G, AGALGAONKAR A P, et al. Distribution system restoration with renewable resources for reliability improvement under system uncertainties [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(10): 8438-8449.
- [19] 李鹏,赵亚汝,范须露,等. 适用于规划-运行两阶段的配电网可靠性等级划分及评估方法[J/OL]. 高电压技术: 1-12 [2024-01-16]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221411>.
LI Peng, ZHAO Yaru, FAN Xulu, et al. Reliability classification and evaluation method of distribution network suitable for planning-operation two stages[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-12 [2024-01-16]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221411>.
- [20] AREFI A, LEDWICH G, NOURBAKHSI G, et al. A fast adequacy analysis for radial distribution networks considering reconfiguration and DGs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 3896-3909.
- [21] 胡邦安,刘友波,许立雄,等. 考虑重构策略的配电网可靠性增值服务双层博弈模型及其求解[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9496-9509.
HU Bang'an, LIU Youbo, XU Lixiong, et al. Solution of reliability value-added service based on two-level game model considering distribution system reconfiguration strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9496-9509.
- [22] 李阳洋,关轶文,赵佳琪,等. 基于优化模型的有源配电网可靠性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 2931-2940.
LI Yangyang, GUAN Yiwen, ZHAO Jiaqi, et al. Reliability evaluation method of active distribution network based on optimization model[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 2931-2940.
- [23] SANNIGRAHI S, GHATAK S R, ACHARJEE P. Multi-scenario based bi-level coordinated planning of active distribution system under uncertain environment [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(1): 850-863.
- [24] 张晋铭,欧阳森,吴晗,等. 计及配电网可靠性和运行经济性的电网侧储能优化配置[J/OL]. 电力自动化设备: 1-11 [2024-01-16]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202312044>.
ZHANG Jinming, OUYANG Sen, WU Han, et al. Optimal configuration of grid-side energy storage considering reliability and operation economy of distribution network [J/OL]. Electric Power Automation Equipment: 1-11 [2024-01-16]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202312044>.
- [25] 刘芳,李冰,张帆. 计及配电网经济性与可靠性的电池储能系统优化配置[J]. 电力建设, 2015, 36(12): 76-83.
LIU Fang, LI Bing, ZHANG Fan. Battery energy storage system optimal allocation considering economy and reliability of distribution network [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(12): 76-83.
- [26] 山东省发展和改革委员会. 关于全面放开燃煤发电上网电价有序推进销售电价市场化改革的通知[EB/OL]. [2024-01-16]. http://fgw.shandong.gov.cn/art/2021/10/25/art_91687_10327042.html.
Shandong Development and Reform Commission. Notice on the comprehensive liberalization of on-grid electricity prices for coal-fired power generation and the orderly promotion of market-oriented reform of electricity sales prices [EB/OL]. [2024-01-16]. http://fgw.shandong.gov.cn/art/2021/10/25/art_91687_10327042.html.

作者简介:



解良彬

解良彬(2000),男,硕士在读,研究方向为储能运行与规划(E-mail:liangbin.xie@foxmail.com);

向月(1987),男,博士,教授,研究方向为电力系统规划与运营优化;

王世谦(1988),男,硕士,工程师,从事电力系统分析、电网规划工作。

(下转第 87 页)

Analytical evaluation method of reliability considering interaction between transmission network and flexible interconnected distribution network

SHI Mingming¹, LIU Ruihuang¹, ZHANG Chenyu¹, ZHU Weiping², GE Xuefeng¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: When applying the fault enumeration method to evaluate the reliability of the whole transmission and distribution network composed of transmission network and flexible interconnected distribution network, apart from analyzing the influence of internal faults of the transmission network and distribution network on their respective power supply reliability, the interaction between the transmission network and distribution network should also be considered under the fault scenario. Based on existing independent reliability evaluation algorithms for the transmission network and distribution network, the reliability evaluation method for the whole transmission and distribution network is proposed in this paper. The proposed method in this paper can account for the interrelation between the operation states of the transmission network and the distribution network under the fault condition. The node load reduction after the failure of the transmission network is refined into the optimized load cutting scheme of the distribution network. While improving the accuracy of the reliability evaluation results of the transmission network, the load loss of the distribution network caused by the failure of the transmission network is included in the reliability evaluation of the distribution network. In addition, the load loss caused by internal faults of the distribution network and its influence on the reliability of the transmission network are included in the reliability evaluation of the transmission network. For the whole transmission and distribution network, the reliability index of the transmission and distribution network is calculated by the analytical method based on fault enumeration. The validity of the reliability evaluation model is verified by the results of the numerical analysis.

Keywords: reliability evaluation; flexible interconnected distribution network; transmission network; fault enumeration; load shedding; reconfiguration under fault

(编辑 钱悦 方晶)

(上接第 66 页)

Optimization configuration of energy storage in distribution feeders considering economy and reliability

XIE Liangbin¹, XIANG Yue¹, WANG Shiqian², LI Qiuyan², LIU Fang³

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Henan Electric Power Company Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

3. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: The capacity of distributed photovoltaic impacts the safe and reliable operation of the distribution network. Energy storage in distribution feeders has emerged as a pivotal solution for consuming distributed photovoltaic. However, it is challenged to balance the economic viability of energy storage investing and grid reliability. In response, a method of optimizing the configuration of energy storage in distribution feeders based on the new model of counter configuration of the renewables from energy storage is proposed, which takes into account both the economy and reliability aspects. Firstly, an economic model for optimizing energy storage in distribution feeders is established. Secondly, a grid reliability simulation is performed based on the results of the economic optimization of energy storage in distribution feeders. Finally, considering the comprehensive indexes of economy and reliability, the different nodes are evaluated for site selection using technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS), and the energy storage configuration scheme is determined by the cumulative distribution curve. The simulation results show that the consuming capacity of distributed photovoltaic in the distribution feeders is effectively improved, and better balance the economic viability of energy storage investing with grid reliability, which can be used as a reference for the reasonable determination of ratios of the energy storage for renewables.

Keywords: reliability; economy; energy storage in distribution feeders; site and size; energy storage configuration ratio; consuming photovoltaic

(编辑 吴昊)