

基于负荷裕度评估的港口微电网拓扑结构优化方法

刘晨

(中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要: 针对港口电网静态电压稳定性提升问题, 提出一种基于线路开断参数的系统拓扑结构优化方法。建立港区线路开断控制策略的识别与优化模型, 创新性地融合线性灵敏度分析与非线性拟合技术: 首先采用灵敏度指标对候选控制措施进行快速筛选; 继而构建非线性回归模型实现控制策略的精准排序; 最终通过仿真计算确定最优线路开断方案。以尼日利亚莱基港真实电网为研究对象, 搭建了包含 11 kV 主网和 400 V 配网的试验仿真平台, 通过验证表明: 所提方法较传统连续潮流法(CPFLOW)可降低 68% 的负荷裕度计算耗时, 且控制策略排序吻合度达到 92.3%。研究成果为港口电网电压稳定控制提供了兼具计算效率与工程适用性的解决方案, 已成功应用于该港区电网升级改造工程。

关键词: 线路开断; 港口微电网; 负荷裕度; 线性灵敏度; 非线性拟合

中图分类号: U653.95

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2025)07-0023-07

doi: 10.7640/zggwjs202507004

A topology optimization method for port microgrids based on load margin assessment

LIU Chen

(China Harbour Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: To improve the static voltage stability of port power network, a topology optimization method based on line disconnection parameters is proposed. By establishing an identification and optimization model of line disconnection control strategies in the port area, it innovatively integrates linear sensitivity analysis and nonlinear fitting techniques: Firstly, sensitivity indicators are used to quickly screen candidate control measures; then, a nonlinear regression model is constructed to accurately rank control strategies; finally, the optimal line disconnection scheme is determined through simulation calculations. Taking the real power grid of the Lekki Port in Nigeria as the research object, an experimental simulation platform including the 11 kV main grid and the 400 V distribution grid was built. The verification shows that the proposed method can reduce the calculation time of load margin by 68% compared with the traditional continuation power flow method(CPFLOW), and the matching degree of control strategy ranking reaches 92.3%. The research results provide a solution for voltage stability control in port power grids that is both computationally efficient and applicable in engineering. It has been successfully applied to the power grid upgrade and transformation project of this port area.

Key words: line disconnection; microgrid for port; load margin; linear sensitivity; nonlinear fitting

0 引言

静态稳定控制作为电力系统规划与可靠性的

核心研究课题, 其技术实施面临显著挑战。随着现代电网运行复杂性的持续提升, 维持系统安全

收稿日期: 2025-02-13 修回日期: 2025-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(51307035, 62073095)

作者简介: 刘晨(1983—), 男, 北京市人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为港湾自动化。E-mail: 15801671243@163.com

稳定运行已成为电力工程领域的关键研究方向。近年来全球范围内频发的大规模停电事故(如2025年智利电网崩溃、2024年巴黎大停电及2021年美国德州电力中断^[1-2])表明,继电保护装置动作引发的系统解列往往导致供需失衡与频率失稳,其中静态失稳常构成事故发展的主导因素,这凸显了开展电力系统静态稳定分析与控制研究的迫切性。

在静态稳定控制策略方面,现有研究主要聚焦于以下技术路径:1)补偿与调节技术,包括无功补偿装置部署、变压器分接头调节等。文献[3]—文献[4]通过并联电容器补偿解决了不对称故障(单相/两相短路)导致的输电容量衰减问题。2)运行优化方法,涉及发电计划动态调整与负荷控制。刘科研等^[5]构建了发电再调度与负荷切除协同优化模型;丁佳乐等^[6]进一步引入经济性指标建立多目标优化框架。3)稳定性增强算法。

电网拓扑作为另一重要控制维度,其技术实现主要依托线路投切操作^[7]。该技术通过改变网络结构参数影响节点电压与支路潮流分布,在消除线路过载、提升负荷裕度等方面具有显著效果。文献[8]建立了输电线路切换的数学描述框架,系统梳理了其在越限校正中的应用范式。文献[9]—文献[10]分别验证了该技术在缓解线路过载和降低网损方面的工程价值,文献[11]创新性地将线路切换与发电调度相结合,构建了线性规划优化模型。

电网线路投切的变化影响节点电压和母线功率的流动,进而改变系统的负荷裕度,同时改造力度小,调节性好,因此通过改变线路开断状态可以有效遏制电网中的母线电压越限,以增强系统稳定性。与此同时,线路的投切虽然可以改变电网负荷裕度,但是其效果却需要进行计算,通过传统连续潮流法(CPFLOW)可以得到系统的负荷裕度,但计算量较为巨大。

对于港口而言,由于货轮到港的时间并不固定,港口24h的用电量较为复杂多变。考虑经济性因素,发电机组不可保持固定数量投运。因此港口为了应对岸桥供电问题,设计岸桥与发动机组自动化系统,根据需要启动的岸桥数量,定量启动柴油发电机组。这种情况下,由于港区离网孤岛的工作状态,电网潜在的静态稳定性风险便不能忽视。在静态电压稳定性分析中,负荷裕度指标可有效量化系统当前运行点至电压崩溃临界

点的安全边界。其定义为:在特定增长方向上,系统各负荷节点可承受的有功功率最大增长量。本研究选取负荷裕度作为核心评估指标,重点关注负荷有功功率增长模式下的裕度特征。

在求解过程中,用传统 CPFLOW 等算法求解系统负荷裕度的思路为:将每个线路投切措施都视为一种备选工况,首先获取当前电力系统的运行情况,进行 CPFLOW 计算获得系统的功率-电压曲线($P-V$ 曲线),进而得到系统的负荷裕度。这样得到的结果非常精准,但需要对每一个工况都进行计算,工作量巨大。

考虑到系统的复杂程度,本文做出了改进:将开断线路的参数纳入考虑,对 CPFLOW 进一步拓展,面向线路投切措施,提出三段式的电网拓扑结构优化方法。1)应用线性灵敏度对措施进行扫描和筛选;2)采用非线性拟合对措施进行排序;3)对前列控制措施进行计算,确定最佳的线路开断控制措施。

1 工程概况

莱基港为离网式的三相交流微电网,由柴油发电机组进行港口供能,电网频率为50 Hz,拓扑形式为单母线分段供电。系统共有关键母线6组12条,整体划分为3个用电区域,共有配电线路148条,具体网络布局如图1所示。供电区域包括2组由4台2 080 kW的柴油发电机组组成的发电机组,供电电压水平为11 kV;区域SS1为生活区,电压水平为0.4 kV,由2台800 kVA的变压器供电,负责港口各楼宇的配电与停车棚等户外设备;区域SS2为冷藏库等配套设施供电区域,电压水平为0.4 kV,由2台2 000 kVA的变压器供电;区域SS3为码头作业供电区,码头共配有1 800 kW的常驻岸桥7台,全部投运后占系统总装机容量的80%,码头配套设施由2台400 kVA的变压器供电,电压水平为0.4 kV。

港口岸桥平常状态为闲置,当有货轮到港时,按需启动岸桥作业,图2为2024年3月某日的港口用电真实采集数据,间接地反映了货轮到港时间的不确定性。

通过监测数据可知,受国际货轮到港时间随机性影响,港口日间峰谷负荷差高达3 500 kW。若采用柴油发电机组持续高负荷运行策略,将导致日均电能冗余率超过50%,严重降低能源利用效率。为此,港口运营方实施动态启停控制策略:

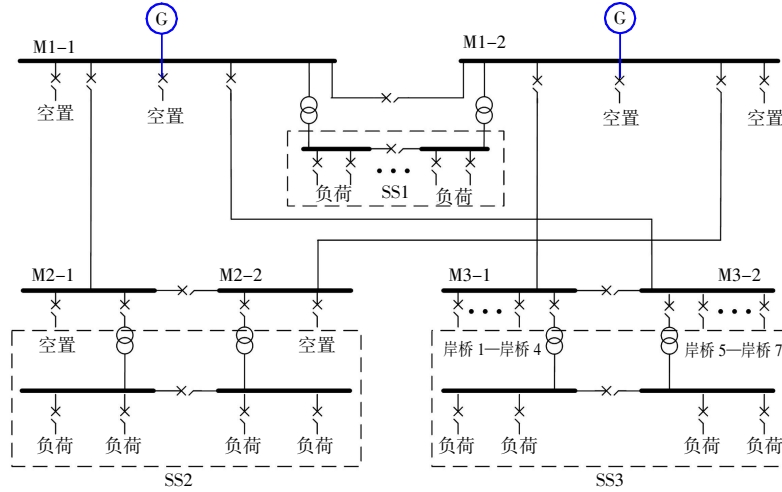


图 1 港口配电网示意图

Fig. 1 Port power distribution network schematic diagram

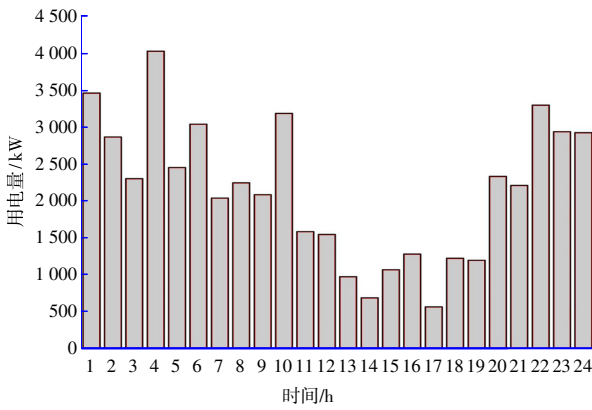


图 2 港口 24 h 用电量

Fig. 2 Port's 24-hour electricity consumption

基于船舶提供的预抵港时间数据，根据岸桥调度系统的作业需求预测，动态启停发电机组。该策略虽有效解决电能过剩问题，但受限于发电机组热备用容量（常低于额定功率的 15%）及发电机冷启动时间（平均需 8~12 min），系统面临不可忽视的电压失稳风险。面对众多可开断的线路，如何快速准确地进行开断方案的选择是关键，因此提出针对线路开断的三段式负荷裕度评估算法，旨在通过高效快速的港口微电网拓扑结构优化，提升静态电压稳定性，即提高系统的负荷裕度。

2 负荷裕度评估算法研究

2.1 基于灵敏度的负荷裕度评估方法

本节推导的基于灵敏度分析的负荷裕度评估方法，可以初步判断线路的开断行为会使系统负荷裕度产生上升还是下降，进而实现线路切断行为的快速初步筛选。核心机理是通过量化线路开断对临界崩溃点(SNB)，即鞍节点分岔点位置的

影响，建立负荷裕度变化的线性预测模型。微电网系统参数化表示，描述系统在负荷增长模式下的稳态运行状态的潮流方程 f 见式(1)。

$$0=f(\mathbf{x}, p, \lambda)=f(\mathbf{x}, p)-\lambda b \quad (1)$$

式中： \mathbf{x} 为系统电压状态向量； λ 为一个可变的连续参数，这里为负荷增长系数，可近似等效为负荷裕度； p 为系统开断线路参数（线路电导、电纳或者对地容纳）； b 为实际和无功功率负载需求的变化以及实际发电量的变化；以 SNB 为对象，将式(1)进行泰勒级数展开，可得到：

$$0=\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \Delta \mathbf{x}+\frac{\partial f}{\partial p} \Delta p+\frac{\partial f}{\partial \lambda} \Delta \lambda \quad (2)$$

式中： $\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}}$ 为系统在 SNB 点的雅可比矩阵，其本身奇异，存在一个对应雅可比矩阵 $\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}}$ 零特征值的左特征向量 ω ； $\frac{\partial f}{\partial p}$ 为连续潮流方程对 p 的偏导； $\frac{\partial f}{\partial \lambda}$ 为式(1)对 λ 的偏导数； $\Delta \mathbf{x}$ 、 Δp 、 $\Delta \lambda$ 为对应值的变化量。

设 SNB 点的 $\mathbf{x}-\lambda$ 坐标为 $(\mathbf{x}^*, \lambda^*)$ ，此时系统的 $\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}}$ ，即 $\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}(\mathbf{x}^*, \lambda^*)}$ 奇异，因此满足：

$$\omega \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}(\mathbf{x}^*, \lambda^*)}=0 \quad (3)$$

将式(3)应用于式(2)，可得：

$$\omega \left(\frac{\partial f}{\partial p} \Delta p + \frac{\partial f}{\partial \lambda} \Delta \lambda \right) = 0 \quad (4)$$

进一步进行处理，得到系统在 SNB 处的 $\Delta \lambda$ ：

$$\Delta \lambda = \frac{\partial \lambda}{\partial p} \Delta p = -\omega \frac{\partial f}{\partial p} \Delta p / \omega \frac{\partial f}{\partial \lambda} \quad (5)$$

令式(5)对象为开断的输电线路,则 $\Delta\lambda$ 的正负可以用于判断开断线路的灵敏度,其值大于 0 则灵敏度为正,小于 0 则灵敏度为负。线路开断时, p 值会发生显著变化。假设开断方案对象为线路 $i-j$,此时参数 p_{ij} 仅与线路两端节点 i 和节点 j 的有功功率平衡方程和无功功率方程有关,即 p_{ij} 不为 0,其余节点不与线路 $i-j$ 关联。因此矩阵 $\frac{\partial f}{\partial p}$ 中的非零元素 $\frac{\partial \Delta P_i}{\partial p_{ij}}$, $\frac{\partial \Delta P_j}{\partial p_{ij}}$, $\frac{\partial \Delta Q_i}{\partial p_{ij}}$ 和 $\frac{\partial \Delta Q_j}{\partial p_{ij}}$ 的表达式为:

$$\Delta P_i = P_{0i} - V_i^* \sum_{j=1}^n V_j^* (G_{ij} \cos \theta_{ij}^* + B_{ij} \sin \theta_{ij}^*) + \lambda^* (\Delta P_{Gi} - \Delta P_{Li}) = 0 \quad (6)$$

$$\Delta Q_i = Q_{0i} - V_i^* \sum_{j=1}^n V_j^* (G_{ij} \sin \theta_{ij}^* + B_{ij} \cos \theta_{ij}^*) + \lambda^* (-\Delta Q_{Li}) = 0 \quad (7)$$

$$\Delta P_j = P_{0j} - V_j^* \sum_{i=1}^n V_i^* (G_{ji} \cos \theta_{ji}^* + B_{ji} \sin \theta_{ji}^*) + \lambda^* (\Delta P_{Gj} - \Delta P_{Lj}) = 0 \quad (8)$$

$$\Delta Q_j = Q_{0j} - V_j^* \sum_{i=1}^n V_i^* (G_{ji} \sin \theta_{ji}^* + B_{ji} \cos \theta_{ji}^*) + \lambda^* (-\Delta Q_{Lj}) = 0 \quad (9)$$

式中: n 为系统节点数目; V_i 为节点 i 的电压值, V_i^* 为系统在 SNB 点时 V_i 的值; V_j 为节点 j 的电压值; V_j^* 为系统在 SNB 点时 V_j 的值; λ^* 为系统在 SNB 点时 λ 的值; ΔP_i 和 ΔQ_i 分别为线路开断前后流向节点 i 的有功功率与无功功率; ΔP_j 和 ΔQ_j 分别为线路开断前后流向节点 j 的有功功率与无功功率; P_{0i} 和 Q_{0i} 分别为线路开断前流向节点 i 的有功功率与无功功率; P_{0j} 和 Q_{0j} 分别为线路开断前流向节点 j 的有功功率与无功功率; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的网络导纳的实部与虚部; G_{ji} 和 B_{ji} 分别为节点 j 和节点 i 之间的网络导纳的实部与虚部,数值与 G_{ij} 和 B_{ij} 相同,仅计算意义不同; θ_{ij}^* 为节点 i 和节点 j 之间的电压相角差值; θ_{ij}^* 为系统在 SNB 点时 θ_{ij} 的值; θ_{ji} 和 θ_{ji}^* 同理; ΔP_{Gi} 为节点 i 的发电机注入有功变化趋势; ΔP_{Li} 和 ΔQ_{Li} 分别为节点 i 的有功负荷与无功负荷增加量; ΔP_{Gj} 为节点 j 的发电机注入有功变化趋势; ΔP_{Lj} 和 ΔQ_{Lj} 分别为节点 j 的有功负荷与无功负荷增加量。

将式(6)一式(9)分别对线路 $i-j$ 参数进行求导,则有:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial p_{ij}} \Delta p_{ij} &= \frac{\partial \Delta P_i}{\partial g_{ij}} \times (-g_{ij}) + \frac{\partial \Delta P_i}{\partial b_{ij}} \times (-b_{ij}) + \frac{\partial \Delta P_i}{\partial b_{i0}} \times (-b_{i0}) \\ &= V_i^* V_j^* \cos \theta_{ij}^* \times (g_{ij} + \sin \theta_{ij}^* \times b_{ij}) - V_i^* \times b_{i0} \\ &= P_{ij} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial p_{ij}} \Delta p_{ij} &= \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial g_{ij}} \times (-g_{ij}) + \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial b_{ij}} \times (-b_{ij}) + \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial b_{i0}} \times (-b_{i0}) \\ &= Q_{ij} \end{aligned} \quad (11)$$

同理可得到:

$$\frac{\partial \Delta P_j}{\partial p_{ji}} \Delta p_{ji} = P_{ji} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \Delta Q_j}{\partial p_{ji}} \Delta p_{ji} = Q_{ji} \quad (13)$$

式中: p_{ij} 为线路 $i-j$ 之间的参数; Δp_{ij} 为 p_{ij} 的变化量; g_{ij} 和 b_{ij} 为 p_{ij} 的一部分,分别为支路电导和支路电纳; b_{i0} 为线路对地电纳的一半。 p_{ji} 数值与 p_{ij} 一致,仅计算意义不同; Δp_{ji} 为 p_{ji} 的变化量; P_{ij} 、 P_{ji} 分别为线路 $i-j$ 与线路 $j-i$ 的支路有功功率; Q_{ij} 、 Q_{ji} 分别为线路 $i-j$ 与线路 $j-i$ 的支路无功功率。

定义 $\tilde{\omega} = -\omega / \omega \frac{\partial f}{\partial \lambda} = -\omega / \omega b$ 用于简化公式,

则线路 $i-j$ 开断后,系统中 λ 的变化量 $\Delta \lambda_{ij}$ 为:

$$\Delta \lambda_{ij} = \tilde{\omega}^P P_{ij} + \tilde{\omega}^Q Q_{ij} + \tilde{\omega}^P P_{ji} + \tilde{\omega}^Q Q_{ji} \quad (14)$$

式中: $\tilde{\omega}^P$ 和 $\tilde{\omega}^Q$ 为代表节点 i 有功和无功功率方程在向量 $\tilde{\omega}$ 中的元素; $\tilde{\omega}^P$ 和 $\tilde{\omega}^Q$ 同理。

本节的灵敏度方法目的是对所有备选的线路开断措施进行扫描,若断开线路 $i-j$ 后 $\Delta \lambda_{ij}$ 为正,则保留该备选措施,否则划为非目标措施,不进入下一步。

2.2 基于 look-ahead 的负荷裕度计算方法

通过灵敏度分析对线路开断工况进行筛选,筛选出那些在切断后可能提升负荷裕度的线路。灵敏度分析虽然可以对候选切断线路进行初步的定性判断,但无法提供切断操作的定量分析。因此,本研究转而采用 look-ahead 负荷裕度法,对筛选出的线路进行负荷裕度的估算。该方法依据的是在鞍结点分岔附近的 $P-V$ 曲线可以近似看作是二次曲线的一部分,从而进行负荷裕度的计算和评估。

不同于传统的曲线拟合方法,look-ahead 负荷裕度计算技术仅利用 2 个潮流解(($V_{i,1}, \lambda_1$)、($V_{i,2}, \lambda_2$))以及第二个潮流解对负荷裕度的导数 $\dot{V}_{i,2}$ 估算负荷裕度。为了提高拟合精度,同时鉴于各节点的 $P-V$ 曲线存在差异,look-ahead 技术在 2

个潮流解 $(V_{i,1}, \lambda_1)$ 与 $(V_{i,2}, \lambda_2)$ 位置选取上, 推荐以负荷节点电压幅值变化量 ΔV_i 最大的点作为参照, 开展 $P-V$ 曲线拟合, 以此获取负荷裕度的预估, 因此, 节点 i 的选择标准遵循式(15)所示:

$$\Delta V_i = \max\left(\frac{V_{i,1} - V_{i,2}}{V_{i,1}}\right) \quad (15)$$

式中: λ_1 与 λ_2 为选取的潮流解对应的系统负荷裕度; $V_{i,1}$ 与 $V_{i,2}$ 为其对应的系统崩溃电压值, 将解代入二次曲线方程得:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \alpha + \beta V_{i,1} + \gamma V_{i,1}^2 \\ \lambda_2 &= \alpha + \beta V_{i,2} + \gamma V_{i,2}^2 \end{aligned} \quad (16)$$

$$1 = \beta \dot{V}_{i,2} + 2\gamma \dot{V}_{i,2} V_{i,2}$$

求解方程(16)可得计算系数 α 、 β 和 γ 。因此负荷裕度估算值 λ_0 可用式(17)估算:

$$\lambda_0 = \alpha - \beta^2 / 4\gamma \quad (17)$$

若 λ_0 与第二个解的 λ_2 符合验证公式:

$$\frac{\lambda_0 - \lambda_2}{\lambda_0} \leq \varepsilon \quad (18)$$

式中: ε 为较小的实数。

那么最终的负荷裕度即为 λ_0 ; 若式(18)不成立, 说明 λ_2 与SNB距离过远, 此时应使用新的选择式(19)选定一个新的潮流解作为新的第二个潮流解。

$$\Delta \lambda = \mu(\lambda_0 - \lambda_2) \quad (19)$$

式中: $\mu < 1$ 为步长控制系数。

通过预测和校正环节计算出新的潮流解 \tilde{x}_2 :

$$\frac{dx}{d\lambda} = -\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial \lambda} \quad (20)$$

$$\tilde{x}_2 = x_2 + \Delta \lambda \frac{dx}{d\lambda} \quad (21)$$

式(20)由连续潮流方程 f 对状态向量 x 导数得到, 将式(19)和式(20)代入式(21)得到状态向量 x 的预测解 \tilde{x}_2 。而校正则将预测解 \tilde{x}_2 作为启动值, 应用潮流解法迭代收敛至校正解 x_2 。

采用 look-ahead 的非线性评估技术, 对阶段一中保留的开断线路进行负荷裕度估算, 随后依据估算结果, 对开断措施进行排序。最后采用 CPFLOW 对排序中排名靠前的线路进行精确的负荷裕度计算, 据此明确每条开断线路的最终负荷裕度, 并对其进行最终排序。

2.3 方法应用流程

本文提出的基于线路开断的港口微电网拓扑结构优化方法包括 3 个阶段。需要的数据为当前

电力系统的参数与切断线路方案集合。考虑实际工程环境真实变化的情况下, 还需要负荷增长预测数据与电力系统发电调度计划。

1) 阶段 1: 基于灵敏度的裕度筛选

在针对待切线路方案集合进行遍历扫描过程中, 筛选出那些会导致负荷裕度减少的方案予以排除。此环节采取线性灵敏度分析方法, 对全部候选方案逐一进行评估筛选。

2) 阶段 2: 基于 look-ahead 的裕度估算

对筛选出的候选切断方案实施量化及排列作业。此阶段采纳非线性的 look-ahead 策略, 对阶段 1 筛选的方案进行负荷裕度分析, 依据分析结果对方案进行排序处理。

3) 阶段 3: CPFLOW 精准计算

利用 CPFLOW 方法对阶段 2 排序出的靠前方案进行精准的负荷裕度计算, 并重新排序, 最终获得多个开端线路的方案优解。

3 仿真模型构建

基于三阶段优化框架, 本研究的仿真模型构建重点考虑算法实现的工程适配性。在 ETAP21.0.1 平台中建立具有以下特征的混合电网模型。

1) 节点类型配置: 严格区分 PQ 节点(生活区 SS1、冷藏区 SS2)与 PV 节点、平衡节点(发电机组母线), 确保式(1)潮流方程中状态向量 x 的准确建模;

2) 支路参数结构化: 148 条可开断线路的导纳矩阵按式(10)一式(13)规范录入, 其中线路的 g_{ij} 、 b_{ij} 和电压等参数设置误差阈值要求 $<0.1\%$, 满足灵敏度计算要求;

3) 运行场景映射: 设置负荷和发电机组的基准工况, 对应式(6)一式(9)中的 ΔP_{Li} 、 ΔP_{Gi} 初始值;

4) 算法接口开发: 通过 ETAP 的 API 实现, 包括阶段 1 的自动灵敏度扫描(调用式(14)计算 $\Delta \lambda_{ij}$), 阶段 2 的 look-ahead 参数交互(动态获取式(16)所需的数据), 阶段 3 的 CPFLOW 分批处理计算。

模型验证机制为设置双重校验层。

1) 底层参数校验: 对比 ETAP 导纳矩阵与式(10)一式(13)理论值的最大偏差 $<0.1\%$;

2) 算法过程校验: 阶段 1 筛选出的 48 条线路均通过式(14)的 $\Delta \lambda_{ij} > 0$ 验证。

该建模方法确保: 灵敏度分析可直接调用线路 $i-j$ 的 P_{ij} 、 Q_{ij} 实时数据, look-ahead 拟合计算

锁定式(15)定义的 ΔV_i 节点并利用式(18)进行校验, CPFLOW 计算与理论雅可比矩阵保持收敛一致性。

图 3 为搭建的港口仿真模型, 根据所研究的

问题, 仿真模型做出以下假设:

- 1) 模型中包含 7 台岸桥起重机, 计算负荷裕度时按照真实情况取平均值投入 4 台;
- 2) 模型中包含 8 个柴油发电机, 计算负荷裕度

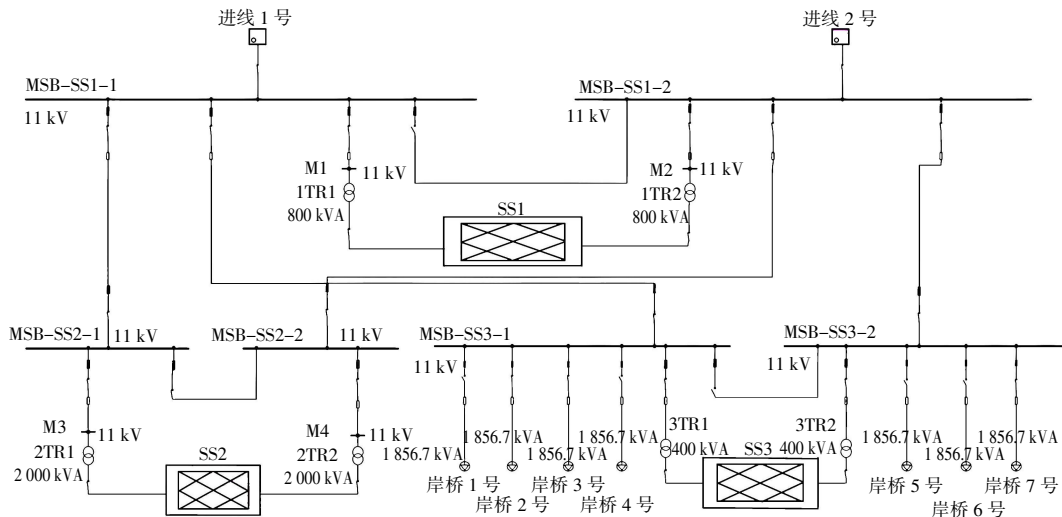


图 3 港口仿真模型

Fig. 3 Port simulation model

度时按照岸桥投运情况投入 4 台运行;

3) 容量规模较小且对系统影响微弱的局部配电网用负荷模型进行等效代替。

港口仿真模型共有可开断线路 148 条, 分别编号为 1 号—148 号, 每条可开断线路皆视为一种方案投入阶段 1, 进行基于灵敏度的裕度筛选, 筛选结果投入阶段 2, 进行基于 look-ahead 的裕度估算, 最终结果与传统 CPFLOW 算法进行对比分析。

4 模型验证及应用

4.1 仿真验证

分别应用提出的线路投切筛选方法与传统的 CPFLOW 方法对港区码头 SS3 的电力系统进行分析, 结果如图 4 所示。

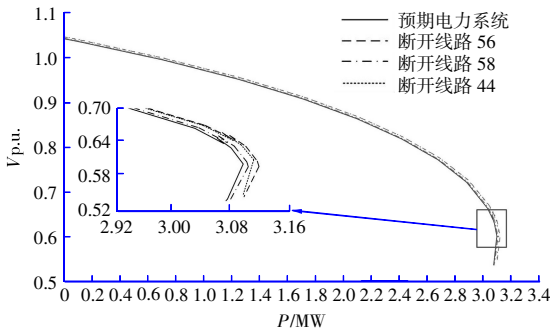


图 4 负荷裕度对比曲线

Fig. 4 Load margin comparison curve

1) 阶段 1 后, 灵敏度为负的方案被去除, 最后得到 48 种灵敏度为正的方案, 计算量降低 68%;

2) 根据阶段 2 的方法估算出的各工况的负荷裕度, 进行方案排序, 其中前 5 名为优解;

3) 使用 CPFLOW 方法对所有方案进行精准计算后取出阶段 2 中 5 种方案的负荷裕度与排序并与第 2 步的结果进行比较, 判断方法的合理性。

预期电力系统及负荷裕度前 3 的开断工况的负荷裕度曲线如图 4 所示, 负荷裕度前 5 的开断工况的数据见表 1。

表 1 工况排序结果

Table 1 Operating condition sorting results

阶段 2 排序	开断线路	负荷裕度/MW		阶段 3 CPFLOW 排序
		look-ahead	CPFLOW	
1	56	3.118	3.217	2
2	44	3.111	3.226	1
3	58	3.109	3.133	5
4	32	3.108	3.198	3
5	37	3.103	3.167	4

预期电力系统的负荷裕度为 3.096 MW, 阶段 2 排序第 1 的开断工况为线路 56, 负荷裕度为 3.118 MW, 增长了 22 kW; 阶段 2 排序第 2 的开断工况为线路 44, 负荷裕度为 3.111 MW, 增长了 15 kW; 阶段 2 排序第 3 的开断工况为线路 58, 负荷裕度为 3.109 MW, 增长了 13 kW。

表 1 展示了采用本文方法所得到的开断线路负荷裕度, 并进行了排序。为进一步验证方法的精度, 采用传统 CPFLOW 方法进行验证计算, 所得结果进行了比较, 可以发现吻合度高达 92.3%, 满足基础精度要求。

4.2 实施效果验证

根据表 1 仿真结果, 实际工程中可以选取负荷裕度提升前 3 位的线路开断方案(线路 56、线路 44、线路 58)进行实施。具体应用设计策略如下:

1) 动态投切机制: 建立基于负荷预测的智能投切系统, 当监测到系统负荷裕度低于 3.0 MW 时自动触发线路开断操作, 优先执行线路 56 开断, 其次为线路 44, 形成分级响应机制。

2) 运行约束处理: 结合 N-1 安全准则, 验证开断后系统仍满足关键负荷供电可靠性要求(SS3 区域岸桥供电中断率 $<0.1\%$), 配套实施变压器分接头自动调节($\pm 5\%$ 调压范围)补偿线路开断造成的局部电压波动。

实际监测数据显示裕度均值达 3.211 MW, 较理论值 3.217 MW 偏差仅 0.19%, 验证了模型精度。通过三阶段筛选机制, 决策耗时从传统方法的 38 min 降至 12 min, 满足港口岸桥突加载荷的快速响应需求(<15 min 冷启动时间窗口要求)。

5 结语

研究提出并验证了一种面向港口微电网的复合式评估框架, 取得 3 方面成果突破:

1) 方法创新性: 对比传统 CPFLOW 方法, 构建“线性筛选-非线性排序-精准计算”三阶段架构, 通过灵敏度指标筛选(计算量缩减 68%)与 look-ahead 非线性拟合(数据吻合度 92.3%), 在保障精度的同时实现决策耗时降低 68%;

2) 工程可行性: 基于莱基港电网的实例模型验证, 该方法可以使电压稳定裕度有效提升, 算法与传统方法数据吻合度高达 92.3%;

3) 技术通用性: 参数化模型兼容 11 kV/400 V 混合网架, 适配多类型发电机组, 核心模型已封装进 ETAP, 形成可迁移的微电网分析工具集。

研究成果为港口等特殊场景的电网优化提供了兼顾效率与精度的新范式, 其模块化设计对可再生能源高渗透电网的规划运行具有普适指导意义。未来的研究将进一步关注方法的拓展, 在面对多条线路的开断工况时, 方法的应用有待探

讨。同时, 电网实际运行中真实条件的限制会使系统理论模型的目标函数更加复杂, 如何加入合适的限制条件使得结果更加准确是未来的研究方向。

参考文献:

- [1] 邵超峰, 鞠美庭. 国内外生态港口建设现状分析及启示[J]. 中国港湾建设, 2012, 32(1): 68-73.
SHAO Chao-feng, JU Mei-ting. Analysis of status-quo of ecological port construction at home and abroad and its enlightenments[J]. China Harbour Engineering, 2012, 32 (1): 68-73.
- [2] WISZNIEWSKI A. New criteria of voltage stability margin for the purpose of load shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1367-1371.
- [3] TAN B, ZHAO J, XIE L. Transferable Deep Kernel Emulator for Probabilistic Load Margin Assessment With Topology Changes, Uncertain Renewable Generations and Loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(6): 5750-5754.
- [4] BHARATI A K, AJJARAPU V. Investigation of relevant distribution system representation with DG for voltage stability margin assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2072-2081.
- [5] 刘科研, 董伟杰, 叶学顺, 等. 基于序阻抗法的配电线路参数识别与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(10): 1964-1971.
LIU Ke-yan, DONG Wei-jie, YE Xue-shun, et al. Research on distribution line identification and simulation based on sequence impedance method[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(10): 1964-1971.
- [6] 丁佳乐, 熊航. 调度运行工作对电网安全稳定的重要性研究[J]. 电工技术, 2024(S1): 134-136.
DING Jia-le, XIONG Hang. Research on the importance of dispatching operation work for power grid safety and stability[J]. Electric engineering, 2024(S1): 134-136.
- [7] ZHOU Y, AJJARAPU V. A fast algorithm for identification and tracing of voltage and oscillatory stability margin boundaries[C]// Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 934-946.
- [8] GAO H, WANG L, YANG D, et al. Mechanism enhanced data-driven method for reliability improvement of load margin estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 3715-3724.
- [9] CAI G, GAO H, YANG D, et al. Synchrophasor-based online load margin estimation using incremental learning assisted light GBM in smart grid[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(3): 4660-4670.
- [10] 高郭冰, 王蕾, 刘洋, 等. 利用电网拓扑优化提高含风电系统的静态电压稳定性[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27(4): 63-71.
GAO Guo-bing, WANG Lei, LIU Yang, et al. Static voltage stability improvement of wind power system by network topology optimization[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2022, 27(4): 63-71.
- [11] KRISHAN R, ROHITH Y. Load and generation converters control strategy to enhance the constant power load stability margin in a DC microgrid[J]. IEEE Access, 2024, 12: 35972-35983.