

[输电线路]

基于绝对潮流因子与优劣解距离法的电网关键薄弱线路辨别

文/彭明伟 钟斌斌 宁康红 周啸波
中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司

受电网潮流因子影响因素复杂性的影响，对电网关键薄弱线路的辨别结果准确性偏低，因此提出基于绝对潮流因子与优劣解距离法的电网关键薄弱线路辨别技术。在充分考虑发电机传输到负荷点的有功功率对于潮流因子影响的基础上，对电网绝对潮流因子状态进行分析。测试结果表明，该方法负荷削减量较低、潮流转移熵和有效效能百分比较高，能够切实实现对电网关键薄弱线路的精准辨别。

电网实际运行过程中，各级网络需要完成功率交换。受供电覆盖范围影响，这种交换发生的频率呈现愈加频繁的发展趋势。由此造成部分电网线路处于极限工作状态，对于长距离、大容量的线路而言，一旦发生故障断开，将带来极为严重的损失。

针对上述问题，以电网关键薄弱线路辨识为基础的相关研究受到越来越多的关注。文献[1]提出基于复杂网络与运行因素的电网薄弱点辨识方法，获取节点度指标和节点介数指标；采用组合赋权法分配指标权重，完成电网薄弱点辨识。但是，该方法在精准度方面仍存在一定不足。文献[2]提出基于改进离差最大化方法的电网关键线路综合辨识，设定电压稳定性、容量裕度、实时故障率和拓扑联系度等指标，结合系统失负荷量最小控制策略衡量线路故障下系统供电能力，完成电网关键线路综合辨识。但是，该方法受客观环境状态的影响较为明显。文献[3]提出基于电压幅值偏差的电力系统薄弱节点识别方法，划分电力系统节点电压数据集，结合电压幅值偏差计算负荷母线无功功率，提取电力系统薄弱节点特征，完成电力系统薄弱节点识别。但是，该方法计算算力有待提升。

在上述基础上，本文提出基于绝对潮流因子与

优劣解距离法的电网关键薄弱线路辨别技术研究，并设置消融实验和对比实验，从多个角度分析验证设计辨识技术的性能。

电网关键薄弱线路辨别技术设计

1. 电网绝对潮流因子分析

对于实际的电网环境而言，输电线路是实现发电机-负荷对之间电能传输的主要载体，受线路的实际状态和配置影响，对应的电能传输功率存在不同程度的差异。其中，输电线路中形成的实际潮流如图1所示。

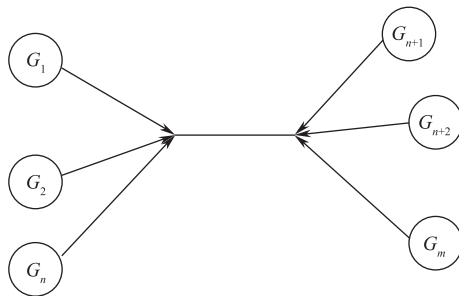


图1 潮流形成方式示意图

线路潮流主要是由于分布在线路两侧的发电机输出反向电流形成的。本文在对单一发电机-负荷对

下的情况进行分析时，对于线路潮流因子的计算过程中，充分考虑了发电机 m 传输到负荷点 n 的有功功率对于潮流因子的影响^[4]。因此，在对其进行具体计算的过程中，可以表示为

$$B_l = \sum_{m \in G} \sum_{n \in L} \min(S_m, S_n) \frac{P_l(m, n)}{P(m, n)} \quad (1)$$

式中， B_l 为线路 l 的绝对潮流因子； $P(m, n)$ 为发电机 m 传输到负荷点 n 的有功功率参数； $P_l(m, n)$ 为 $P(m, n)$ 中线路 l 的部分； $\min(S_m, S_n)$ 为 (m, n) 发电机-负荷对于线路 l 的绝对潮流因子的最小分量参数； G 为线路 l 对应的所有发电机； L 表示线路 l 对应的所有负荷。

2. 电网关键薄弱线路辨别

在对电网绝对潮流因子影响因素进行赋权时，首先构建了电网绝对潮流因子影响因素原始矩阵^[5]，可以表示为

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{j1} & \cdots & a_{ji} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中， A 为电网绝对潮流因子影响因素原始矩阵； a_{ji} 为第 j 个电网绝对潮流因子状态的第 i 个影响因素。

那么，对于第 j 个电网绝对潮流因子状态而言，第 i 个影响因素在其整体状态中所占比重的计算方式可以表示为

$$P_{ji} = \frac{a_{ji}}{\sum a_{ji}} \quad (3)$$

式中， P_{ji} 为 a_{ji} 在第 j 个电网绝对潮流因子状态中所占的比重。第 i 个影响因素的熵值计算方式可以表示为^[6]

$$e_i = -\sum P_{ji} \ln P_{ji} \quad (4)$$

式中， e_j 为对于第 j 个电网绝对潮流因子状态而言，第 i 个影响因素的熵值参数。第 i 个影响因素的熵权计算方式可以表示为

$$w_i = \frac{1 - e_i}{\sum (1 - e_i)} \quad (5)$$

式中， w_i 为第 i 个影响因素的熵权参数，也就是第 i 个影响因素的权重。

以上述权重计算结果为基础，借助TOPSIS法对待评估线路状态和最优状态序列的接近度进行相关分析。评估线路状态的最大值和最小值之间的向量距离计算方式表示为^[7]

$$\begin{cases} D_l^+ = \sqrt{\sum (B_l^+ - P_{ji} w_i)^2} \\ D_l^- = \sqrt{\sum (B_l^- - P_{ji} w_i)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中， D_l^+ 为评估线路状态与最大值向量之间的距离； D_l^- 为评估线路状态与最小值向量之间的距离，以此为基础，最终的电网关键线路薄弱状态的分析结果可以表示为

$$U = \frac{D_l^-}{D_l^- + D_l^+} \quad (7)$$

式中， U 为电网关键线路薄弱状态的分析结果。

通过对所有线路进行分析，即可根据 U 的大小实现对薄弱程度的排序。在具体的排序阶段， U 值越大，表示对应线路的薄弱程度越高，在整体电网关键线路薄弱序列中的位置越靠前；相反地， U 值越小，表示对应线路的薄弱程度越低，在整体电网关键线路薄弱序列中的位置越靠后。按照上述所示的方式，实现对电网关键线路薄弱情况的全面分析，确定电网环境中具体薄弱线路的实际情况。算法整体流程如图2所示。

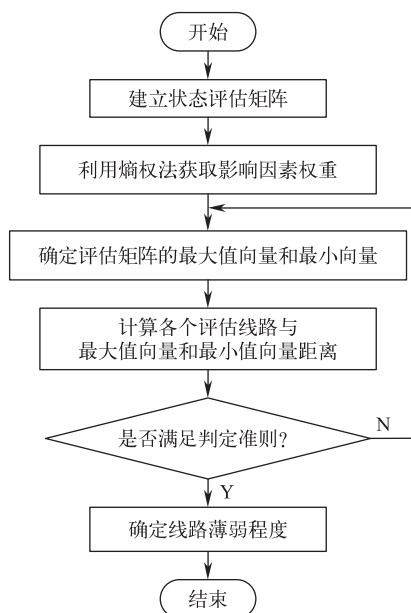


图2 电网关键薄弱线路辨别流程

测试与分析

1. 测试环境构建

在对本文设计的基于绝对潮流因子与优劣解距离法的电网关键薄弱线路，辨别技术实际应用效果进行分析时，以IEEE-30节点电网系统为基础开展对比测试。其中，涵盖4台发电机，负荷数量共计18个，对

应的传输线路共计37条，具体接线如图3所示。

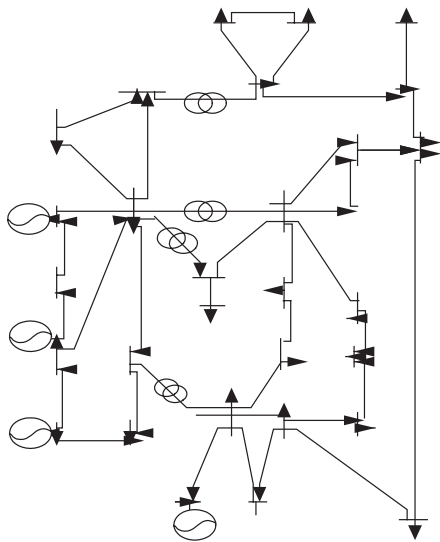


图3 测试IEEE-30节点电网系统

2. 测试结果与分析

(1) 消融实验

为验证基于绝对潮流因子与优劣解距离法的电网关键薄弱线路辨别的有效性，设计消融实验。一共设计3个测试组，绝对潮流因子计算组、TOPSIS法线路状态分析组、绝对潮流因子计算+TOPSIS法线路状态分析组。以MSE、MAE、 R_2 作为评价指标，验证不同测试组电网关键薄弱线路辨别效果。MSE指标用于评估方法预测结果与实际值之间的接近程度，MSE值越小表明方法预测结果与实际值接近程度越高。MAE指标用于衡量方法预测结果与实际值之间的平均绝对差异，MAE越小表明方法识别能力越强。 R_2 指标用于评估方法对数据解释能力， R_2 取值范围在0~1之间，越接近1表明方法对电网系统线路数据的解释能力越好。3个测试组的MSE、MAE、 R_2 指标结果见表1。

表1 不同测试组的指标结果

测试组	指标		
	MSE	MAE	R_2
绝对潮流因子计算组	0.36	0.41	0.77
TOPSIS法线路状态分析组	0.47	0.32	0.79
绝对潮流因子计算+TOPSIS法线路状态分析组	0.12	0.13	0.92

分析表1可知，单一计算组MSE值和MAE值较高， R_2 值较低。而绝对潮流因子计算+TOPSIS法线路状态分析组佳，MSE值为0.12，MAE值为0.13，

R_2 值为0.92，进一步提升了方法应用效果。由此证明，本文方法在辨别电网关键薄弱线路方面具有可行性。

(2) 对比实验

对比分析多次攻击作用下，本文方法、文献[2]方法和文献[3]方法线路负荷削减量结果。线路负荷削减量约低，表明方法电网关键薄弱线路辨别精准度越高，不同方法在线路中的负荷削减量结果如图4所示。

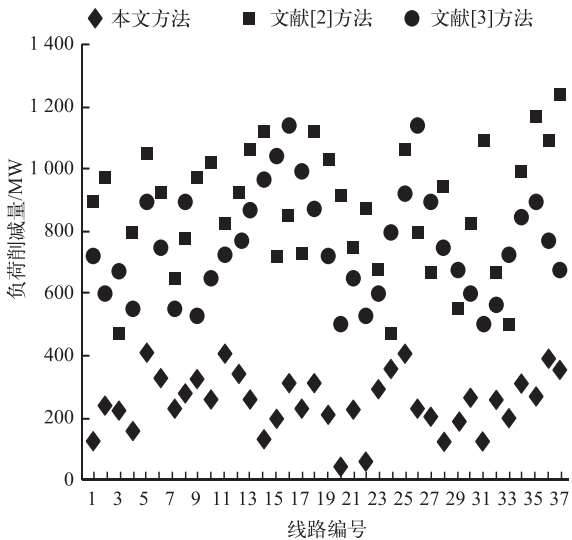


图4 线路负荷削减量

由图4可知，本文方法线路负荷削减量均低于500 MW，而文献[2]方法和文献[3]方法线路负荷削减量在480~1 205 MW之间。本文方法通过精确分析电网绝对潮流因子状态，全面了解电网潮流分布情况，更准确地识别出电网中的关键薄弱线路。在此基础上，对潮流进行优化调整，使线路负荷更加均衡，从而降低线路负荷削减量的需求，提高电网可靠性。由此证明，本文方法具有较好的电网关键薄弱线路辨别精度且优化效果较高。

对比分析多次攻击作用下，本文方法、文献[2]方法和文献[3]方法线路潮流转移熵结果。线路潮流转移熵越高，表明方法受客观环境状态影响越小。不同方法在线路中的潮流转移熵结果如图5所示。

由图5可知，本文方法线路潮流转移熵均高于0.65，而文献[2]方法线路潮流转移熵均值约为0.49，文献[3]方法线路潮流转移熵均值约为0.53。因为本文方法考虑发电机传输到负荷点的有功功率和负荷变化等多种因素对电网潮流的影响，建立电网绝对潮流因子影响因素原始矩阵，提高对潮流转

移特性的准确度。同时，熵权参数的应用使本文方法能够量化不同因素对电网绝对潮流因子的影响程度差异。通过赋予每个因素适当的权重，可以更加准确地描述电网潮流的变化趋势，从而提高潮流转移熵，使其在面对多次攻击时依然能够保持较高的潮流转移能力。

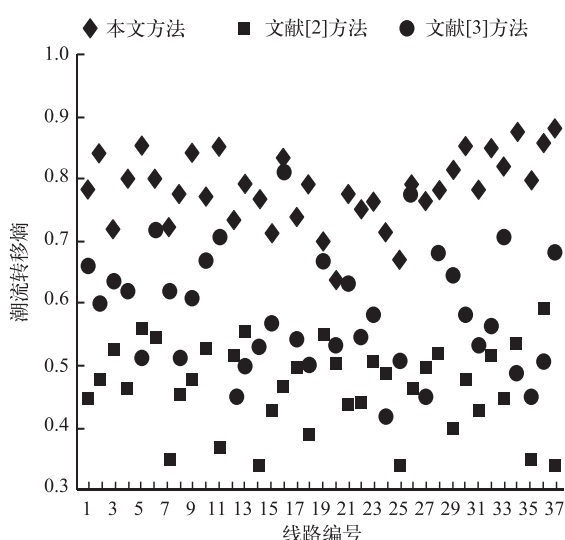


图5 线路潮流转移熵

对比分析多次攻击作用下，本文方法、文献[2]方法和文献[3]方法对于线路有效效能辨识结果。有效效能辨识越高，表明方法稳定性越高。不同方法在线路中的有效效能辨识结果如图6所示。

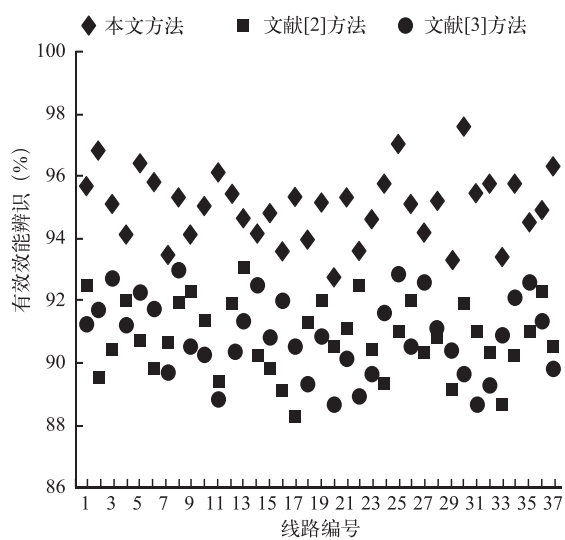


图6 线路有效效能辨识

由图6可知，本文方法线路有效效能辨识最低值为93%，而文献[2]方法和文献[3]方法线路有效效能

辨识最高值为93.5%。本文方法利用TOPSIS法计算待评估线路的最大值和最小值的向量距离，得到量化评估结果。这个结果不仅可以用于判断线路的薄弱状态，还可以对不同线路进行排序，确定关键线路，从而提高线路的有效效能辨识。由此证明，本文方法有助于更好地把握电网运行状态，保障电网的稳定性。

结束语

本文提出基于绝对潮流因子与优劣解距离法的电网关键薄弱线路辨别技术，具有较高的精准度和稳定性，且受客观环境状态影响较小。借助本文的设计与研究，希望能够为实际的电网关键薄弱线路维护管理提供一定的参考价值，最大限度保障电网供电阶段的稳定性和安全性。**EA**
(收稿日期：2024-10-18)

参考文献

[1] 谢李为, 李勇, 罗隆福, 等. 基于复杂网络与运行因素的电网薄弱点辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 83-91.

[2] 南斌, 董树锋, 徐成司, 等. 基于改进离差最大化方法的电网关键线路综合辨识[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 4076-4084.

[3] Yusuff A A, Mosetlthe T C, Ayodele T R. Statistical method for identification of weak nodes in power system based on voltage magnitude deviation[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 200(1): 107464.

[4] 管恩齐, 何晋, 骆通. 含直流潮流控制器的真双极多端柔性直流电网潮流计算研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(2): 68-76.

[5] 周念成, 向浩楠, 魏能峤, 等. 含电流型潮流控制器的柔性直流电网故障电流抑制特性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 142-152.

[6] 张继钢, 吴良峥, 乔慧婷, 等. 基于CEEMDAN-GRU的电网工程主材价格多步预测[J]. 控制工程, 2023, 30(11): 2134-2142.

[7] 徐扬, 张耀, 陈宇轩, 等. 基于Bagging混合策略的多风电场稀疏向量自回归概率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 95-106.