

基于改进离差最大化方法的电网关键线路 综合辨识

南斌, 董树锋, 徐成司, 唐坤杰

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

Comprehensive Identification of Critical Lines in Power Grid Based on Improved Maximizing Dispersions Method

NAN Bin, DONG Shufeng, XU Chengsi, TANG Kunjie

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: The identification of critical lines is of great significance to ensure the safety of the power system. Most of the existing methods of critical line identification methods are not complete enough have a lot of shortcomings because they seldom consider the information carried by nodes and the accidental faults of lines are considered insufficiently. Therefore, a multi-index identification method for critical line identification was proposed, based on the grid topology and the current operation modes. Firstly, by considering the voltage stability of local system, the capacity of each line, the line fault probability and the topological importance of the nodes of a local system, four evaluation indexes were established to identify the importance of the line including its voltage stability, capacity margin, real-time fault probability, and topological connection degree. Secondly, the comprehensive importance index with the subjective and objective weighting considering different factors were established proposed, developed by the improved method of maximizing dispersions. Meanwhile, the strategy of the least system load shedding was adopted to measure the power supply capacity of the power grid with the failure of the critical lines. Finally, the feasibility and correctness of the proposed identification method were verified via the simulation of the IEEE 39-bus system.

KEY WORDS: critical line identification; voltage stability; fault probability; maximizing dispersion; load shedding

摘要: 关键线路的辨识对保证电力系统安全性具有重要意义。针对现有关键线路辨识方法较少考虑线路两端节点信息以及对线路偶然故障考虑不足的问题,以电网拓扑信息为基础,结合当前运行状态,提出一种多指标评价的关键线路辨

识方法。通过考虑局部系统的电压稳定性、线路传输容量、线路故障率以及节点的拓扑重要性,建立了识别线路重要程度的电压稳定性、容量裕度、实时故障率、拓扑联系度等4个指标;改进离差最大化方法,建立了考虑不同因素的主客观赋权的线路综合重要性指标;采用系统失负荷量最小的控制策略,衡量线路故障下系统的供电能力;最后对IEEE 39节点系统进行仿真,验证了所提辨识方法的可行性和正确性。

关键词: 关键线路辨识; 电压稳定性; 故障率; 离差最大化; 失负荷量

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2405

0 引言

近年来,国际范围内发生了多起由电网局部故障引发的大停电,对社会生产生活造成了巨大影响^[1-4]。随着电网规模的不断扩大以及结构的复杂化,对供电安全性提出更高要求。研究表明电网中的线路故障易引发连锁反应蔓延至其他设备,最终引发电网大规模解列,造成大停电事故。因此,为尽量避免大停电事故,如何快速、有效辨识电网中的关键线路,具有重要的理论和实际研究价值。

现有的关键线路辨识方法主要有两类,分别基于电力系统状态分析和复杂网络理论。电力系统状态分析的代表性方法是熵理论,文献[5]首次提出电网潮流熵的概念,以衡量系统潮流的不平衡度。文献[6]进一步从支路潮流冲击影响力和系统脆弱度2个方面对电网中的脆弱支路进行综合评估。文献[7]从静态潮流负载分配和支路开断潮流动态转移的角度提出负载潮流熵和支路开断熵指标。但是状态分析方法普遍依赖于多次开断线路的潮流计算,即使采用直流潮流计算,时间成本也较高,不能满

基金项目: 国家自然科学基金项目(52077193)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (52077193).

足安全分析的实时性要求^[8]。由于电网具有小世界特性^[9-10]，可以采用以复杂网络理论为基础的方法辨识关键线路。文献[10-11]通过在发电机与负荷节点对之间注入单位电流，以发电机出力与负荷水平的较小值为权值，提出了“电气介数”指标辨识关键线路。在此基础上文献[12]进一步考虑了当前运行方式下输电线路的使用情况，提出“有功潮流介数”指标作为辨识判据，但是其未考虑系统中无功功率的传输。文献[13]利用潮流追踪法量化了任意输电线路在所有电网发电和负荷节点对之间的功率输送中被利用的程度，进而提出“潮流介数”的指标作为辨识判据，但是该方法潮流计算量较大。文献[14]在不进行潮流计算的情况下，基于电流分布理论提出了“绝对潮流介数”指标辨识关键线路。上述文献提出的指标或方法能够有效辨识关键线路，但是考虑因素较为单一，因此最近的研究开始采用多指标的综合辨识。文献[15-17]采用了多介数指标的综合指标辨识关键线路，但是主观地对各指标权重进行赋值，合理性不足。

为了改善现有关键线路辨识方法较少考虑线路两端节点信息的情况，并弥补单一辨识指标的不足，本文综合考虑电网的运行参数、全局拓扑及恶劣气象条件下的线路故障，并采用改进离差最大化组合评价方法，提出关键线路辨识的综合评价模型，进一步采用最优潮流失负荷量的指标对评价结果进行有效性验证。最后以 IEEE 39 节点系统为算例，辨识系统的关键线路，验证方法的有效性。

1 关键线路评价指标

实际电力系统中，线路的关键性主要体现在 2 个方面：一是线路自身的脆弱程度，线路越脆弱关键性越高；二是线路在整个电力系统中的作用，线路承担作用越大关键性越高。本节围绕这 2 个方面建立 4 项关键线路评价指标。

1.1 电压稳定性指标

电压稳定性是电网安全运行的基本条件之一，电压失稳会直接影响线路运行状况，可能导致线路退出运行，甚至造成大面积停电，因此有必要在关键线路辨识中考虑电压稳定性水平。目前常用的静态电压稳定性指标大多基于系统潮流方程，以潮流极限值当做电压稳定的临界点，例如灵敏度指标、奇异值和特征值指标、负荷裕度指标等^[18]。这些指标计算精度较高，但大多存在所需信息量大、线性度不好的问题，而且计算量会随着系统规模增加而急剧增大。考虑到电压奔溃往往发生的较为突然，

为了帮助调度运行人员进行快速在线分析，需要采用快速计算分析的算法和适当的简化模型^[19]。因此本文基于现有广域测量系统可获得的高频数据，从以末端电压为变量的潮流方程的有解条件^[20]出发，构造电压稳定性指标。

对于一般的 Π 型等值线路 $i-j$ ，其线路参数和运行参数如图 1 所示。图中： $U_i \angle \delta_i$ 和 $U_j \angle \delta_j$ 分别为节点 i 和节点 j 的电压相量； δ 为节点 i 和节点 j 的相角差； $Z \angle \theta = R + jX$ 为线路阻抗； $jB/2$ 为线路对地导纳； $\tilde{S}_i = P_i + jQ_i$ 和 $\tilde{S}_j = P_j + jQ_j$ 分别为节点 i 的注入功率和节点 j 的流出功率； \dot{I}_{ij} 为线路中流过的电流。

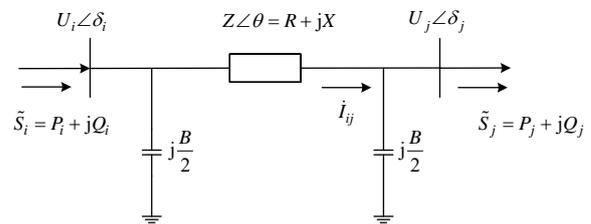


图 1 Π 型等值线路

Fig. 1 Equivalent line of type Π

线路 $i-j$ 的电压方程为

$$\dot{U}_i = \dot{U}_j + \dot{I}_{ij}(R + jX) \quad (1)$$

其中，

$$\dot{I}_{ij} = \left(\frac{P_j + jQ_j}{\dot{U}_j} \right)^* + \frac{jB}{2} \dot{U}_j \quad (2)$$

将式(1)按实部和虚部分别展开：

$$\frac{BR}{2} U_j^2 - U_i U_j \sin \delta + P_j X - Q_j R = 0 \quad (3)$$

$$\left(1 - \frac{BX}{2}\right) U_j^2 - U_i U_j \cos \delta + P_j R + Q_j X = 0 \quad (4)$$

两式均为关于 U_j 的二次方程，若方程有解则满足：

$$U_i^2 \sin^2 \delta - 2BR(P_j X - Q_j R) \geq 0 \quad (5)$$

$$U_i^2 \cos^2 \delta - 4\left(1 - \frac{BX}{2}\right)(P_j R + Q_j X) \geq 0 \quad (6)$$

根据支路末端电压 U_j 有解的条件定义电压稳定性指标 L_{U-ij} 为

$$L_{U-ij} = \max(L_{U1}, L_{U2}) \quad (7)$$

其中，

$$L_{U1} = \frac{2BR(P_j X - Q_j R)}{U_i^2 \sin^2 \delta} \leq 1 \quad (8)$$

$$L_{U2} = \frac{4\left(1 - \frac{BX}{2}\right)(P_j R + Q_j X)}{U_i^2 \cos^2 \delta} \leq 1 \quad (9)$$

L_{U-ij} 指标值大于 1 时，以末端电压为变量的潮

流方程无解,即线路电压已经奔溃,线路十分脆弱;指标值小于1时,以末端电压为变量的潮流方程有解,指标越趋近于1时,表示当前运行状态下线路*i-j*容易发生电压崩溃。

该指标建立了节点脆弱性和线路脆弱性的联系,辨识关键线路时较好地融合了两端节点的电压信息。从电力系统潮流二次方程得到的电压有解条件是电压稳定的必要条件,能够在一定程度上反映电压稳定性,和传统指标相比,所提 L_V 指标进行了适当简化,具有显式表达形式,计算所需物理量可以通过量测实时获得,计算简便,能够满足快速在线分析需求。

1.2 容量裕度指标

随着社会用电量的快速增长,为满足负荷需求,输电公司经常使线路处于极限运行状态,可能导致线路过载、设备退出运行进而丢失负荷,严重时将引发连锁故障导致系统奔溃,因此有必要在关键线路辨识中考虑线路负载水平。线路负载率可以表征当前运行状态下线路的利用程度,识别系统中负载率较高的脆弱线路进行监控,降低过载线路的传输功率可以有效降低系统运行的安全风险。

传统研究一般以线路运行时的有功功率与最大能承载的有功功率的比值反映线路潮流限制^[12,17,21],该方式具有2个不足:1)电网中不只存在有功功率的传输,该比值忽略了线路无功功率的传输;2)该方式中线路重要性与负载率成正比例关系,无法强调高负载率线路的重要性。因此本文定义线路*i-j*的容量裕度指标 L_{S-ij} 为

$$L_{S-ij} = \begin{cases} e^{1-S_{ij-max}/S_{ij}}, & S_{ij} \leq S_{ij-max} \\ 1 + e^{1-S_{ij-max}/S_{ij}}, & S_{ij} > S_{ij-max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: S_{ij} 为线路*i-j*在当前运行状态下的线路传输功率; S_{ij-max} 为线路*i-j*允许的最大传输容量。

该指数形式定义的容量裕度指标 L_{S-ij} 计及了线路承载的无功潮流,能够全面地反映线路的负载水平。当线路潮流与最大传输容量接近或已超过线路容量限制时,指标值会显著增大,因此能够较好反映不同负载率线路的重要性差异。类似地,除了指数形式,容量裕度指标还可以采用幂函数如 $L_{S-ij} = (S_{ij}/S_{ij-max})^\alpha$, $\alpha > 1$ 的形式。

1.3 实时故障率指标

线路故障停运是系统失效的重要原因之一,高故障率线路作为电网薄弱环节应当予以特别关注。线路故障受老化失效、健康状态及气象环境状况等多种因素的影响,特别地雷电、冰雪、台风、山火

等恶劣气象条件下线路发生故障的概率要比正常天气情况下大得多,如澳大利亚9.28停电事故^[3]和美国加州2020年停电事故^[22]中都存在极端天气引发线路故障或被迫停运的情况。因此本文基于统计特性建立计及气象因素的线路实时故障率指标。

从中长期角度来看,老化失效是导致线路故障的主要风险因素,一般采用浴盆曲线建立老化失效模型,以描述线路故障率在使用年限内的变化。例如可以采用契合浴盆曲线变化趋势的Weibull分布函数进行刻画,其形状和参数可以通过极大似然估计、最小二乘法等对线路历史故障统计数据拟合得到。据此可得到某时段线路*i-j*的自然故障率 λ_{1-ij} 。

由于老化失效模型得到的故障率通常为常数,无法响应短期内风险因素变化对线路运行可靠性的影响,因此自然故障率可作为基准故障率。从短期角度来看,恶劣气象条件是导致线路故障的一个强相关因素。根据历史统计数据得到线路*i-j*处于恶劣气象条件的偶然故障率 λ_{2-ij} :

$$\lambda_{2-ij} = \bar{\lambda}_{ij} \frac{F'_{ij}}{F_{ij}} \quad (11)$$

式中: $\bar{\lambda}_{ij}$ 为线路*i-j*故障率统计平均值; F_{ij} 为线路*i-j*处于极端天气的概率; F'_{ij} 为线路*i-j*在极端条件下发生故障占总故障次数的比例。

需要指出的是不同的输电线路故障受到灾害天气的季节性影响,例如我国中部某地区的输电线路故障会受到春秋山的山火、夏季的雷击和冬季的覆冰影响^[23],因此在统计时应取对应线路的历史同期(同季或同月)故障情况。

取2种故障率的较大值作为线路*i-j*的实时故障率 $L_{\lambda-ij}$:

$$L_{\lambda-ij} = \max(\lambda_{1-ij}, \lambda_{2-ij}) \quad (12)$$

1.4 拓扑联系度指标

输电线路重要性的评价除了受运行状态的影响,也与线路在整个电网中的拓扑位置有关,例如连接2个大电网的联络线显然具有较高的重要性。度、最短路径/平均路径、介数、聚类系数等是描述复杂网络拓扑结构统计特性的基本参数^[24],采用复杂网络理论可以从结构拓扑角度分析电网中的关键线路,但由于电网潮流传播不遵循最短路径原则^[10],因此以最短路径为基础的介数指标不适合直接应用于电网。该理论将节点度数 K_i 定义为与节点*i*相连的所有边的数量之和,其值越大表示该节点在网络中覆盖范围越大,在结构中的地位越重要,度的定义简单、直观,适用于电网结

构拓扑分析。

类似地为了辨识线路 $i-j$ 的重要性, 本文定义线路 $i-j$ 的拓扑联系度指标 $L_{K-i,j}$:

$$L_{K-i,j} = \frac{K_i K_j}{\bar{K}^2} \quad (13)$$

其中,

$$\bar{K} = \frac{1}{N} \sum_{i \in M} K_i = \frac{2L}{N} \quad (14)$$

式中: \bar{K} 为电网中所有节点度数的平均值; M 为电网中所有节点的集合; N 为电网节点总数; L 为电网线路总数。

基于线路两端节点度数建立的拓扑联系度指标表征了线路在全局电网中的联络能力, 指标值越大, 说明线路在电网功率传输中的枢纽作用越重要, 线路断开容易对电网结构造成较大冲击, 对系统完整性的影响越大。

2 关键线路综合评价模型

2.1 离差最大化决策方法

影响线路重要程度的因素是多样的, 采用多指标衡量线路重要性属于组合评价问题。组合评价综合考虑了评价问题的多种影响因素, 可以尽量弥补各种方法的缺点, 产生较好的评价效果。

离差最大化方法作为一种客观性组合评价方法, 最早应用于经济学领域^[25], 其基本思想如下。设有 m 个评价方案, n 个评价指标, 评价指标集记为 $G=\{G_1, G_2, \dots, G_n\}$, 各指标的权重向量记为 $\mathbf{W}_0=[w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ 。离差最大化决策主要目标是确定使得不同指标值间离差最大的权重向量 \mathbf{W} : 如果所有决策方案的 G_i 指标值均相等, 则 G_i 指标对决策方案的排序不起任何作用, 权重可以记为 0; 相反, 如果所有决策方案的 G_i 指标值相差越大, 则 G_i 指标对决策方案的排序将起重要作用, 应该赋予较大权重。例如在关键线路辨识中, 若各线路故障率相等, 则故障率指标无法区分各线路重要性, 权重应记为 0; 若各线路故障率相差极大, 则高故障率线路显然更加重要, 故障率指标可以较好区分各线路重要性, 权重应赋予较大值。该方法原理简单、易于理解, 充分利用了数据自身携带的信息量, 而且得到的组合指标值较为分散, 便于排序和决策, 因此在诸多领域得到了广泛应用。

2.2 基于主客观综合赋权的改进离差最大化方法

在实际评价中, 各指标的重要性差异是客观存在的, 但是某些指标值可能遮蔽该指标自身固有的重要性。例如在关键线路辨识中, 若某区域长期处

于极端气候条件, 导致各线路故障率普遍较高时, 故障率指标值的离差较小, 但显然电网运维人员应特别关注线路负载率情况, 此时就需要考虑指标本身的重要性。因此本文对离差最大化方法进行改进, 综合考虑指标固有重要性差异与指标值差异, 以更理想地辨识出电网中的关键线路。

设系统中有 m 条线路, 即 m 个评价方案, n 个评价指标, 评价指标集记为 $G=\{G_1, G_2, \dots, G_n\}$, 基于专家经验给定主观权重, 第 j 个指标的主观权重记为 w_j , 主观权重向量记为 $\mathbf{W}=[w_1, w_2, \dots, w_n]^T$, 第 i 条线路对应的第 j 个指标的值记为 u_{ij} , $\mathbf{U}=(u_{ij})_{m \times n}$ 为决策矩阵。

本文将离差最大化方法中的原有权重记为客观权重, 客观权重向量记为 $\mathbf{W}^*=[w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*]^T$, 则第 i 条线路对应的综合评价值为 $E_i=w_1^* w_{i1} + w_2^* w_{i2} + \dots + w_n^* w_{in}$ 。

由于 \mathbf{W} 和 \mathbf{U} 是已知的, 仅需求解 \mathbf{W}^* 即可求出所有线路的综合评价, 求解步骤如下:

1) 对评价指标进行归一化处理。

本文所提指标均为效益型指标^[25], 即数值越大线路重要程度越高, 可以进行如下归一化处理:

$$u_{ij} = \frac{u_{ij} - u_j^{\min}}{u_j^{\max} - u_j^{\min}}, i=1, 2, \dots, m \quad (15)$$

式中: u_j^{\max} 和 u_j^{\min} 分别为 G_j 指标最大值和最小值。

2) 获取所有评价指标对电网线路的总离差。

对于评价指标 G_j , 不考虑权重影响时, 线路 i 与其他线路 k 的总离差记为 d_{ij0} , $d_{ij0} = \sum_{k=1}^m |u_{ij} - u_{kj}|$; 考虑主观权重和客观权重时, 线路 i 与其他线路 k 的总离差记为 d_{ij} , $d_{ij} = \sum_{k=1}^m |w_j^* w_j u_{ij} - w_j^* w_j u_{kj}|$; 所有线路间的总离差记为 $d_{ij}(G_j)$, $d_{ij}(G_j) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m |w_j^* w_j u_{ij} - w_j^* w_j u_{kj}|$ 。

3) 求解优化模型。

对于所有评价指标 G , 所有线路间的总离差记为 D , 基于离差最大化原理, \mathbf{W}^* 的选择应使总离差 D 最大, 即如下优化模型:

$$\begin{cases} \max \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m w_j^* |w_j u_{ij} - w_j u_{kj}| \\ \text{s.t.} \sum_{j=1}^n (w_j^*)^2 = 1, w_j^* \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

使用拉格朗日法进行处理, 可以求得 w_j^* 的归一化最优解为

$$w_j^* = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m |w_j u_{ij} - w_j u_{kj}|}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m |w_j u_{ij} - w_j u_{kj}|} \quad (17)$$

求出 W^* 后通过公式 $E_i = w_1^* w_{1i} u_{i1} + w_2^* w_{2i} u_{i2} + \dots + w_n^* w_{ni} u_{in}$ 计算所有线路的综合重要性指标，并对结果进行排序。

3 辨识结果的有效性验证

3.1 关键线路故障攻击方式

对输电线路进行攻击时，线路易发生 $N-1$ 及 $N-k$ 多重故障。发生 $N-1$ 故障时，需将每条线路分别断开进行校验。发生 $N-k$ 故障时，需按照一定顺序依次断开 k 条线路进行校验， $N-k$ 故障攻击方式分为静态攻击和动态攻击 2 种，如图 2 所示。

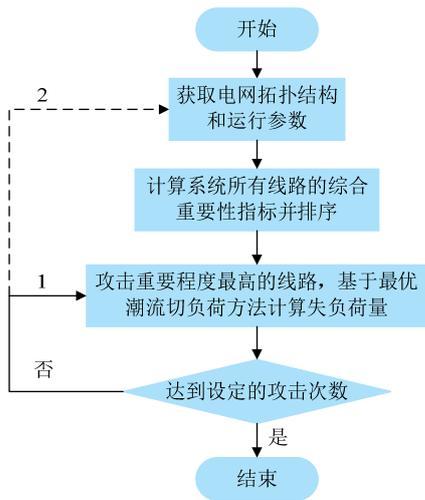


图 2 静态攻击和动态攻击流程

Fig. 2 Flow chart of static attack and dynamic attack

2 种方法主要差别在于静态攻击(方式 1)仅对原始系统进行一次关键线路辨识，按照线路重要度排序依次进行攻击，动态攻击(方式 2)在每次攻击一条线路后，重新获取系统参数并进行重要性辨识与排序，再次选择最重要的线路进行攻击。

动态攻击对电网的破坏更加严重^[26]，但是每次断开一条线路后需要重新辨识系统关键线路，计算量较大，实时性较差，且该研究并非模拟连锁故障过程，因此本文采用静态攻击方式进行验证。

3.2 基于最优潮流失负荷量的验证指标

为了验证所提关键线路辨识方法的有效性，需要采用一定指标来反映辨识出来的关键线路的重要性，其中一个关键问题在于如何处理线路断开造成网络解列的情况。

文献[27-28]仅考虑系统解列后的最大孤岛，通过最大连通域的大小验证该线路的重要程度；文献[26,29]考虑线路断开后拓扑的变化，通过网络效能指标进行衡量。这些指标忽略了孤岛系统的自我调节能力，得到的结果较为悲观。文献[9,12]考虑了孤岛系统的功率调节，但未给出具体算

法，针对于此本文提出最优潮流切负荷模型进行验证。

一条线路断开导致系统解列为 2 个孤岛时，可以将故障前往线路注入功率的部分称为送端孤岛，另一部分称为受端孤岛。一般来说，在满足潮流计算约束的情况下，送端孤岛通过调整发电机出力即可使孤岛系统到达新的平衡状态，受端孤岛即使调整发电机出力可能也无法避免节点电压越限或频率失稳。此时受端孤岛需要通过切除部分负荷以维持系统安全稳定运行，通过系统最优失负荷量可以验证该线路的重要性。

最优失负荷量目标函数为

$$\min \sum_{n \in D} P_{\text{loss}-n} \quad (18)$$

式中： D 为负荷节点的集合； $P_{\text{loss}-n}$ 为负荷 n 的有功失负荷量。

潮流计算的等式约束为

$$\begin{cases} \sum_{n \in D} (P_n - P_{\text{loss}-n}) - \sum_{m \in G} P'_m + \sum_{l \in L} \Delta P_l = 0 \\ \sum_{n \in D} (Q_n - Q_{\text{loss}-n}) - \sum_{m \in G} Q'_m + \sum_{l \in L} \Delta Q_l = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中： P_n 和 Q_n 分别为负荷 n 的初始有功和无功功率； G 为发电机节点的集合； P'_m 和 Q'_m 分别为发电机 m 的有功和无功出力； L 为线路的集合； ΔP_l 和 ΔQ_l 分别为线路 l 的有功和无功损耗； $Q_{\text{loss}-n}$ 为负荷 n 的无功失负荷量。

潮流计算的不等式约束为

$$\begin{cases} -S_{l-\max} \leq S_l \leq S_{l-\max} \\ U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \\ P_m^{\min} \leq P_m \leq P_m^{\max} \\ Q_m^{\min} \leq Q_m \leq Q_m^{\max} \end{cases} \quad (20)$$

式(20)分别为线路潮流的上下界约束，各节点电压上下界约束，发电机有功和无功出力上下界约束。

此外设定切负荷时不改变原先负荷的功率因数，则切负荷的功率因数约束为：

$$Q_{\text{loss}-n} = P_{\text{loss}-n} \tan \varphi_n^0 \quad (21)$$

式中 φ_n^0 为负荷 n 的初始功率因数。

求解该最优潮流切负荷模型，可以求出任意线路断开后系统的失负荷量，以此验证识别出的关键线路的重要性。

4 算例分析

4.1 算例设置

算例采用图 3 所示的 IEEE 39 节点系统，该系统含有 10 台发电机，19 个负荷和 46 条线路，设定线路的最大传输功率为热稳定极限值。

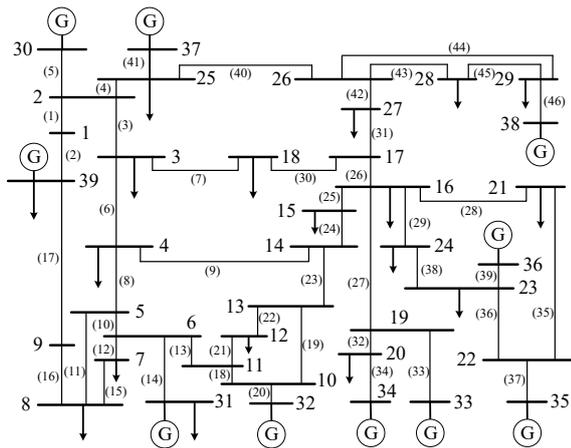


图3 IEEE 39节点系统
Fig.3 IEEE 39-bus system

发电机在电网中具有重要地位，发电机出线一旦断开会对系统造成较大冲击，而且切除大量发电机会显著增加系统失负荷量。因此本文假定发电机出线在所有线路中是最重要的，不再参与辨识。

4.2 单一辨识指标的结果分析

根据 L_U 、 L_S 、 L_λ 和 L_K 等 4 类指标的定义，计算各指标值并按照降序排列，选取前 10 的线路作为关键线路，结果如表 1 所示。

排序	L_U	L_S	L_λ	L_K
1	26-29	16-19	26-29	16-17
2	23-24	21-22	26-28	16-19
3	16-19	6-11	11-12	2-3
4	21-22	2-3	12-13	5-6
5	1-2	23-24	1-2	6-11
6	26-28	28-29	8-9	2-25
7	2-3	10-11	23-24	25-26
8	28-29	16-21	25-26	26-29
9	6-7	10-13	14-15	15-16
10	8-9	4-14	3-4	16-21

从表 1 可以看出不同指标的辨识结果存在差异。采用电压稳定性指标进行辨识，其重要度排序较高的线路主要为靠近发电机的线路，为了维持负荷节点电压稳定，送端电压往往较高，容易造成电压失稳或崩溃。采用容量裕度指标进行辨识，其重要度排序较高的线路负载率较高，如线路 16-19，说明线路发生过载故障的可能性较大，线路较为脆弱。采用实时故障率指标进行辨识时，算例中假设故障率和线路电抗成正比，其重要度排序体现了线路的电抗的大小，线路越长、电抗越大，故障率也越高，该替代具有合理性。采用拓扑联系度指标进行辨识，重要度排序越高，说明该线路及两端节点在系统中的拓扑地位越重要，如线路 16-17，节

点 17 与节点 18 和节点 27 相连，节点 16 和节点 15、节点 19 以及节点 21 相连。若该条线路断开，相继断开 15-16 或 16-19 均会造成系统解列，断开其他几条相连线路时会影响相关节点负荷的供电线路，因此其重要度较高。

4.3 关键线路辨识方法的综合评价与分析

在上述单一辨识指标的基础上，将各指标值进行归一化，4 个指标的主观权重为 $W=[0.3, 0.35, 0.05, 0.3]^T$ 。基于改进离差最大化评价模型，得到各指标的客观权重为 $W^*=[0.1747, 0.5034, 0.0400, 0.2775]^T$ ，因此可以得到所有线路的综合重要性指标值，如图 4 所示。

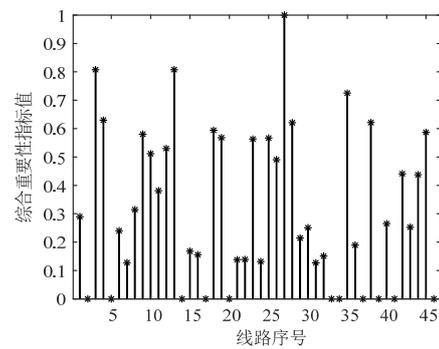


图4 各线路的综合指标值
Fig.4 Comprehensive index value of each line

对图 4 得到的综合指标值进行降序排列并挑选前 10 条线路，作为关键输电线路。基于本文所提方法、电气介数方法^[10]、有功潮流介数方法^[12]、潮流熵理论^[6]以及随机矩阵与熵理论结合的辨识方法^[30]所得到的关键线路如下表 2 所示。其中电气介数和有功潮流介数主要考虑电网的结构特性；潮流熵理论和随机矩阵理论与熵理论结合的方法主要考虑电网的动态特性，其中后者从数据驱动角度定义了电网的有序和无序。

排序	本文方法	电气介数	有功潮流介数	潮流熵理论	随机矩阵与熵理论
1	16-19	16-17	16-19	5-6	16-19
2	2-3	15-16	16-17	16-19	5-6
3	6-11	14-15	2-3	19-20	5-8
4	21-22	2-25	2-25	6-7	6-7
5	2-25	17-27	15-16	6-11	7-8
6	23-24	16-19	6-11	15-16	4-5
7	16-21	26-27	21-22	4-5	13-14
8	10-11	17-18	16-21	2-25	14-15
9	4-14	3-18	26-27	13-14	10-13
10	13-14	2-3	13-14	16-17	17-27

从表 2 可以看出，本文方法辨识出的线路与其他方法辨识出的线路有 7 条是相同的，但排序不同。

和大多数方法一样, 本文辨识出线路 16-19 关键度最高, 结合表 1 可知, 该线路的 L_U 、 L_S 和 L_K 指标值均较高。 L_K 指标值较高是因为节点 16 和节点 19 连接了多个节点, 在结构上具有重要地位; L_U 和 L_S 指标值较高说明在当前状态下该线路电压安全裕度较低, 同时负载率较高, 线路较为脆弱, 综上所述线路 16-19 在系统中占据了重要地位。其他方法并未辨识出线路 23-24、线路 10-11 以及线路 4-14。线路 23-24 承载了节点 35 和 36 的发电机传输功率, 断开可能会造成主网功率失衡, 线路 10-11 和 4-14 当前运行状态下负载率较高, 存在过载断开的危险, 因此本文方法将其判定为关键线路。

为了验证本文所提方法的有效性, 采用第 3 节提出的 $N-1$ 故障攻击模式, 分别断开每条线路, 计算不同运行状态下的系统最优失负荷量, 其结果如图 5 所示。

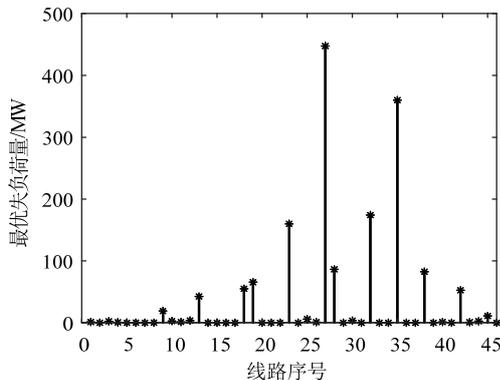


图 5 $N-1$ 故障下系统最优失负荷校验

Fig. 5 Optimal power flow loss check with an $N-1$ fault

当系统发生线路 $N-1$ 故障时, 按照 3.2 节提出的验证指标计算最优失负荷量, 需要指出的是本文假定发电机出线不再参与辨识, 因此设定发电机出线故障下系统失负荷为 0。 $N-1$ 故障下失负荷最高的前 10 条线路分别为 16-19、21-22、19-20、13-14、16-21、23-24、10-13、10-11、26-27 和 6-11, 其中有 7 条线路与本文方法辨识得到的关键输电线路相同, 本文方法没有辨识出 19-20 等线路, 但考虑到断开线路 19-20 造成节点 20 和 34 脱离主网, 相当于断开发电机出线, 因此可以直接将其视为最重要线路而不再参与辨识。其他 4 种方法辨识得到的关键输电线路分别有 2、6、4 和 3 条与上述结果相同, 显然本文方法的辨识结果能够更好地反映系统在 $N-1$ 故障下的关键线路。

进一步地, 采用第 3 节提出的 $N-k$ 故障攻击模式设置 5 个案例 C1—C5, 分别表示按照本文方法、电气介数、有功潮流介数、潮流熵以及随机矩阵与潮流熵结合的方法辨识的线路排序逐条攻击关键

线路, 不同运行状态下的系统最优失负荷量 P_{loss} 指标的变化情况如图 6 所示。

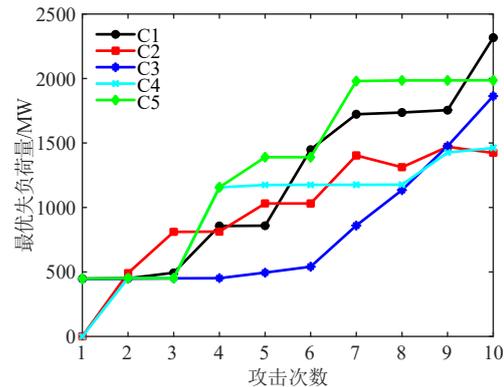


图 6 不同攻击方法下的系统失负荷量

Fig. 6 Load-shedding under different attacks

从图中可以看出, 按本文方法的辨识结果攻击前 10 条关键线路时, 最优潮流失负荷量平均增长幅度最快, 切除 10 条关键线路后系统失负荷量达到 2317.3MW。按照其他 4 种方法切除 10 条线路后系统失负荷量分别为 1424.3、1864.2、1461.5 以及 1986.3MW。

按照 C1 方法识别出的关键线路进行连续攻击, 总体失负荷量最高。断开第 1 条线路 16-19 时, 系统会解列为 2 个孤岛, 使得电网结构产生较大改变, 而且造成节点 33 和 34 的发电机脱离主网, 功率传输受阻, 其中送端孤岛(包括节点 19、20、33 和 34)可以通过调整发电机出力维持孤岛功率平衡, 但是受端孤岛需要切除 447.6MW 负荷, 导致系统失负荷量骤增。断开第 4 条线路 21-22, 节点 35 和 36 的发电机传输功率受阻, 仅能通过线路 23-24 传输功率, 但受到线路 23-24 最大传输功率的限制(600MW), 发电机出力减少, 系统失负荷量也明显增加。断开第 6 条线路 23-24 时, 节点 22、23、35 和 36 构成的送端孤岛脱离主网, 节点 35 和 36 的发电机功率传输通道被完全切断, 造成主网失负荷量再次增加。断开第 7 条线路 16-21, 切断了节点 21 负荷的供电, 导致该负荷必须完全切除, 因此额外损失了 274MW 负荷。当断开第 10 条线路时, 节点 10、11、12、13 和 32 构成的送端孤岛脱离主网, 节点 32 发电机仅需为节点 12 的负荷(8.53MW)供电, 多余出力无法传递给主网, 造成了主网失负荷量大幅增加。

按照 C2 方法识别出的关键线路进行连续攻击, 断开 10 条线路的系统失负荷量较低, 但断开前 3 条线路失负荷量会明显增加, 这是由于连续断开线路 16-17 和线路 15-16 会导致系统解列为两个孤岛, 并且线路 14-15 断开会导致节点 15 的负荷完

全切除。类似地按照 C3 方法断开 7-10 条线路时, 系统失负荷量显著增加也是因为形成了多个孤岛。按照 C4 方法识别出的关键线路进行连续攻击, 系统失负荷主要受到线路传输功率的限制, 例如断开第 9 条线路时, 为节点 15 的负荷供电的线路只有 3-4-14-15, 线路 3-14 的传输容量不能支撑为节点 4 和节点 15 的负荷供电。按照 C5 方法识别出的关键线路进行连续攻击, 会导致节点 31、32、33 和 34 四台发电机脱离主网, 系统解列为 3 个孤岛, 系统失负荷量快速上升。从结果来看 C1 和 C5 的最优潮流失负荷量接近, 在攻击次数较少时 C5 方法识别效果较好, 但 C5 方法评价过程中的时域仿真计算时间成本较高, 而 C1 方法仅依赖于系统结构参数和当前运行状态, 实时性更好。

算例结果表明, 断开时会造成系统解列进而失负荷的线路往往较为关键, 虽然解列后孤岛内部可以进行功率调整, 但是仍对系统供电产生较大影响。综上, 本文所提方法能够辨识出会对系统产生关键影响的高风险线路, 同时最优潮流切负荷的验证方式也是合理有效的。

5 结论

本文考虑了电网的拓扑结构和运行状态, 提出一种采用改进离差最大化方法的电网关键线路综合性辨识方法。通过算例仿真与现有方法进行对比分析, 采用最优潮流失负荷量指标验证了所提方法的可行性和合理性。主要结论如下:

1) 在获取线路运行参数的基础上, 通过分析线路两端节点电压可行解域大小, 建立了考虑局部电压稳定性的重要性指标, 完善了电网关键线路辨识的考虑因素。

2) 采用主客观综合赋权的改进离差最大化方法, 建立了考虑节点电压、线路负载、线路故障率及综合评价指标, 挖掘了辨识指标携带的信息, 使得电网关键线路辨识结果更加合理。

3) 考虑了电网解列形成孤岛的情况, 采用最优潮流失负荷量衡量电网稳定性。结果表明, 本文方法能够快速辨识对系统供电影响较大的关键线路, 对输电线路的运维管理具有指导意义。

本文所提关键线路辨识及有效性验证方法未考虑实际连锁故障传播机制, 下一步研究工作将围绕其展开。

参考文献

[1] 易俊, 卜广全, 郭强, 等. 巴西“3·21”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 1-6.

YI Jun, BU Guangquan, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Brazilian power grid on March 21, 2018 and its enlightenment to power grid in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 1-6(in Chinese).

[2] 刘云. 巴西电网失步解列情况分析及其启示[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1111-1121.
LIU Yun. Analysis on out-of-step separation in Brazilian power grid and its inspiration[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1111-1121(in Chinese).

[3] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-6.
ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of “9·28” blackout in south Australia and its enlightenment to China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 1-6(in Chinese).

[4] RAHMAN K M J, MUNNEE M M, KHAN S. Largest blackouts around the world: trends and data analyses[C]//Proceedings of 2016 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE). Pune: IEEE, 2016: 155-159.

[5] 曹一家, 王光增, 曹丽华, 等. 基于潮流熵的复杂电网自组织临界态判断模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 1-6.
CAO Yijia, WANG Guangzeng, CAO Lihua, et al. An identification model for self-organized criticality of power grids based on power flow entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 1-6(in Chinese).

[6] 张弘历, 李华强, 杨植雅, 等. 基于潮流增长率泰尔熵的脆弱支路辨识[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2340-2346.
ZHANG Hongli, LI Huaqiang, YANG Zhiya, et al. Identification of vulnerable line based on the Theil entropy of flow growth rate[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2340-2346(in Chinese).

[7] 李美成, 梅文明, 刘永强, 等. 基于改进负载潮流熵指标准确辨识电网脆弱支路的方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 1026-1033.
LI Meicheng, MEI Wenming, LIU Yongqiang, et al. Accurate identification method of brittle branches in power grid based on improved load flow entropy indexes[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1026-1033(in Chinese).

[8] ZHANG Qiao, FAN Wenli, QIU Ziyang, et al. A new identification approach of power system vulnerable lines based on weighed H-index[J]. IEEE Access, 2019, 7: 121421-121431.

[9] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 21-24, 29.
MENG Zhongwei, LU Zongxiang, SONG Jingyan. Comparison analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24, 29(in Chinese).

[10] 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.
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39(in Chinese).

[11] WANG Kai, ZHANG Buhan, ZHANG Zhe, et al. An electrical betweenness approach for vulnerability assessment of power grids considering the capacity of generators and load[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2011, 390(23-24): 4692-4701.

[12] 张涛, 孙晓伟, 徐雪琴, 等. 基于有功潮流介数的电网关键线路辨识[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 193-198.
ZHANG Tao, SUN Xiaowei, XU Xueqin, et al. Identification of critical lines in power grid based on active power flow betweenness[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 193-198(in Chinese).

- [13] 梁才, 刘文颖, 但扬清, 等. 输电线路的潮流介数及其在关键线路识别中的应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 35-40.
LIANG Cai, LIU Wenyong, DAN Yangqing, et al. Flow betweenness of transmission lines and its application in critical line identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 35-40(in Chinese).
- [14] 贾燕冰, 何海丹. 基于绝对潮流介数和分布因子相关度的关键线路辨识方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 307-313.
JIA Yanbing, HE Haidan. Identification of critical line in power systems based on absolute power flow betweenness and distribution factor correlation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 307-313(in Chinese).
- [15] 徐敬友, 陈冲, 罗纯坚, 等. 基于改进复杂网络模型的电网关键环节辨识[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 53-61.
XU Jingyou, CHEN Chong, LUO Chunjian, et al. Identification of power grid key parts based on improved complex network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 53-61(in Chinese).
- [16] LU Nan, LIU Tianqi, WU Lei, et al. Vulnerable transmission lines identification based on complex network theory[C]//Proceedings of 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Atlanta: IEEE, 2019: 1-5.
- [17] 陶鸿飞, 谢栋, 赵福林, 等. 含大规模风电并网电力系统的关键线路综合辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 115-123.
TAO Hongfei, XIE Dong, ZHAO Fulin, et al. Comprehensive identification of critical line in power systems with large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 115-123(in Chinese).
- [18] 薛安成, 刘瑞煌, 李铭凯, 等. 基于支路电压方程的在线电压稳定指标[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 95-103.
XUE Ancheng, LIU Ruihuang, LI Mingkai, et al. A new on-line voltage stability index based on voltage equation of the branch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 95-103(in Chinese).
- [19] 周双喜, 姜勇, 朱凌志. 电力系统电压静态稳定性指标述评[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 1-7.
ZHOU Shuangxi, JIANG Yong, ZHU Lingzhi. Review on steady state voltage stability indices of power systems[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 1-7(in Chinese).
- [20] 刘道伟, 谢小荣, 穆钢, 等. 基于同步相量测量的电力系统在线电压稳定指标[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 13-17.
LIU Daowei, XIE Xiaorong, MU Gang, et al. An on-line voltage stability index of power system based on synchronized phasor measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 13-17(in Chinese).
- [21] 韩畅, 林振智, 杨莉, 等. 台风条件下区域电力系统的重要线路多维度辨识[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 118-125.
HAN Chang, LIN Zhenzhi, YANG Li, et al. Multi-dimensional critical line identification for regional power systems under typhoon[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 118-125(in Chinese).
- [22] 胡秦然, 丁昊晖, 陈心宜, 等. 美国加州 2020 年轮流停电事故分析及其对中国电网的启示[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 11-18.
HU Qinran, DING Haohui, CHEN Xinyi, et al. Analysis on rotating power outage in California, USA in 2020 and its enlightenment to power grid of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 11-18(in Chinese).
- [23] 王建, 熊小伏, 李哲, 等. 气象环境相关的输电线路故障时间分布特征及模拟[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 109-114, 123.
WANG Jian, XIONG Xiaofu, LI Zhe, et al. Time distribution of weather-related transmission line failure and its fitting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 109-114, 123(in Chinese).
- [24] 蔡泽祥, 王星华, 任晓娜. 复杂网络理论及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 114-121.
CAI Zexiang, WANG Xinghua, REN Xiaona. A review of complex network theory and its application in power systems[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 114-121(in Chinese).
- [25] 王应明. 运用离差最大化方法进行多指标决策与排序[J]. 系统工程与电子技术, 1998(7): 24-26, 31.
WANG Yingming. Using the method of maximizing deviations to make decision for multiindices[J]. Systems Engineering and Electronics, 1998(7): 24-26, 31(in Chinese).
- [26] 朱大锐, 王睿, 段建东, 等. 考虑多影响因素的关键输电线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5938-5947.
ZHU Darui, WANG Rui, DUAN Jiandong, et al. Identification of critical transmission lines considering multiple influencing factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5938-5947(in Chinese).
- [27] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5, 31.
CAO Yijia, CHEN Xiaogang, SUN Ke. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12): 1-5, 31(in Chinese).
- [28] CHEN Xiaogang, SUN Ke, CAO Yijia, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[C]//Proceedings of 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa: IEEE, 2007: 1-6.
- [29] 何培颖, 房鑫炎. 基于连锁过载故障发生机理的关键线路辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(8): 76-80.
HE Peiyong, FANG Xinyan. Identification of critical lines based on the developing mechanism of cascading overload fault[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2018, 30(8): 76-80(in Chinese).
- [30] 刘威, 张东霞, 丁玉成, 等. 基于随机矩阵理论与熵理论的电网薄弱环节辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5893-5901.
LIU Wei, ZHANG Dongxia, DING Yucheng, et al. Power grid vulnerability identification methods based on random matrix theory and entropy theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5893-5901(in Chinese).



南斌

在线出版日期: 2022-05-05。

收稿日期: 2021-12-13。

作者简介:

南斌(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行, E-mail: 3160105500@zju.edu.cn;
董树锋(1982), 男, 副教授, 博士生导师, 通信作者, 研究方向为电力系统高性能计算、综合能源系统优化运行, E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn;
徐成司(1995), 男, 硕士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, E-mail: 3140103128@zju.edu.cn。

(责任编辑 宋钰龙)