

DOI: 10.7667/PSPC161939

# 计及无功潮流影响的传输介数概念及其 电网关键线路辨识研究

曹煜<sup>1</sup>, 郭创新<sup>1</sup>, 章禹<sup>1</sup>, 朱炳铨<sup>2</sup>, 徐立中<sup>2</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

**摘要:** 在潮流介数的基础上, 考虑了线路在传输无功潮流方面的作用, 提出线路传输介数并将其用于辨识电网关键线路。由于充足的无功支持是电压稳定性的基础, 将无功传输的作用纳入到关键线路辨识方法中后, 传输介数能准确地辨识出影响系统电压稳定性的重要线路。关键线路的连续故障会导致有功和无功传输通道的破坏, 需要切除部分负荷以维持系统频率和电压稳定, 故采用基于最优潮流的失负荷量作为故障线路重要性的评价指标, 以验证具有高传输介数的线路在电网运行中承担关键作用。IEEE39 和 IEEE118 节点系统算例表明, 传输介数能够辨识出系统中影响节点电压稳定水平的重要线路, 其辨识效果优于潮流介数, 基于传输介数的电网关键线路辨识方法具有合理性和有效性。

**关键词:** 传输介数; 关键线路辨识; 潮流追踪; 电压稳定性; 失负荷量; 最优潮流

## Study of the concept of transmission betweenness considering the effect of reactive power flow and its application in identification of critical lines in power grid

CAO Yu<sup>1</sup>, GUO Chuangxin<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, ZHU Bingquan<sup>2</sup>, XU Lizhong<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** Based on flow betweenness, transmission betweenness puts into consideration the role of a line in transmission of reactive power. Transmission betweenness is proposed and applied into identification of critical lines in power grid. Since abundant reactive power support is the base of voltage stability, transmission betweenness considering the effect of reactive power flow can identify critical lines that are important to voltage stability. Successive faults of critical lines can destroy transmission corridors of active and reactive power flow. On this occasion, some loads have to be cut off to maintain frequency and voltage stability. So, load shedding based on optimal power flow is calculated as the evaluation index to verify that transmission lines with high transmission betweenness are critical indeed in power grid. The results of IEEE 39-bus system and IEEE 118-bus system show that transmission betweenness is superior to flow betweenness in identification of critical lines that influence voltage stability, and the identification method of critical lines in power grid based on transmission betweenness is reasonable and effective.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900100), and Science Technology Program of State Grid Zhejiang Electric Power Company (No. 5211SX1500R4).

**Key words:** transmission betweenness; identification of critical lines; power flow tracing; voltage stability; load shedding; optimal power flow

## 0 引言

近年来, 世界范围内的大停电事故时有发生。

多起大停电事故的调查报告<sup>[1-2]</sup>表明, 大停电事故的起因均是由个别元件故障引发的连锁故障。输电线路作为电能的传输媒介, 对维持电力系统稳定运行起着重要作用。某些关键线路故障将迅速改变潮流分布, 造成其他线路跳闸和电压崩溃, 继而引发连锁故障。因此, 对电网中的关键线路进行辨识, 加

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900100); 国网浙江省电力公司科技项目(5211SX1500R4)

强对关键线路的监视与保护，能有效地降低大停电风险，提高电力系统的供电可靠性。

复杂网络理论及其改进模型被大量应用于电网关键线路的辨识。Watts D J 等人提出了“小世界网络”模型<sup>[3]</sup>，并得出了美国西部电网是介于规则网络和随机网络之间的小世界网络的结论。基于复杂网络理论，利用节点和支路的介数来辨识电网关键环节的方法被提出<sup>[4]</sup>。文献[5]在纯粹拓扑模型的基础上，将线路电抗值和节点有功功率分别作为边和节点的权重，提出了加权介数的概念。文献[6-7]进一步考虑运行容量和潮流传输路径的影响，对加权介数进行了改进。加权介数无法克服节点间的功率按最短路径传输的弊端，忽略了功率是遵循基尔霍夫定律进行分流，即所有线路都可能成为电流传播路径的事实。文献[8]提出用电流传输分布因子PTDF来描述电能传输过程中线路不同的分流情况，即采用发电机-负荷节点对单位电流注入流出下，流经某条线路的电流来表征该线路在传输该节点对功率的作用。在此基础上，电气介数<sup>[9]</sup>进一步考虑了功率沿所有路径传播这一事实对线路介数的影响，更加符合电力系统真实情况，缺陷在于没有考虑线路中电流的方向性。文献[10]基于潮流跟踪方法，提出线路潮流介数的指标，综合考虑了电网结构和系统运行方式，能够反映有功潮流在全网的分布情况，也量化了线路对全网潮流传播的贡献。

以上的模型和方法可以不同程度地描述线路在电力系统运行中的重要性，但它们都是以线路传输有功功率为研究对象，却都忽视了线路在传输无功潮流方面的作用。尽管无功功率不适合大规模远距离传输，大多在规划层面实现就地平衡，但在重要无功补偿点附近，线路承担着将无功运输到邻近负荷节点的作用。另外，由于站与站之间存在无功交互作用<sup>[11]</sup>，这些节点之间同样存在较大数量的无功功率交换。处于无功功率交换通道的线路对于传输无功功率和维持相关节点电压稳定起着重要作用。如何量化线路在传输无功潮流方面的作用，并将其纳入电网关键线路的辨识中去，是本文尝试解决的问题。

本文首先在现有的潮流介数<sup>[10]</sup>的基础上，考虑无功潮流的作用，提出传输介数概念，并将其用于辨识系统的关键线路。该方法吸收了潮流介数能体现电流可分和电流有方向性的优点，并能够反映线路在无功潮流传输过程中的作用，使其物理背景更加符合电力系统的特点；其次，采用基于最优潮流的失负荷量作为评价指标，来反映关键线路故障对电力系统状态造成的影响，由此验证高传输介数线

路在电力系统中的重要性；最后，IEEE39和IEEE118节点系统的仿真结果表明，本文提出的传输介数能够准确地辨识电网关键线路。

## 1 传输介数

### 1.1 有功潮流因子

文献[10]提出的潮流介数克服了以往介数指标假设节点间功率按最短路径传输和未考虑潮流方向性的弊端，具有较好的特性。其定义如式(1)。

$$F_{Bij} = \sum_{m \in G} \sum_{n \in L} \min(S_m, S_n) \frac{P_{ij}(m, n)}{P(m, n)} \quad (1)$$

式中： $G$ 为发电机节点集合； $L$ 为负荷节点集合； $P(m, n)$ 为发电机 $m$ 到负荷 $n$ 所传输的有功功率； $P_{ij}(m, n)$ 为发电机 $m$ 到负荷 $n$ 所传输的有功功率在线路 $i-j$ 上的分量； $\min(S_m, S_n)$ 为单一潮流介数的权重，取发电机 $m$ 和负荷 $n$ 的视在功率中的较小值，表示 $m$ 与 $n$ 之间最大可传输的视在功率。

事实上，视在功率分为有功功率和无功功率，文献[10]仅仅考虑了线路在传输有功潮流方面的作用，而在本文中，将同时考虑线路在传输有功潮流和无功潮流两方面的作用。因此，借鉴潮流介数的思路，定义有功潮流因子为

$$F_{Pij} = \sum_{m \in G_p} \sum_{n \in L_p} \min(P_m, P_n) \frac{P_{ij}(m, n)}{P(m, n)} \quad (2)$$

式中： $F_{Pij}$ 为线路 $i-j$ 的有功潮流因子； $G_p$ 为发电机节点集合； $L_p$ 为负荷节点集合； $P(m, n)$ 为发电机 $m$ 到负荷 $n$ 所传输的有功功率； $P_{ij}(m, n)$ 为发电机 $m$ 到负荷 $n$ 所传输的有功功率在线路 $i-j$ 上的分量； $\min(P_m, P_n)$ 为单一有功潮流因子的权重，取发电机 $m$ 和负荷 $n$ 的有功功率中的较小值，表示 $m$ 与 $n$ 之间最大可传输的有功功率。相较于文献[10]中的潮流介数，本文用 $\min(P_m, P_n)$ 代替 $\min(S_m, S_n)$ ，体现出有功潮流和无功潮流分开分析的思路。

对于式(2)中两个关键量 $P_{ij}(m, n)$ 和 $P(m, n)$ 的计算，将在1.3节中阐述。

有功潮流因子充分吸收了有功潮流介数的优点，综合了线路在不同发电负荷节点对之间传输路径中被利用的深度和广度，深度即在各发电负荷节点对之间承担的有功潮流传输量，广度即被利用的发电负荷节点对数量及权重。

### 1.2 无功潮流因子

电力系统稳定性包括频率稳定和电压稳定，其中，频率稳定是以系统有功功率的平衡为前提，而电压稳定则与无功功率平衡密切相关<sup>[12-13]</sup>。为了维持负荷节点电压稳定，必须由无功功率电源提供足

够的无功功率。输电线路承担着传输无功潮流的任务,关键线路的故障可能引起无功传输通道破坏,进而造成相关节点电压崩溃,引发连锁故障。因此,在辨识电网关键线路时,考虑输电线路在传输无功潮流和维持电压稳定方面的作用是非常有必要的。

文献[10]所采用的潮流追踪算法不仅可以对有功潮流进行追踪,对无功潮流也同样适用<sup>[14]</sup>。为了量化线路在传输无功潮流方面的作用,仿照有功潮流因子的思路,定义无功潮流因子为

$$F_{Q_{ij}} = \sum_{m \in G_Q} \sum_{n \in L_Q} \min(Q_m, Q_n) \frac{Q_{ij}(m, n)}{Q(m, n)} \quad (3)$$

式中:  $F_{Q_{ij}}$  为线路  $i-j$  的无功潮流因子;  $G_Q$  为无功电源节点集合;  $L_Q$  为无功负荷节点集合;  $Q(m, n)$  为无功电源  $m$  到无功负荷  $n$  所传输的无功功率;  $Q_{ij}(m, n)$  为无功电源  $m$  到无功负荷  $n$  所传输的无功功率在线路  $i-j$  上的分量;  $\min(Q_m, Q_n)$  为单一无功潮流因子的权重,取无功电源  $m$  和无功负荷  $n$  的无功功率中的较小值,表示  $m$  与  $n$  之间最大可传输的无功功率。需要注意的是,这里的无功电源指输出无功功率的节点,包括迟相运行的发电机节点和无功补偿装置;无功负荷指消耗无功功率的节点,包括负荷节点和进相运行的发电机节点。

对于式(3)中两个关键量  $Q_{ij}(m, n)$  和  $Q(m, n)$  的计算,将在 1.3 节中阐述。

为了验证无功潮流因子的作用,引入节点电压偏移量<sup>[15]</sup>作为参照指标,量化线路故障对电网电压稳定性的影响。定义如式(4)。

$$\text{offset}_{ij} = \sum_{k=1}^N |1 - u_k^*| \quad (4)$$

式中:  $\text{offset}_{ij}$  表示线路  $i-j$  故障后引起的节点电压偏移量;  $u_k^*$  表示节点  $k$  的电压标幺值;  $N$  表示节点数。

### 1.3 潮流追踪方法

有功潮流因子和无功潮流因子的计算难点分别在于计算式(2)中的关键量  $P_{ij}(m, n)$  和  $P(m, n)$  以及式(3)中的关键量  $Q_{ij}(m, n)$  和  $Q(m, n)$ 。本文采用潮流追踪算法<sup>[16-17]</sup>分别对有功潮流和无功潮流进行追踪,以求取式(2)和式(3)中的关键量。接下来以有功潮流追踪为例,阐述潮流追踪的步骤如下。

1) 根据初始状态,计算系统的潮流结果,得到每个节点的电压和相角、线路首末端传输功率、线路损耗和发电机输出功率等。

2) 对系统进行无损化等值处理。将线路上的有功损耗  $\Delta P_{ij}$  平均分配到线路的两端节点,作为两端节点有功负荷,使得

$$P_i^{\text{net}} = P_i + \sum_{j \in N_i} \frac{\Delta P_{ij}}{2} \quad (5)$$

式中:  $P_i^{\text{net}}$  是有功无损网络中节点  $i$  的有功负荷;  $P_i$  是节点  $i$  初始的有功负荷;  $N_i$  是与节点  $i$  有线路连接的节点集合;  $\Delta P_{ij}$  是线路  $i-j$  的有功损耗。

3) 建立有功无损网络的顺流分配矩阵  $A_d$  和逆流分配矩阵  $A_u$ , 分别如式(6)、式(7)所示。

$$[A_d]_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ -P_{ij} / P_{T_i} & i \neq j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$[A_u]_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ -P_{ij} / P_{T_j} & i \neq j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P_{ij}$  是线路  $i-j$  上的有功潮流;  $P_{T_i}$ 、 $P_{T_j}$  分别为节点  $i$  和节点  $j$  的总注入有功功率。

4) 计算发电机  $m$  到负荷  $n$  所传输的有功功率  $P(m, n)$ , 方法如式(8)。

$$P(m, n) = P_n^{\text{net}} \times \frac{[A_d^{-1}]_{nm} P_m}{P_{T_n}} \quad (8)$$

式中:  $P_n^{\text{net}}$  是有功无损网络中节点  $n$  的有功负荷;  $P_{T_n}$  是节点  $n$  的总注入有功功率;  $P_m$  是发电机节点  $m$  的有功功率;  $A_d^{-1}$  是顺流分配矩阵  $A_d$  的逆。

5) 发电机  $m$  到负荷  $n$  所传输的有功功率在线路  $i-j$  上的分量  $P_{ij}(m, n)$ , 方法如式(9)。

$$P_{ij}(m, n) = P_{ij} \times \frac{[A_d^{-1}]_{jn} P_n^{\text{net}}}{P_{T_j}} \times \frac{[A_u^{-1}]_{im} P_m}{P_{T_i}} \quad (9)$$

式中:  $P_{ij}$  是有功无损网络中线路  $i-j$  的有功潮流;  $A_d^{-1}$  是顺流分配矩阵  $A_d$  的逆;  $A_u^{-1}$  是逆流分配矩阵  $A_u$  的逆。

通过以上步骤,可实现有功潮流追踪,从而计算得到有功潮流因子关键量  $P_{ij}(m, n)$  和  $P(m, n)$ 。无功潮流追踪的步骤与上述有功潮流追踪的步骤基本一致,仅在不损化等值处理上有所差异<sup>[14]</sup>。在进行无功潮流追踪时,线路等效为  $\pi$  型模型,将线路的充电功率和无功损耗平均分配到线路的两端节点,分别作为两端节点的无功电源和无功负荷,使得

$$Q_i^{\text{net}} = Q_i - \sum_{j \in N_i} U_i^2 \times \frac{B_{ij}}{2} + \frac{\Delta Q_{ij}}{2} \quad (10)$$

式中:  $Q_i^{\text{net}}$  是无功无损网络中节点  $i$  的无功量;  $Q_i$  是节点  $i$  初始的无功负荷;  $N_i$  是与节点  $i$  有线路连接的节点集合;  $U_i$  是节点  $i$  的电压幅值;  $B_{ij}$  是线路  $i-j$  的等效对地电纳;  $\Delta Q_{ij}$  是线路  $i-j$  的无功损耗。如果  $Q_i^{\text{net}}$  大于零,节点  $i$  应视作无功负荷节点;如果

$Q_i^{\text{net}}$  小于零, 节点  $i$  应视作无功电源节点。

#### 1.4 传输介数

为了综合反映输电线路在传输有功潮流和无功潮流方面的作用, 量化线路在电力系统运行过程中的重要程度, 准确地辨识出电网关键线路, 本文提出传输介数的概念。

由于电网中负荷和发电机的功率因数一般在 0.85 以上<sup>[12]</sup>, 所以全网有功负荷和有功出力一般比无功负荷和无功出力大数倍, 由式(2)、式(3)可知, 计算得到的有功潮流因子相应地也会比无功潮流因子大数倍。如果简单地将线路有功潮流因子和无功潮流因子相加作为传输介数, 无功潮流因子的作用将无法体现。出于这种考量, 本文使用有功潮流因子和无功潮流因子的标幺值来计算传输介数, 并通过有功潮流因子和无功潮流因子的权重系数来调节两者的权重。

线路  $i-j$  的传输介数  $B_{ij}$  定义如式(11)。

$$B_{ij} = \sqrt{\omega_P \times F_{Pij}^2 + \omega_Q \times F_{Qij}^2} \quad (11)$$

式中,  $\omega_P$  和  $\omega_Q$  分别是有功潮流因子和无功潮流因子的权重系数, 可根据对有功潮流和无功潮流的侧重程度动态调整。特别地, 将在第 4 部分的算例分析中对比三种权重系数取值的辨识效果, 以此确定  $\omega_P$  和  $\omega_Q$  的取值:

- 1)  $\omega_P=1, \omega_Q=0$ , 此时只考虑有功潮流传输;
- 2)  $\omega_P=0, \omega_Q=1$ , 此时只考虑无功潮流传输;
- 3)  $\omega_P=0.5, \omega_Q=0.5$ , 此时同等程度考虑有功潮流传输和无功潮流传输。

$F_{Pij}^*$  和  $F_{Qij}^*$  分别是有功潮流因子和无功潮流因子的标幺值, 计算方法如式(12)。

$$\begin{cases} F_{Pij}^* = F_{Pij} / \max(F_P) \\ F_{Qij}^* = F_{Qij} / \max(F_Q) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $F_{Pij}$  和  $F_{Qij}$  分别是式(2)和式(3)定义有功潮流因子和无功潮流因子;  $\max(F_P)$  和  $\max(F_Q)$  分别表示线路有功潮流因子和无功潮流因子的最大值。

## 2 基于最优潮流的失负荷量评价指标

为了验证基于传输介数的电网关键线路辨识方法的有效性, 需要采用一定的评价指标来验证辨识出来的关键线路的重要性。已有的一些文献采用了系统连通性<sup>[18]</sup>、最大传输能力<sup>[19]</sup>和潮流熵<sup>[20]</sup>等指标来验证, 这些指标大多只考虑了系统受扰动后拓扑结构的变化, 忽略了系统解列后各孤岛内部的自我调节, 有一定的局限性。线路相继断开后, 系统可能解列成若干个孤岛, 但可以通过调节各个孤岛内的发电机出力来尽量减少切负荷。当一些重要线路

故障时, 系统内的有功和无功传输通道遭到破坏, 即使调整发电机出力也无法避免节点电压越限和系统频率失稳, 为了保证系统继续安全运行, 被迫切除部分负荷, 而这个满足安全约束下最小的失负荷量可以直观地反映故障线路的重要性。考虑到实际系统中关心负荷有功量的削减情况, 本文采用基于最优潮流的失负荷量  $\text{LoadShed}$  作为评价指标, 验证关键线路的重要性, 计算方法如式(13)。

$$\text{LoadShed} = \sum_{i \in L} P_{\text{loss}_i} \quad (13)$$

式中:  $L$  为负荷节点集合;  $P_{\text{loss}_i}$  是负荷节点  $i$  的有功功率削减量。而  $P_{\text{loss}_i}$  的计算采用最优潮流的方法, 模型如下:

$$\min \sum_{i \in L} P_{\text{loss}_i} \quad (14)$$

s.t.

$$\sum_{n \in L} P_n - P_{\text{loss}_n} - \sum_{m \in G} P_m + \sum_{l \in \text{Lines}} \Delta P_l = 0 \quad (15)$$

$$\sum_{n \in L} Q_n - Q_{\text{loss}_n} - \sum_{m \in G} Q_m + \sum_{l \in \text{Lines}} \Delta Q_l = 0 \quad (16)$$

$$S_{ij}^f(\theta, V) < S_{ij}^{\max}, i, j \in \text{Bus} \quad (17)$$

$$S_{ij}^t(\theta, V) < S_{ij}^{\max}, i, j \in \text{Bus} \quad (18)$$

$$V_i^{\min} < V_i < V_i^{\max}, i \in \text{Bus} \quad (19)$$

$$P_m^{\min} < P_m < P_m^{\max}, m \in G \quad (20)$$

$$Q_m^{\min} < Q_m < Q_m^{\max}, m \in G \quad (21)$$

式(15)、式(16)分别是有功和无功平衡约束; 式(17)、式(18)是线路首末端功率约束; 式(19)是节点电压约束; 式(20)、式(21)分别是发电机有功和无功出力约束。采用  $\text{Matpower}$  仿真组件求解上述模型, 求出关键线路断开后的失负荷量, 作为关键线路重要性的评价指标。

## 3 关键线路动态攻击方式

本文采用如下 5 种攻击方式分别攻击电网中的线路, 对比 5 种攻击方式下的失负荷量, 来确定传输介数中有功潮流因子和无功潮流因子的权重系数, 也将验证基于传输介数的电网关键线路辨识方法比潮流介数<sup>[10]</sup>更有效。

1) 基于有功潮流因子的动态攻击, 即设置  $\omega_P=1, \omega_Q=0$ 。每次攻击有功潮流因子最大的线路, 攻击结束后重新计算剩余线路有功潮流因子。

2) 基于无功潮流因子的动态攻击, 即设置  $\omega_P=0, \omega_Q=1$ 。每次攻击无功潮流因子最大的线路, 攻击结束后重新计算剩余线路无功潮流因子。

3) 基于传输介数的动态攻击, 即设置  $\omega_P=0.5, \omega_Q=0.5$ 。每次攻击传输介数最大的线路, 攻击结束

后重新计算剩余线路的传输介数。

4) 基于潮流介数的动态攻击。每次攻击潮流介数最大的线路, 攻击结束后重新计算剩余线路的潮流介数。

5) 随机攻击。每次随机选择一条线路攻击。

基于传输介数的动态攻击流程如图 1 所示。其余的 4 种攻击流程与图 1 基本相同, 只是在攻击线路的选取依据上各有不同。

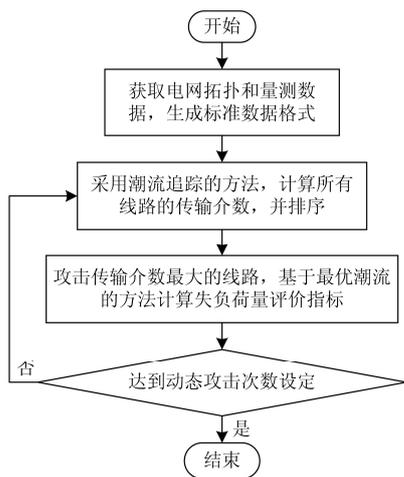


图 1 基于传输介数的动态攻击流程

Fig. 1 Flow chart of dynamic attack based on transmission betweenness

## 4 算例分析

### 4.1 IEEE39 节点系统算例

采用标准 IEEE39 节点系统进行仿真分析, 该系统包含 10 台发电机、19 个负荷和 46 条线路, 系统拓扑图如图 2 所示。

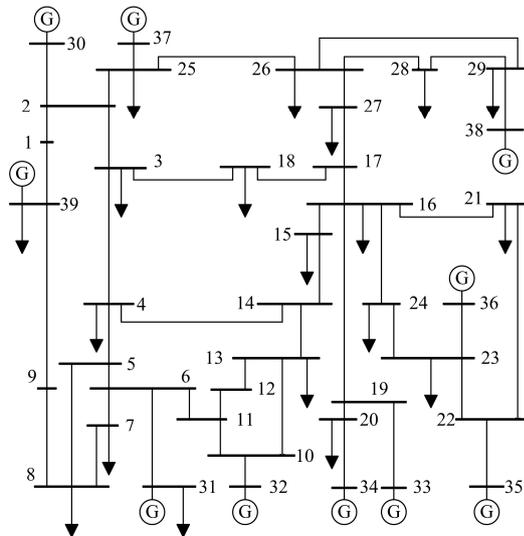


图 2 IEEE39 节点系统接线图

Fig. 2 Connection diagram of IEEE 39-bus system

### 1) 权重系数的确定

为了确定传输介数中有功潮流因子和无功潮流因子的权重系数, 同时验证基于传输介数的电网关键线路辨识方法的有效性, 本文采用第 3 节介绍的 5 种攻击方式对系统进行攻击, 以第 2 节介绍的基于最优潮流的失负荷量作为评价指标, 比较选取不同权重系数时, 传输介数辨识关键线路的效率差异, 从而确定传输介数中有功潮流因子和无功潮流因子的权重系数。同时比较传输介数和潮流介数的失负荷量, 验证本文提出的传输介数比潮流介数更有效。

连续动态攻击 10 次, 5 种攻击方式的失负荷量见表 1。

表 1 不同攻击方式的失负荷量

Table 1 Load shedding of different attack strategies

次 数	MW				随机 攻击
	$\omega_P=1$ $\omega_Q=0$	$\omega_P=0$ $\omega_Q=1$	$\omega_P=0.5$ $\omega_Q=0.5$	潮流介数 攻击	
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	131	0	217	217	0
4	812	554	1098	913	164
5	1230	1108	1818	1303	649
6	1623	1662	2673	1865	823
7	2125	2216	3227	2419	985
8	2555	2770	3781	2973	1251
9	3201	3324	4335	3527	1445
10	4055	3878	4889	4081	1640

将 5 种攻击方式的 10 次攻击结果绘制成失负荷量变化曲线, 如图 3 所示。

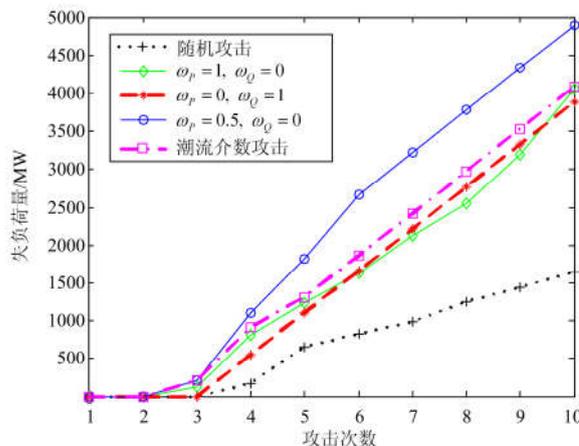


图 3 IEEE39 节点系统失负荷量变化

Fig. 3 Load shedding of IEEE39-bus system

从图 3 的整体曲线可以看出, 无论是基于有功潮流因子( $\omega_P=1, \omega_Q=0$ )的动态攻击、基于无功潮流

因子( $\omega_P=0$ ,  $\omega_Q=1$ )的动态攻击、基于传输介数( $\omega_P=0.5$ ,  $\omega_Q=0.5$ )的动态攻击还是基于潮流介数<sup>[10]</sup>的动态攻击, 它们的失负荷量的增长速度均明显快于随机攻击, 也就是说不管是偏重有功潮流传输还是无功潮流传输, 传输介数用于电网关键线路辨识的方法都是有效的, 潮流介数也能较好地辨识电网关键线路。

比较  $\omega_P$  和  $\omega_Q$  的 3 种取值情况可以发现, 前两次攻击结束后, 3 种取值情况都没有出现失负荷, 这是因为前两次攻击的联络线断开后, 电网解列成了孤岛, 但孤岛上通过调整发电机出力保证了出力和负荷的平衡, 所以没有出现失负荷。尽管没有失负荷, 前两次的攻击使得重要的联络线断开, 整个电网的连通性明显下降, 电网变得更加脆弱, 等到第 3 次攻击时, 基于有功潮流因子( $\omega_P=1$ ,  $\omega_Q=0$ )的动态攻击和基于传输介数( $\omega_P=0.5$ ,  $\omega_Q=0.5$ )的动态攻击开始出现失负荷, 并且后者的失负荷量更大。从第 3 次攻击到第 10 次攻击, 传输介数的失负荷量始终大于有功潮流因子和无功潮流因子的失负荷量, 这是因为传输介数综合考虑了有功潮流传输和无功潮流传输的作用, 能够辨识出对系统频率稳定和电压稳定都起较大作用的线路, 这些线路的故障断开将极大地影响电网的稳定。所以,  $\omega_P=0.5$ 、 $\omega_Q=0.5$  的取值较  $\omega_P=1$ 、 $\omega_Q=0$  和  $\omega_P=0$ 、 $\omega_Q=1$  的取值更能全面反映线路在电网安全稳定运行中的作用。

由此, 本文确定在传输介数的定义中, 有功潮流因子权重系数  $\omega_P$  和无功潮流因子权重系数  $\omega_Q$  均设置为 0.5, 即同等程度地考虑有功潮流传输和无功潮流传输的作用。

进一步对比  $\omega_P=0.5$ 、 $\omega_Q=0.5$  时的传输介数和潮流介数的失负荷量可以看到, 从第 4 次攻击开始, 基于传输介数的失负荷量始终大于潮流介数的失负荷量, 并且这种差距在不断拉大, 这是因为传输介数充分考虑了线路在无功传输和电压稳定方面的作用, 辨识出的关键线路兼顾有功和无功传输、频率和电压稳定的因素, 所以在电网关键线路辨识方面, 本文提出的传输介数优于潮流介数。

## 2) 关键线路辨识结果

在前面的权重系数确定环节中已经看到: 相比较文献[10]提出的潮流介数而言,  $\omega_P$  和  $\omega_Q$  均设置为 0.5 的传输介数能够更好地辨识关键线路。为了进一步对比潮流介数和本文提出的传输介数的辨识效果, 分别计算 IEEE39 系统初始状态下所有线路的潮流介数和传输介数, 选择排序前十名的线路作为关键线路, 结果如表 2 所示。

表 2 关键线路辨识结果

排序	潮流介数	传输介数
1	16-17	16-17
2	17-18	15-16
3	22-35	16-19
4	23-24	17-18
5	19-33	22-35
6	23-36	19-33
7	3-18	23-24
8	10-32	5-8
9	3-4	23-36
10	21-22	3-18

可以看到, 无论是在潮流介数还是传输介数辨识结果中, 线路 16-17 均排在首位, 即它是公认的最重要线路, 究其原因, 在于线路 16-17 是发电机 33 至 36 与其他发电机和负荷节点连接的枢纽通道, 一旦线路 16-17 断开, 将导致发电机 33 至 36 从主网中解列, 形成两个孤岛, 连通性和输电可靠性大大降低。从有功潮流因子角度来说, 线路 16-17 的有功潮流因子达到 3788, 远超其他线路, 凭借它在有功潮流传输方面承担的重要作用, 它在传输介数排序中也得以位居首位。

在传输介数的辨识结果中, 线路 15-16 和线路 16-19 排在了线路 17-18 前面, 这是因为线路 15-16 承担着发电机 33 至 36 与其他负荷节点的无功传输任务, 而线路 16-19 是发电机 33 和 34 将无功功率送出的唯一通路, 它们两者是无功潮流因子最大和次大的两条线路, 无功传输的作用不言而喻, 同时它们在有功传输方面也作用颇大, 所以传输介数排在了第二和第三位。

为了说明将无功潮流传输纳入关键线路辨识方法中的必要性和有效性, 按照式(4)的定义, 计算系统中每条线路故障断开后系统的电压偏移量, 去除潮流不收敛的情况(都是发电机出口线路), 得到电压偏移量排在前五名的线路, 如表 3 所示。

表 3 故障后电压偏移量最大的线路

排序	故障线路	电压偏移量
1	16-19	2.631
2	15-16	1.243
3	5-8	1.171
4	6-31	1.166
5	12-13	1.146

从表 2 的数据中, 对比传输介数和潮流介数的辨识结果可以发现, 在传输介数辨识出来的十条关

键线路中,有七条线路出现在潮流介数的辨识结果中,剩余三条是线路 16-19、线路 15-16 和线路 5-8,而这三条线路正是表 3 中排名前三名的线路。与此形成对比的是,表 2 里潮流介数辨识出的十条关键线路中,没有一条出现在表 3 中。也就是说,文献 [10] 提出的潮流介数无法考虑线路在无功传输方面的作用,因而无法辨识出影响电压稳定性的重要线路,而通过引入无功潮流因子,传输介数很好地弥补了这个缺陷。电压稳定性是电力系统十分重视的问题,而电压稳定的基础正是充足的无功支持,因此,将线路在无功潮流传输方面的作用引入关键线路辨识的做法是有必要的,算例的结果也证实了此方法的有效性。

#### 4.2 IEEE118 节点系统算例

为了进一步对比潮流介数与本文提出的传输介数的辨识效果,采用第 3 节介绍的基于潮流介数、基于传输介数( $\omega_P$  和  $\omega_Q$  均设置为 0.5)和随机攻击的三种攻击方式对 IEEE118 系统进行攻击。

IEEE118 系统包含 54 台发电机、99 个负荷和 186 条线路,全网负荷为 4242 MW。

连续攻击 16 次,三种攻击方式的失负荷量如图 4。从图中可以看出,基于传输介数的攻击从第 5 次开始出现失负荷,而随机攻击和基于潮流介数的攻击分别直到第 9 次和第 8 次攻击才出现失负荷,且传输介数的曲线增长速度明显快于潮流介数和随机攻击的曲线,说明基于传输介数的线路辨识方法相较于基于潮流介数的辨识方法而言,效率更高,能够更快、更准地辨识出关键线路。

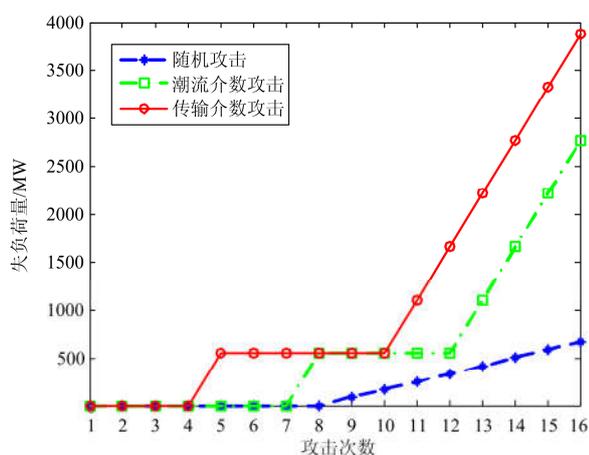


图 4 IEEE118 节点系统失负荷量变化

Fig. 4 Load shedding of IEEE118-bus system

在第 16 次攻击后,基于传输介数的动态攻击的失负荷量已经达到 3878 MW,接近全网总负荷,说明在切除这 16 条关键线路后,网络的连通性受到严

重破坏,整个电网基本处于瘫痪状态,无法保证正常的电力供应。而随机攻击和基于潮流介数的动态攻击的失负荷量分别是 672 MW 和 2770 MW,说明基于潮流介数和基于传输介数的辨识方法均有一定的合理性,且基于传输介数的关键线路辨识方法更有效。

## 5 结论

1) 提出了线路传输介数指标,它吸收了有功潮流介数能体现电流可分和电流有方向性的优点,并考虑了线路在无功潮流传输过程中的作用,使其物理背景更加符合电力系统实际。

2) 用基于最优潮流的失负荷量作为评价指标,验证辨识出来的关键线路的重要性。该评价指标从电力系统实际关注点出发,能直观地反映线路故障对电网的影响。

3) IEEE39 节点系统算例和 IEEE118 节点系统算例表明,高传输介数线路在电网运行过程中承担关键作用,基于传输介数的电网关键线路辨识方法具有合理性和有效性。

## 参考文献

- [1] 印永华,郭剑波,赵建军,等. 美加“8.14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-11.  
YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11.
- [2] 汤涌,卜广全,易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 167-174.  
TANG Yong, BU Guangquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian power grid on July 30 and 31, 2012[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 167-174.
- [3] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440.
- [4] 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.  
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.
- [5] 丁明,韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性

- 评估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 20-25.  
DING Ming, HAN Pingping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28(10): 20-25.
- [6] 何俊, 庞松龄, 禹冰, 等. 基于容量介数指标的电网脆弱线路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 30-35.  
HE Jun, PANG Songling, YU Bing, et al. Vulnerable line identification of power grid based on capacity betweenness index[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 30-35.
- [7] 张富超, 谢成荣, 沈立新, 等. 基于源流路径链和输电介数的电网关键线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 7-12.  
ZHANG Fuchao, XIE Chengrong, SHEN Lixin, et al. Identification of power grid critical lines based on path chains and transmission betweenness[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 7-12.
- [8] BOMPARD E, WU D, XUE F. Structural vulnerability of power systems: a topological approach[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1334-1340.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 董萍, 徐良德, 刘明波, 等. 多站点无功补偿装置的多目标协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 587-595.  
DONG Ping, XU Liangde, LIU Mingbo, et al. Multi-objective coordinated control of reactive compensation devices among multiple substations[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 587-595.
- [12] 韩祯祥. 电力系统分析[M]. 4版. 杭州: 浙江大学出版社, 2009.
- [13] LI Zhengming, LI Wenwen, PAN Tianhong. An optimized compensation strategy of DVR for micro-grid voltage sag[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.  
DOI 10.1186/s41601-016-0018-9
- [14] TIWARI A, AJJARAPU V. Reactive power cost allocation based on modified power flow tracing methodology[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting: IEEE, 2007: 1-7.
- [15] 付英杰. 含分布式电源的配电网无功/电压控制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.  
FU Yingjie. Research on the control of reactive power and voltage of distribution networks contained distributed generation[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [16] BIALEK J. Tracing the flow of electricity[J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(4): 313-320.
- [17] 罗静. 无功功率潮流跟踪的模型与算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.  
LUO Jing. Study on theory and algorithm for tracing reactive power flow[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [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.  
DING Ming, HAN Pingping. Small-world topological model based vulnerability assessment algorithm for large-scale power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 7-10.
- [19] 刘小丽, 毛弋, 梁杉, 等. 基于综合介数的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 116-121.  
LIU Xiaoli, MAO Yi, LIANG Shan, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on comprehensive betweenness index[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 116-121.
- [20] 岳贤龙, 王涛, 顾雪平, 等. 基于自组织临界理论的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 18-26.  
YUE Xianlong, WANG Tao, GU Xueping, et al. Vulnerable line identification of power grid based on self-organizing critical theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 18-26.

收稿日期: 2016-11-22; 修回日期: 2017-01-08

作者简介:

曹煜(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统风险评估; E-mail: caoyu1993@zju.edu.cn

郭创新(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能调度及风险调度、智能信息处理技术。E-mail: guochuangxin@zju.edu.cn

(编辑 魏小丽)