

# 复杂电网级联事故下的重要线路辨识

曾阳阳<sup>1</sup>, 关翔友<sup>2</sup>, 徐 昆<sup>2</sup>, 刘闻博<sup>2</sup>, 姜婷茵<sup>2</sup>, 范珺阳<sup>2</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网哈尔滨供电公司, 黑龙江 哈尔滨 150036)

**摘要:** 实现电网级联事故中的关键输电线路准确辨识, 对大范围的电力供应中断事故的预防及控制有着重要意义。首先, 运用能量函数, 结合直接法的建模思路, 将事故过程中的潮流转移、电压波动等诸多复杂电气量变化统一至能量函数框架内, 准确量化线路之间的能量关联关系, 构造出适用于级联事故分析的复杂网络模型; 然后, 在 PTDF 网络能力的启发下, 以上述复杂网络模型为执行环境, 提出线路能量流量的概念, 用于评估网络线路在级联事故发生过程中的关键程度; 最后, 通过改进 OPA 模型在 IEEE-39 节点系统进行级联事故仿真, 并求取 Pearson 相关系数, 验证了线路重要度指标的有效性, 为电网安全运行和稳定性控制提出合理化建议。

**关键词:** 能量函数; 级联事故; 线路能量流量; 改进 OPA 模型

**中图分类号:** TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)02-0048-06

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20210210

## Identification of Important Lines under Complex Grid Cascading Accidents

Zeng Yangyang<sup>1</sup>, Guan Xiangyou<sup>2</sup>, Xu Kun<sup>2</sup>, Liu Wenbo<sup>2</sup>, Jiang Tinghan<sup>2</sup>, Fan Junyang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

2. State Grid Harbin Electric Power Supply Company, Harbin 150036, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Accurate identification of key transmission lines in power grid cascading accidents is of great significance for the prevention and control of large-scale power supply interruption accidents. Firstly, using the energy function and combined with the modeling method of direct method, the changes of complex electric quantities such as power flow transfer and voltage fluctuation in the accident process are unified into the framework of energy function, and the energy correlation relationship between the lines is accurately quantified. The complex network model of cascading accident analysis is constructed, and then, inspired by the PTDF network capability, the above-mentioned complex network model is used as the execution environment, and the concept of line energy flow is proposed to evaluate the critical degree of network lines in the process of cascading accidents. Finally, the improved OPA model is used to simulate the cascading accident in IEEE-39 node system, and the Pearson correlation coefficient is obtained to verify the validity of the line importance index, which provides reasonable suggestions for security operation and stability control of power grid.

**Key words:** energy function; cascading accident; line energy flow; improved OPA model

## 0 引言

近年来, 世界范围内频繁发生的由级联事故造成的大范围电力供应中断事件, 给全社会造成了巨大的经济损失甚至人员伤亡, 也给网络安全研究人员敲响了警钟<sup>[1-2]</sup>。研究表明, 级联事故往往是由电网中某一元件故障引起系统中其他元件连锁失效

造成的。例如在 2003 年发生的美国和加拿大地区的大停电事故, 其触发因素是树枝意外与一回高压线路接触后造成线路接地短路后断开, 潮流转移引起的诸多突发事故造成连锁效应累积后的大范围停电。文献[3-5]中均指出, 电网中存在重要元件(节点或线路), 其故障后引起电网潮流大范围重新分配和诸多电气量的振荡变化, 在级联事故的发生和扩散过程中起到关键作用。因此, 准确识别电

力网络中退出运行后能造成大范围级联事故的线路,并按照其造成事故危害程度对线路重要度进行排序,对电力系统级联事故控制有着重要意义。

基于此,全世界研究学者围绕电力系统关键线路识别展开了相关研究,当前主要研究方法可分为两大类<sup>[6]</sup>。第一类研究是基于还原论和电网动态特性等传统方法,以潮流计算和系统暂态稳定分析等为主要手段,通过级联事故仿真推演出系统状态的发展趋势,有针对性地进行电力系统状态评估和脆弱性辨识;第二类研究应用复杂网络理论,以电网拓扑结构为研究对象,借助节点(或线路)的度和介数等指标,对电网元件的重要程度进行评估。

电网是内部包含大量动态原件构成的复杂非线性动力学系统,电网级联事故扩散过程中往往伴随着功率振荡、潮流转移和电压波动等诸多复杂现象。但是在第一类研究方法中大多选取上述电气量中单方面因素作为扩散依据,例如经典 OPA 模型<sup>[7-8]</sup> 仅以线路有功潮流转移越限为级联事故扩散依据,忽略了电压和功角等诸多关键电气量的振荡波动,过于片面,其仿真结果与电网事故扩散特征有较大差别。基于此,文献[9]在分析电网级联事故脆弱性时,将潮流转移、电压波动和电压相角等诸多电气量变化在能量函数计算表达式中统一表达,即实现了电网级联扩散关键驱动力的同一性建模。由于其全面性和有效性,能量函数在电网级联事故的分析当中得到广泛应用<sup>[10-12]</sup>。第二类研究方法中,若仅从电网拓扑结构角度对网络元件的重要度进行评估,即其结果在网络任何运行方式下重要线路辨识结果一致。这类方法只在意系统中的内在结构短板,却忽略了外在运行风险。而在运用能量函数构造出的复杂网络模型中,除运行状态外,网络拓扑结构也对网络元件间能量关系起到关键作用。即该模型综合考虑了电力系统级联事故扩散过程中各类电气量之间的关联方式和电网本身的拓扑结构特性。

综上,运用能量函数和直接法的建模思想,全面量化网络线路之间的关联关系,构造出以线路为基本结构单元、以线路间能量关联关系为权重的适用于电网级联事故分析的复杂网络模型;然后,对复杂网络理论中的网络能力(net-ability, NT)指标进行适应性改良,在所提的复杂网络模型环境内,提出线路重要度评估指标;最后,通过基于 OPA 模型的电网级联事故仿真对所提出的指标有效性进行了验

证,并结合试验结果为电网级联事故预防及控制提出新的研究思路和意见。

## 1 基于能量函数的复杂网络模型

### 1.1 能量转移冲击

对于稳定运行中的电网,短路、断线等大扰动除了会严重威胁其暂态稳定性以外,还会进一步触发连锁效应造成大范围停电事故。潮流重新分配可能会出现有功功率越限且伴随诸多电气量的波动振荡现象。电网调度人员会通过多类技术手段保证电网各项电气指标不越限,维持电力系统可靠运行。一般情况下,通过直流优化计算来表述上述调整过程,如式(1)所示。

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i \in G} c_i p_i + \sum_{j \in D} + \sum_{j \in D} T_j (P_{dj} - P_j) \\ \text{s. t.} & \sum_{i=1}^n P_i = 0 \\ & P_{dj} \leq P_j \leq 0, \quad j \in D \\ & P_{gl}^{\min} \leq P_l \leq P_{gl}^{\max}, \quad i \in G \\ & -F_l^{\max} \leq F_l \leq F_l^{\max}, \quad l \in L \end{aligned} \quad (1)$$

式中:目标函数为当系统受到大扰动后调度部门改变发电机出力并且切负荷措施造成的经济损失之和最小; $p_i$ 为电网中所有节点的注入有功功率; $D$ 和 $G$ 分别为电网中负荷节点和发电机节点的集合; $c_i$ 和 $p_i$ 分别为调整后发电机产生单位出力的所需费用和调整后发电机的有功出力; $P_{dj}$ 为节点 $j$ 的负荷需求; $P_j$ 为调整后节点 $j$ 的实际负荷; $T_j$ 为切除单位负荷对系统造成的经济损失,一般情况下要求 $T_j \gg c_i$ ;最后3个约束是为保证调整措施执行后节点负荷不超过实际负荷需求的上限,各发电机出力和各线路潮流不超越其上下限。该模型求解为混合整数规划问题(mixed integer linear programming),需利用 Cplex 求解。

在稳定运行状态下,电网支路 $k$ (其首末端节点为 $i$ 和 $j$ )的初始有功潮流和无功潮流分别为 $P_{ij,s}$ 、 $Q_{ij,s}$ 。电力网络拓扑结构改变引起支路上的电气量发生变化,系统中可能某些线路受能量冲击过大,系统安全受到威胁。采用直接法的建模方式<sup>[13-14]</sup>,若线路 $l$ 断开,经直流潮流优化过程处理后,导致线路 $k$ 所受能量冲击为

$$E_{l \rightarrow k} = \int_{(\delta_{ij}^*, U_{ij}^*)}^{(\delta_{ij}, U_{ij})} [f_{P_{ij}}, f_{Q_{ij}}] \cdot \begin{bmatrix} d\delta_{ij} \\ dU_{ij} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $f_{p_{ij}}$  和  $f_{q_{ij}}$  为线路  $l$  断开后, 经过直流优化过程后的线路  $k$  上的有功潮流和无功潮流的变化量。根据线路之间的有功和无功功率传输关系可知:

$$f_{p_{ij}} = P_{ij} - P_{ij,s} = U_i^2 G_{ij} - U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - P_{ij,s} \quad (3)$$

$$f_{q_{ij}} = \frac{Q_{ij} - Q_{ij,s}}{U_{ij}} \cdot (U_{ij})^{-1} \cdot$$

$$[-U_{ij}^2 B_{ij} + U_i U_j (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) - Q_{ij,s}] \quad (4)$$

将式(3)、式(4)带入式(2)中, 得出线路  $l$  断开后, 线路  $k$  所受能量转移冲击为

$$E_{l \rightarrow k} = \int_{\delta_{ij,s}}^{\delta_{ij}} [U_i^2 G_{ij} - U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij}) (B_{ij} \sin \delta_{ij}) - P_{ij,s}] d\delta_{ij} + \int_{U_{ij,s}}^{U_{ij}} [U_i^2 B_{ij} + U_i U_j (B_{ij} \cos \delta_{ij}) (G_{ij} \sin \delta_{ij}) - Q_{ij,s}] / U_{ij} dU_{ij} \quad (5)$$

式(3)至式(5)中:  $\delta_i$  和  $\delta_j$  是对应端点电压的相角,  $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ ;  $U_{ij}$  为节点  $i$  和  $j$  之间电压幅值差,  $U_{ij} = U_i - U_j$ ; 下标  $s$  代表初始值。

$E_{l \rightarrow k}$  的物理意义为线路  $l$  断开后线路  $k$  上各类电气量变化, 电气量偏离初始值越大, 支路  $k$  所受到的能量冲击越大。

## 1.2 线路间能量关联关系

线路意外断开导致其他线路电气量改变, 形成能量冲击; 但另一方面, 若受冲击线路承载能量冲击极限足够大, 该线路也不会因为过载而级联断开。综合上述两个因素, 线路  $l(k)$  断开对线路  $k(l)$  运行稳定性的影响可定量描述为  $R_{l \rightarrow k}$  ( $R_{k \rightarrow l}$ )。由此, 定义线路间能量关联关系为:

$$R_{lk} = R_{kl} = \frac{R_{l \rightarrow k} - R_{k \rightarrow l}}{2} \quad (6)$$

$$\begin{cases} R_{l \rightarrow k} = \frac{E_k^{\max} - E_{l \rightarrow k}}{E_k^{\max}} \\ R_{k \rightarrow l} = \frac{E_l^{\max} - E_{k \rightarrow l}}{E_l^{\max}} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $E_k^{\max}$  为线路  $k$  (其首末端节点为  $i$  和  $j$ ) 的能量冲击承载极限。在电网中:

$$E_{ij}^{\max} = E_{p_{ij}}^{\max} + E_{q_{ij}}^{\max} \quad (8)$$

其中:

$$E_{p_{ij}}^{\max} = \int_{\delta_{ij}^{\min}}^{\delta_{ij}^{\max}} (P_{ij}^{\max} - P_{ij,s}) d\delta_{ij} \quad (9)$$

$$E_{q_{ij}}^{\max} = \int_{U_{ij}^{\min}}^{U_{ij}^{\max}} \frac{Q_{ij}^{\max} - Q_{ij,s}}{U_{ij}} dU_{ij} \quad (10)$$

式中:  $i, j$  为线路  $k$  两端点的节点编号;  $\delta_{ij}^{\max}$ 、 $\delta_{ij}^{\min}$  和

$U_{ij}^{\max}$ 、 $U_{ij}^{\min}$  为  $i, j$  节点电压相角幅值差的上限和下限。

如式(6)所示, 当线路  $l$  意外断开对线路  $k$  的能量作用越接近线路  $k$  的承载极限, 则线路  $l$  所发生事故对线路  $k$  造成的影响越大, 该式函数值越小, 从级联效应来说, 两者关联作用影响越大。以线路之间的相对能量传递作用关系  $R_{lk}$  为关联关系权重, 可构造出以线路为基本结构单元的加权无向的复杂网络模型。该模型的状态关联矩阵是由  $R_{lk}$  为元素组成的“复杂网络系统作用关系相对矩阵” $\mathbf{R}$  为

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0 & R_{12} & \cdots & R_{1k} & \cdots & R_{1M} \\ R_{21} & 0 & \cdots & R_{2k} & \cdots & R_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{k1} & R_{k2} & \cdots & 0 & \cdots & R_{kM} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{M1} & R_{M2} & \cdots & R_{Mk} & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中, 矩阵为对称矩阵,  $R_{lk} = R_{kl}$ , 对角线元素为 0。在该矩阵的基础上, 可构建出线路为基本结构单元、线路之间能量关联关系为权重的加权无向网络模型, 为线路重要度指标提取提供执行环境。

## 2 线路重要度指标

### 2.1 网络能力

为量化描述电力网络中每条线路在潮流输送中的贡献, 文献[15-16]定义了功率传输分布因子 (power transmission distribution factors, PTDF) 矩阵  $\mathbf{F}$ , 反映了网络潮流对一对发电机节点和负载节点之间传输功率变化的灵敏度。对于确定的网络结构, 可由矩阵  $\mathbf{F}$  推导出的网络能力 (net-ability, NT) 指标从网架拓扑结构的角度量化网络整体性能。若一条线路断开后网络 NT 值下降的幅值越大, 从结构上讲, 这条线路对电网运行越重要。为实现网络能力对电网运行影响的评估, 在综合考虑电网内在结构短板和外部运行风险后, 文献[17-18]结合了通信网络中流量和有效性能的概念, 定义了适用于电网状态分析的网络能力。

$$P_Y = \frac{1}{N_g N_l} \sum_{g \in S_g} \sum_{l \in S_l} T_{gl} \frac{1}{Z_{gl, \text{equ}}} \quad (12)$$

式中:  $N_g$  和  $N_l$  分别为电力系统中发电和负荷节点的数目;  $S_g$  和  $S_l$  分别为发电机和负荷节点的集合;  $T_{gl}$  为节点  $g$  和  $l$  之间的有功传输极限;  $Z_{gl, \text{equ}}$  为节点  $g$  和  $l$  之间的电气距离。数值上:

$$Z_{gl, equ} = (Z_{gg} - Z_{gl}) - (Z_{gl} - Z_{ll}) \quad (13)$$

式中,  $Z_{gg}$ 、 $Z_{gl}$ 、 $Z_{ll}$  为网络节点阻抗矩阵中对应位置元素。

由此, 给出电网中节点流量概念, 用以评估网络中节点重要程度, 其物理意义为节点  $i$  故障移除后, 网络能力下降越多, 节点在电网稳定运行中越关键。

$$F_i = \frac{P_Y - P_{Y-i}}{P_Y} \quad (14)$$

式中,  $P_Y$  和  $P_{Y-i}$  分别为电网正常运行和节点  $i$  故障移除后的网络能力大小。

## 2.2 线路重要度指标

如前所述, 在以线路为基本结构单元、线路之间能量传输关系为权重的复杂网络的执行环境内, 对网络能力进行适应性改良, 提出网络能量传输能力  $C_Y$  概念, 用以评估网络整体性能。

$$C_Y = \frac{1}{L_m L_n} \sum_{l \in S_m} \sum_{k \in S_o} \frac{E_n^{\max}}{Z_{mn}} \quad (15)$$

式中:  $L_m$  为网络中可主动断开线路数目, 为遍历网络中所有线路,  $L_m$  取电网线路总数;  $L_n$  为线路  $l$  断开后受到能量冲击的线路数目;  $S_m$  为网络线路集合;  $S_o$  为线路  $m$  断开后, 受能量冲击线路集合;  $E_n^{\max}$  为受冲击线路  $n$  的能量冲击承载极限;  $Z_{mn}$  为线路  $m$ 、 $n$  之间的电气距离。在上述以能量关联关系为权重的复杂网络模型, 该指标从整体性角度量化网络线路之间的能量传输性能,  $C_Y$  值越大, 网络运行性能越好。

关于权重, 根据网络结构单元之间关联关系赋予方式和物理意义的不同可分为两大类: 1) 相似权, 其特征为权重越大则结构单元之间的关联越紧密; 2) 相异权, 其特征为权重值越大则结构单元之间关联越弱, 例如线路阻抗、节点之间距离等。根据网络能量关联关系定义可知,  $R_{mn}$  值越小, 表征线路  $m$ 、 $n$  之间关联关系越强, 属相异权。由文献[19]可知, 式(12)中电气距离同属相异权。因此, 从关联关系角度, 线路间能量关联  $R$  矩阵中元素与线路阻抗有相同物理意义。因此, 在所定义的复杂网络模型下, 线路  $m$ 、 $n$  之间的电气距离定义为

$$Z_{mn} = R_{mn} \quad (16)$$

基于此, 将线路移除后, 将电网能量传输能力变化量定义为输电线路的重要度指标判据, 网络线路能量流量  $L_i$  计算公式为

$$L_i = \frac{C_Y - C_{Y-i}}{C_Y} \quad (17)$$

式中:  $C_Y$  为电网  $Y$  正常运行时的网络能量传输能力;  $C_{Y-i}$  是电网  $Y$  移除线路  $i$  后网络能量传输能力。  $L_i$  值越大, 表示线路  $i$  在电网运行中的地位越关键。

## 3 算例

### 3.1 构造复杂网络模型

以 matpower 数据包中的 IEEE-39 系统作为算例执行环境, 系统中共有 39 个节点, 共有线路 46 条, 将储存线路数据的 mpc.branch 矩阵中线路所在行数作为网络中线路序号, 如图 1 所示。

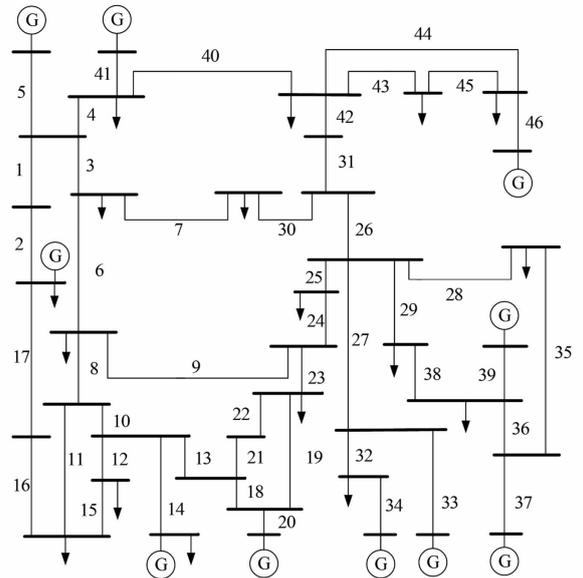


图1 IEEE-39节点电力系统拓扑分布

依次断开网络中所有线路, 并求取该线路断开后受冲击线路的冲击能量大小, 并按照式(6)至式(10)计算两线路之间的能量关联关系。由此求取线路之间作用关系相对矩阵, 矩阵元素分布如图2所示。

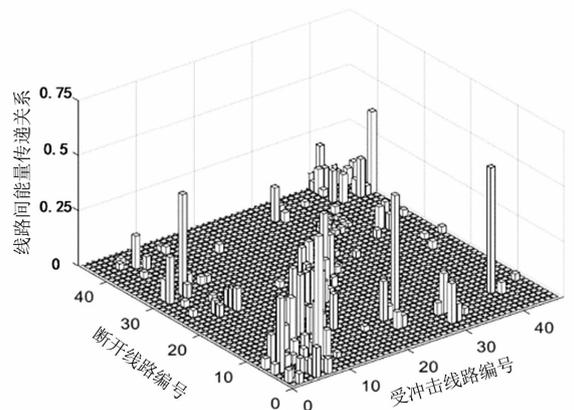


图2 线路间能量传输分布

可见, 矩阵中元素主要集中在对角线, 表示线路断开对邻近线路的能量冲击最大, 并以断开线路为

中心向外逐渐减弱。说明能量函数能够很好表示实际线路之间的能量关联关系,且能定量描述拓扑关系上距离较远的线路间能量关系。由此,可构建出以线路为基本结构单元、线路之间能量关联关系为权重的加权无向网络模型。

### 3.2 线路能量流量指标提取

首先,计算出电网初始运行状态下网络能量传输能力  $C_V$ 。依次断开网络中线路,计算线路  $i$  断开后网络的能量传输能力  $C_{V-1}$ 。由式(17)计算每条线路的能量流量  $L_i$  结果,如表 1 所示,所有数据保留 3 位小数。

表 1 各线路的能量流量

线路	$L_i$	线路	$L_i$	线路	$L_i$
2	0.596	43	0.383	12	0.193
14	0.577	29	0.379	27	0.175
1	0.571	11	0.373	42	0.134
9	0.560	22	0.365	28	0.120
8	0.554	21	0.365	25	0.011
5	0.552	13	0.355	10	0.010
7	0.516	36	0.353	45	0.010
3	0.507	31	0.344	33	0.002
6	0.499	40	0.338	23	0.001
32	0.477	26	0.306	46	0.001
17	0.447	18	0.305	39	0.001
44	0.446	19	0.299	37	0.001
16	0.415	4	0.296	34	0.001
30	0.394	38	0.266	35	0.000
20	0.393	41	0.213		
15	0.390	24	0.212		

按上述线路重要度指标物理意义可知,该指标数值越大,其故障后引起的级联事故范围越大。以级联事故结束后网络中的负荷损失百分比作为级联事故规模的评估指标,遍历各线路断线后的电网级联事故规模,并通过求取与各线路重要度指标的相关系数,验证重要度指标的有效性。

### 3.3 重要度指标有效性验证

2002 年, D. E. Newman 和 Dobson I 等人<sup>[7]</sup>建立了 OPA 模型,用于仿真电网级联事故,推演事故扩散规律,并已得到广泛应用。该模型包含两个时间维度:外层是慢动态过程,用于仿真电网中负荷需求不断增加和电网的升级改造;内层为快动态过程,用于模拟电网级联事故的扩散过程。然而,如前文所述,OPA 原模型存在不足,以基于能量函数的能量转移冲击作用为判据,结合直流优化模型,通过更改级联事故驱动因素对 OPA 模型进行适应性改进,具体操作流程如图 3 所示。

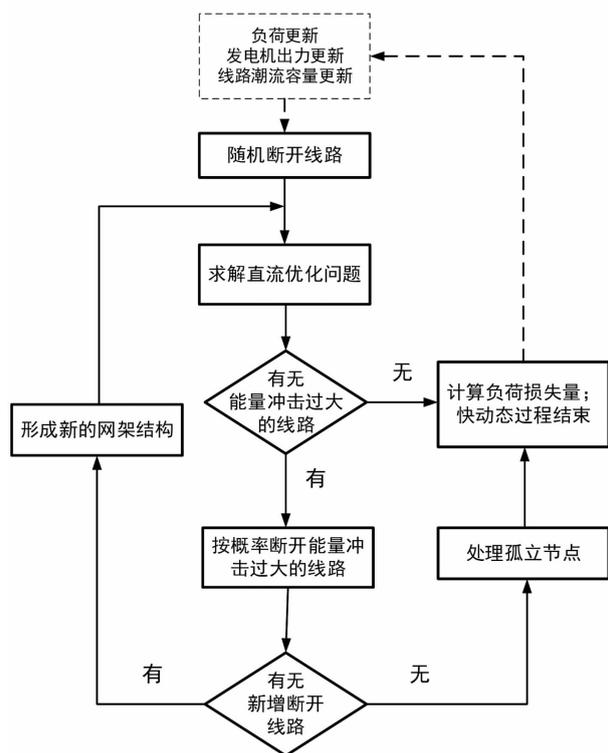


图 3 改进 OPA 模型流程

仿真过程中,线路过冲阈值  $\alpha$  设置为 0.75,断线概率  $p$  取 0.7,即当  $E_{l-k} \geq E_k^{\max}$  时, $k$  线路以 0.7 的概率断开。采用负荷损失百分比作为电网级联事故规模评估指标。在 IEEE-39 节点系统中依次断开线路,制造初始故障。按照改进 OPA 模型,对每条线路断开后进行 1000 次级联事故仿真,求取每条线路断线后的平均事故规模,记录数据并求取拟合直线,如图 4 所示,并计算皮尔逊(Pearson)相关系数。

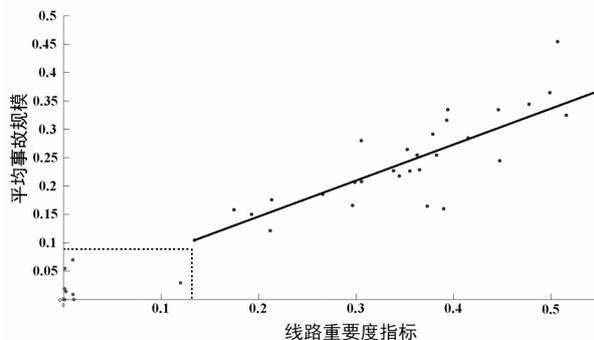


图 4 线路重要度指标与平均事故规模的拟合直线

图中虚框内的点为重要度指标很小的线路在其断线后所造成的级联事故规模,可见这些线路造成的负荷损失很小。对能造成一定规模级联事故的线路,求取其平均事故规模与其能量流量的相关系数为 0.872 7,属强正相关。因此,线路能量流量可有效量化线路在级联事故发生过程中的关键程度。

## 4 结 语

以能量函数为基本数学工具,结合直接法建模方式,准确量化网络线路之间的能量传输关系后,建立了以线路为基本结构单元的复杂网络模型;在PTDF网络能力的启发下,在上述复杂网络模型的执行环境下,提出线路能量流量的概念,用于评估网络线路在级联事故发生过程中的关键程度;最后,在IEEE-39节点系统内进行的级联事故仿真证明了所提的线路关键指标的有效性,对电网级联事故的预防分析与控制有积极意义。

### 参考文献

- [1] Enquiry Committee. Report of the Enquiry Committee on Grid Disturbance in Northern Region on 30th July 2012 and in Northern, Eastern & North - Eastern Region on 31st July 2012 [R/OL]. New Delhi, 2012. [http://www.powermin.nic.in/pdf/GRID\\_ENQ\\_REP\\_16\\_8\\_12.pdf](http://www.powermin.nic.in/pdf/GRID_ENQ_REP_16_8_12.pdf).
- [2] US-Canada Power System Outage Task Force. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendation [R/OL]. Canada, 2004. <http://reports.energy.gov/>.
- [3] 韦晓广,高仕斌,李多,等. 基于连锁故障网络图和不同攻击方式的输电线路脆弱性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 465-474.
- [4] Liu K, Dong X, Wang B, et al. Research on the Process of Power Flow Transferring and Its Identification method [C]// International Conference on Advanced Power System Automation & Protection, IEEE, 2012.
- [5] 王羽佳,李华强,刘沛清,等. 基于改进DEAHP模型的支路综合脆弱性评估方法[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1249-1256.
- [6] 曾凯文,文劲宇,程时杰,等. 复杂电网连锁故障下的关键线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1103-1112.
- [7] Dobson I, B. A. Carreras, Lynch V E, et al. An Initial Model for Complex Dynamics in Electric Power System Blackouts [C]// Hawaii International Conference on System Sciences, IEEE Computer Society, 2001.
- [8] Carreras B A, Newman D E, Dobson I, et al. Initial Evidence for Self-organized Criticality in Electric Power System Blackouts [C]// Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE, 2000.
- [9] Zhou Q, Davidson J, Fouad A A. Application of Artificial Neural Networks in Power System Security and Vulnerability Assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 525-532.
- [10] 刘群英,刘俊勇,刘起方. 基于支路势能信息的电网脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 6-11.
- [11] 苟竞,刘俊勇,刘友波,等. 基于能量熵测度的电力系统连锁故障风险辨识[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2754-2761.
- [12] 苟竞,刘俊勇,魏震波,等. 基于多尺度熵的电力能量流复杂性分析[J]. 物理学报, 2014, 63(20): 347-354.
- [13] 余一平,闵勇,陈磊,等. 基于能量函数的强迫功率振荡扰动源定位[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 1-6.
- [14] 苟竞,刘俊勇,刘友波,等. 基于发电机对暂态势能集的电力系统暂态稳定快速评估[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 464-471.
- [15] Arianos S, Bompard E, Carbone A, et al. Power Grid Vulnerabilities: A Complex Network Approach [J]. Chaos, 2009, 19(1): 013119.
- [16] Bompard E, Napoli R, Xue F. Analysis of Structural Vulnerabilities in Power Transmission Grids [J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2009, 2(1): 5-12.
- [17] 刘文颖,蔡万通,张宁,等. 基于加权网络拓扑熵的电网自组织临界状态演化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5740-5748.
- [18] Zhu Y, Yan J, Sun Y, et al. Revealing Cascading Failure Vulnerability in Power Grids Using Risk-Graph [J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2014, 25(12): 3274-3284.
- [19] 倪向萍,阮前途,梅生伟,等. 基于复杂网络理论的无功分区算法及其在上海电网中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 6-12.

### 作者简介:

曾阳阳(1999),女,学士,主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;

关翔友(1994),男,硕士研究生,主要研究方向为复杂系统及其理论、电力系统安全稳定分析与控制;

徐 昆(1990),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护、电力系统安全稳定分析与控制。

(收稿日期:2020-11-16)