

# 考虑元件综合重要度的电网安全性风险评估方法

刘沛清, 李华强, 赵 阳, 曾 珂

(四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 从系统学角度出发, 综合考虑系统中元件的结构属性、状态属性及社会属性, 提出一种考虑元件综合重要度的电网安全性风险评估方法。综合元件结构重要度因子模型与元件状态灵敏度因子模型构建元件综合重要度模型, 该模型克服了传统风险评估方法中对于不同元件的重要度无法表征的不足; 综合考虑电网结构与状态, 建立表征电网潮流分布均衡性与负荷损失的严重度模型, 完善安全性风险评估指标体系。仿真结果表明, 相较于传统方法, 该方法对电网  $N-1$  故障风险排序更为合理, 对  $N-k$  故障序列分级风险辨识度更高。

**关键词:** 复杂网络; 结构重要度因子; 状态灵敏度因子; 风险评估;  $N-k$  故障; 安全性; 故障分析

**中图分类号:** TM 734

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.020

## 0 引言

随着社会经济的高速发展、科技水平以及人民生活水平的不断提高, 电力系统规模与复杂性俱增, 与此同时, 对电网运行安全性的要求也越来越高<sup>[1]</sup>。研究近年来国内外电力系统发生的大停电事故<sup>[2-4]</sup>发现, 大停电事故往往是由于某一个或几个元件故障引发的一系列连锁故障。这些元件无论是在网络拓扑结构上, 还是电网运行中都有着“牵一发而动全身”的重要作用。因此, 在电网安全性评估中, 综合考虑不同元件的重要程度显得尤为重要。

电力系统安全性评估主要有确定性评估方法<sup>[5]</sup>、概率性评估方法<sup>[6-7]</sup>和风险评估方法<sup>[8-9]</sup> 3 类。风险评估方法将事故概率与严重度相结合, 很好地克服了确定性评估方法无法考虑事故发生频率和概率性评估方法无法表征事故严重程度的不足, 在电网安全性评估领域得到了很好的应用。文献<sup>[10-11]</sup>提出了基于不确定理论的电网风险评估模型, 考虑了元件故障率在不同情况下的模糊性, 但未考虑电网结构对其安全性的影响。文献<sup>[12]</sup>引用“短板效应”理论论证电网结构与运行状态的关系, 提出了网络能力、熵度及输电介数等指标, 对电网结构安全性进行了重点分析。文献<sup>[13]</sup>提出了基于复杂网络理论的事故风险评估模型, 将电气介数引入事故严重度函数, 在一定程度上弥补了上述风险评估的不足, 但对元件重要度的考虑过于单一。上述文献在电网安全性风险评估时, 对系统中不同元件重要程度的差异性均未给出全面的表征。

本文首先从系统学角度出发, 综合考虑系统中元件的结构属性、状态属性以及社会属性, 通过结

合元件结构重要度因子与状态灵敏度因子, 建立了元件综合重要度因子模型, 提出了一种考虑元件综合重要度的电网安全性风险评估方法, 该方法很好地弥补了已有风险评估方法中对元件重要度考虑欠佳的不足。其次, 建立了分别表征系统潮流分布均衡性以及负荷损失的严重度模型, 完善了现有的风险评估指标体系。最后, 以 IEEE 30 节点系统为例, 对元件综合重要度因子进行仿真分析, 对电网  $N-1$  初始故障风险进行排序, 对电网  $N-k$  故障序列进行分级风险评估, 并且与传统方法进行了对比分析。

## 1 元件综合重要度因子模型

根据系统学原理, 结构和功能是所有系统都存在的 2 种基本属性。因此, 本文将元件在电力系统中的重要程度剖分为考虑元件结构属性与社会属性的元件结构重要度因子和考虑元件功能属性的元件状态灵敏度因子。

### 1.1 元件结构重要度因子

#### 1.1.1 复杂网络与电气介数

现实中的大多复杂系统都可以用网络的形式来描述。其中, 电力系统是典型的非线性复杂系统, 利用复杂网络理论, 结合电网特性, 按照文献<sup>[14-15]</sup>电力网络拓扑模型建立原则可将电力系统网络简化为由  $N$  个节点、 $M$  条边组成的有向加权网络, 其中节点分为发电、负荷和联络节点 3 类。

在传统复杂网络理论中, 通过建立介数指标来表征节点和支路在网络结构中的重要属性, 该指标假设潮流在两节点之间只通过最短路径传输, 而此假设对于电力工程而言显然是不符合实际的。文献<sup>[16-17]</sup>基于 Kirchhoff 定律, 提出了电气介数指标。

a. 节点  $n$  的电气介数  $B_e(n)$  定义为:

$$B_e(n) = \sum_{i \in G, j \in L} \sqrt{w_i w_j} B_{e,ij}(n) \quad (1)$$

其中,  $G, L$  分别为发电机节点集合和负荷节点集合;  $(i, j)$  为所有“发电-负荷”节点对;  $w_i$  为发电机节点  $i$  的权重, 取发电机额定容量或实际出力;  $w_j$  为负荷节点  $j$  的权重, 取实际或峰值负荷;  $B_{e,ij}(n)$  为  $(i, j)$  间加入单位注入电流元后在节点  $n$  上产生的电气介数。

$$B_{e,ij}(n) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sum_m |I_{ij}(m, n)| & n \neq i, j \\ 1 & n = i, j \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $I_{ij}(m, n)$  为在  $(i, j)$  间加入单位注入电流元后在支路  $m-n$  上引起的电流;  $m$  为与  $n$  有支路直接相连的节点。

b. 支路  $l$  的电气介数  $B_e(l)$  定义为:

$$B_e(l) = \sum_{i \in G, j \in L} \sqrt{w_i w_j} |I^{ij}(l)| \quad (3)$$

其中,  $I^{ij}(l)$  为在“发电-负荷”节点对  $(i, j)$  间加入单位电流元后, 在支路  $l$  上引起的电流。

电气介数很好地弥补了已有模型假设潮流只沿最短路径流动的不足, 更符合电力系统的运行物理特征。该指标能真实地反映“发电-负荷”节点之间功率传输对各线路和节点的占用情况, 量化了元件在全网功率传输过程中的重要程度。

### 1.1.2 元件结构重要度因子

在电力系统网络中, 各元件不仅仅具有物理属性(如节点负荷量), 同时还具有社会属性(如节点负荷性质、供电用户重要程度等), 电气介数指标无法在电气影响力与社会影响力两方面来全面衡量元件在电力系统中的结构重要程度。因此, 本文通过将经济因子引入电气介数形成元件结构重要度因子来全面衡量各元件的结构重要程度。

通过一个简单的示例图来进行说明。图 1 所示为某一电力网简图, 其中  $G_1 \sim G_g$  为发电机节点,  $L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_h$  为负荷节点,  $l_1, l_2, \dots, l_M$  为支路。

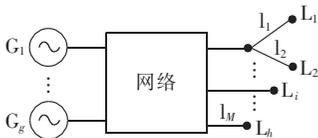


图 1 电力网简图示例

Fig.1 Example of simplified power grid

在图 1 所示网络中, 若负荷节点  $L_1$  与  $L_2$  具有相同的网络结构特征, 即  $L_1$  和  $L_2$  具有相同的连接方式和负荷量, 则负荷节点  $L_1$  与  $L_2$ 、支路  $l_1$  和  $l_2$  具有相同大小的电气介数。然而, 该指标没有考虑到不同负荷节点之间存在的经济性差异, 即单位负荷损

失造成的经济损失不同。因此, 通过引入经济因子来修正电气介数构建元件结构重要度因子是合理的。

节点  $n$  结构重要度因子  $B_N(n)$  定义为:

$$B_N(n) = \sum_{i \in G, j \in L} \sqrt{W_i W_j} B_{e,ij}(n) \quad (4)$$

$$W_i = \frac{\varepsilon_i w_i}{\sum_{i \in G} \varepsilon_i w_i} \quad (5)$$

$$W_j = \frac{\varepsilon_j w_j}{\sum_{j \in L} \varepsilon_j w_j} \quad (6)$$

其中,  $W_i$  和  $W_j$  分别为发电机节点  $i$  和负荷节点  $j$  结合社会属性与物理属性后的综合权重;  $\varepsilon_i$  为发电机节点  $i$  的发电经济因子;  $\varepsilon_j$  为负荷节点  $j$  的负荷经济因子。

类似地, 支路  $l$  结构重要度因子  $B_L(l)$  定义为:

$$B_L(l) = \sum_{i \in G, j \in L} \sqrt{W_i W_j} |I^{ij}(l)| \quad (7)$$

## 1.2 元件状态灵敏度因子

从电网实际运行角度考虑, 对于系统运行人员而言, 最关心系统中运行状态易受扰动影响, 逼近临界状态速度快, 且故障后会对电网造成严重后果的元件。电网中系统负荷的波动对电力系统的安全性存在较大的影响, 系统中各元件运行状态对于负荷波动的响应敏感程度根据元件属性及位置不同而不同, 即系统中不同元件的状态灵敏度不同。所以, 在电网安全性评估中, 元件的状态灵敏度是考核系统中元件重要程度的重要组成部分。

### 1.2.1 节点状态灵敏度因子

电网负荷波动会引起节点母线电压的变化, 并且对系统的电压稳定性有较大影响<sup>[18]</sup>。由于各节点在网络中的拓扑属性以及电压等级不同, 节点母线电压对负荷变化的响应灵敏度也存在较大差异, 一般相对于发电机节点而言, 负荷节点母线电压对于负荷波动反应更为敏感; 相对于高电压等级的节点而言, 较低电压等级母线电压对于负荷波动反应更为敏感。

由于电压稳定与系统的无功功率存在直接的关系, 本文定义节点状态灵敏度因子为节点电压关于无功功率变化的灵敏度。节点  $n$  电压对负荷节点  $j$  无功功率变化的灵敏度  $s_N(n)_j$  定义为:

$$s_N(n)_j = \frac{\partial U_n}{\partial Q_j} \quad (8)$$

其中,  $U_n$  为节点  $n$  电压;  $Q_j$  为负荷节点  $j$  的无功功率。

当系统无功发生变化时, 常常表现为多负荷节点无功功率的变化, 从系统全局得到节点状态灵敏度因子显得更为重要。定义节点  $n$  对系统全局无功功率变化的灵敏度因子  $s_N(n)$  为:

$$s_N(n) = \sum_{j \in L} s_N(n)_j \quad (9)$$

其中,  $L$  为负荷节点集合。

### 1.2.2 支路状态灵敏度因子

与节点状态灵敏度因子类似, 电网负荷波动时会引起线路传输潮流的变化, 其对系统的热稳定性有较大影响。同样, 由于各支路在系统中拓扑属性与热稳限制不同, 其传输潮流对负荷变化的响应灵敏度也不同。由于系统热稳定性主要与系统有功功率存在直接的关系, 本文定义支路状态灵敏度因子为支路潮流关于负荷节点有功功率变化的灵敏度。支路  $l$  潮流对负荷节点  $j$  有功功率变化的灵敏度  $s_L(l)_j$  定义为:

$$s_L(l)_j = \frac{\partial P_l}{\partial P_j} \quad (10)$$

其中,  $P_l$  为支路  $l$  传输的有功功率;  $P_j$  为负荷节点  $j$  的有功功率。

与节点状态灵敏度因子类似, 定义支路  $l$  对系统全局有功功率变化的灵敏度因子  $s_L(l)$  为:

$$s_L(l) = \sum_{j \in L} s_L(l)_j \quad (11)$$

### 1.3 元件综合重要度因子

综合考虑元件在系统中的结构属性、状态属性以及社会属性, 建立元件综合重要度因子模型。其中, 定义节点综合重要度因子  $I_N(n)$  为:

$$I_N(n) = \frac{1}{2} [B_N(n) + s_N(n)] \quad (12)$$

同理, 定义支路综合重要度因子  $I_L(l)$  为:

$$I_L(l) = \frac{1}{2} [B_L(l) + s_L(l)] \quad (13)$$

## 2 事故严重程度评估指标

### 2.1 低电压严重度

低电压严重度呈偏小型分布规律, 如图 2 所示。

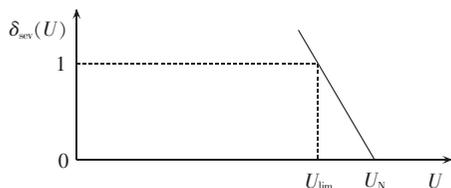


图 2 低电压严重度函数

Fig.2 Severity function of low voltage

对应节点  $i$  的低电压严重度函数为:

$$\delta_{sev}(U_i) = \begin{cases} 0 & U_i \geq U_N \\ \frac{U_N - U_i}{U_N - U_{lim}} & U_i < U_N \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $U_i$  为节点  $i$  当前的运行电压;  $U_N$  为节点电压额定值;  $U_{lim}$  为设定的低电压最大风险阈值, 一般设定为额定电压的 90%。

为合理表征系统中不同元件的运行状态严重

程度的差异性, 将节点综合重要度因子作为权重因子, 定义系统全局的低电压严重度为:

$$S(U) = \sum_{i=1}^N I_N(i) \delta_{sev}(U_i) \quad (15)$$

其中,  $N$  为节点总数;  $I_N(i)$  为节点  $i$  的综合重要度因子。

### 2.2 线路过载严重度

线路过载严重度呈现偏大型分布规律, 见图 3。

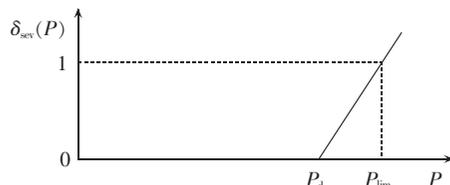


图 3 线路过载严重度函数

Fig.3 Severity function of line overload

对应支路  $l$  的过载严重度函数为:

$$\delta_{sev}(P_l) = \begin{cases} 0 & P_l < P_d \\ \frac{P_l - P_d}{P_{lim} - P_d} & P_l \geq P_d \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $P_l$  为支路  $l$  当前传输的有功功率;  $P_{lim}$  为支路过载风险最大阈值, 本文设定为线路满载的有功功率极限值;  $P_d$  为设定的支路过载风险阈值, 一般取  $P_{lim}$  的 90%。

同理, 引入支路综合重要度因子作为权重因子, 定义系统全局的线路过载严重度为:

$$S(P) = \sum_{l=1}^M I_L(l) \delta_{sev}(P_l) \quad (17)$$

其中,  $M$  为线路总数;  $I_L(l)$  为支路  $l$  的综合重要度因子。

### 2.3 潮流分布严重度

潮流分布的均衡性对电网连锁性故障的传播有重要的影响<sup>[19]</sup>, 本文采用潮流熵定量描述线路潮流分布的不均衡性, 设线路总数为  $M$ , 线路  $l$  最大功率传输容量为  $P_l^{max}$ , 运行时实际潮流为  $P_l^0$ , 则线路  $l$  的负载率  $\mu_l$  为:

$$\mu_l = \left| \frac{P_l^0}{P_l^{max}} \right| \quad l = 1, 2, \dots, M \quad (18)$$

设定常数序列  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_k, \dots, A_z\}$ , 本文中取  $A = \{0, 0.02, \dots, 2.0\}$ 。用  $l_k$  表示负载率  $\mu_l \in (A_k, A_{k+1}]$  的线路条数, 对不同负载率区间内的线路条数进行概率化得:

$$p(k) = \frac{l_k}{M} \quad (19)$$

其中,  $p(k)$  为负载率  $\mu_l \in (A_k, A_{k+1}]$  的线路占总线路数的比例。

由式(18)和式(19)得电网潮流熵为:

$$H = -C \sum_{k=1}^{n-1} p(k) \ln p(k) \quad (20)$$

其中,  $C$  取  $\ln 10$ 。

由式(20)可见,当所有线路的负载率都处于相同负载率区间时,潮流熵为 0,线路潮流分布最均衡,此时线路容量最大线路承载的潮流也最大,同时,容量小的线路承载的潮流也较小。而当不存在任意 2 条线路的负载率处于同一负载率区间时,潮流熵达到最大值:

$$H_{\max} = -C \ln \frac{1}{M} \quad (21)$$

此时,线路潮流分布处于最不平衡的状态。因某些线路负载率很高,一旦出现扰动极易造成过载,甚至引发系统连锁故障;而负载率很低的线路没有得到充分利用。

定义潮流分布严重度函数如图 4 所示。

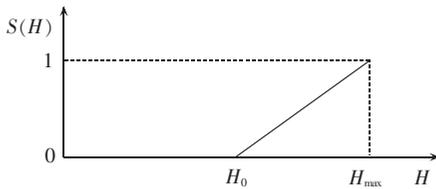


图 4 潮流分布严重度函数

Fig.4 Severity function of power flow distribution

对应系统潮流分布严重度函数为:

$$S(H) = \begin{cases} 0 & H < H_0 \\ \frac{H-H_0}{H_{\max}-H_0} & H \geq H_0 \end{cases} \quad (22)$$

其中,  $H$  为系统故障后的潮流熵;  $H_0$  为系统故障前稳态时的潮流熵;  $H_{\max}$  为系统潮流熵最大值。

## 2.4 失负荷严重度

电力系统中元件故障常会引起负荷的丢失,在安全性评估中,负荷损失主要有以下 3 个类型<sup>[20]</sup>:

a. 某条线路故障退出运行直接导致系统失去相关负荷节点,此时负荷损失量即为该节点的负荷量;

b. 低压减载装置动作,当负荷节点母线电压降低到设定值后,切除设定的负荷量;

c. 系统解列为几个孤岛之后,为保持各个孤岛功率平衡,需要加入相关控制措施所导致的失负荷量。

由于负荷属性不同,为体现不同负荷损失严重程度的差异性,引入负荷经济因子到失负荷评估指标中,定义负荷损失比例为:

$$\eta = \frac{\sum_{i \in L'} \varepsilon_i P_{\text{loss}i}}{\sum_{j \in L} P_j} \times 100\% \quad (23)$$

其中,  $\eta$  为事故后系统负荷损失比例;  $L$  为负荷节点集合;  $L'$  为失负荷节点集合;  $\varepsilon_i$  为负荷节点  $i$  的经济因子;  $P_{\text{loss}i}$  为失负荷节点  $i$  的负荷损失量;  $P_j$  为事故前负荷节点  $j$  的负荷量。

定义失负荷严重度函数如图 5 所示。

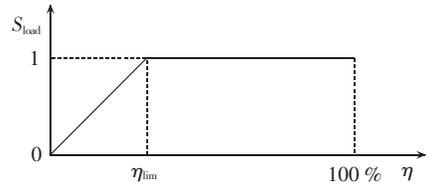


图 5 失负荷严重度函数

Fig.5 Severity function of load loss

对应失负荷严重度函数为:

$$S_{\text{load}} = \begin{cases} \frac{\eta}{\eta_{\text{lim}}} & \eta < \eta_{\text{lim}} \\ 1 & \eta \geq \eta_{\text{lim}} \end{cases} \quad (24)$$

其中,  $\eta_{\text{lim}}$  为系统负荷损失最大设定阈值,本文取为电网负荷总量的 20%。

## 3 考虑元件综合重要度的综合风险评估

### 3.1 故障概率

#### 3.1.1 N-1 事故下的故障概率

从事故统计数据可以看出电力系统发生事故的的概率基本符合泊松分布<sup>[9]</sup>,即:

$$p(E_i) = (1 - e^{-\lambda_i}) e^{-\sum \lambda_i} \quad (25)$$

其中,  $E_i$  为第  $i$  个系统事故;  $p(E_i)$  为事故  $E_i$  发生的概率;  $\lambda_i$  为系统中元件  $i$  的故障率。

#### 3.1.2 N-k 事故下的故障概率

电力系统连锁故障概率符合贝叶斯网络模型<sup>[13]</sup>,即电力系统  $N-k$  事故概率为条件概率,上级事故对下级事故发生的概率有重要影响。则由初始故障事件  $E_1$  的概率  $p(E_1)$  可得知第  $i$  级事故发生的概率  $p(E_i)$  为:

$$p(E_i) = p(E_{i-1}) p(E_i | E_{i-1}) \quad i > 1 \quad (26)$$

其中,  $p(E_i | E_{i-1})$  为在第  $i-1$  级事故  $E_{i-1}$  发生的情况下,线路由于过载跳闸或者发生隐性故障跳闸的概率。

### 3.2 综合风险评估模型及流程

风险评估综合考虑事故发生可能性及事故后的严重程度。本文将反映元件结构属性与状态属性的综合重要度因子引入严重度评估指标,同时构建系统潮流分布严重度指标与负荷损失严重度指标完善系统安全评估严重度指标体系,得到电网第  $i$  级故障后系统安全性综合风险评估指标为:

$$R_i = p(E_i) (S(U) + S(P) + S(H) + S_{\text{load}}) \quad (27)$$

根据综合风险评估模型对系统进行风险评估,计算流程如图 6 所示。

## 4 系统仿真

### 4.1 概述

本文采用 IEEE 30 节点系统进行仿真测试仿

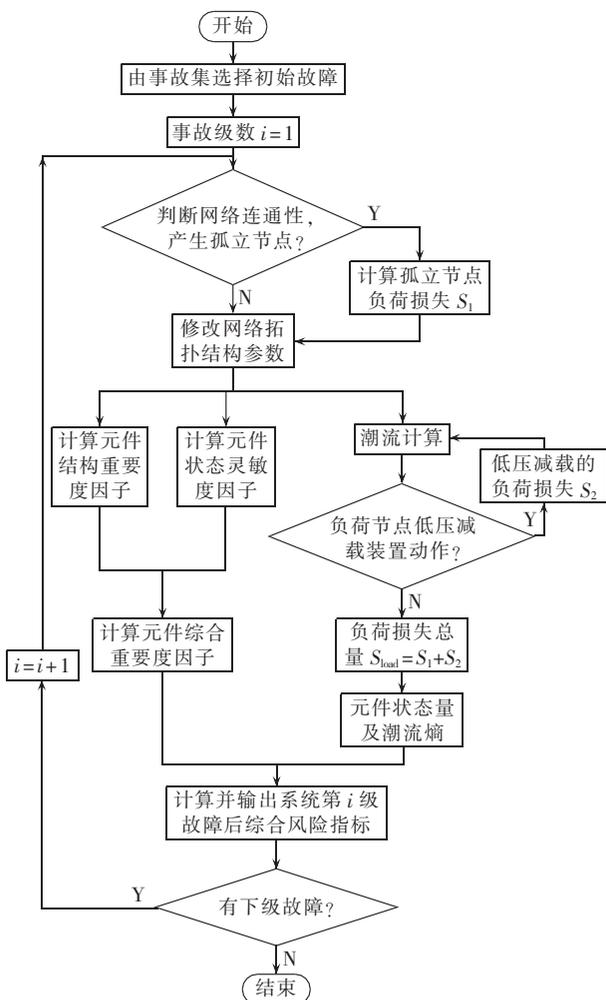


图 6 风险评估流程图

Fig.6 Flowchart of risk assessment

析,该系统包括 6 台发电机、41 条支路,为方便分析,系统中所有节点均采用单母线接线方式,系统节点支路编号如图 7 所示。计算中,选取所有线路初始故障概率为 0.05<sup>[21]</sup>;线路主保护动作概率为 0.85<sup>[22]</sup>,

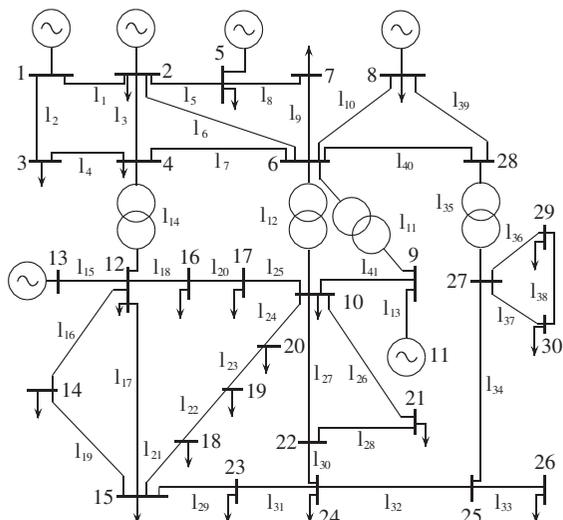


图 7 IEEE 30 节点系统接线图

Fig.7 Connection diagram of IEEE 30-bus system

误动概率为 0.05<sup>[22]</sup>。

### 4.2 元件综合重要度因子分析

以支路  $l_1$  故障后电网为例,对元件综合重要度因子进行分析。图 8 为支路  $l_1$  故障后,系统中各节点的重要度因子。由图 8 可以看出,结构重要度因子较高的节点,如节点 6、节点 10 和节点 12,均为系统中的中枢节点,在系统中处于能量汇总与分配的关键位置;同时,状态灵敏度因子较高的节点,如节点 30、节点 29 和节点 26,均为系统末端的负荷节点,其受负荷扰动的影响最为明显。节点综合重要度因子指标综合了元件结构属性与状态属性,对文献[13]只考虑单一属性的节点电气介数指标起到了很好的修正作用,能够更合理地表征节点在系统中的重要程度。

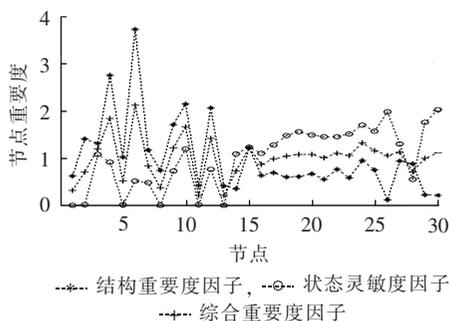


图 8  $l_1$  故障后节点重要度因子

Fig.8 Node importance factor after  $l_1$  breaks down

图 9 为支路  $l_1$  故障后,系统中各支路的重要度因子。由图 9 可以看出,支路的结构重要度因子分布与状态灵敏度因子分布大致相同,结构重要度因子分布较为平均,而状态灵敏度因子指标相较结构重要度因子而言,变化幅度较大,对不同支路的状态属性有较明显的辨识。因此,用支路综合重要度因子来表征支路的重要程度更具合理性,其对关键支路的辨识性更高。

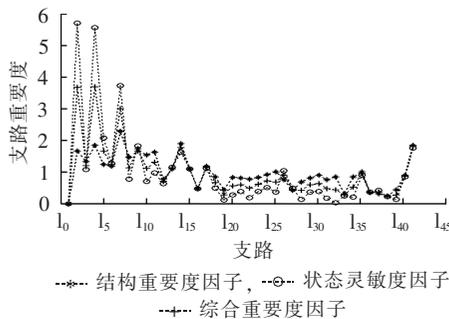


图 9  $l_1$  故障后支路重要度因子

Fig.9 Branch importance factor after  $l_1$  breaks down

### 4.3 N-1 事故排序分析

根据本文方法,结合元件综合重要度因子,考虑电网故障后潮流分布状态及负荷损失严重程度,

对  $N-1$  故障进行安全风险评估分析,并与文献[13]方法及传统方法进行对比分析,前 10 位排序结果如表 1 所示。

表 1  $N-1$  事故风险前 10 排序  
Table 1 Top 10 of  $N-1$  contingency risk

事故风险排序	本文方法	文献[13]方法	传统方法
1	$l_1$	$l_1$	$l_1$
2	$l_2$	$l_2$	$l_2$
3	$l_{35}$	$l_4$	$l_8$
4	$l_{24}$	$l_7$	$l_5$
5	$l_4$	$l_{11}$	$l_{11}$
6	$l_5$	$l_8$	$l_4$
7	$l_7$	$l_{12}$	$l_{24}$
8	$l_{41}$	$l_9$	$l_{10}$
9	$l_{11}$	$l_5$	$l_7$
10	$l_8$	$l_{24}$	$l_{32}$

由表 1 可以看出,本文得到的风险较高的前 10 个故障排序与文献[13]方法、传统方法结果有很大的相似之处,证明了本文方法的正确性。 $l_1$  或  $l_2$  故障后,均极易导致  $G_1$  平衡机(节点 1 所连发电机)节点与电网脱离,造成系统解列。本文得到的风险排序与传统方法的差异主要在于支路  $l_{35}$ 、 $l_{24}$  和  $l_{41}$ ,其中,支路  $l_{35}$  为变压器支路,承担电网右下侧负荷节点 23—30 的负荷供应,支路  $l_{35}$  故障跳开后,会导致支路  $l_{30}$ 、 $l_{32}$  严重过载,极易引起负荷节点 24—30 与主网脱离形成孤岛,造成大面积负荷损失。类似的还有支路  $l_{24}$ 、 $l_{41}$ ,这些支路均处于网络能量传输的关键位置,对缩短发电节点-负荷节点间电气距离有重要作用,一旦故障,将导致其他线路过载,极易引发电网连锁性故障,应该引起运行人员的重点关注。本文方法对引发电网连锁性事故的初始故障起到了很好的辨识作用。

4.4  $N-k$  事故序列风险评估

按照本文方法,选取 2 条以  $l_5$ 、 $l_7$  为初始故障的  $N-k$  故障序列进行风险评估,得到各级故障风险指标,并与传统方法进行对比,如表 2 和表 3 所示,表中箭头表示故障发生顺序。

表 2 和表 3 可以看出,本文方法对于  $N-k$  各级故障的风险值较传统方法有更好的辨识性,尤其在辨识电网连锁故障序列中引发电网急剧恶化的关键环节时,具有明显指示作用。由表 3 数据,支路

表 2  $l_5$  为初始故障的  $N-k$  故障序列风险评估  
Table 2 Risk assessment of  $N-k$  contingency series with initial fault of  $l_5$

故障序列	风险指标	
	本文方法	传统方法
$l_5$	4.7375	1.6497
$l_6$	14.8933	2.4655
$l_3$	25.6733	4.0890
$l_2, l_4$	—	—

注: $l_2$ 、 $l_4$  故障后系统解列。

表 3  $l_7$  为初始故障的  $N-k$  故障序列风险评估

Table 3 Risk assessment of  $N-k$  contingency series with initial fault of  $l_7$

故障序列	风险指标	
	本文方法	传统方法
$l_7$	3.9186	1.1496
$l_6$	9.4799	2.0455
$l_{30}$	18.6242	2.9798
$l_{17}$	24.1024	4.0696
$l_{19}$	34.2045	4.9422
$l_8, l_5$	—	—

注: $l_8$ 、 $l_5$  故障后系统解列。

$l_{20}$  故障前后,本文方法风险走势为 9.4799~18.3242,风险值增幅很大,说明  $l_{20}$  故障后会引引起系统运行状态急剧恶化,同时,通过仿真分析可知, $l_{20}$  故障后会引引起系统中  $l_{17}$ 、 $l_{21}$ 、 $l_{29}$  等 5 条线路出现不同程度的过载,系统中近 3 成节点电压低于额定电压,与本文方法结论一致。反观传统方法指标, $l_{20}$  故障前后风险指标为 2.0455~2.9798,走势变化不明显,不能很好地给系统运行人员提出警示以避免连锁故障的发生。

5 结论

本文在已有风险评估基础上,综合考虑元件结构属性、状态属性及社会属性,提出了一种考虑元件综合重要度及表征电网整体运行状态的电网安全性风险评估方法。该方法综合元件结构重要度因子模型与元件状态灵敏度因子模型构建了元件综合重要度模型,克服了传统风险评估方法中忽视系统中不同元件重要度差异性的不足。该方法评估结果切合实际,且对事故风险辨识度更高,能够为电网安全运行提供合理参考。

参考文献:

[1] 韩祯祥,曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004,28(9):1-6.  
HAN Zhenxiang, CAO Yijia. Power system security and its prevention[J]. Power System Technology, 2004,28(9):1-6.  
[2] 汤涌,卜广泉,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] 石立宝,史中英,姚良忠,等. 现代电力系统连锁性大停电事故机理研究综述[J]. 电网技术, 2010,34(3):48-54.  
SHI Libao, SHI Zhongying, YAO Liangzhong, et al. A review of mechanism of large cascading failure blackouts of modern power system[J]. Power System Technology, 2010,34(3):48-54.  
[4] 方勇杰. 美国“9·8”大停电对连锁故障防控技术的启示[J]. 电力系统自动化, 2012,36(15):1-7.  
FANG Yongjie. Lessons from September 8, 2011 southwest blackout for prevention and control of cascading outages [J].

- Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 1-7.
- [5] 吴政球, 王良缘. 具有综合负荷模拟的暂态稳定裕度灵敏度分析[J]. 电网技术, 2003, 27(3): 53-58.  
WU Zhengqiu, WANG Liangyuan. Sensitivity analysis of transient stable margin with complicated load modeling[J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 53-58.
- [6] 李文沅, 卢继平. 暂态稳定概率评估的蒙特卡罗方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 18-23.  
LI Wenyuan, LU Jiping. Monte Carlo method for probabilistic transient stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 18-23.
- [7] 李生虎, 丁明, 汪兴强. 电力系统静态电压安全问题的概率评价[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 26-30.  
LI Shenghu, DING Ming, WANG Xingqiang. Probabilistic evaluation to static voltage security of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 26-30.
- [8] MCCALLEY J D, VITTAL V, ABI-SAMRA N. An overview of risk based security assessment[C]//Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE. Edmonton, Canada: IEEE, 1999: 173-178.
- [9] 朱益华, 罗毅, 段涛, 等. 基于输电线路实时评估模型的电力系统静态安全在线风险评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 150-156.  
ZHU Yihua, LUO Yi, DUAN Tao, et al. Online risk assessment based on real-time evaluation model of transmission line for static security of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 150-156.
- [10] 冯永青, 吴文传, 张伯明, 等. 基于可信性理论的电力系统运行风险评估(三)应用与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 11-16.  
FENG Yongqing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Power system operation risk assessment based on credibility theory part three engineering application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 11-16.
- [11] 巫伟南, 杨军, 胡文平, 等. 考虑输电线路故障特性的电网综合风险评估体系[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 129-134.  
WU Weinan, YANG Jun, HU Wenping, et al. Power grid risk assessment system considering characteristics of transmission line failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 129-134.
- [12] 薛飞, 雷宪章, BOMPARD E. 电网的结构性安全分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 1-5.  
XUE Fei, LEI Xianzhang, BOMPARD E. Structural analysis of power grid security[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 1-5.
- [13] 赵阳, 李华强, 王伊渺, 等. 基于复杂网络理论和条件概率的灾难性事故风险评估方法[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3190-3196.  
ZHAO Yang, LI Huaqiang, WANG Yimiao, et al. A complex network theory and conditional probability based risk assessment method for disastrous accidents[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3190-3196.
- [14] 曹一家, 陈晓钢, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路识别[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.
- [15] 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.
- [16] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 基于电气介数的电网连锁故障传播机制与积极防御[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 61-68.  
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Cascading failure mechanism in power grid based on electric betweenness and active defence[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 61-68.
- [17] 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.
- [18] 赵洪山, 赵莹莹. 基于灵敏度技术的电网脆弱域评估[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 54-58.  
ZHAO Hongshan, ZHAO Yingying. Evaluation of power grid vulnerable region based on sensitivity technique[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 54-58.
- [19] 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.
- [20] 顾雪平, 张硕, 梁海平, 等. 考虑系统运行状况的电网连锁故障风险性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 124-130.  
GU Xueping, ZHANG Shuo, LIANG Haiping, et al. Risk assessment of power grid cascading failure considering system operation conditions[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 124-130.
- [21] 付蓉, 蒋国平, 王保云. 计及系统连锁故障风险的电网预防控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 12-17.  
FU Rong, JIANG Guoping, WANG Baoyun. A preventive control strategy for power grid considering system cascading failure risk[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 12-17.
- [22] 张国华, 张建华, 杨志栋, 等. 电力系统  $N-k$  故障的风险评估方法[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 17-21.  
ZHANG Guohua, ZHANG Jianhua, YANG Zhidong, et al. Risk assessment method of power system  $N-k$  contingencies[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 17-21.

#### 作者简介:



刘沛清

刘沛清(1989—),男,河北沧州人,硕士研究生,从事电力系统安全性评估、电力系统不确定性方面的研究(E-mail:liupeiqing89@126.com);

李华强(1965—),男,四川成都人,教授,博士,长期从事电力系统分析、稳定及优化问题研究;

赵阳(1989—),女,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为电力系统安全性评估;

曾珂(1990—),男,四川成都人,硕士研究生,研究方向为熵理论在电力系统中的应用。

(下转第 144 页 continued on page 144)

Railway, 2014(1):13-17.

[15] 李娟,薛永端,徐丙珉,等. 单相均匀传输线暂态模型参数计算[J]. 电网技术, 2013, 37(4):437-441.

LI Juan, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. A method to calculate parameters of transient model for single-phase uniform transmission line[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 437-441.

[16] 韩旭东,王斌,高仕斌,等. 基于车网耦合的高速铁路 AT 供电系统谐振特性[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4):582-589.

HAN Xudong, WANG Bin, GAO Shibin, et al. Harmonic resonance of AT power supply system of high speed railway based on train-network coupling[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4):582-589.

作者简介:



赵元哲

赵元哲(1987—),男,山东聊城人,博士研究生,从事牵引供电系统电能质量、谐波谐振与抑制技术、车网耦合等方面的研究(E-mail: yuanzhezha@gmail.com);

李群湛(1957—),男,河北元氏人,教授,博士研究生导师,从事牵引供电系统电能质量、同相供电等方面的研究;

周福林(1982—),男,四川广安人,讲师,博士,从事电能质量分析与控制、牵引供电系统分析方面的教学与研究工作。

## Resonance suppression based on wave-trap high-pass filter for high-speed railway

ZHAO Yuanzhe, LI Qunzhan, ZHOU Fulin

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The high-frequency harmonic currents generated by the AC-DC-AC locomotives of high-speed railway system may induce the traction network resonance and harmonic current enlargement, seriously affecting its safe and reliable operation. The resonance occurrence mechanism is analyzed and a kind of wave-trap HPF(High-Pass Filter) is proposed to filter the high-frequency harmonic currents and suppress the resonance for high-speed railway system. It consists of a capacitor, a reactor and a resistor, in which, the capacitor and the reactor are connected to each other in parallel, and then to the resistor in series. It functions as an open circuit to hold back the power-frequency current while as a low impedance to allow the high-frequency current to easily pass. The simulative and experimental results show that, the proposed wave-trap functions as a high impedance, while with low impedance at high-frequency, it can filter the high-frequency harmonic currents and suppress traction network resonance.

**Key words:** electrical railway; electric traction; traction power system; harmonic analysis; harmonic suppression; wave-trap high-pass filter; resonance suppression; electric filters

(上接第 138 页 continued from page 138)

## Power grid security risk assessment considering comprehensive element importance index

LIU Peiqing, LI Huaqiang, ZHAO Yang, ZENG Ke

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** From the systematologic point of view, a method of power grid security risk assessment based on the integrated element importance index is proposed, which comprehensively considers the structural, conditional and social attributes of element. An integrated element importance model based on the structural importance factor model and status sensitivity factor model of element is built, which overcomes the shortage of traditional risk assessment method in characterizing the importance of different elements. A model considering the structure and condition of power grid is built to characterize the proportionality of power flow distribution and the severity of load loss, and to improve the risk assessment index system of power grid security. Simulative results show that, compared with the traditional methods, the proposed method ranks the power grid  $N-1$  contingency risk more reasonably and recognizes the  $N-k$  contingency series grading risk more precisely.

**Key words:** complex network; structural importance factor; state sensitivity factor; risk assessment;  $N-k$  contingency; security; failure analysis