

基于元件功率的区域电力系统薄弱环节辨识算法

李玲玲, 鲁修学, 孙东旺, 李志刚

(河北工业大学电磁场与电器可靠性省部共建国家重点实验室, 天津 300130)

摘要: 在已构建的电力系统网络中总是存在着会造成大面积停电事故的网络节点, 即薄弱环节, 因此, 对于庞大的电力系统网络来说, 寻求网络中存在的薄弱环节具有着重要的意义。基于小世界网络模型对区域性电力系统进行网络建模, 并以节点功率变化为基础, 构建网络中某一发电节点的功率值变化或者从电网中解列后对网络系统中其他元件功率影响的一种新算法模型。并提出了功率变化度的概念, 进而辨识电力系统中的薄弱环节, 对电力系统的经济可靠建设提供理论支持。最后通过一个电力系统算例验证了该算法的有效性。

关键词: 安全可靠运行; 网络节点; 薄弱环节; 网络建模; 功率变化度

An identification algorithm of the weak links for regional power system based on element power

LI Ling-ling, LU Xiu-xue, SUN Dong-wang, LI Zhi-gang

(State Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability,
Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: There are always network nodes that can cause widespread blackouts in the built power system network, which are called weak links. Thus seeking the weak links in the network has an important significance to a large power system network. The new algorithm model based on node power variation and the small-world network model for regional power system can estimate the effect on other elements power when the power of generation node changes or splits from the grid. Then through proposing the concept of the power change degree, the weak links in the power system could be identified and theoretical support for economic and reliable construction of the power system is provided. In the end, the validity of the new algorithm is verified through an example of the power system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61072100 and No. 51377044).

Key words: safe reliable operation; network nodes; weak links; network modeling; power change degree

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0077-07

0 引言

近年来, 国内外相继发生了多起电网大停电事故^[1-2], 引起了人们对电网安全性和可靠性的广泛关注^[3-7], 这些停电事故表明: 电力系统既庞大又复杂, 内在和外在因素都会影响其运行的安全稳定, 使其在一些突发故障情况下容易引起系统的连锁故障, 造成大面积停电。电力系统网络的薄弱环节是指人为干预、信息、计算、通信等因素而造成的潜伏着的会造成大面积停电事故的网络环节。因此寻找合

理的算法对电力系统网络中的薄弱环节进行合理的计算量化辨识, 进而给电力系统建设提供数据依据, 就显得格外重要。

对电力系统的薄弱环节辨识分析一直建立在微分方程理论的基础上, 即通过对系统中各元件建立详细的数学模型, 以时域仿真的形式对系统进行动态分析^[8-10], 这种分析方法对故障模拟, 寻找系统网络薄弱环节起到了很好的作用, 但对于区域级的大电力系统网络来说, 该算法需要大量的时间。

实际上, 电网络本身的拓扑结构是电网所具有的内在、本质的特性, 一旦确定下来, 必然对电网的性能产生深刻的影响。国内外已有文献对此进行过描述, 文献[11]通过电网络中元件可靠度及故障率来辨识网络中的薄弱环节, 对电网络薄弱环节辨

基金项目: 国家自然科学基金(61072100, 51377044); 天津市自然科学基金(12JCYBJC12400); 河北省科技支撑计划项目(12212173)

识起到了一定的作用,但是在这种算法中元件在电网络中的体现形式只有两种,要么正常工作,要么故障停止工作退出电网络,不能体现出元件功率轻微变化时对电网络的影响大小。因此,从电网络自身的拓扑结构及发电元件出力和用电元件功率出发,分析故障传播机理,即当电力系统网络中的发电环节出现出力不足或者出力过多时,分析网络中其他节点承受这种突变的能力大小,即寻求网络中的薄弱环节,提出有针对性的增强措施,对建设强壮的电网络将具有指导意义。

电网络拓扑结构及系统元件的可靠性和电气参数共同决定了电力系统的可靠性。人们利用网络本身的属性对电力系统可靠性及薄弱环节进行辨识已有一定的研究,文献[11]通过对中美典型电网的扩散结构进行比较并定性分析了小世界网络特性对连锁故障传播的影响,研究表明大部分电力网络属于小世界网络,并认为小世界网络较小的平均距离和较高聚类系数等性质,对故障的传播起到了推波助澜的作用。文献[12-13]分析了电网络拓扑结构所存在的脆弱性。文献[14]提出了基于平均距离的网络算法。本文通过对区域性电力系统进行网络建模,并以电力系统功率变化为基础,构建电力系统网络中发电节点的功率值变化或者从电网中解列后对系统中其他元件功率及线路效能影响的一种新算法,进而辨识电力系统中的薄弱环节,对电力系统的经济可靠建设提供理论支持。

1 电力系统网络数字化模型

1.1 小世界网络模型简介

现实世界中的大多数复杂系统可以用网络的形式来描述。人们最初用规则网络描述真实世界的系统,由于规则网络结构的特殊性,导致规则网络所能描述系统的范围极其有限。1959年数学家 Erdos 和 Renyi 提出了 ER 随机网络的概念,大大拓展了网络研究的范围。随机网络的随机性十分符合真实网络中连接的某些特性,但是其对于动态演化系统中所表现出来的一些重要特性,1998年 Watts 和 Strogatz 提出小世界网络的概念,突破了随机网络模型的束缚,揭示了复杂系统网络结构所包含的各类特征,奠定了复杂网络研究的基础。

小世界网络介于规则网络和随机网络之间,通过某个很小的概率 p 切断规则网络中原始的边,并随机选择新的节点重新连接,它同时具有较大的聚类系数和较小的平均距离。

1.2 复杂网络的拓扑特征参数

复杂网络研究将电网络抽象为由 n 个节点、 k

条线路组成的无向有权网络。复杂网络研究中的特征参数定义如下。

(1) 线路额定效能 E 。指在电网络中线路对电能输送能力的大小。假设网络中的第 k 条线路,该条线路的额定功率为 S_n ,选取网络中的功率基准值为 S_b ,则线路效能定义为

$$E_k = \frac{S_n}{S_b} \quad (1)$$

(2) 最有效路径的效能 E_{ij}^{\max} 。路径的效能 E_{ij} 是指发电机节点 i 和负荷节点 j 之间某一连通路径沿线的线路效能的和谐构成,发电机节点 i 和负荷节点 j 之间所有连通路径中路径效能最大的路径称为最有效路径。最有效路径反映了发电机节点与负荷节点间的电能输送能力,路径的效能越大,其所能传输的电能越多。

(3) 系统全局效能 E_{global} 。系统的全局效能定义为网络中所有发电机节点与负荷节点之间最有效路径的效能的均值,其定义式为

$$E_{\text{global}} = \frac{1}{N_L N_G} \sum_{i \in N_L} \sum_{j \in N_G} E_{ij} \quad (2)$$

式中: N_L 表示网络中的用电节点; N_G 表示网络中的发电节点。

系统全局效能反映了整个网络的电能传送能力,系统全局效能越高,整个系统所能承担的传输容量越大。

(4) 线路介数 B_n 。线路介数是指线路被网络中所有发电节点与负荷节点之间最短路经过的次数。

(5) 线路介数累积分布 $P_a(B_n)$ 。 $P_a(b_n)$ 表示介数大于等于 b_n 节点个数占节点总数的百分比,则节点介数的累积概率为

$$P_a(b_n) = \sum_{B_n > b_n} P(B_n) \quad (3)$$

1.3 基于复杂网络的电力系统网络数字化模型

本文对网络小世界模型进行改进,全面对电力系统模型中的薄弱环节进行辨识,基于模型建立的需要,在所建立的电力系统模型中,本文把网络中所有发电元件及用电元件都视为节点,并将电力系统中所有元器件及节点的电压等级统一归到同一电压等级,而各个元件的功率是不同的,因此把各个元件的功率作为本文所建网络模型的变量。

图 1 为电力系统网络中的两个相连的元件。



图 1 电力系统中两相连元件模型

Fig. 1 Two connected components in the power system model

设元件 1 的功率值为 S_1 , 元件 2 的功率值为 S_2 , 在电力系统网络中, 元件 1 功率值的变化必然会导致元件 2 功率的变化, 元件 2 功率值的变化也必然会导致元件 1 功率值发生变化。当元件 1 的功率值 S_1 远大于元件 2 的功率值 S_2 时, 则 S_1 有轻微的变化, 就会导致 S_2 产生较大的变化, 而 S_2 发生变化对 S_1 的影响就较小。

因此, 定义如下影响系数。

元件 1 对元件 2 的影响系数为

$$\gamma = \frac{S_1}{S_1 + S_2} \quad (4)$$

元件 2 对元件 1 的影响系数为

$$\delta = \frac{S_2}{S_1 + S_2} \quad (5)$$

当 S_1 大于 S_2 时, 则有 $\gamma > \delta$, 即元件 1 对元件 2 功率的影响大于元件 2 对元件 1 的影响, 与上述原理相符。

基于以上原理及复杂网络的小世界模型, 建立如下电力系统网络数学化模型。

规定, 本文所构建的电力系统网络模型中, 发电元件及用电元件的功率值统一记为 S , 并规定, 在电力系统网络中, 发电元件及用电元件统一称为元件, 发电节点及用电节点统称为节点。

电力系统网络模型如图 2 所示。该网络模型图只是所构建模型的一部分, 图中只显示了 5 个节点, 其编号为: 节点 e、节点 f、节点 k、节点 i、节点 j。

图 2 所构建的模型中, 即包含有发电元件, 又包含有用电元件。

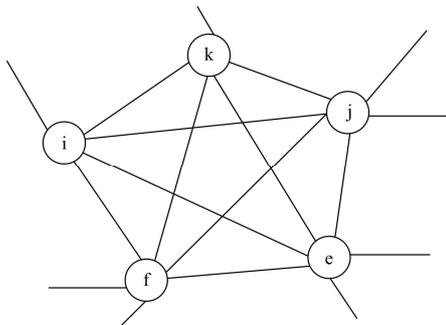


图 2 电力系统网络模型

Fig. 2 Network model of power system

2 基于功率变化的电力系统薄弱环节辨识算法

2.1 单一节点功率变化的网络薄弱环节辨识

2.1.1 单一节点功率变化对网络中节点的薄弱环节

辨识

在电力系统模型中, 元件与元件之间的功率变化是相互影响的, 模型中设元件 i 的功率 S_i 发生变化, 必将对模型中其他元件的功率值产生影响, 进而影响该元件的工作效能。

在此, 我们以模型中元件 i 和元件 j 为例, 元件 i 的功率值发生变化后, 利用本文所提出的算法求出元件 j 的功率变化值, 进而求出对网络中其他元件的功率影响值, 从而辨别网络模型中的薄弱环节。具体算法如下。

电力系统网络中, 设元件 i 到元件 j 共有 n 条路径, 其中一条路径为

$$ij_0 \rightarrow ij_1 \cdots ij_{m-1} \rightarrow ij_m$$

ij_0 代表元件 i , ij_m 表示元件 j ; $ij_1, ij_2, \dots, ij_{m-1}$ 表示该条路径上的其他节点, 即从元件 i 到元件 j 之间的这条路径中共有 $m-1$ 个元件节点, 设路径中元件的额定功率值依次为

$$S_{ij_0}, S_{ij_1}, \dots, S_{ij_{m-1}}, S_{ij_m} \quad (6)$$

当元件 i 的功率值变化 ΔS , 则通过上述路径必然会对元件 j 的功率值产生影响。

元件 i 的功率值发生变化必然先对其临近的元件 ij_1 的功率值产生影响, 元件 ij_1 的功率值变化量计算式为

$$\Delta S_{ij_1} = \frac{S_{ij_0}}{S_{ij_1} + S_{ij_0}} \cdot \Delta S \quad (7)$$

元件 ij_1 的功率值发生变化, 进而导致元件 ij_2 的功率值发生变化, 其变化量为

$$\Delta S_{ij_2} = \frac{S_{ij_1}}{S_{ij_2} + S_{ij_1}} \cdot \Delta S_{ij_1} \quad (8)$$

依次计算, 则在该条路径上, 元件 i 功率的变化导致元件 j 功率的变化量记为 Δ_1 , 则

$$\Delta_1 = \Delta S_{ij_m} = \frac{S_{ij_{m-1}}}{S_{ij_{m-1}} + S_{ij_m}} \cdot \Delta S_{ij_{m-1}} \quad (9)$$

同理, 计算出其他 $n-1$ 路径从元件 i 对元件 j 的功率影响值 $\Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_n$ 。则当元件 i 的功率值变化 ΔS , 所构电力系统网络模型中元件 j 的功率变化值为

$$\Delta_{ij} = \sum_{k=1}^n \Delta_k \quad (10)$$

根据同样的计算模型, 计算元件 i 功率变化对电力系统网络模型中其他元件节点的功率所造成的影响值。

2.1.2 单一节点功率变化对网络中线路的薄弱环节

辨识

按照本文的定义, 电力系统网络中节点与节点之间的线路都有其额定的效能 E , 当网络中单一节点功率变化时, 会造成小世界网络模型中的功率沿各个路径从新分配。

设网络模型中第 k 条线路总介数为 m , 则电网络中单一节点功率变化时对该条线路功率变化的贡献值为

$$\Delta S_k = \sum_{i=1}^m \Delta S_i \quad (11)$$

式中, ΔS_i 为经过该条线路的第 i 条路径上的功率变化对该条线路传输功率所造成的影响值。

第 k 条线路效能变化值计算为

$$\Delta E_k = \frac{\Delta S_k}{S_b} \quad (12)$$

2.2 多个节点功率变化的薄弱环节辨识算法

2.2.1 多个节点功率变化对网络节点的薄弱环节辨识

电力系统模型中, 当有多个节点的功率发生变化时, 对其他节点功率的影响可以采用叠加的算法, 即当网络模型中节点 i 和节点 j 的功率分别发生 ΔS_i 和 ΔS_j 时, 网络中另一节点 f 功率的变化值计算如下。

①保持节点 j 功率不变, 节点 i 功率变化 ΔS_i 时, 根据单一节点功率变化的薄弱环节辨识算法, 计算出节点 f 的功率变化值 $\Delta_{i,f}$;

②保持节点 i 功率不变, 节点 j 功率变化 ΔS_j 时, 根据单一节点功率变化的薄弱环节辨识算法, 计算出节点 f 的功率变化值 $\Delta_{j,f}$;

③采用叠加的算法, 计算出网络模型中节点 i 和节点 j 功率分别发生 ΔS_i 和 ΔS_j 时, 节点 f 功率的变化值

$$\Delta_{ijf} = \Delta_{i,f} + \Delta_{j,f} \quad (13)$$

2.2.2 多个节点功率变化对网络中线路的薄弱环节辨识

电力系统模型中, 当有多个节点的功率发生变化时, 对电网络中线路效能的影响同样可以采取叠加的算法, 即当网络模型中节点 i 和节点 j 的功率分别发生 ΔS_i 和 ΔS_j 时, 网络中第 k 条线路效能的变化值计算如下。

①保持节点 j 功率不变, 节点 i 功率变化 ΔS_i 时, 根据单一节点功率变化的线路薄弱环节辨识算法, 计算出网络中第 k 条线路的效能变化值 $\Delta S_k(i)$;

②保持节点 i 功率不变, 节点 j 功率变化 ΔS_j 时, 根据单一节点功率变化的线路薄弱环节辨识算法,

计算出节点 f 的功率变化值 $\Delta S_k(j)$;

③采用叠加的算法, 计算出网络模型中节点 i 和节点 j 功率分别发生 ΔS_i 和 ΔS_j 时, 网络中第 k 条线路的效能变化值为

$$\Delta E_k = \frac{\Delta S_k(i) + \Delta S_k(j)}{S_b} \quad (14)$$

3 节点功率变化度的提出及电网络薄弱环节辨识

电力系统中每个节点功率的变化都有一定的范围, 超过一定的范围则该节点就会出现工作故障, 严重者将导致系统解列。

设节点 j 的额定功率为 S_j , 导致节点 j 从电网中解列的功率变化最值记为 $\Delta \Gamma_j$, 则节点 j 的功率阈值百分比为

$$\alpha = \frac{\Delta \Gamma_j}{S_j} \quad (15)$$

当电力系统网络中节点 i 的功率发生变化时, 通过上述算法, 可以求出区域电力系统网络中节点 j 功率的变化值 Δ_{ij} , 则节点 j 的功率变化百分比为

$$\delta = \frac{\Delta_{ij}}{S_j} \quad (16)$$

本文把节点的功率变化百分比与其功率阈值百分比的商定义为功率变化度, 其计算公式为

$$\varphi = \frac{\alpha}{\delta} \quad (17)$$

在相同条件下, 节点的功率变化度越大, 则网络其他节点的变化对该节点功率的影响越大, 功率变化度最大的那个节点即为电网中的最薄弱环节。

本文所提出的算法也适用于对系统或产品进行可靠性评估。一个系统或者产品都有诸多继电器等器件按照一定的拓扑关系构成, 按照本文所述, 可以将组成系统或产品的小器件看做是系统或者产品拓扑结构上的节点, 诸多节点就构成了系统或产品的拓扑网络结构。以小器件的可靠性为基础变量, 并采用本文所述算法, 从而发现存在潜在缺陷的子系统或产品的功能部件, 有针对性地修改系统或产品的设计方案, 从根本上提高其可靠性。

4 算例分析

4.1 算例实例

本文借助一电力系统模型, 如图 3 所示。

基于把电网中所有发电元件及用电元件都视为节点的原则, 建立该网络的数学化模型如图 4 所示。该网络模型中包含五个节点, 其中节点 1、节点

2 为发电节点, 节点 3、节点 4、节点 5 为用电节点。

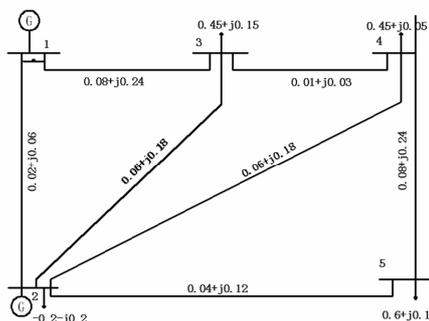


图 3 某一电力系统模型图

Fig. 3 A model diagram of power system

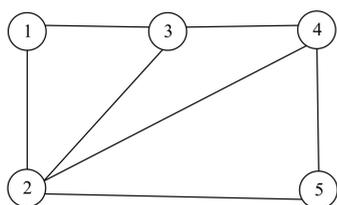


图 4 网络的数学化模型

Fig. 4 Mathematical model of the network

4.2 以往算法对该算例进行脆弱性分析

我们采用文献[14]所述的方法对本算例的网络模型进行结构脆弱性分析, 文献[14]中模拟了多种网络攻击模式, 为了鉴于比较并能说明问题, 本文选择高介数线路攻击模式对该算例进行薄弱环节评估。

选择并移除网络中介数最高的一条线路, 在上述的攻击模式下, 电网全局效能的变化曲线如图 5 所示。

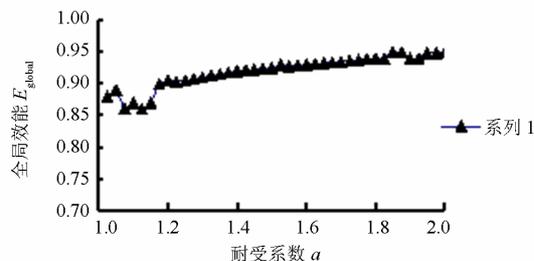


图 5 高介数线路攻击模式全局效能 E_{global} 变化趋势

Fig. 5 Trend of global performance E under high betweenness line attack mode

从图 5 可以看出, 当网络受到高介数线路移除故障攻击时, 全局效能下降明显, 高介数线路承担了大量的最有效路径。高介数线路的移除会引起大量最有效路径的重新分布, 进而引起连锁故障。因此高介数线路对电力网络的连锁故障有着重大的影

响, 可以看出, 高介数线路对网络稳定性有着至关重要的作用。

4.3 采用本文所述算法对电力系统薄弱环节进行辨识

采用本文所述算法, 对该电力系统网络的薄弱环节进行辨识。

节点功率及节点功率阈值百分比数据如表 1 所示。

表 1 节点功率及功率阈值百分比

Table 1 Power node and percentage of power threshold

节点号	1	2	3	4
功率	$5.0+j3.0$	$0.2+j0.2$	$0.45+j0.15$	$0.4+j0.05$
有功阈值	± 0.05	± 0.05	± 0.05	± 0.05
无功阈值	± 0.05	± 0.05	± 0.05	± 0.05
百分比				

4.3.1 单一节点功率变化的节点薄弱环节辨识

令节点 1 的功率变化为

$$\Delta S_1 = -0.005 - j0.0001$$

利用本文所述算法, 求得模型中其他节点的功率变化值及功率变化度如表 2 所示。

表 2 节点功率变化值及功率变化度

Table 2 Changes of value on node power and degree of changes on power

节点号	1	2	3	4
功率	$-0.00500 -$	$-0.0100 +$	$-0.0077 -$	$-0.008 -$
变化值	$0.0001i$	$0.0006i$	$0.0012i$	$0.0024i$
有功变化百分比	-0.001	-0.05	-0.017	$11 -0.02$
无功变化百分比	-0.000	0.003	-0.008	-0.048
有功变化度	-0.02	-1.00	-0.342	$2 -0.400$
无功变化度	-0.000	0.006	-0.16	-0.960

从表 2 可以看出, 当节点 1 的功率降低 ΔS_1 后, 从有功功率变化度来看, 节点 2 的有功功率变化度最大, 因此, 当节点 1 出力不足时, 节点 2 便是该网络中的有功功率薄弱环节; 从无功功率变化度来看, 节点 4 的无功功率变化度最大, 因此, 当节点 1 出力不足时, 节点 4 便是该网络中的无功功率薄弱环节。

4.3.2 单一节点功率变化的线路薄弱环节辨识

当发电节点 1 出力增加 5% 时, 采用本文所述算法对电网络中的线路效能进行计算, 得出网络中各线路介数及效能变化值如表 3 所示。

从表 3 可以得出, 线路 L_{34} 的介数最高, 即从发电节点到用电节点经过该条线路的路径最多, 因此对其效能的影响值也最大, 因此线路 L_{34} 为该网

络线路的薄弱环节。

表 3 各线路介数及效能变化值

线路	L ₁₂	L ₁₃	L ₃₄	L ₂₃	L ₂₄	L ₂₅	L ₄₅
介数	12	8	13	7	8	7	11
效能增加值	0.12	0.08	0.14	0.06	0.04	0.03	0.01

4.3.3 多个节点功率变化的节点薄弱环节辨识

令节点 1 的功率变化 $\Delta S_1 = -0.005 - i0.0001$ ，节点 2 的功率变化 $\Delta S_2 = 0.01 + i0.05$ ，利用本文所述算法，求得模型中其他节点的功率变化值及功率变化度如表 4 所示。

如表 4，从有功功率变化度来看，当节点 1、节点 2 的功率改变后，节点 3 的有功功率变化度最大，因此，当节点 1、节点 2 出力作如上改变时，节点 3 便是该网络中的有功功率薄弱环节；从无功率变化度来看，节点 4 的无功功率变化度最大，因此，节点 4 便是该网络中的无功功率薄弱环节。

表 4 节点功率变化值及功率变化度

节点号	1	2	3	4	5
功率变化值	-0.00500 - 0.0001i	0.010 + 0.050i	-0.0112 + 0.0352i	-0.0169 + 0.0408i	-0.0116 + 0.0278i
有功变化百分比	-0.001	0.05	-0.0249	-0.0422	-0.0193
无功变化百分比	-0.00003	0.25	0.235	0.816	0.278
有功变化度	-0.02	1	-0.498	-0.844	-0.386
无功变化度	-0.0006	5	4.7	16.32	5.56

4.3.4 多个节点功率变化的线路薄弱环节辨识

当发电节点 1 和发电节点 2 出力各增加 3% 时，采用本文所述算法对电网络中的线路效能进行计算，得出网络中各线路介数及效能变化值如表 5 所示。

表 5 各线路介数及效能变化值

线路	L ₁₂	L ₁₃	L ₃₄	L ₂₃	L ₂₄	L ₂₅	L ₄₅
介数	12	8	13	7	8	7	11
效能增加值	0.06	0.10	0.14	0.09	0.04	0.03	0.01

从表 5 可以看出，线路 L₃₄ 及 L₂₃ 的效能变化值较大。因此，当电网络中出现能量波动时，这两条

线路有可能率先超出其额定效能值，因此，线路 L₃₄ 及 L₂₃ 为该种模式下线路的薄弱环节。

通过文献[14]所述方法以及本文所述算法对电网络的薄弱环节辨识可以看出，文献[14]所述算法只能辨识某一故障模式下对电力系统全局的影响大小，即只能辨识出网络中某一节点或者某一线路故障对整个电力系统网络的影响力。该种算法只能得到某一节点或某一线路在电力系统中的重要程度，并不能反映出节点或线路自身是否强壮；而本文所提出的算法，通过计算分析电力系统网络中各个节点及线路在某一故障模式下的特征值变化量大小，从而找出网络中的脆弱链条所在，能够判断出节点或线路自身是否强壮，因此本文所提出的算法能够全面精确地辨识网络中的节点及线路薄弱环节。

5 结论

电网络本身的拓扑结构是电网所具有的内在、本质的特性，一旦确定下来，其结构对电网络的可靠性有着巨大的影响。因此，从电网络自身的拓扑结构分析故障传播机理，即当电力系统网络中的发电环节出现出力不足或者出力过多时，分析网络中其他节点及线路承受这种突变的能力大小，并通过分析各个节点及线路突变能力大小，来寻求网络中的薄弱环节。

人们利用网络本身的属性对电力系统可靠性及薄弱环节进行辨识已有一定的研究，本文针对区域性电力系统网络，以电力系统中元件的功率为变量，基于网络本身的拓扑结构属性，构建了电力系统网络数学化算法模型，为了定量的辨识电网络中的薄弱环节，本文提出了节点功率变化度的概念，通过比较各个节点功率变化度值的大小，达到辨识电网络中的薄弱环节的目的，对电力系统的经济可靠建设提供理论支持。

参考文献

- [1] 苏晓. 一起 220 kV 电网事故分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 237-239.
SU Xiao. Analysis of accident in a 220 kV grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 237-239.
- [2] 尹项根, 陈庆前, 王博. 基于四层集合模型的复杂电力系统脆弱性评估体系[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 225-233.
YIN Xiang-gen, CHEN Qing-qian, WANG Bo. Vulnerability assessment system of complicated power system based on four-level set model[J]. Transactions of

- China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 225-233.
- [3] 陈兆庆, 祝瑞金. 对大受端电网规划若干技术问题的思考[J]. 东北电力, 2009, 37(5): 695-698.
CHEN Zhao-qing, ZHU Rui-jin. Technical issues on planning for large receiving-end grids[J]. East China Electric Power, 2009, 37(5): 695-698.
- [4] 张文亮, 周孝信, 印永华, 等. 华北——华中——华东特高压同步电网构建和安全性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 1-6.
ZHANG Wen-liang, ZHOU Xiao-xin, YIN Yong-hua, et al. Composition and security analysis of "North China-Central China-East China"[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 1-6.
- [5] 张谦, 奚魏民, 黄俊辉, 等. 考虑系统运行方式的江苏电网过江断面概率潮流实证分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 47-52.
ZHANG Qian, XI Wei-min, HUANG Jun-hui, et al. Probabilistic load flow evaluation considering system operation mode for transmission lines across the Yangzi River of Jiangsu Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 47-52.
- [6] 毛安家, 何金. 一种基于可行性理论的电网安全性综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 80-86.
MAO An-jia, HE Jin. An approach of power grid security comprehensive assessment based on credibility theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 80-86.
- [7] 姚建国, 赖业宁. 智能电网的本质动因和技术需求[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 1-4.
YAO Jian-guo, LAI Ye-ning. Views on smart grid evolution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 1-4.
- [8] 韩冬, 马进, 贺仁睦, 等. 电力系统时域仿真的动态一致性检验[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 29-33.
HAN Dong, MA Jin, HE Ren-mu, et al. Dynamic consistency test for power system time-domain simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 29-33.
- [9] 吴熙, 蒋平. TCSC 在次同步谐振中的借阻尼现象[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 34-38.
WU Xi, JIANG Ping. Borrow damping phenomena of TCSC to subsynchronous resonance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 34-38.
- [10] 王成山, 李鹏, 黄碧斌. 一种计及多重开关的电力电子时域仿真插值算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 83-88.
WANG Cheng-shan, LI Peng, HUANG Bi-bin. An interpolation algorithm for time-domain simulation of power electronics circuit considering multiple switching events[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 83-88.
- [11] 赵渊, 周念成, 谢开贵, 等. 大电力系统可靠性评估的灵敏度分析[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 25-30.
ZHAO Yuan, ZHOU Nian-cheng, XIE Kai-gui, et al. Sensitivity analysis on reliability assessment of bulk power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 25-30.
- [12] 苟竞, 刘军勇, 魏震波, 等. 考虑元件单元信息的电网暂态脆弱性研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 148-155.
GOU Jing, LIU Jun-yong, WEI Zhen-bo, et al. Review of power grid transient vulnerability under component unit information[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 148-155.
- [13] 陈恩泽, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于事故链的电网低频振荡及脆弱性分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 42-48.
CHEN En-ze, LIU Di-chen, LIAO Qing-fen, et al. Low frequency oscillation and vulnerability analysis of power grid based on the fault chains[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 42-48.
- [14] 陈晓刚, 孙可, 曹一家. 基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 138-144.
CHEN Xiao-gang, SUN Ke, CAO Yi-jia. Structural vulnerability analysis of large power grid based on complex network theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 138-144.

收稿日期: 2013-04-07; 修回日期: 2013-08-20

作者简介:

李玲玲(1968-), 女, 博士后, 博士生导师, 从事电器可靠性及其检测技术的研究; E-mail: lilingling@hebut.edu.cn

鲁修学(1990-), 男, 硕士研究生, 从事电器、电力系统可靠性及其检测技术的研究。