

基于网络拓扑和运行状态的电网灾难性事故评估模型

催振^{1,2}, 肖先勇^{1,2}

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 电网拓扑结构作为承载电气运行量的主体, 和电气状态量一起成为影响电网灾难性事故的两个关键因素。在着重关注运行状态的风险评估之后, 以复杂网络理论为基础, 综合考虑结构状态和运行状态的方法得到研究人员的广泛关注。以电网拓扑结构和电气运行量的评估指标为切入点, 对各种评估方法的思想、方法手段、目的进行了类比、评述。指出了在分析电网灾难性事件中, 将电网运行状态耦合到电网拓扑结构上是全面系统评估电网连锁故障严重度的关键。而采用拓扑剖分的方法, 将复杂电网分为若干单元系统, 再采用不确定风险分析的方法将各个单元系统有机整合, 在单元系统层面来分析电网灾难事故的严重性可能是一条有效途径; 并指出了今后值得注意的研究方向。

关键词: 复杂网络; 灾难性事故; 连锁事件; 拓扑结构状态; 运行状态; 不确定性理论

Abstract: Grid topology which is the principle part of carrying electrical operation capacity, and electrical state capacity are two key factors to influence the catastrophic failures in power grid. After focusing on risk assessment of operating condition and based on complex network theory, the methods synthetically considering topology state and operating condition are obtained close attention by researchers. Taking the evaluation indices of grid topology and electrical operation capacity as the cut-point, the ideas, means and purposes of various assessment methods are analogized and reviewed. It is pointed out that during analyzing grid catastrophic events, using the operating condition of power grid coupled to the grid topology is crucial for the comprehensive assessment of the severity of grid cascading failures. Based on topological triangulation method, the complex power grid is divided into several modules, then the module systems are integrated by uncertain risk analysis method, and making the analysis of grid catastrophic failures on the module systems level may be effective. In the end, the research direction which should be noted in the future are proposed.

Key words: complex network; catastrophic failures; chain events; topology state; operating condition; uncertainty theory

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0020-06

0 引言

随着电网的复杂性增加和自然环境等的变化, 电力系统灾难性连锁事故频繁发生, 这些灾难性大停电事件大多始于系统某一元件故障^[1]。系统设计的安全水平大多满足 $N-1$ 准则, 但在 $N-1$ 故障情况下, 一些不确定性因素可能会影响电网脆弱环节, 如果这些薄弱环节也故障, 就很可能引发一系列连锁故障, 连锁性故障迅速传播最终可能导致大面积崩溃^[20, 22], 因而, 国内外学者对电网脆弱环节的关程度越来越高, 进行了许多有益的探索。

随着经济的高速发展, 电网的互联程度越来越高, 互联坚强智能电网是未来电网发展的必然趋势。但是, 对于高度互联的电网, 若发生连锁性故障, 造成

的损失和影响程度必然也是灾难性的。因而, 考虑到系统规模和复杂程度都在不断增加的高度互联电网的实际, 从一个整体系统的层面研究电网的灾难性事件, 更具有工程意义。下面先从复杂网络的角度出发, 对已有电网连锁故障评估模型进行评述, 从中得出值得关注的研究方向, 对其进行分析研究, 以便进一步深入研究参考。

1 复杂网络理论

1.1 复杂网络的拓扑参数^[1, 2]

用复杂网络理论研究电力系统, 先将系统描述为 n 节点、 m 支路的复杂网络, 引入以下特征参数。

平均距离 L : 假设网络节点数为 n , 节点 i 和 j 之间以最少的边数连通的路径是最短路径 d_{ij} 。将所有

节点间的最短路径求均值,得网络平均距离

$$L = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}$$

节点度数 D : 连接该节点的边数。

节点介数 B_n : 按照最短路径遍历网络中所有发电机节点与负荷节点之间的连接路径,节点被这些路径经过的次数就是节点介数。

线路介数 B_l : 按照最短路径遍历网络中所有发电机节点与负荷节点之间的连接路径,线路被这些路径经过的次数就是线路介数。

网络冗余性 R : 断开有直接相连关系的两节点之间的支路,此时连接两节点的最短路径就是网络冗余性 R ,从物理含义可以看出冗余性反映了节点间的最短备用路径长度。

最大连通域的大小 G : 最大连通域是指网络发生解列后,所有连通区域中节点数最大的区域,其大小指最大连通域中的节点数目。

1.2 复杂网络模型^[3]

实际的电网总是呈现出各种特征,研究人员从所关注的目标出发,通过抓住一些特征、忽略一些特征的方法,建立起了一系列理想的复杂网络模型,以此研究电网能较好地反映出所关注的重点。

1959年,数学家 Erdős 和 Rényi 提出了最早的随机网络模型,几十年来复杂网络理论有了很大发展。特别是20世纪末,Watts 和 Strogatz 提出小世界模型 (small world) 以及 Barabási 和 Albert 提出无标度网络特性 (scale free),引发复杂网络研究的又一轮高潮。在小世界网络模型中,只有少数节点拥有较高的度数,但对网络的连通起着决定性作用,该特征与电网特征之间的相似度很高,因而不少研究人员以此为工具研究电网连锁故障。

2 基于复杂网络理论的电网连锁故障评估

电网灾难性事故的评估中,研究人员从防御目的出发,虽然研究的方法和手段各不相同,但主要从3个角度来研究:①从网络固有拓扑结构出发,辨识触发连锁故障的单一脆弱线路;②从网络运行状态出发,辨识引发电网灾难的连锁故障序列;③综合考虑拓扑结构和运行状态来评估电网灾难性事件的风险。

2.1 基于拓扑结构的单一脆弱线路辨识

对于拓扑结构已知的电网,在一定运行状态下,

其网络中固然存在脆弱的环节是电网的固有属性。这些固有脆弱环节对触发系统发生连锁故障,最终导致灾难性大停电起着导火索的作用。因而,单独将这些脆弱环节辨识出来,对其严加防范以防触发连锁事故的发生。

在对单一脆弱线路的辨识方法中,经历了从简单图论结构到有权有向网络再到考虑一些简单电气量等阶段。在最初的研究中,电网被描述为无权无向的网络^[2],这与实际电网中,每条支路按照一定的方向输送各不相同的电能,是有差异的。因而,评估的结果不能很好地准确辨识出脆弱支路。文献[4]在文献[2]的基础上,提出了加权的电网模型,该模型的线路权重基于线路的电抗,并提出了新的电网脆弱评估指标。并且,该模型在保持了小世界特性的同时,在反映节点重要度和实际电力系统运行状态方面都优于无权网络。其中,提出的用失负荷百分比 L_{out} 来测度故障影响的广度、用输电效率下降百分比 E 来测度故障影响的深度,对后续研究都具有启发和指导的意义。文献[5]又在文献[4]的基础上进一步把电网模型扩展为有向有权网络,提出了综合考虑功率特性和网络特性的新的脆弱性指标。并在此模型上,从随机攻击和蓄意攻击2种方式出发,辨识出了网络中的脆弱节点和脆弱线路。可见,研究人员已从单一考虑拓扑结构,向兼顾电网实际特性层面研究。

既考虑网络本身的拓扑结构又满足电力系统运行的实际状态,是复杂网络模型发展的必然趋势。在电网模型中,常将发电机节点称为源节点,将负荷节点称为流节点(汇接点),源流节点之间的串联路径称为输电路径^[6],以下也以此简称。实际电网中,只要源流节点对之间存在输电路径,电能就可以从该源节点传输到该流节点。基于电网这一实际运行情况,文献[7、8]提出了线路的电气介数,以此用于辨识电网中的关键线路(也称“脆弱线路”)。该方法解决了以前方法中假设源流节点间潮流只沿最短路径传输的不足,比较真实的反映了源流节点之间对输电路径的实际利用情况,与实际电力系统更贴近了一步。并且,其提出的系统最大传输能力指标,对于后续从更系统更整体的层面研究系统故障的影响具有很好的开创性作用。

2.2 基于运行状态的连锁故障序列辨识^[9、10]

引发电网灾难性大停电的连锁事件序列就如同多米诺骨牌一样,两者都存在一定崩溃路径。崩溃路

径中的前一事件触发了后续事件的发生。如果能够筛选出风险高的连锁事件序列,在前一事件发生后,按照已筛选出的高风险的连锁故障序列进行阻断,可以有效防治后续故障事件的发生。可见,高风险的连锁故障序列筛选是解决问题的关键。在连锁事件序列的筛选中,都是建立在各种网络模型的基础上的,以下详细分析几种主流的复杂网络模型。

2.2.1 OPA 模型^[9]

这是由美国橡树岭国家实验室和威斯康辛大学电力系统工程研究中心和阿拉斯加大学这三所研究机构首个英文字母命名的网络模型。其主要关注的是系统负荷的变化,该模型包含了快时间尺度和慢时间尺度两个度量标准。其中,快时间尺度过程描述的是网络连锁过负荷和连锁故障这两个相互平衡的过程;慢时间尺度描述的是负荷增长和网络传输性能逐步提高这一对相互平衡的过程。

该模型基于直流潮流,采用线性规划法对目标函数进行求解,目标函数为求解代价函数: $C = \sum P_s(t) - W \sum P_l(t)$ 的最小值, $\sum P_s(t)$ 为 t 时刻所有发电机的总功率, $\sum P_l(t)$ 为 t 时刻系统的总负荷, W 通常取值为 100,以保证在能满足负荷的情况下,尽量增加发电机而不甩负荷。

该模型存在的不足是,所做假设与实际电网差距较大,所有网络元件都按照相同方法进行假设,对于网络自身拓扑结构考虑不够完善。

2.2.2 隐性故障模型^[10]

根据国内外统计数据显示,电力系统中 75% 的连锁事件都与保护的隐性故障有关^[11]。隐性故障:电力系统中一种固有的、不可避免的元件缺陷,在系统处于正常运行状态下,它一直“隐而不发”,但是当系统在一定的故障状态下,隐性故障就会暴露出来。

常见的隐性故障分为:基于线路保护的隐性故障和基于电压的隐性故障。基于线路保护的隐性故障是指,当网络中支路断开后,与该支路首末节点有连接关系的所有支路的保护都暴露在隐性故障的威胁之下,其发生的可能性如图 1 所示。基于电压的隐性故障是指,在网络中,如果系统无功不足,会造成发电机母线电压下降,在此情况下可能会造成发电机跳开,此时所有与该发电机母线相连的支路都暴露在隐性故障的威胁之下,其发生的可能性可以用图 2 来描述。文献 [11] 基于隐性故障模型,综合考虑了运行状态的负荷特性和机组调速器特性,结合电压不稳定

指数、有功无功裕度指数、掉负荷指数等指标来筛选出了高风险的连锁故障序列。

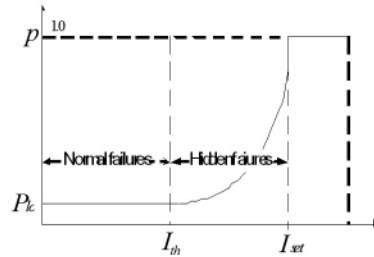


图1 暴露线故障概率

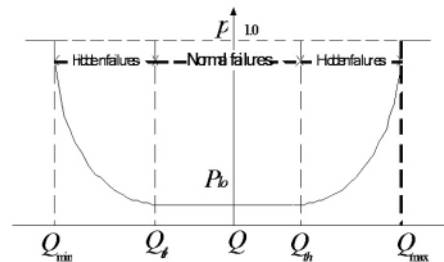


图2 发电机故障概率

2.2.3 其他复杂网络模型^[10]

除了以上的模型外,国外的研究人员以图论为基础,提出了一系列新的复杂网络模型,虽然在现阶段还没有得到广泛的认可和应用,但是其中的思想非常具有开创性和启发性,现对其各自进行简述分析。

Holme 和 Kim 相隔中心性模型:把电网以图 $G = (V, E)$ 来描述,其中 V 为网络的节点集, E 为网络的支路集。相隔中心性模型假设两节点之间的功能都是通过最短路径完成的,其主要关注的是网络演化所导致的过负荷,并采用相隔中心性来评估网络节点和支路的负荷和容量。该模型存在的不足在于:模型以无标度网络模型为基础,模型中的网络是一直生长变化的,但模型假设了每个节点容量的最大值均相同。

Motter 与 Lai 模型: Motter 与 Lai 模型与相隔中心性模型不同在于,其假设了各节点的容量不同,故障节点会从网络中永久删除;并且,在由于连锁故障发生的过程是短时间的,所以不考虑网络生长。相似之处都是采用经过某节点最短路径的总数目来定义该节点负荷,节点能够处理的最大负荷为节点的容量,节点的容量正比于其初始负荷。

Crucitti 和 Latora 的有效性能模型:该模型基于系统中某一元件故障引起的潮流动态重分布,应用有效性能概念将电网描述为由 N 个节点 K 条支路形成的有权图 G ,用 $N \times N$ 邻接矩阵 e_{ij} 来描述, e_{ij} 为节点 i 与 j 之间的有效性能, $e_{ij} \in (0, 1]$,如果两点之间没有

边相连则 $e_{ij} = 0$ 。引入 Crucitti 和 Latora 的有效性能模型的优点: 第一, 是假设过负荷节点的负荷降到额定值以下, 这些节点可能通过重新接入网络而再次正常工作; 第二, 是避免了在以往的静态故障研究中通过移除系统中一定比例的元件并评估仿真后的故障能在多大程度上影响网络运行的方法, 而是采用了动态仿真法, 认为一个元件故障不但能对网络行为产生直接影响, 还会导致其他元件过负荷, 使得相应部分或全部元件发生故障, 从而产生连锁影响。

3.3 基于拓扑结构和运行状态的综合模型

在对电网灾难性事故的评估中, 准确合理地制定故障引起的严重指标一直是评估方法需要解决的难题。现有的指标中通常是仅仅考虑运行状态的严重性, 而忽略了网络结构的严重性。网络结构作为承载电气量的主体, 其结构的完整性直接影响到供电的可靠性, 因而, 网络结构的严重性和运行状态的严重性应该是值得同等关注的两个方面。

文献 [12] 在已有研究基础上, 提出了状态脆弱性及结构脆弱性的准确定义及新评估模型; 并提出了结合这两个脆弱因素综合考虑的思想, 既考虑电网的运行状态又结合网络拓扑结构, 并以此建立了可针对不同运行状态变量以获取不同评估目的评估模型通式。

文献 [8] 在评估故障对电力系统带来的影响方面, 将故障后系统最大连通区域指标和系统最大传输能力指标结合使用, 因而可以从拓扑结构和输电能力两个方面的变化来更全面地评估连锁故障对系统的影响。

电力系统自身的网络拓扑结构指标和运行状态指标是两个平级的指标, 两者相互独立, 又相互承载。准确合理地将这两类指标耦合是评估连锁故障影响的关键。文献 [13] 受中国人口与地理关系中著名的胡焕庸线的启发, 采用二维平面拟合的思路来研究电网脆弱性。

电网灾难性事件中连锁故障和电网灾难发生后的黑启动, 可以说是一对互逆的过程。黑启动中网络重构的策略是寻求网络结构和运行质量的最优, 而筛选高风险的连锁故障序列的策略是辨识出对网络结构和运行质量影响最大的故障序列, 可以看出, 两者具有密切的联系, 可以互相借鉴。对于大停电之后的黑启动策略, 文献 [14] 提出了一种基于节点重要度评估的网络重构策略, 该策略采用节点收缩后的网络凝聚度定量评估网络中电源和负荷的重要性。以此

为基础, 结合网络结构和运行质量的综合评价指标——网络重构效率来全面、客观地评估重构效果。这一方法策略对于如何结合网络自身结构和运行状态来评估网络的状态有很好的借鉴作用。

3 相关问题探讨及今后值得注意的研究方向

现有电网灾难性事件评估中, 以孤立的眼光来分析每一个事件给系统带来的风险 (即: 某条支路故障的可能性测度 · 此支路故障后的系统严重性测度 = 该支路故障引来的系统风险)。以此方法, 对电网中所有正常运行的支路分别求出其故障带来的系统风险, 然后对求出的风险值排序, 筛选出其中风险值最大的 Q 组事故链, 然后据此进行下一次支路故障的风险分析)。在求取故障造成的严重性时, 大多认为事件发生后对电网整体造成的严重程度就是系统中所有孤立元件严重程度的叠加^[11]。所以, 针对现有的理论认识, 为后续研究提供了 2 个很好的切入点^[15-18]。

(1) 经济学中最早提出风险分析的概念: 风险 = 该事件发生的可能性测度 · 该事件带来的损失。风险指数: 某一具体损失发生的不确定测度 (Risk index is defined as the uncertain measure that some specified loss occurs)。可见对事件发生的测度和事件引来的损失是造成风险的两个关键因素, 请注意是损失, 而不是严重程度。传统的理论正苦于解决如何将一系列严重性指标整合为一个统一的指标来评估连锁故障的影响时, 可以从风险评估的定义出发, 抓住损失这一概念, 得出一个统一的、可加的指标。其实, 现有的方法关注于母线电压越限指标、支路功率越限指标、发电机有无功裕度指标、甩负荷百分比指标等等, 这些归根结底都指向于负荷的丢失。因而, 完全可以将这系列指标采用一定的映射关系指向于负荷的丢失, 从而得出一个统一的、可加的负荷丢失期望。

(2) 电力网络中节点与支路、之路与支路之间并不是相互独立的, 电网之所以能够将电源节点的电能传输到负荷节点是依靠各组源流对之间一条条路径实现的。可见在电网中单独独立的支路是没有意义的, 只有当一系列支路通过一定的拓扑连接关系后, 这些支路才能具有相应的传输功能。正因为各支路之间存在着一系列相互关联的关系, 所以, 对于系统风险的评估是应该站在一个考虑了网络拓扑关系的

单元系统层面来分析,而不是将系统中的各条支路当作各不相干的孤立元件来分析。文献[21]已提出了对电网进行功能组分解的思想,并在功能组的基础上给出了N-K事故辨识方法。受此启发,在此采用拓扑图论的方法将一个复杂电网分割成一个一个的单元系统,将风险分析从孤立地单独分析每一个元件的层面提升到从单元系统的层面来分析。

单元系统^[19]:最原始的基本电力网络就是单机系统(即:一台电机+一条支路+一个负荷,这就是所定义的单元系统)。电力系统的发展就是将一系列的这样单元系统通过一系列的并联、串联关系得到现有的复杂电力系统。因而对简单的串联、并联系统分析时很有必要,文献[19]以针对单元串、并联系统,对其进行风险分析,在此不做赘述。在实际电网中,电源节点与负荷节点之间的连接关系并不是简单的并联或者串联,而是两种关系同时交织存在的,所以想要从简单的单元系统的层面来分析电网连锁事件的风险就先得采用拓扑图论的方法将复杂电力网络分割成一组一组的单元系统。以下以一个包含了串、并联关系的桥联系统来分析。

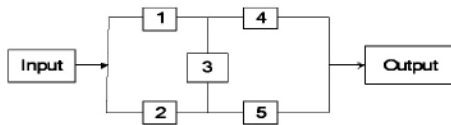


图3 简单桥联系统

(1) 图3这个简单的桥联网络中包含了5个元件,其各自正常运行的测度分别用5个不确定变量 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 来表示。显然,其中存在4条输电路径,分别为

- Path₁: Input—1—4—Output;
- Path₂: Input—2—5—Output;
- Path₃: Input—1—3—5—Output;
- Path₄: Input—2—3—4—Output。

对于这4条路径各自来说,都是当且仅当本路径中所有元件都正常运行时本路径才能工作,因而可得出这4条路径各自的正常运行的测度分别为

$$\begin{cases} path_1 = x_1 \wedge x_4 \\ path_2 = x_2 \wedge x_5 \\ path_3 = x_1 \wedge x_3 \wedge x_5 \\ path_4 = x_2 \wedge x_3 \wedge x_4 \end{cases} \quad (1)$$

显然对于这个桥联系统,只要这4条路径中任意一条路径正常运行,系统都可以运行,当且仅当这4条路

径全故障后,系统才会故障,所以该系统能保持运行的测度为 $f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (x_1 \wedge x_4) \vee (x_2 \wedge x_5) \vee (x_1 \wedge x_3 \wedge x_5) \vee (x_2 \wedge x_3 \wedge x_4)$ (2)

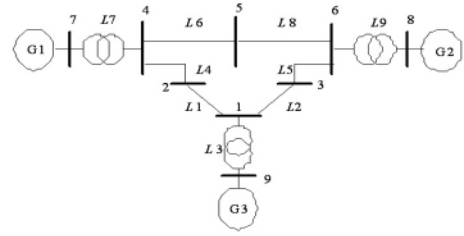


图4 IEEE9节点系统

(2) 以图4的9节点系统为例,各支路正常运行的不确定测度为 x_1, x_2, \dots, x_9 ,经过源流路径剖分,可以得出系统共有9对源流对:G₁—2、G₁—3、G₁—5、G₂—2、G₂—3、G₂—5、G₃—2、G₃—3、G₃—5。

- 现仅对5号负荷节点具体分析,当网络正常运行时,G₁、G₂、G₃对负荷节点5的6条供电路径分别为
- Path₁: G₁—L₇—L₆—5
 - Path₂: G₁—L₇—L₄—L₁—L₂—L₅—L₈—5
 - Path₃: G₂—L₉—L₈—5
 - Path₄: G₂—L₉—L₅—L₂—L₁—L₄—L₆—5
 - Path₅: G₃—L₃—L₁—L₄—L₆—5
 - Path₆: G₃—L₂—L₅—L₈—5

若IEEE9节点系统中各支路正常运行的不确定测度为 x_1, x_2, \dots, x_9 ,则5号负荷节点正常供电的不确定测度为

$$\begin{aligned} x_n = & (x_7 \wedge x_6) \vee (x_7 \wedge x_4 \wedge x_1 \wedge x_2 \wedge x_5 \wedge x_8) \\ & \vee (x_9 \wedge x_8) \vee (x_9 \wedge x_5 \wedge x_2 \wedge x_1 \wedge x_4 \wedge x_6) \\ & \vee (x_3 \wedge x_1 \wedge x_4 \wedge x_6) \vee (x_2 \wedge x_5 \wedge x_8) \end{aligned} \quad (3)$$

现假设支路L₉故障,则此时G₁、G₂、G₃对负荷节点5的4条供电路径为

- Path₁: G₁—L₇—L₆—5
- Path₂: G₁—L₇—L₄—L₁—L₂—L₅—L₈—5
- Path₃: G₃—L₃—L₁—L₄—L₆—5
- Path₄: G₃—L₂—L₅—L₈—5

此时对负荷节点5供电的测度为

$$\begin{aligned} x_f = & (x_7 \wedge x_6) \vee (x_7 \wedge x_4 \wedge x_1 \wedge x_2 \wedge x_5 \wedge x_8) \\ & \vee (x_3 \wedge x_1 \wedge x_4 \wedge x_6) \vee (x_2 \wedge x_5 \wedge x_8) \end{aligned} \quad (4)$$

将正常情况下节点5的负荷标么化为1,在支路L₉故障,经潮流计算得出的节点5的负荷输出标么化为R₅,从而可以得出L₉支路故障后,节点5的期望负荷为 $R_5 = \frac{x_f}{x_n} \times R_5$,所以可得在L₉故障后节点5的损失

期望为 $\bar{L}_5 = 1 - R_5$ 。同理,可以求出,在 $N - 1$ 故障情况的 $\bar{L}_2, \bar{L}_3, \bar{L}_5$ 他们的物理含义都是负荷节点掉电损失期望值,从而可以分别求得 $N - 1$ 事故后对于每个负荷节点带来的风险指数为 $RISK_n = x_f \times \bar{L}_n$ ($n = 2, 3, 5$)。最后可以求得故障对于全网带来的风险指数为 $RISK = \sum_{n=2,3,5} w_n \times RISK_n$, w_n 为每个负荷点在总的负荷中所占的权重,可以根据 $w_n = \frac{S_n}{\sum_{n=2,3,5} S_n}$ 可以得到,其中 S_n 为 n 节点的视在功率。

这样,就得出了 $N - 1$ 故障情况下各组事件给系统带来的风险,将其进行排序筛选出风险值最大的 Q 组事件后,进行潮流计算再按照上述方法可得到 $N - 2$ 情况下各组事件带来的系统风险,再重复上述步骤,依次类推,直到搜索到预先设定的最大允许故障数或者最大允许失负荷比例或者是直到潮流不收敛时结束。从而得出一个给系统造成高风险的预想事故。

可见,该方法在分析过程中摆脱了以孤立的眼光来审视电网支路的传统思路,提升到了从单元系统这一个整体层面来评估电网的故障风险,可以说向更系统化、更逼近科学实际;在结果方面,该方法不仅可得出故障给系统带来的风险,更能得出具体事件对具体负荷节点带来的风险。

所以综上所述,该方法采用拓扑剖分,将复杂网络剖分为若干单元系统,再采用刘宝碇教授不确定理论中最新提出的不确定风险分析(uncertain risk analysis)将各个单元系统有机结合,从而得出了评估电网连锁事件风险的新思路,此方法在分析手段上更系统整体化,在分析结果上更细致具体化。

4 结 语

从复杂网络理论角度对电力系统连锁故障进行研究,为探索未来高度互联化、智能化大电网的安全提供了新的理论基础和思路。以复杂网络为基础,先分别评述了从拓扑结构角度探索触发连锁故障的单一脆弱支路,再到从运行状态角度辨识高风险连锁故障序列的各种模型方法,最后再分析了综合考虑网络结构和运行状态的模型。上述模型无论从哪个角度出发,都紧紧秉承了网络拓扑结构作为电气量运行的主体,网络结构的指标应该和运行状态量指标同等重

要这一思想。因而,如何将结构状态与运行状态有机结合起来评估电网的灾难性事件是关键点也是难点,采用拓扑剖分,将复杂网络剖分为若干单元系统,再采用不确定风险分析将各个单元系统有机结合,从而得到评估电网连锁事件风险的新思路。值得注意的是,复杂电力系统建模绝非易事,理论研究仅是第一步,各种模型对存在自身的局限性,如何提高和验证模型与方法的普适性是需要继续深入研究的。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 孙可,韩祯祥,曹一家.复杂电网连锁故障模型评述[J].电网技术,2005,29(13):1-9.
- [4] 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.
- [5] 张国华,张建华,杨京燕,等.基于有向权重图和复杂网络理论的大型电力系统脆弱性评估[J].电力自动化设备,2009,29(4):21-26.
- [6] 邵莹,于继来.采用源流路径电气剖分信息的电网脆弱性评估[J].中国电机工程学报,2009,29(31):34-39.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 孙可.复杂网络理论在电力网中的若干应用研究[D].杭州:浙江大学,2008.
- [10] 李蓉蓉.复杂电力系统连锁故障风险评估研究[D].杭州:浙江大学,2006.
- [11] Hazra J, Sinha A K. Identification of Catastrophic Failures in Power System Using Pattern Recognition and Fuzzy Estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 378-387.
- [12] 魏震波,刘俊勇,朱国俊,等.基于电网状态与结构的综合脆弱评估模型[J].电力系统自动化,2009,33(8):11-14.
- [13] 丁剑,白晓民,赵伟,等.基于二维平面拟合的电网脆弱性分析[J].电力系统自动化,2008,32(8):1-4.
- [14] 刘艳,顾雪平.基于节点重要度评价的骨架网络重构[J].中国电机工程学报,2007,27(10):20-27.

(下转第53页)

整方向,迅速改进和转变,以满足电网各种运行工况的需求,此外,电网在规划设计方面也需要进行综合考虑,开展电磁环网解环研究、电源分区消纳研究、电源接入地方式研究、750 ~ 220 kV 电压控制专题研究等,建设坚强的各级电网,各级电网统一协调统筹发展,为电网运行提供坚强的物理保障。

作者简介:

常喜强(1976),男,硕士,高级工程师,从事电力系统安全稳定运行控制工作;

孙谊婧(1974),女,硕士,高级工程师,从事电力系统安全稳定运行控制工作。

(收稿日期:2011-07-10)

(上接第25页)

[15] 于继来,汤奕. 交流支路和节点的联合电气剖分[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 37-42.

[16] 王锡凡. 电网可靠性评估的随机网流模型[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 1-6, 22.

[17] 汤奕,于继来. 一种新的输电线路阻塞责任定量分析方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(4): 98-103.

[18] 汤奕,于继来,周苏荃. 电力网络源流路径电气剖分算法[J]. 2006, 30(22): 28-33.

[19] Baoding Liu, Uncertainty Theory [M]. Beijing: Uncertainty Theory Laboratory, 2010. <http://orsc.edu.cn/liu>.

[20] 管霖,郑传材. 线路 N-K 停运机理及其概率模型[J]. 电力系统自动化学报, 2009, 21(4): 115-119.

[21] 宋毅,王成山. 双重故障模式下基于证据理论和功能组分解的 N-K 事故辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 47-53.

[22] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 1-5.

(收稿日期:2011-04-10)

(上接第42页)

[6] Kandil M S, El-Debeiky S M, Hasanien N E. Long-term Load Forecasting for Fast Developing Utility Using a Knowledge-based Expert System [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 491-496.

[7] 张民,鲍海,晏玲. 基于卡尔曼滤波的短期负荷预测方法的研究[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 39-42.

[8] 陈泽淮,张尧,武志刚. RBF神经网络在中长期负荷预测中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(1): 15-19.

[9] 钱卫华,姚建刚,龙立波,等. 基于短期相关性和负荷增长的中长期负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 59-64.

[10] 谢敬东,唐国庆,徐高飞,等. 组合预测方法在电力负荷预测中的应用[J]. 中国电力, 1998, 31(6): 3-5.

[11] 吉培荣,张玉文,赵青. 组合预测方法在电力系统负荷预测中的应用[J]. 三峡大学学报, 2005, 27(5): 398-400.

[12] 牛东晓,陈志业,邢棉,等. 具有二重趋势性的季节性电力负荷预测组合优化灰色神经网络模型[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 29-32.

[13] 李金超,牛东晓,李金颖,等. 基于熵权的中长期电力负荷组合预测[J]. 华东电力, 2005, 33(8): 27-29.

[14] 李春生,王耀南. 基于条件熵的电力负荷组合预测模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(4): 55-58.

[15] 肖先勇,葛嘉,何德胜. 基于支持向量机的中长期电力负荷组合预测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 84-88.

[16] 丁巧林,潘学华,杨薛明. 最优组合预测方法在电力负荷预测中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊1): 127-130.

[17] 苗增强,武宏波,李婷,等. 基于最小一乘法的组合赋权法在中长期负荷预测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 28-32.

[18] 周涑,任海军,李健,等. 层次结构下的中长期电力负荷变权组合预测方法[J]. 2010, 30(6): 47-52.

[19] 孙见荆. 组合预测参数估计方法研究[J]. 预测, 1996, 15(6): 54-56.

[20] 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用[M]. 大连:大连理工大学, 1994.

[21] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1998.

[22] 陈守煜,赵瑛琪. 模糊优选(优化)理论与模型[J]. 应用数学, 1993, 6(1): 1-6.

[23] 康海贵,刘艳,孙敏. 施工方案评价中的多级模糊优化及非结构性模糊决策分析[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(6): 228-231.

[24] 杨实俊,刘健夫. 模糊优选考核方法在企业人力资源管理中的应用[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(4): 110-112.

[25] 王世儒,雷伟丽. 基于模糊数学的多级泵站老化评价[J]. 甘肃水利水电技术, 2009, 45(1): 22-23.

[26] 李海龙. 基于熵权的多级模糊优选模型在软基处理中的应用[J]. 西部探矿工程, 2009(4): 50-53.

[27] 毛季帆,姚建刚,金永顺. 中长期电力组合预测模型的理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 53-59.

(收稿日期:2011-04-28)