

DOI: 10.7500/AEPS20130606018

关于电力系统相继故障研究的评述

薛禹胜¹, 谢云云^{1,2}, 文福拴³, 董朝阳⁴

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 210003;

2. 南京理工大学自动化学院, 江苏省南京市 210094; 3. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027;

4. School of Electrical and Information Engineering, The University of Sydney, NSW 2006, 澳大利亚)

摘要: 归纳相继故障研究的要点与现状, 包括演化机理、模式表示、场景筛选判据。建议仅在需要强调前后故障间的因果关系时使用术语“连锁故障”, 否则使用内涵更广的“相继故障”来计及独立的相继故障和有共同致障源的相继故障。针对关键相继事故链的识别方法, 归纳为基于概率、后果或风险的几类关注度指标, 并比较了其分析方法及效果。指出对研究与应用的新挑战, 特别是对小概率高风险事件的正确处理, 展望研究重点与可能突破的方向。

关键词: 相继故障; 连锁故障; 群发故障; 故障关注度; 风险排序

0 引言

人类活动规模及资源优化范围的不断扩大, 提高了经济收益与资源利用效率, 但也伴随着天灾人祸对电力可靠性的影响越来越复杂。统计表明, 虽然电力事故的频次在下降, 但后果却日益严重。各国大停电事故^[1-4]表明, 孤立的故障一般并不会直接导致当代的电力系统大停电, 但一个并不严重的故障可能通过非线性因素的反复放大而倾覆整个多米诺骨牌, 而波及全球的巨大灾难则往往由事前被认为几乎不可能发生的小概率高风险事件引起^[5-6]。因此, 相继故障越来越成为研究的热点。

电网某个元件的故障及投切都会改变系统潮流。若余下支路上的负荷超过该支路的承受能力(或整个电网无法在该工况下维持稳定运行), 为了避免设备的损坏(或系统的崩溃), 设备保护(或系统保护)就会动作, 从而造成新的开断。如此反复很可能导致大停电^[7]。这些有直接因果关系的相继故障可称之为因果相关的相继故障或连锁故障。期间, 保护装置与其他自动设备的隐性故障以及人员的错误决策或操作, 都会以相继故障的形式推波助澜。

在受扰系统恢复到正常状态之前, 原有的或新

的威胁源还可能造成孤立的新故障(群), 从而引发与上述连锁事故链并行的(群发性)相继故障。例如, 2008 年的极端冰灾导致了大范围的停电事故^[8-9], 期间大量电力设备因共同的致障原因或同时或先后发生故障。这类彼此之间无直接因果关系的相继故障不同于连锁故障, 可称之为独立(的)相继故障。在许多自然灾情或恶性信息灾情中都可观察到独立相继故障。

连锁故障与独立相继故障都属于相继故障, 故在不会引起歧义的场所可统称为相继故障。但由于致障原因不同, 故在预测它们的概率时, 所关心的条件因素也不同, 而有必要区分为连锁故障及独立相继故障。目前, 针对连锁故障的研究较多, 但对独立相继故障及群发故障的研究则远不如前者深入。

对相继故障的分析可以基于各组件数学模型的仿真法(以下简称常规仿真法)或基于复杂性理论。

常规仿真法通常先按物理概念建立各组件的数学模型, 通过计算机仿真技术来求解, 属于还原论范畴。它包括面向特定场景的确定性仿真及面向不确定因素的随机仿真。确定性方法基于 $N-1$ 等判据分析连锁故障的演化^[10-11], 易于理解, 但受限于计算量, 对现代电力系统只可能处理单级故障。随机算法可以处理隐性故障等不确定因素。启发性规则有利于提高效率。复杂性理论从宏观上解释相继故障导致系统崩溃的机理。不确定性的研究有穷尽式搜索方式及蒙特卡洛抽样法。为了克服维数灾^[10], 加快抽样法收敛的方法包括: 通过安全域及灵敏度概念^[12]将抽样法与确定性方法相结合, 以及采用重点抽样技术^[13]。

收稿日期: 2013-06-06。

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA05A105); 国家自然科学基金重大项目(91024028); 国家电网公司大电网重大专项资助项目(SGCC-MPLG003-2012); 国家电网公司科技项目(YS11002); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2011136); ARC LP120100302; ARC DP120101345。

常规仿真法的物理概念清楚,结论直观。其模型的详细程度,可按研究目的是系统在特定场景下的行为细节,抑或不确定因素的影响而予以选择。该类方法的计算量大,而且如何通过面向案例的仿真来宏观评估整体可靠性,还需要在方法论上有所突破。

复杂系统理论则从整体视角出发,属于整体论范畴。它用演化结构来描述系统的整体行为规律,并已引起电力学者的关注^[14],如电网整体脆弱性的评估、演化趋势的预测、扩展的信息物理系统的可靠性分析与控制。这类方法包括复杂系统理论法和复杂网络理论法^[15]。

复杂系统理论有助于研究大停电的机理与电力系统的宏观规划,但目前由于对电力系统物理特性的过度忽略,还难以具体指导电力系统的运行与控制。

本文归纳了相继故障的要素及影响相继故障演化的因素;评述了已有的研究方法;讨论了关注度和事故链的选择;探讨了相继故障研究的框架与前景。

1 故障的时空分布

故障是指影响供电可靠性或供电质量的事件,包括自然灾害、设备事故、操作事故、暴力事件等,都可能威胁到系统正常运行的静态或动态约束条件。故障不但会以光速波及整个同步电网,也可能在秒级时间尺度或分钟级时间尺度上触发后继故障而形成事故链。各故障在时间上与空间中的耦合使问题进一步复杂化。为分析各事故链的风险,必须掌握其具体组成及各故障间的相关性,包括独立故障、群发性故障或连锁故障。

1.1 单个故障

1) 设备缺陷发展成短路故障,或者由于雷击、覆冰等恶劣气象,异物接触及误操作而造成短路。其中,单相接地、两相接地、两相及三相短路分别约占65%,20%,10%,5%,但其对系统可靠性的冲击大小则呈升序。

2) 保护装置在选择性开断过载支路时,潮流的转移可能引起新的支路过载而连锁开断。在线开断仿真功能应该事先发现潜在的连锁开断,并通过调整工况来消除。

3) 保护装置或断路器误动及人员操作引起的机组误脱网、支路误开断甚至系统解列。

1.2 群发性故障

由于同一地区的气象及地质条件相仿,外部极端条件往往同时波及众多支路及设备,而造成群体性故障及大面积停电,例如大范围自然灾害:①雷击

引起的过电压除了会造成一次回路对地或相间闪络,或损坏变压器及开关等一次设备外,还可能影响二次系统的正常工作及设备安全;②覆冰引起线路受力过载及闪络,而不均匀覆冰或不同期脱冰则可能造成导线舞动及杆塔扭倾;③台风造成杆塔倾覆,导线刮断或舞动,或引发闪络跳闸;④绝缘表面附着的污秽物在潮湿条件下会造成污闪。

1.3 相继故障

相继故障是指前一故障后,系统状态尚未调整到足够健康的情况下,又遭受新扰动的故障场景。

1.4 连锁故障

连锁故障是指前后故障之间有相当明确的因果关系,前一故障改变了系统状态,从而触发下一个故障。例如:①潮流转移引起其他支路因新的过载而连锁开断,一连串的连锁开断甚至影响到系统的同步稳定性、电压稳定性或频率稳定性;②继电保护及系统保护由于硬件或软件的缺陷,或人为因素而误动,或断路器机械误动;③保护装置或断路器的拒动使故障只能靠后备保护切除,不但加长了故障存在的时间,还可能扩大停电范围。

显然,连锁故障只是相继故障中的一部分。目前对两者概念的混淆不利于研究的深入,建议仅在需要强调前后故障之间的因果关系时使用“连锁故障”的术语,否则应该称为“相继故障”。

2 相继故障的场景

2.1 相继故障的准静态仿真与动态仿真

如要考虑系统在前一故障后尚未过渡到新的平衡态时就发生新故障,则需要用定量的时序{(故障1,时间1);(故障2,时间2);…;(故障n,时间n)}表示故障模式,并必须用同一次暂态仿真来反映。由于间隔时间上的不确定性与计算量太大,预防性研究并不总是可行,但可用来复现特定场景或研究稳定机理。

目前,关于连锁故障的研究都忽略了系统的动态过程,假设系统可以平稳过渡到新的平衡态。其模式可用定性的时序故障模式描述为{故障1;故障2;…;故障n},各故障之间可能有直接因果关系,也可能来自相同的致障源,或者完全独立。

在此情况下,可以将相继开断过程解耦为若干次单故障的开断,递归式地通过准静态的潮流计算实现仿真。针对每个新平衡态,检查是否存在静态违约或由于变压器抽头动作而引起电压不稳定。

如何将相继故障的研究从静态安全分析范畴拓展到动态范畴值得讨论,例如校核新平衡态的动态稳定性或进一步考虑暂态过程的稳定性。

2.2 连锁故障是相继故障的特例

显然,连锁故障是相继故障的重要特例。可以用故障树来描述系统处于某一状态(节点)时由于某故障(树枝)而演化到后一状态,这棵树从根节点到某个叶节点的途径代表一个事故链。利用后续故障与前发故障的相关性,可以大大缩小连锁故障的搜索范围;讨论连锁故障的后果时,除了其直接损失外,还要考虑对后续故障概率的影响。

连锁故障的分析方法包括复杂性理论、人工智能及潮流/稳定分析。复杂系统模型将电力系统看作包含大量个体及个体间相互作用的模型,通过其自组织临界特性的分析,判断连锁故障的可能性。复杂网络模型研究简化的电网拓扑模型对扰动的承受能力以及连锁故障的发生可能性。人工智能包括各种启发式方法及人工神经网络方法。潮流/稳定分析还可分为确定性及不确定性方法。

2.3 独立的相继故障

伦敦大停电^[3]、巴西大停电^[16]等大停电灾难中,都有独立故障或弱相关的故障推波助澜^[17-18]。保护装置与断路器的隐性故障包括误动与拒动,虽然其概率较小,但后果往往很严重。文献[19-20]建立了线路保护隐性故障的启发式概率模型。文献[21]建立了线路和发电机保护的隐性连锁故障概率模型。文献[22]中研究了初始故障及断路器失灵故障组成的双重故障。文献[23]采用故障树分析法^[24],建立了保护装置隐藏故障的条件概率模型。

虽然目前的 $N-1$ 安全分析算法可以逐个分析 N 个独立场景,但要逐个分析多个独立故障的全部组合则很不现实。为此,可按一定指标进行启发式搜索^[10],但同时保证该指标的快速和强壮并不容易。

与连锁故障的树形象相对应,也许可以将独立的相继故障比作原树上的寄生树。后者的多样性及其与原树的分分合合,使故障树的“生态”变得更为复杂。各种保护的误动与拒动可以按概率随机抽样来取舍,就像并非所有树上都有寄生树。

2.4 有共同致障源的相继故障

由于大多数文献没有注意到独立相继故障不同于连锁故障的特点,因此,在研究大停电防御时,往往没有综合考虑连锁故障和独立故障,特别是由自然灾害或信息冲击等灾害源造成的群发故障。

极端灾害气象不仅会造成初始故障或群发故障,还会影响后续故障或产生独立相继故障。文献[11,25]考虑了气象因素对后续故障的影响。文献[26]基于雷电定位系统的数据,预报雷电范围,改进不同线路雷击故障率的计算方法。文献[27]建立

了气象与电气的模型,仿真分析线路覆冰与电网的交互影响。文献[28]基于风速和冻雨量的广义帕累托分布,提出冰荷载和风荷载的概率计算模型,基于Copula函数计算冰灾条件下的输电线断线倒塔的概率。文献[29]根据台风与电网信息,实时构建预想事故集并排序。

3 相继故障的关注度

3.1 启发式的规则与机理性的关注度

即使排除群发故障的可能性,研究具有 n 个元素的相继故障的算法,其时间复杂度为指数阶 $O(2^n)$ 。这对现代电力系统不但绝不可行,也并无必要。为了从中挑选出极少量应该关注的事故链,需要建立一套启发式规则或定义一个关注度指标,有效地过滤掉安全的算例。采用不同的指标会得到不同的结果。

关注度指标可以是特征量的启发性函数(如电气距离、雅可比矩阵的特征量),或机理性指标(如潮流偏移量、最小模特征根、负荷母线的VQ曲线、通过PV曲线拟合预估的负荷裕度、灵敏度)。前者与启发式规则一样,计算量少,但不可靠;后者则与之相反,而其可信度与所反映的机理程度密切相关。综合应用两者可能兼收其优点,但也很可能事与愿违。分级筛选及排序是常用的手段。例如:先用快速方法(如直流潮流)剔除大量很安全的算例,为了不误剔严重故障,还应该有快速而有效的误差上限估算手段;然后用较强壮的方法(如解耦潮流的少量迭代)识别出应予关注者,再按其排序逐个详细研究。文献[30]在工程中采用了两阶段筛选方法,即先用负荷裕度和潮流迭代预估方法,再用改进的二次曲线预估方法来为静态稳定分析选择算例。

关注度的选择与研究目标密切相关。复杂性系统理论以宏观统计性结论为目的,并不严格区分故障的时空细节、后续开断的序列、故障后果的准确评估等。但如果要求有针对性地预警及控制,就需要研究事故链的概率、演化过程及后果评估等细节。关注度指标可以分为基于概率、基于后果及基于风险3类。

3.2 故障概率

故障率的精确值对于相继故障引发大停电的机理研究并不关键,但对搜索相继事故链则至关重要。初始故障率可以通过经验和历史统计数据决定,或通过故障机理及人为、气象、设备等因素设定。后续的连锁故障则与潮流转移情况有关^[31-32],也可同时考虑保护误动等隐性因素^[33]或气象等外部因素。

组成相继事故链的各级故障的概率一般都很

小,其乘积将是非常小的数,显然与实际观察到的大停电概率不符。这是因为连锁故障或群发故障的条件概率并不小,有时甚至可视为必然事件。

3.3 故障后果

文献[14]按故障造成负荷孤立、电源孤立及电网解列3类后果讨论故障率。

由于模型的限制,在潜在故障发生前难以评估其将造成的停电范围、持续时间及社会影响,故障后果只适用于评估已发生的故障。

研究者转为用系统离开安全域边界的距离,即安全裕度来间接反映故障的严重程度。常见的有用热稳定裕度^[34]与电压稳定裕度^[33,35]反映故障后平衡点的影响,用暂态稳定裕度反映系统到达稳定平衡点之前的影响^[36]。也有文献按初始故障造成的潮流转移引起其他支路偏离初始潮流的程度来评估故障后果。

文献[37]中提出采用最优稳定控制代价来反映经济损失,即采用主动停电造成的损失代替系统失稳的不受控停电损失。

3.4 故障风险

1) 经典的风险概念

故障风险被定义为各故障场景 i 的概率 P_{di} 与其后果 M_i 的乘积之和,即 $\sum_i P_{di} M_i$ 。若将各后果 M_i 都设为1,则风险分析退化为概率分析;若将各场景的概率 P_{di} 设为1,风险分析就退化为确定性的故障后果。

2) 基于控制代价的风险指标

停电损失的概念只能应用于已发生的故障,故不支持停电风险的估算。

虽然安全裕度指标可以间接反映故障后果,但由于难以将其合理地折算为经济损失,故当要用概率来对其加权时,便失去了可比性。文献[38]用故障临界清除时间与实际清除时间之差来定义裕度,可以反映系统的稳定程度,却与故障损失没有单调的关系。

3.5 基于控制代价的故障风险关注度

考虑到安全控制的目的就是以受控的小范围停电的代价来避免不受控的大范围停电,故用使系统安全的最小控制代价来代替停电损失更符合问题的本质^[12]。采用最小控制代价值反映故障后果的其他优点包括:①可通过优化计算直接得到^[12];②具有货币的量纲,可应用于风险计算。

为此,将故障风险的定义修正为:使系统安全的最小控制代价与故障发生概率的乘积。它更好地反映了故障的关注度。据此定义,可以直接比较各候

选的后续故障。这包括通过静态和暂态仿真分析,若系统不安全,则搜索其最小的静态控制代价 C_i 或/及最小的暂态控制代价 C_i' ,然后根据其故障概率 P_i 计算故障风险 $r_i = P_i(C_i + C_i')$ 。若系统安全,则对应的风险为0。

4 按关注度搜索事故链

4.1 离线分析环境及在线分析环境

现代电力系统的支路数 N 高达数万。即使离线计算环境下,要按完整的 $N-2$ 准则校核安全都是挑战,更不用说考虑更多级的相继故障了。因此,离线编制的运行规程难以具体指导调度员应对庞大的故障树。

若处于在线计算环境下分析实际运行工况下的安全性,虽然计算能力受到更大限制,但只要能在3 min内完成 $N-1$ 准则的校核,那么不论 m 有多大,都可以达到离线 $N-m$ 校核的效果。这将大大提高对相继故障大停电的防御能力^[39]。

4.2 初始故障的选择

独立的单个故障的不确定性反映在故障元件、故障地点、故障场景与故障参数上,由于这些因素的大量组合,其分析与选择困难甚多。独立故障的概率可取统计数据;群发性故障需要研究外部致障因素影响故障率的机理^[40-41]。

单纯按照故障后果排序选择事故链,可能会要求不切实际的经济代价;单纯按照概率大小排序选择事故链,可能会忽略小概率但后果很严重的情况^[42]。但由于各种常见的初始故障的概率之间差别并不太大,故可以先取安全裕度最差的故障点和故障方式分析,再视需要补充。在有强烈的外部致障因素时,需要考虑群发故障。

4.3 后续故障的选择

快速识别出关注度高的支路,可以减少安全分析的工作量。导致大停电的事故链并不一定会构成最小割集。选择后续开断支路的方法众多,包括:搜索被开断支路两端节点之间支路阻抗之和最小的路径,或以图论知识通过回路环确定潮流增量较大的支路,或通过矩阵运算识别受开断影响最严重的输电断面。其共同点是电网处理为无权网络或以电气距离等局部特征量加权的网络,据此搜索危险路径。由于不能真实反映潮流的变化,这类方法不能满足强壮性要求。

后续故障主要是由于潮流转移引起后续支路的开断,所以往往通过潮流计算选择后续的过载支路^[31,33,43]。文献[32]按支路潮流占总潮流的比重及越限程度选择后续过载支路。文献[43]在选择后续

故障时还考虑了隐藏故障。对于极端灾害天气对后续故障的影响则是后续研究的一个重点。文献[44]同时考虑网络拓扑结构及潮流分布的不均衡性对潮流转移路径的影响来识别危险线路。

4.4 事故链的结束

仅考虑静态稳定时,当发生静态电压失稳、系统解列并造成大规模停电,则仿真结束^[33-45]。考虑暂态安全时还要判断暂态稳定性问题^[45-46]。工程研究中还必须限制事故链的深度^[47]。如果采用风险为关注度,则可在风险不再显著增大时停止搜索。

4.5 关键相继事故链的识别

按基于最小控制代价定义的关注度将潜在的事故链排序,根据需要的计算量与可用的计算能力,选择关注度最高的若干事故链进行进一步的详细分析。虽然理论上较严格,但由于问题的时间复杂度很高,穷尽式或随机抽样式地试探并不现实。在工程应用中利用历史统计数据及对具体系统特性的掌握都有助于提高计算的可行性。

可以利用详尽程度不同的关注度来构成多层排除。由于连锁故障的条件概率比独立故障的概率高得多,故尽量先利用连锁故障的相关性搜索,然后再加入对独立故障的考虑。

5 随机模拟法

随机模拟法一般采用蒙特卡洛法抽样选择初始故障及隐性故障等不确定因素,但计算量太大,难以处理众多随机变量。

文献[28,48]在研究自然灾害对相继故障的影响时采用了固定的统计概率,故难以预测实时气象对停电风险的影响。文献[40-41]构思了极端外部灾害中的停电防御系统;文献[26,28]从极端灾害引发设备故障率的机理出发,研究极端天气对元件故障的影响。

相继故障风险分析的关键是如何确定应关注的相继故障序列。这包括候选事故链的快速搜索及其关注度的有效评估。然后,对关注度最高的若干故障序列进行详细的风险分析及对策优化,包括在一次系统的差异性设计标准与二次系统的决策优化之间的协调。其中的关注度,可基于故障概率,或故障后果,或故障风险来定义。

初始故障及独立相继故障的概率可取历史统计值,或根据元件可靠性模型计算^[25],其值应考虑各种因素的影响^[33],但目前的研究很少结合实际气象条件。群发故障则要考虑其组分故障的联合概率。

后续故障的搜索主要根据潮流的转移情况^[31,33]、保护装置的动作特性^[49]及隐性故障发生概

率^[43]。事故链的概率是其每个故障组分在已发生的故障影响下的条件概率的乘积。因此,对于由连锁故障组成的事故链,其概率虽然比初始故障的概率小,但一定大大超过各组成故障的概率之积。这就是貌似强壮的电力系统却频频发生大停电的原因。

估算某潜在故障一旦发生将造成的损失量是非常困难的,这不但受制于仿真模型不够详实,而且按仿真结果也难以量化损失。特别是对于动态稳定约束的破坏,缺乏有效而令人信服的方法来预测损失。文献[37]提出用消除违约所需的最小控制代价来代替被动的停电损失,较好地解决了相继故障损失估计的可行性问题。

以风险为关注度指标可大大提高识别的合理性^[50]。

6 基于复杂性理论的方法

6.1 复杂系统理论法

电力系统具有复杂系统的典型特征,如组成单元的数量庞大,单元间相互作用,具有多层次、开放性、自适应性、进化能力及复杂动力学特性^[51]。很多学者用复杂系统理论解释连锁故障引发大停电问题,相应的方法有 OPA 模型^[52]、CASCADE 模型^[53]及分支过程模型^[54]。文献[55-56]验证了停电规模与概率之间服从幂律分布。

临界态是指系统处于极其敏感的状态,此时,微小的局部扰动会被不断扩延至全系统;自组织是指到达该状态的驱动力是系统内部组分间的相互作用,而非外界因素。自组织临界性描述的是,由很多单元组成的非线性系统在某种条件下可能自发地向临界状态演化。在临界状态下,小事件能引起遍及整体的连锁反应。系统到达该状态的规模与频率满足幂律关系^[57],这个概念经常用沙堆模型来说明。文献[56]发现北美电网停电事故规模的概率分布函数与沙堆模型类似,也满足幂律分布,由此认为大停电是自组织临界特征的反映。

OPA 模型以一定概率随机开断支路,按线性规划调整负荷及出力,检验潮流并增加越限线路的传输容量。如此循环,以负载增加与系统扩容的交互为驱动,反映电力系统从初始状态向自组织临界状态的演化,包括模拟系统日常运行的快动态及模拟电网长期演化的慢动态。该模型假设所有元件的特性相同,采用了不考虑电源节点的故障等较强的假设,过于粗糙。

CASCADE 模型采用了非常强的假设,即系统由相同元件构成。一条支路的开断导致其他支路都

增加一个相同标幺值 p 的负载,而与网络结构、支路参数及开断位置无关。当支路的负荷超过其限值时,判为故障而发生新的开断。不断反复之,以定性判断是否存在导致大停电的事故链。

分支过程模型将 CASCADE 模型中的连锁故障由泊松分布参数为 K 的分支过程来近似模拟,故具有类似的缺陷。

6.2 复杂网络理论法

复杂网络是具有复杂拓扑结构和动力行为的大规模网络,是由大量节点通过边而连接成的图。反映网络基本性质的 4 个特征量为:①所有节点对之间最短距离的平均路长 L ,其值相对于网络规模来说很小的网络被认为具有小世界性质;②衡量网络节点集聚程度的集群系数 C ,其值比同规模随机网络大得多的网络被认为具有高度集团化性质;③与某节点连接的所有边的数目称为该节点的度,设网络所有节点的度的分布函数为 $P(k)$,若其等价于 k^{-r} ,而 r 的取值又与网络规模等所有特征量无关,则该网络被认为具有无标度性质;④介数 B ,即节点或边被网络中所有最短路径经过的次数,反映对应的流对节点或边的利用情况。

随机图理论在 20 世纪后 40 年内一直是研究复杂网络的基本理论。随机网络(或指数网络)的连接是随机设置的,但节点的连接数(度值)符合钟形的泊松分布。可以用其平均度值作为随机网络的特征度值,随着度值与平均值偏离程度的增加,其概率呈指数式迅速递减,即度值的波动范围不大。

但电力网、通信网及交通网等大多数实际网络中,度值的变化区间相当大。度值分布符合幂律的网络称为无标度网络,其连接状况极其不均匀,而其运行行为则由那些度值高的少量节点主导。无标度网络的度分布呈幂律的原因是(网络节点数的)成长性和(新节点与度值较高的节点相连的)优先连接性。小世界模型反映了无标度网络的特性,例如:在互联网上只需点击 19 次超链接,就可从一个网页到达总数超过 80 亿的任一其他页面。

直到 1998 年出现了小世界网络模型^[58]与无标度网络模型^[59]等,才开始研究非完全随机的网络对于各种攻击的承受能力及连锁故障的可能性。

小世界网络模型描述从完全规则网络到随机网络的转变。从 N 个节点的环网开始,每个节点都与 k 个邻点相连,并以概率 P_{ws} 随机地重新分布网络的每条边,同时保证没有自连接和重复边。研究发现,当 $0 < P_{ws} < 0.01$ 时,上述模型不满足无标度性质,但具有小世界性质及高度集团化,使故障传播速度和影响范围远高于相应的规则网络和随机网络,

而更容易发生连锁故障。电网的小世界特性反映节点间联系的紧密程度,而无标度特性则反映节点边的分布特性。

其他的改进模型包括:Watts 构造模型^[60]利用了图论中的渗透模型,结合生成函数法建立了构造模型。初始故障只发生在那些度小于随机阈值的节点上,而当这类脆弱的节点在网络中连成渗流群时,连锁故障可能发生。

相隔中心性模型^[61]以无标度网络模型为基础,假设各节点的容量最大值相同,而任意两节点之间的传输都经过最短路径,这都与实际电力系统不符。

ML 模型^[62]假设各节点的容量正比于其初始负荷,且按比例增长。节点故障后将永久删除,而不考虑网络的生长。

由于忽略了电网的许多物理特性与规律,对上述复杂性理论方法是否能真实反映实际电力系统的脆弱性存在较大争议^[63]。笔者认为,复杂性理论方法从整体视角定性地研究连锁故障,对电力系统的规划有一定的指导意义,特别在许多细节均存在高度不确定性的情况下去比较宏观方案。但对于运行与控制问题则必须考虑系统的实际工况与定量的分析结果,故离不开故障细节、潮流及暂态行为的物理规律。

7 相继故障研究的趋势

模式识别法与基于复杂性理论的分析方法从统计学角度来分析连锁故障的宏观机理,较难适用于优化控制策略。针对相继故障的风险分析有利于具体控制策略的优化,但仍然需要许多努力,具体包括以下几个方面。

1)合理地确定概率值,包括初始故障和后续故障的概率,特别是极端气象、人为失误、设备隐性缺陷等的致障机理及评估方法。

2)提高风险评估的精度与收敛速度,特别是对小概率高风险事件的正确处理。

3)考虑与电网密切关联的通信与信息网络故障对电力系统相继故障的影响,例如差动保护采用的光纤故障后,相应的支路必须陪停。不同领域的网络具有各自的内在规律和外在表现,而其相继故障的演变及传播过程也不尽相同。它们在自然灾害等共同致灾因素下的整体表现有待研究。

4)研究相继故障的最终目的是有效降低停电风险。相继故障控制的复杂性反映在针对前发故障的各种控制措施会严重影响各后续故障的概率与后果,而极端灾害下对群发故障的对策迫切有待研究。

5)基于电力系统的特点,利用常规仿真法与复

杂性理论的互补性,协调整体论与还原论的长处,开拓对相继故障的研究思路。

8 结语

由独立故障、连锁故障及群发性故障组成的相继事故链,是导致大停电的主要途径。事故链中的故障,包括存在直接因果关系的、没有因果关系的以及由共同致障因素触发的这3类。关注度,即筛选潜在事故链的准则,可以是故障后果、故障概率或故障风险;不同的关注度影响到分析方法及效果。目前对连锁故障的研究主要在可靠性分析领域,并且与工程实用需求仍有相当差距。而离控制决策的目标还更远,特别是对极端灾害引起的群发性相继故障很少研究。

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 system on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11.
- [2] 意大利2003年9月28日大停电简介[J].供用电,2003,20(6):3-5.
Brief introduction on the 28 September 2003 blackout in Italy [J]. Distribution & Utilization, 2003, 20(6): 3-5.
- [3] 唐葆生.伦敦南部地区大停电及其教训[J].电网技术,2003,27(11):1-5.
TANG Baosheng. Blackout in south of London and its lessons [J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 1-5.
- [4] 何大愚.对于美国西部电力系统1996年7月2日大停电事故的初步认识[J].电网技术,1996,20(9):35-39.
HE Dayu. A preliminary understanding of WSCC disturbance and separation on July 2, 1996 in the United States[J]. Power System Technology, 1996, 20(9): 35-39.
- [5] 甘德强,胡江溢,韩祯祥.2003年国际若干停电事故思考[J].电力系统自动化,2004,28(3):1-5.
GAN Deqiang, HU Jiangyi, HAN Zhenxiang. Thinking over several blackouts in 2003 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 1-5.
- [6] WANG H, THORP J S. Optimal locations for protection system enhancement: a simulation of cascading outage[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4): 528-533.
- [7] 薛禹胜.综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8·14”大停电的警示[J].电力系统自动化,2003,27(18):1-5.
XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster—lessons from the eastern inter connection blackout in 2003 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 1-5.
- [8] 陆佳政,蒋正龙,雷红才,等.湖南电网2008年冰灾事故分析[J].电力系统自动化,2008,32(11):16-19.
- LU Jiazheng, JIANG Zhenglong, LEI Hongcai, et al. Analysis of Hunan power grid ice disaster accident in 2008 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 16-19.
- [9] 邵德军,尹项根,陈庆前,等.2008年冰灾对我国南方地区电网的影响分析[J].电网技术,2009,33(5):38-43.
SHAO Dejun, YIN Xianggen, CHEN Qingqian, et al. Effects of icing and snow disaster occurred in 2008 on power grids in south China [J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 38-43.
- [10] KOYAMA Y, SASAKI T, IHARA S, et al. Voltage collapse scenario search[C]// Proceedings of International Conference on Power System Technology, October 13-17, 2002, Kunming, China: 344-348.
- [11] 张硕,顾雪平.电力系统大停电事故仿真的故障序列选择[J].电力系统自动化,2009,33(14):12-16.
ZHANG Shuo, GU Xueping. Determination of the fault series in cascading fault simulation of power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 12-16.
- [12] 刘强,薛禹胜,董兆阳,等.基于稳定域及条件概率的暂态稳定不确定性分析[J].电力系统自动化,2007,31(19):1-5.
LIU Qiang, XUE Yusheng, DONG Zhaoyang, et al. Non-deterministic analysis for transient stability based on transient stability domain and conditional probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 1-5.
- [13] XUE Y S, HUANG J, DONG Z Y. A probabilistic method for electricity market evaluation considering high risk events with low probability [C]// 12th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, June 10-14, 2012, Istanbul, Turkey.
- [14] 艾欣,崔明勇,雷之力.电力系统连锁故障研究综述[J].华北电力大学学报:自然科学版,2008,35(6):44-51.
AI Xin, CUI Mingyong, LEI Zhili. Review on cascading failure in power system [J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2008, 35(6): 44-51.
- [15] 汪小帆,李翔,陈关荣.复杂网络理论及其应用[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [16] 林伟芳,汤涌,孙华东,等.巴西“2·4”大停电事故及对电网安全稳定运行的启示[J].电力系统自动化,2011,35(9):1-5.
LIN Weifang, TANG Yong, SUN Huadong, et al. Blackout in Brazil power grid on February 4, 2011 and inspirations for stable operation of power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 1-5.
- [17] Disturbance Analysis Working Group. Review of selected electric system disturbances in North American[R]. Princeton, USA: Disturbance Analysis Working Group; 1979-1995.
- [18] CIGRE. An international survey of the present status and the perspective of long-term dynamics in power systems[R]. 1995.
- [19] BAE K, THORP J S. A stochastic study of hidden failures in power system protection [J]. Decision Support System, 1999, 24(3): 259-268.
- [20] THORP J S, WANG H. Computer simulation of cascading disturbances in electric power system: impact of protection

- systems on transmission system reliability final report[R]. 2001.
- [21] 陈为化,江全元,曹一家.考虑继电保护隐性故障的电力系统连锁故障风险评估[J].电网技术,2006,30(13):14-19.
CHEN Weihua, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Risk assessment of power system cascading failure considering hidden failures of protective relays [J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 14-19.
- [22] 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 $N-K$ 事故识别方法[J].中国电机工程学报,2008,28(28):47-53.
SONG Yi, WANG Chengshan. $N-K$ contingency identification method under double failure incident based on evidence theory and functional group decomposition [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 47-53.
- [23] 吴文传,吕颖,张伯明.继电保护隐患的运行风险在线评估[J].中国电机工程学报,2009,29(7):78-83.
WU Wenchuan, LÜ Ying, ZHANG Boming. Online operating risk assessment of hidden failures in protection system [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 78-83.
- [24] CHEN Q M, MCCALLEY J D. Identifying high risk $N-K$ contingencies for online security assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 823-834.
- [25] 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.
- [26] XIE Yunyun, XUE Yusheng, CHEN Jiahong, et al. Extensions of power system early-warning defense schemes by integrating wide area meteorological information [C]// The Forth International Conference on DRPT, July 6-9, 2011, Weihai, China: 57-62.
- [27] 张恒旭,刘玉田,张鹏飞.极端冰雪灾害下电网安全评估需求分析与框架设计[J].中国电机工程学报,2009,29(16):8-14.
ZHANG Hengxu, LIU Yutian, ZHANG Pengfei. Requirements analysis and framework design for power system security assessment considering extreme ice disasters [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 8-14.
- [28] 徐文军,杨洪明,赵俊华,等.冰风暴灾害下电力断线倒塔的概率计算[J].电力系统自动化,2011,35(1):13-17.
XU Wenjun, YANG Hongming, ZHAO Junhua, et al. Probability calculation of broken transmission lines and collapsed towers under ice storms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 13-17.
- [29] 邵振国,林智敏,林韩,等.在线安全预警中的预想事故生成[J].电力系统自动化,2008,32(7):15-18.
SHAO Zhenguo, LIN Zhimin, LIN Han, et al. Online determination of predictive contingency in security forewarning analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 15-18.
- [30] 赵晋泉,江晓东,张伯明.一种用于电力系统静态稳定性分析的故障筛选与排序方法[J].电网技术,2005,29(20):62-67.
ZHAO Jinqun, CHIANG H D, ZHANG Boming. A contingency screening and ranking method for power system static stability analysis[J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 62-67.
- [31] 马瑞,陶俊娜,徐慧明.基于潮流转移因子的电力系统连锁跳闸风险评估[J].电力系统自动化,2008,32(12):17-21.
MA Rui, TAO Junna, XU Huiming. Power flow transfer factor based risk assessment of power system cascading trips [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 17-21.
- [32] 余晓丹,贾宏杰,陈建华.电力系统连锁故障预测初探[J].电网技术,2006,30(13):20-25.
YU Xiaodan, JIA Hongjie, CHEN Jianhua. A preliminary research on power system cascading contingency forecasting [J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 20-25.
- [33] 王英英.基于事故链的电力系统连锁故障风险评估与预防控制研究[D].武汉:华中科技大学,2010.
- [34] 陈为化.基于风险的电力系统静态安全分析与预防控制[D].杭州:浙江大学,2007.
- [35] 李蓉蓉.基于潮流转移预测的电力系统连锁跳闸风险评估研究[D].长沙:长沙理工大学,2009.
- [36] VITTAL V, MCCALLEY J D, VAN A V, et al. Transient instability risk assessment [C]// Proceeding of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 18-22, 1999, Edmonton, Canada: 206-211.
- [37] 薛禹胜,刘强,董ZY,等.关于暂态稳定不确定性分析的评述[J].电力系统自动化,2007,31(14):1-6.
XUE Yusheng, LIU Qiang, DONG Zhaoyang, et al. A review of non-deterministic analysis for power system transient stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 1-6.
- [38] 王守相,张伯明,郭琦.基于时间裕度的全局电力系统暂态安全风险评估[J].中国电机工程学报,2005,25(15):51-55.
WANG Shouxiang, ZHANG Boming, GUO Qi. Transient security risk assessment of global power system based on time margin [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 51-55.
- [39] MORISON K, WANG L, KUNDUR P, et al. Critical requirements for successful on-line security assessment [C]// IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, October 10-13, 2004, New York, USA: 1676-1680.
- [40] 薛禹胜,费圣英,卜凡强.极端外部灾害中的停电防御系统构思:(一)新的挑战与反思[J].电力系统自动化,2008,32(9):1-6.
XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters; Part I new challenges and reflection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 1-6.
- [41] 薛禹胜,费圣英,卜凡强.极端外部灾害中的停电防御系统构思:(二)任务与展望[J].电力系统自动化,2008,32(10):1-5.
XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters; Part II tasks and prospects [J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2008, 32(10): 1-5.
- [42] 薛禹胜,肖世杰.综合防御高风险的小概率事件——对日本相继天灾引发大停电及核泄漏事件的思考[J].电力系统自动化, 2011,35(8):1-11.
XUE Yusheng, XIAO Shijie. Comprehensively defending high risk events with low probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 1-11.
- [43] 易俊,周孝信.考虑系统频率特性以及保护隐藏故障的电网连锁故障模型[J].电力系统自动化,2006,30(14):1-5.
YI Jun, ZHOU Xiaoxin. Cascading failure model of power grids considering frequency response characteristics and hidden failures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(14): 1-5.
- [44] 沈瑞寒,刘涤尘,赵洁.基于加权网络模型的电网潮流转移下危险线路识别[J].电网技术,2012,36(5):245-250.
SHEN Ruihan, LIU Dichen, ZHAO Jie, et al. Weighted network model based recognition of dangerous lines under power flow transferring[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 245-250.
- [45] 宋毅,王成山.具有时序特征的相继故障演变模型[J].中国电机工程学报,2008,28(22):29-34.
SONG Yi, WANG Chengshan. A kind of continual fault evolution model with temporal characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 29-34.
- [46] 余洋洋.电网连锁故障风险评估方法研究[D].北京:华北电力大学,2008.
- [47] 刘昊.电网连锁故障模式搜索法研究[D].北京:华北电力大学, 2005.
- [48] 孙荣富,程林,孙元章.基于恶劣气候条件的停运率建模及电网充裕度评估[J].电力系统自动化,2009,33(13):8-12.
SUN Rongfu, CHENG Lin, SUN Yuanzhang. An outage rate model and system adequacy assessment based on adverse weather conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 8-12.
- [49] 宋毅.电力系统连锁故障机理及风险评估方法研究[D].天津:天津大学,2008.
- [50] DAI Y Y, XUE Y S, CHEN G, et al. Identify the sequences of cascading failure with risk assessment based on distribution factors[C]// IET Renewable Power Generation Conference, September 9-13, 2013, Beijing, China.
- [51] 戴汝为.复杂巨系统科学——一门 21 世纪的科学[J].自然杂志,1997,19(4):187-192.
DAI Ruwei. Complex giant system science[J]. Chinese Journal of Nature, 1997, 19(4): 187-192.
- [52] CARRENRAS B A, LYNCH V E, DOBSON I, et al. Dynamics, criticality and self-organization in a model for blackouts in power transmission systems[C]// Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on Power System Sciences, January 7-10, 2002, Hawaii, USA: 163-169.
- [53] DOBSON I, CARRENRAS B A, NEWMAN D E. A probabilistic loading-dependent model of cascading failure and possible implications for blackouts[C]// Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on Power System Sciences, January 6-9, 2003, Hawaii, USA: 10-19.
- [54] DOBSON I, CARRENRAS B A, NEWMAN D E. A branching process approximation to cascading load-dependent system failure [C]// Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on Power System Sciences, January 5-8, 2004, Hawaii, USA: 915-924.
- [55] CARRENRAS B A, NEWMAN D E, DOBSON I, et al. Initial evidence for self-organized criticality in electric power system blackouts [C]// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, January 4-7, 2000, Hawaii, USA.
- [56] CHEN J, THORP J S, PARASHAR M. Analysis of electric power system disturbance data[C]// Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, January 4-7, 2000, Hawaii, USA.
- [57] BAK P, TANG C, WIESENFELD K. Self-organized criticality: an explanation of the $1/f$ noise[J]. Physical Review Letters, 1987, 59(4): 381-384.
- [58] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks[J]. Nature, 1998, 393(6): 440-442.
- [59] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286: 509-512.
- [60] WATTS D J. A simple model of global cascades on random networks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(9): 5766- 5771.
- [61] HOLME P, KIM B J, YOON C N, et al. Attack vulnerability of complex networks [EB/OL]. [2013-05-10]. <http://arxiv.org/ftp/cond-mat/papers/0202/0202410.pdf>.
- [62] LAI Y C, MOTTER A E, NISHIKAW T. Attacks and cascades in complex networks[J]. Lecture Notes in Physics, 2004, 650: 299-310.
- [63] AMARAL L, BARRAT A, CALDARELLI G, et al. Virtual round table on ten leading questions for network [J]. The European Physical Journal B, 2004, 38(2): 143-145.

薛禹胜(1941—),男,通信作者,中国工程院院士,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化。E-mail: xueyusheng@sgepri.sgcc.com.cn

谢云云(1985—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统外部灾害防御。E-mail: yunyun-xie@163.com

文福拴(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统故障诊断、系统恢复和电力市场。E-mail: fushuan.wen@gmail.com

(编辑 蔡静雯)

(下转第 40 页 continued on page 40)

A Review on Cascading Failures in Power Systems

*XUE Yusheng*¹, *XIE Yunyun*^{1,2}, *WEN Fushuan*³, *DONG Zhaoyang*⁴

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 210003, China;

2. Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

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

4. School of Electrical and Information Engineering, The University of Sydney, NSW 2006, Australia)

Abstract: This paper summarizes the key points and state-of-the-art of researches on cascading failures, including the evolution mechanism, mode expression and scene screening criteria. It is suggested that the term “liansuo faults” with Chinese pinyin might be used only if the causality between two successive faults needs stress. Otherwise, the term “xiangji faults” with Chinese pinyin is more suitable for covering successive faults with independent causes or common causes. The methods for identifying key successive-fault-chains can be classified by the applied attention indices, such as the probability-based, the consequence-based and the risk-based ones. These methods and their effects are compared. This paper also points out new challenges and possible breakthroughs on the relevant researches and applications, especially for correct handling of small-probability and high-risk faults.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A105), National Natural Science Foundation of China (No. 91024028), State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid (No. SGCC-MPLG003-2012), State Grid Corporation of China (No. YS11002), Jiangsu Provincial Natural Science Foundation of China (No. BK2011136), ARC LP120100302, and ARC DP120101345.

Key words: successive failures; cascading failure; mass failure; fault attention degree; risk ranking