

电力系统连锁故障评估综述

张 建, 刘 鑫, 蒲春林

(泸州电业局, 四川 泸州 646000)

摘 要: 比较全面地对系统连锁故障发生、演化机理以及预防措施进行了综述。首先阐述了连锁故障发生原因和产生机理; 其次从系统宏观和微观物理特性的角度将故障模型分为基于复杂网络理论和基于电力系统理论两大类。对连锁故障模型进行详细分析, 给出了不同模型的实现方式以及存在的缺陷, 并进一步指出了由于电网所具有的存在复杂性和演化复杂性, 使得准确对连锁故障的演化机理进行研究存在较大困难。最后提出了预防及缓解大停电事件的有效方法和途径。

关键词: 电力系统; 连锁故障; 复杂网络; 演化机理

Abstract: The occurrence causes, evolution mechanism and preventive measures of cascading failures in a power system are reviewed in detail. Firstly, the occurrence causes and generation mechanism of cascading failures are introduced. Then in view of the macro- and micro-physical properties of the power system, the failure models are divided into two categories which are based on complex network theory and power system theory respectively. Each failure model is analyzed in detail and the implementation styles and the existing limitations are presented. Furthermore, due to the existence complexity and evolution complexity of the power system, the great difficulties indeed exist to assess the evolution mechanism of cascading failures accurately. Finally, the effective measures to prevent and mitigate major blackouts are proposed.

Key words: power system; cascading failures; complex network; evolution mechanism

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0036-04

0 前 言

随着电力系统的日益扩大, 系统内元件间联系也日趋复杂, 如何保证系统安全稳定运行是关键。近年来, 因自然灾害和突发事件引起的电力系统事故时有发生, 其直接后果导致系统发生灾难性事故, 进而引发大面积停电^[1-3]。1996年 7、8 月份美国西部接连发生两次大停电事故; 2003 年下半年在北美和加拿大、英国伦敦、瑞典和丹麦、意大利都先后发生了大面积停电事故; 2008 年 1 月中国南方的冰雪大灾难造成的大面积停电事件, 都给社会甚至是国家安全带来了严重的影响。

大量研究表明, 电力系统大面积停电事件是由多重故障, 特别是连锁故障引起的^[4]。连锁故障是一种发生概率较低但后果非常严重的事故, 定义为系统内某一元件 (可能是输电线路或电力设备) 发生故障后, 引起相邻线路过负荷或保护动作连锁跳闸, 如此传递扩散, 最终导致大面积停电甚至整个电网的停运^[4]。因此, 在建设坚强智能电网的今天, 强化电网

安全, 保证可靠供电就必须对系统连锁故障的产生、形成及演化机理进行研究分析, 以便找到更有效的预防性措施。

1 电力系统连锁故障的特点

1.1 连锁故障发生原因

电力系统遭受一定程度的扰动时, 可能导致系统发生连锁故障。从电力系统事故发生的原因看, 主要包括外部因素和内部因素两种^[3], 具体如下。

1) 自然因素。如冰雪、地震、高温、海啸、暴雨等。其中最典型的例子是 2008 年年初中国南方发生的冰雪灾, 以及 2008 年 5 月 12 日中国四川汶川发生里氏 8.0 级特大地震, 均导致了大规模的停电事件。这些扰动发生概率较低, 但危害极其严重。统计表明约 20% 的故障由自然因素引起。

2) 电力设备故障因素。设备自身老化、失修导致其电气性能和机械性能出现故障和失效。

3) 人为因素。包括人为误操作导致设备误动或拒动、设备生产及维护不当等。

4) 电力供需不平衡的电力危机因素。负荷和发电量突变引起两者之间的不平衡, 如系统解列, 联络线断开等。

其中, 自然因素属于外部因素, 其他三类属于内部因素。

1.2 连锁故障诱因及发生机理

当系统发生故障时, 系统内的保护和控制措施动作, 以确保系统安全稳定运行。因此, 系统连锁故障导致的大停电事件往往不是某个简单的故障事件, 而是一系列事件和诸多偶然因素共同发展和演化的结果。大停电事件一般有四个核心诱因, 即功角稳定破坏、电压崩溃、频率崩溃和过负荷连锁反应^[4]。这些诱因往往不是孤立存在的, 而是诸多因素相继和综合作用的结果。例如, 系统失步将引起电压波动, 可能诱发发电机跳闸, 导致系统电压和频率恶化而崩溃; 系统解列, 功率不平衡加剧引起线路过负荷而连锁跳闸, 同时, 功率的严重短缺又引起系统频率下降等。

电力系统连锁故障强调故障发生的关联性, 即上一层故障是如何诱发下一层故障的。连锁故障的发生机理可简单描述为^[5]: 电力系统正常运行时每个元件都带有一定的初始负荷, 当由于某种原因导致系统发生故障时, 继电保护装置动作, 使得系统某一个或几个元件过负荷, 此时系统潮流平衡引起负荷在其他节点上的重新分配。如果原先正常工作的元件不能承受多余的负荷, 将引发过负荷故障, 依次传递, 并最终导致系统大面积瘫痪和大规模停电事故的发生。

2 系统连锁故障模型

2.1 电网的复杂性

电力系统作为最复杂的人工网络之一, 它的复杂性主要体现在其存在复杂性和演化复杂性^[6], 表现如下。

1) 电网的大规模性和行为的统计性: 电网自形成起经过短短一百多年的发展, 所涉及到的节点数成千上万, 甚至是更多。超大规模网络的行为具有统计特性。

2) 连接结构的复杂性: 电网虽然是一个人工网络, 但其连接结构却既非完全规则, 又非完全随机, 具有内在的自组织规律。

3) 节点动力学行为的复杂性: 电网拓扑结构中的各个节点, 包括发电机、变压器和变电站, 本身就是

典型的非线性系统, 具有分岔和混沌等非线性动力学行为。

4) 故障的不可预测性: 电网中故障受天气、环境、网络拓扑等诸多因素的影响, 具有不确定性。

5) 网络时空演化的复杂性: 随着技术的不断发展, 电网的层次结构历经多次改革和连接方式的大幅度变化, 表现出空间和时间演化上的复杂性。

6) 故障演化的复杂性: 电力系统故障在较长的时间内, 既表现为无序的非稳定性, 又表现为有序的节律性和周期性; 在较短的时间内, 多时间尺度的动态行为以及各种失稳模式和振荡模式复杂变化。电力系统故障在空间上既存在普遍性, 又具有区域性。

上述特征 1) - 4) 属于存在复杂性, 5) 和 6) 属于演化复杂性。电力系统的复杂性为连锁故障研究提出了新的挑战。

2.2 系统连锁故障模型

连锁故障模型的研究涉及到电力系统、统计物理学、非线性控制论等多个领域。这些模型从不同的程度上反映了电力系统宏观及微观的物理特性, 可分为基于复杂网络理论和基于电力系统理论的连锁故障模型。其中, 前者包括小世界模型^[7]和无标度模型^[8]、相隔中心性模型^[9]、Motter-Lai 模型^[10]等; 后者包括 OPA 模型^[11]、Cascade 模型^[12]、隐性故障模型^[13]等。

2.2.1 小世界模型和无标度模型

20 世纪 60 年代以来, 随机图理论在将近 40 年的时间里一直都是研究复杂网络的基本理论, 但实际中绝大多数网络并不是完全随机的。20 世纪末, 对复杂网络的科学探索发生了革命性的转变, 其中小世界网络模型及无标度网络模型可以看作是复杂网络研究新纪元开始的标志。

Watts 及 Strogatz 于 1998 年首次提出了小世界网络模型。和随机网络相比, 小世界网络具有相似的特征路径长度以及很大的聚类系数。大量的研究表明, 小世界网络广泛存在于社会的复杂网络中, 例如神经网络、基因网络、人际关系网、互联网等。文献 [7] 验证了美国西部电网是基于规则网络和随机网络之间的小世界网络。随后, 巴西电网和中国电网也被证明具有小世界特性。

研究发现很多大型复杂网络都呈现无标度特性, 即网络的节点度概率分布遵循幂律分布。为解释这种现象, Barabasi 及 Albert 于 1999 年提出无标度网络

模型^[8]。模型指出增长和择优连接是无标度网络的两个重要因素。文献^[9]指出美国西部的高压电网度分布近似服从幂律分布,其幂指数为 4.0。

电网的小世界特性主要反映节点间联系的紧密程度,而无标度特性则反映了节点边的分布特性。两者基于图论的思想,采用节点和边来表示电网中的电气设备以及设备间的联系。通过对网络特征量,例如聚类系数、平均路径长度、度分布等的提取,使得人们对含有成千上万甚至是数百万节点复杂网络的探索成为可能。

2.2.2 相隔中心性模型

相隔中心性模型又称 Holme-Kim 模型^[9],该模型主要关注网络演化所导致的过负荷效应,其基本假设是任意两个节点之间信息或能量的交换都通过最短路径进行。该模型通过定义相隔中心性的概念来评估网络中节点和边的负荷和容量。该模型以无标度网络为基础,然而实际中电力网络并非都是无标度网络;模型的网络任意生长变化,以及假设网络中各个节点的容量相同,这都与实际电力系统不符合。

2.2.3 Motter-Lai 模型

该模型^[10]与相隔中心性模型基本类似,也采用某节点最短路径的总数来定义节点负荷。该模型假设节点的容量正比于其初始负荷,且按一定的比例增长。该模型与相隔中心性模型不同之处在于,该模型假设各节点容量不同,节点故障时将该节点从网络中移除,连锁故障的发生时间远小于网络生长时间。

2.2.4 OPA 模型

OPA 模型是由美国橡树岭国家实验室、Wisconsin 大学电力系统工程研究中心和 Alaska 大学的多位研究人员共同提出的。该模型包含传输线路、负荷及发电机的直流潮流模型,其核心是以研究负荷变化为目的,探讨输电系统大停电的全局动力学行为特征。该模型将电力系统比作沙堆。模型涵盖了快速和慢速两个动态过程。其中,快动态过程模拟系统的日运行情况,并采用线路开断表示连锁故障的发生;慢动态过程模拟电网的长期演化过程,包括系统负荷水平的持续增长以及网络的规划建设,是在外部驱动力作用下发生的。

该模型以一定概率随机开断线路,通过最优潮流调整发电机出力以及负荷值,检验传输线路潮流是否接近传输容量,并以一定的概率开断这样的线路,依次递推,直到快动态过程结束。对于开断的线路进行

改造以增加其传输容量。

该模型的不足之处在于:所用网络节点数目少;假设所有元件的特性相同;电网控制仅仅通过调节模型中少数参数实现;模型参数与系统实际参数间对应关系不清晰;无法反映电网的频率及电压无功特性等。

2.2.5 Cascade 模型

Cascade 连锁故障模型基于元件级联失效思想,假设系统由 n 个相同的元件构成,所有元件初始时都处于正常运行状态,且具有相互独立的初始负荷,其大小在某一区间内随机变化。在每个负荷上加一随机扰动,当元件的负荷超过某一故障阈值时,判断该元件发生故障。该故障元件上的负荷随之转移到其它未发生故障的元件,依次类推,从而引发系统发生连锁故障。

虽然 Cascade 连锁故障模型可对大停电事故进行定性的分析,但存在以下不足:①假设系统中元件相同;②故障元件上负荷的再次分配未考虑网络拓扑的影响;③未考虑发电侧功率的变化情况。

2.2.6 隐性故障模型

隐性故障为系统继电保护装置的永久性故障,一般由硬件缺陷或保护整定值不当造成。这种缺陷只有当系统处于不正常运行状态时才会表现出来,其直接后果将导致被保护元件的误动。按照形成原因的不同,可将隐性故障分为两类,即由线路保护及发电机母线低电压引起的隐性故障。前者为当线路断开时,与该线路两端相连的所有线路存在发生隐性故障的可能;后者为系统无功不足导致发电机跳闸时,与该发电机相连所有线路存在发生隐性故障的可能。

隐性故障模型基于电力系统自身的特点,仿真由随机选取的初始线路跳闸开始,如果连接在该线路两侧的线路潮流超过其传输容量则判定该线路跳闸,否则按照隐性故障原理和发生概率判断不受保护的线路是否跳闸,直至连锁故障结束。

该模型的缺点在于未考虑到系统的动态特性。

3 连锁故障大停电的预防

现阶段研究关于预防和缓解大停电事件的方法和途径可以概括为:降低初始扰动的概率;及时阻断连锁故障的传播;释放系统压力,使系统远离临界运行状态^[14]。

对连锁故障这种小概率的事故进行预防控制,虽然可以提高系统的抗干扰能力,但考虑到故障发生的随机性,因此,对于降低大停电故障风险的作用十分有限。同时,电网互联导致电网规模的扩大,元件故障所波及的范围也随之扩大,采用常规方法对所有故障可能组合进行在线分析,从计算能力和计算精度方面都遇到了很大的困难。

从运行和规划的角度研究如何释放系统压力,使系统远离大停电前的临界状态。采用适当的切换操作和负荷管理可以有效地降低输电系统压力。同时,合理的规划可以引导系统向更均衡的方向发展。

4 结 论

近年来世界范围内发生了多起大停电事件,大多表现为连锁故障,因此对系统连锁故障进行研究引起了国内外学者的广泛关注。以上较详细对连锁故障产生、形成、演化机理以及预防措施进行综述。从连锁故障的特点出发,指出连锁故障强调故障发生的关联性,然后从系统宏观和微观的角度对故障模型进行分类,给出了各类模型的实现方式和存在的缺陷,这些模型为揭示电网连锁故障及由其引发的大停电提供了有益的理论基础。最后提出了预防及缓解大停电事件的有效方法和途径。

参考文献

[1] 韩祯祥,曹一家. 电力系统的安全性及其防治措施 [J]. 电网技术, 2004, 28(8): 1—6.
[2] 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.
[3] 张文亮,周孝信,白晓民,等. 城市电网应对突发事件保障供电安全的对策研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 1—7.
[4] 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.
[5] 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.
[6] 丁理杰. 复杂电网连锁故障大停电分析与预防研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2008.
[7] Watts D J Strogatz S H. Collective Dynamics of Small-world Networks [J]. Nature 1998, 393(6684): 440—442.
[8] Barabasi A L Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks [J]. Science 1999, 286: 509—512.
[9] Home P. Edge Overload Breakdown in Evolving Network [J]. Physical Review E. 2002, 66(2): 036119. 1—036119. 7.
[10] Lai Y C Motter A E Nishikawa T. Attacks and Cascades in Complex Networks [J]. Lecture Notes in Physics 2004, 650: 299—310.
[11] Dobson I Carreras B A Lynch V E et al An Initial Model for Complex Dynamics in Electric Power System Blackouts [C]. Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences Hawaii 2001, 1: 710—718.
[12] Dobson I Chen J Thorp J S et al Examining Criticality of Blackouts in Power System Models with Cascading Events [C]. Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences Hawaii 2002, 1: 7—10.
[13] Phadke A G Thorp J S Expose Hidden Failures to Prevent Cascading Outages [J]. IEEE Computer Application in Power 1996, 9(3): 20—23.
[14] 任惠. 电力系统连锁故障风险分析 [D]. 北京:华北电力大学, 2009.

作者简介:

张 建 (1968), 男, 工程师, 主要从事电网运行管理的工作;

刘 鑫 (1983), 男, 硕士研究生, 主要从事调度自动化等方面的研究;

蒲春林 (1986), 男, 助理工程师, 主要从事配网方面的工作。
(收稿日期: 2010—07—05)

• 简讯 •

低碳背景下核电发展趋势思考

核电装机容量到 2020 年实现 70 000 MW 以上的目标, 届时我国天然铀需求量将达到近 14 000 t/a 我国必须在加大国内勘探开发力度的同时, 充分利用海外资源和国际市场, 但由于铀资源的特殊性, 海外开发和天然铀贸易难度大、风险高、不确定因素多, 使之成为能否保证核电加快发展的又一重要因素; 2020 年以前能否实现核电发展目标, 与三代核电技术的消化、吸收、再创新息息相关, 只有建立起真正的核蒸汽系统供应商, 才能保障我国核电主设备领域实现技术的不断升级, 最终拥有自主知识产权。