

复杂网络理论在电力系统中的运用与研究

肖 军, 刘天琪

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:自从小世界效应和无标度特性发现以来, 复杂网络的研究在过去几年得到了迅速发展, 其中复杂网络在电力系统中的运用也成为当前许多学者的研究焦点。文章对复杂网络理论与电力网络的共性进行了较为详细的叙述, 指出了复杂网络在电力系统中运用的结合点。介绍了与两者共性有关的复杂网络理论的特征参数。同时在电力系统大停电模型、临界自组织状态、电力系统线路脆弱性评估以及小世界模型四个方面详细综述了目前复杂网络在电力系统中的运用及进展。最后对复杂网络在电力系统研究中存在的问题和未来发展的趋势进行了总结和展望。

关键词:复杂网络; 大停电模型; 临界自组织状态; 脆弱性; 小世界

Abstract: Since the small-world effect and scale-free properties have been found, the research of complex network has developed rapidly over the past few years and its use in the power system also becomes the research focus of many scholars. A detailed overview of the current complex network in power system and the progress of its application are discussed based on the blackout model of power system, the self-organized critical state, the vulnerability assessment of transmission lines, as well as the small-world model. Finally, the summarization and expectation of the existing problems of complex network in power system and the future development trends are given.

Key words: complex network; blackout model; self-organized critical state; vulnerability; small world

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)02-0028-05

电网的大规模互联使电力系统成为了一个庞大的复杂网络系统。随着电力网络规模的逐渐扩大, 电力系统的局部故障可能迅速传播到大区域甚至整个电网。近年来, 国内外电力系统曾发生了多次连锁故障导致的大停电事故^[1,2], 这类事故造成了重大经济损失和社会影响, 引起人们对电网安全的高度关注, 促使人们理解和分析大停电和连锁故障传播机理。应用复杂系统理论的研究成果研究连锁故障的传播机理正越来越受到学术界的关注^[3~5]。因此, 需要系统从整个网络出发, 对电力系统的结构和连锁故障进行研究, 以保证电力系统的安全稳定运行。

自从 20 世纪 60 年代著名数学家 Erdos 和 Renyi 提出 ER 随机图模型后^[6], 复杂网络的研究一直受到科学和工程各个领域研究人员的广泛关注。复杂网络研究的内容主要包括: 网络的几何性质、网络的形成机制、网络演化的统计规律、网络上的模型性质以及网络的结构稳定性、网络的演化动力学机制等问题。从 20 世纪 70、80 年代开始, 复杂性问题的研究与非线性科学及其混沌动力学的复杂研究交错在一起, 在国际上形成了非线性科学与复杂性问题的研究热潮^[7]。而利用复杂网络理论来研究非线性复杂动

态网络的方法也已经渗透到众多学科之中。电力网是一个强非线性的大规模动态系统, 它可视为由电站、高压输电线等抽象而成的网络上的结点和连线, 通过不同连接方式组成的规模庞大的复杂网络。复杂网络理论为其提供了一个全新的视角和研究方法, 从复杂网络的角度来分析和研究电力网络, 有助于从整体上把握电力网络的复杂性和整个网络响应的动力学特性, 深入理解大停电模型和机理。

1 电力系统的复杂网络特性

1.1 电力网络的复杂性

电力系统是一个高维的强非线性复杂系统。“系统复杂性”是指“远离平衡态的巨大耗散系统中由于组成单元之间局部的非线性相互作用而自发地涌现出 (emerge) 的系统总体性质、结构与动力学行为”^[8]。“涌现”指的是由系统局部的相互作用所产生的系统总体的特征, 不同于子系统 (或局部组成单元) 的原有性质, 是复杂动力系统内部的基本特征与属性^[8,9]。

电力系统是一个典型的复杂系统, 其主要特征包括: (1) 电力系统具有大规模性和统计特性, 现在电

基金项目: 国家科技攻关计划 (JS20080113506594)

力系统的互联使电网成为了一个超大规模的网络,具有大量的节点和线路,其行为具有统计特性;(2)实际电网的线路连接具有稀疏性和复杂性。实际电网不是一个全局耦合结构的网络,它的连接数目通常为 $O(N)$ 。实际系统的连接结构的复杂性主要体现在网络的连接结构既非完全规则也非完全随机,但却具有内在的特征规律,即现在的研究表明大部分电网都具有的小世界特性;(3)电网节点的动力学行为具有复杂性,实际上每个节点都是发电机、电站及负荷点,故每个节点本身也是非线性系统(可以用离散的和连续微分方程描述),具有分岔和混沌等非线性动力学行为,故其节点具有动态行为复杂性;(4)电网具有时空复杂性,复杂电力网络在空间上体现出一个大规模的超大型网络,在时间上体现为一个高维的非线性复杂网络。

复杂电力网络时空演化中出现的复杂性,包括大停电连锁故障机理以及演化特征是迄今尚未解决的一类难题^[8]。然而传统的电力系统分析一直是建立在微分一代数方程理论的基础上,以时域仿真的形式对系统进行动态分析。时域仿真在深入分析电力系统连锁故障和大停电机理等系统动态行为方面却有明显的局限性,它基本不能揭示系统整体的动态行为特性。因此,运用复杂网络理论对电力系统的动态行为进行分析和研究可以很好地深入分析电力系统的连锁故障和大停电的机理。对大停电模型和连锁故障机理以及演化的研究主要需要分析电力系统大停电的本质,构造出合理的简化模型来分析连锁故障以及大停电的机理和全局性质。

1.2 电网的拓扑网络原则

要用复杂网络理论对电网进行分析,首先必须把电力网络化为拓扑网络模型。在电力系统中,通常采用如下的假设条件^[11]:(1)只考虑高压输电网(中国电网考虑 110 kV 以上,北美电网考虑 115 kV 以上),不考虑配电网和发电厂、变电站的主接线;(2)节点均为无差别节点,发电机、负荷及电站都作为节点,不考虑大地零点;(3)所有边均简化为无向无权边,不考虑输电线的各种特性参数和电压等级的不同;(4)合并同杆并架输电线,不计并联电容支路(消除自环和多重边),使模型成为简单图。这样,电网就成为一个具有 N 个节点和 K 条边的无权无向的稀疏连通图,包括 $n \times n$ 连接权矩阵 $\{E_{ij}\}$ 和 $n \times 1$ 权重矩阵 $\{W_i\}$ 。

1.3 电网与复杂网络共性的几个特征参数

(1)特征路径长度 L : 在一个网络中节点 i 与节点 j 的最短距离 d_{ij} 被定义为连接这两个节点间的最短路径所包含的边数。对所有节点对的最短距离求平均值,即可得到该网络的特征路径长度 L 。

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

(2)聚类系数 C : 网络的聚类系数 C 是专门用来衡量网络节点集聚程度的一个重要参数。在网络中,每个节点的聚类系数可表示为

$$C_i = a_i / b_i$$

式中: a_i 为连接到顶点 i 的三角形的个数; b_i 为连接到顶点 i 的三元组的个数。整个网络的聚类系数定义为

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$$

(3)节点度数 D : 节点的度数是指连接该节点的边数。

(4)节点介数 BN : 节点的介数是指节点被网络中所有发电机节点与负荷节点之间最短路径经过的次数。

(5)线路介数 BL : 线路的介数是指线路被网络中所有发电机节点与负荷节点之间最短路径经过的次数。

以上参数都能体现出电网与复杂网络的共性,研究清楚以上特征参数存在和变化的规律是电力系统复杂性研究的重要研究内容。研究电网存在的复杂性,以及特征参数的变化对大停电和连锁故障演化等的影响,从而揭示电网的结构属性与连锁故障演化的关系^[12]。

2 复杂网络理论在电力系统的运用

2.1 连锁故障模型

通过对近年来国内外电网的事故统计数据进行分析可以发现,虽然事故发生的次数在下降,但其造成的影响却变得越来越严重。特别是某一元件开断引起的连锁故障常常造成电网大规模停电的严重后果,如 1996 年的美国西部电网大停电、2003 年的美加大停电、2003 年的英国伦敦大停电等^[13~16]。

学者提出了基于负荷转移的 CASCADE 模型^[17, 18],基于“近似”直流潮流和隐故障机理的隐故

障 (Hidden Failure) 模型^[19~22], 基于负荷切除和交流潮流的 Manchester 模型^[23~25]和基于直流最优潮流的 OPA 模型^[26~28]等各种模型来模拟电力系统连锁故障和大停电。其中, CASCADE 模型是一个抽象概率模型, 主要对连锁故障进行了一个理论化的解释; 隐故障模型基于近似直流潮流和隐故障机理, 可以有效模拟电力系统在发生故障后导致的系统连锁故障; Manchester 模型立足于电力系统交流模型, 利用切除负荷和解潮流方程来确定系统的运行方式, 从而模拟电力系统的连锁故障过程。

目前已有把无功、电压特性与连锁故障模型结合起来研究和考虑频率特性的连锁故障, 有基于直流、交流和最优潮流的 OPA 模型, 直流潮流只考虑有功对系统的影响, 交流和最优潮流的计算速度还需要改进。在连锁故障模型中如何考虑过电压、低电压以及励磁对设备的影响, 这些模型都只考虑了系统的静态稳定。

2.2 小世界模型

在对网络拓扑结构分析的过程中, Watts 等人于 1998 年提出了小世界 (Small-world) 网络模型^[29]。Watts 同时验证了美国西部电网是一个小世界网络^[30]。

小世界电网所特有的较小特征路径长度和较高聚类系数等特性, 对故障的传播起到推波助澜的作用。这是由于, 一般的聚类系数对应着故障传播的广度, 特征路径长度代表着故障传播的深度, 而特征路径越小, 故障在网络中传播的深度越大。小世界网络兼具大的深度和宽的广度, 所以传播的速度和影响范围大大高于相应的规则网络和随机网络。文献 [31] 提出了基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估综合算法, 重点解决了电网的拓扑分析和连锁故障模拟的问题, 在算法的实现和软件设计过程中, 充分考虑了电网拓扑模型的扩展性, 以及电网故障模式、脆弱性评估判据的可变通性等需求, 可适应算法的不断改进和完善。

目前已有学者把电网线路的权重特性和复杂网络理论联系起来, 即将线路阻抗作为线路的权重, 使网络成为了一个有权无向的网络, 这样更能体现出电网的小世界模型, 从而复杂网络的小世界的特性就能更好的运用在电力网络中。

2.3 线路的脆弱性评估

对电力系统的脆弱性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数学模型, 以时域仿真的形式对系统进行动态分析。这种分析方法对故障模拟, 寻找系统薄弱环节起到了很好的作用。事实上, 电网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。文献 [32] 分析了北美电网拓扑结构所存在的脆弱性。文献 [33] 则对北美电网的连锁故障进行了建模和仿真, 表明北美电网存在着少部分的脆弱节点会导致大规模事故的发生。文献 [34] 从电网拓扑结构出发, 分析电网整体结构对连锁崩溃的影响, 指出介数和度数较高的联络节点在保证电网连通性的同时, 对故障的传播起着推波助澜的作用。

一旦能够辨识出电力系统的关键运行线路, 则着重注意关键线路的运行状态, 可以保证系统的安全稳定运行。目前主要通过网络拓扑结构, 通过计算线路的介数进行关键线路的辨识。文献 [35] 为快速评估线路故障对系统静态安全的影响, 基于复杂网络脆弱度理论, 构建了互补性脆弱度指标集和综合脆弱度指标, 进而提出一种输电线路脆弱度评估方法。该方法可从全局和局部、有功和无功两方面综合衡量输电线路的脆弱度。根据电力网络有功功率传输的特点构建了平均传输距离指标, 从全局的角度衡量输电线路故障对有功功率全网传输效率的影响; 其次, 提出了局部变化量指标, 从负荷节点和发电机节点的角度有效评估局部无功平衡受影响的程度。上述两类指标构成了互补性脆弱度指标集。对互补性指标集进行了归一化处理, 得到综合脆弱度指标。

目前, 学者主要从网络的拓扑结构提出线路的脆弱性指标, 而电力网络的特性不仅体现在网络的拓扑结构上, 而且电网的运行状态, 动态行为也是电力网络的主要特性。如何把实际电网的物理特性与复杂网络的特征结合, 以及如何有效的将网络拓扑和电网的运行行为状态两者联系起来作为线路脆弱性的评估是值得研究的内容。

2.4 临界自组织性

1987 年, 美国 Brookhaven 国家实验室的巴克等人提出了自组织临界性 (Self-Organized Criticality) 的概念^[36]来说明时空耗散动力系统的动力学行为。电力系统大停电是系统处于临界状态时, 在微小的扰动下触发连锁反应并导致灾变的过程现象。自组织临界性的概念可望成为用来揭示包括大停电现象在内的复杂电力系统整体行为特征的有效工具之一。

在自组织临界状态下,一个小事件会引发一个大事件乃至突变。自组织临界性概念的基本立场是,认为电力系统总是处于持续的非平衡状态,由于系统内部和外部诸多要素之间的相互作用,它们可以组织成为一种临界稳定的状态,即临界状态。

文献 [37] 将电力系统向临界状态演化的过程与沙堆模型的形成过程进行了类比:电力负荷的增长类似于沙堆模型中坠落的沙子,负荷增长到一定水平时会使电力系统进入临界状态,正如沙堆某处坡度过陡后沙粒发生滑坡、引起大小不等的雪崩一样,进入临界状态的电力系统在负荷继续增长的过程中一定会发生规模不等的停电事故。在物理学(平衡统计力学)中,临界点是系统行为或结构发生急剧变化的地方。对于电力系统而言,其临界点指大停电前的系统状态。文献 [38] 应用复杂系统理论,通过分析美国电网大停电事故的部分数据,深入探讨了电力系统大停电规模与频率之间的幂律关系以及大停电规模分布的分形分维特征,提出了大停电现象可以用自组织临界性的概念来加以解释的观点。结合 Hurst 指数,进一步说明了存在着对电力系统大停电进行预测的可能。文献 [39] 建立了基于交流潮流、考虑隐藏故障特性的连锁故障搜索算法,并利用该算法对华北电网进行了分析,得出了华北电网处于自组织临界状态的结论。分析了负载情况对系统发生连锁故障概率的影响,发现系统负载较均匀时发生连锁故障的概率将大大降低。

如果能够判断出系统运行正处于临界自组织状态,那么就可以采取措施加强该系统的安全稳定运行。然而目前没有具体的指标和系统的方法来判断电力系统的临界自组织状态,基于复杂网络的临界状态,是利用连锁故障模型判断系统停电规模和停电频率的关系,一旦其成幂律分布,则系统正处于临界自组织状态。但是这种方法需要大量的统计数据,仿真时间长,抽样次数多,只适合于离线判断系统的自组织临界状态。能否减少判断自组织临界状态的时间,快速而有效的判断出系统的临界自组织状态,并分析在这种状态下系统的运行轨迹,是目前研究的重点。

3 结论与展望

虽然复杂网络理论在过去几年的发展和进步确实富有成果和惊人的,在电力系统中的运用也被广泛

的研究,但在电网中的研究还处于起步阶段,在未来在该领域还有很多值得研究的。在这里提出几个需要进一步研究的方向。

(1) 复杂网络理论应该和实际的电力系统更加紧密的结合起来,电力系统中很多物理特征没有在复杂网络理论中明确,准确的反映出来。

(2) 尽管研究人员已经在许多实际电网中发现一些统计模式和规律,但没有建立系统性的方法识别网络结构,无法准确判断上述参数。

(3) 电网应该找到更好的模型描述更加复杂的系统和网络结构,然而目前却只有小世界模型被广泛接受和运用。

(4) 随着电力系统规模的扩大,更需要加快网络之间的数据和信息的交换,优化模型,尽量减少时滞。

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以及应吸取的教训[J].电网技术,2003,27(10):8-12.
- [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] Dobson I, Carreras B A, Lynch V E, et al. Complex systems analysis of series of blackouts, cascading failure, criticality, and self-organization [C]// 9th Bulk Power System Dynamics and Control-VI Cortina d'Ampezzo, Italy, 2004. 438-451.
- [4] Benjamin A, Carreras David E, Newman Ian, Dobson et al. Evidence for self-organized criticality in a time series of electric power system blackouts [J]. IEEE Trans Circuits and System, 2004, 51(9): 1733-1740.
- [5] Dobson I, Carreras B A, Lynch V E, et al. An initial model for complex dynamics in electric power system blackouts [C]// Proceedings of 34th Hawaii International Conference on System Sciences Maui Hawaii, January 2001, 710-718.
- [6] Penrose A, Rényi on the evolution of random graphs [J]. Publ Math Inst Hung Acad Sci 1960.
- [7] 方娜清,汪小帆,刘增荣.略论复杂性和非线性复杂网络系统的研究[J].科技导报,2004,(2):9-12,64.
- [8] 曹一家,刘美君,丁理杰,陈晓刚,孙可,王绍部.大电网安全性评估的系统复杂性理论研究[J].电力系统及其自动化学报,2007,1(19):1-7.
- [9] 成思危.复杂科学与系统工程[J].管理科学学报 1999,2(2):1-7.
- [10] 张嗣瀛.复杂系统与复杂性科学简介[J].青岛大学学报,2001,16(4):25-29.

- [11] 孟仲伟, 奋宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 21—24.
- [12] 陈海波, 刘梦欣, 王杰. 复杂网络理论在电力网络中的应用与研究 [J]. 华东电力, 2007, 5(35): 1—6.
- [13] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8·14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训 [J]. 电网技术, 2003, 27(10): 1—5.
- [14] 刘永奇, 谢开. 从调度角度分析 8·14 美加大停电 [J]. 电网技术, 2004, 28(8): 15—20, 50.
- [15] 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, 12.
- [16] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示 [J]. 电网技术, 2003, 27(9): 3—6.
- [17] Dobson I, Carreiras BA, Newman DE. A loading dependent model of probabilistic cascading failure. *Probability in the Engineering and Informational Sciences* 2005, 19(1): 15—32.
- [18] Dobson I, BACarreiras V, Lynch et al. Complex systems analysis of series of blackouts: cascading failure, criticality, and self-organization. *Bulk Power System Dynamic sand Control—VI*, August 22—27, 2004, Cortina, AmPezzo Italy.
- [19] Phadeke A G, Thorp J⁵. ExPose hidden failures to Prevent cascading outages. *IEEE Computer Application in power* 1996, 9(3): 20—23.
- [20] Bae K, James S, Thorp A. A stochastic study of hidden failure in Power system Protection. *Decision Support Systems* 1999, (24): 259—268.
- [21] Chen J, Thorp JS, Dobson I. Cascading dynamic and mitigation assessment in Power system disturbances via hidden failure model. *Interactional Journal Electrical Power and Energy Systems* 2005, 27(4): 318—326.
- [22] 李生虎, 丁明, 王敏, 等. 考虑故障不确定性和保护动作性能的电网连锁故障模式搜索 [J]. 电网技术, 2004, 28(13): 27—31.
- [23] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 1—6.
- [24] Rios M, A. Kirsehen DS, Jayaweera D, et al. Value of security: modeling time dependent Phenomena and weather conditions. *IEEE Trans Power Systems* 2002, 17(3): 543—548.
- [25] Kirsehen D S, Jayaweera D, Nedie D P, et al. A Probabilistic indicator of system stress. *IEEE Trans Power Systems* 2004, 19(3): 1650—1657.
- [26] Dobson I, Carreiras B A, Lynch V E, et al. An initial model for complex dynamics in Electric Power system blackouts. *Proceedings of the 34th Annual Hawaii Antinational Conference System Sciences Maui Hawaii Jan. 3—6, 2001*: 710—718.
- [27] B A Carreiras VE, Lynch ML, Saehtjen et al. Modeling blackout dynamic in Power Transmission networks with simple structure. *34th Hawaii International Conference on System Sciences Maui Hawaii Jan. 2001*.
- [28] B A Carreiras VE, Lynch I, Dobson et al. Dynamics, criticality and self-organization in A mode for blackouts in Power transmission systems. *35th Hawaii International Conference Systems Sciences Maui Hawaii Jan. 2002*.
- [29] Watts D J, Strogatz SH. Collective Dynamics of “Small world” Networks. *Nature* 1998, 393(4): 440—442.
- [30] Watts D J. *Small worlds— The Dynamics of Networks Between Ordered Randomness*. Princeton (NJ): Press 1998.
- [31] 丁明, 韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 7—10, 40.
- [32] Reka Albert, Istvan Albert, Gray L, Nakamoto. Structural vulnerability of the North American power grid [J]. *Phys Rev E* 2004, 69, 025103.
- [33] Reka Kinney, Paolo Cincitti, Reka Albert et al. Modeling cascading failures in the North American power grid [J]. *Eur Phys J B* 2005, (46): 101—107.
- [34] 丁明, 韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(增刊): 118—122.
- [35] 倪向萍, 梅生伟, 张雪敏. 基于复杂网络理论的输电线路脆弱度评估方法 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 1—5.
- [36] Bak P, Chen K. Self-organized criticality [J]. *Scientific American* 1991, 264(1): 26—33.
- [37] Dobson I, Carreiras B A, Lynch V E et al. An initial model for complex dynamics in electric power system blackouts [C]. *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences Maui Hawaii 2001*, (2): 710—718.
- [38] 曹一家, 江全元, 丁理杰. 电力系统大停电的自组织临界现象 [J]. 电网技术, 2005, 29(15): 1—5.
- [39] 易俊, 周孝信, 肖逾男. 用连锁故障搜索算法判别系统的自组织临界状态 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 1—5.

作者简介:

肖军 (1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为人工智能及复杂网络在电力系统中的运用。

刘天琪 (1962—), 女, 博导, 教授, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化。

(收稿日期: 2008—12—15)