

# 用复杂网络理论分析电网及大停电事故

李晶晶, 王 红

(山东师范大学 信息科学与工程学院, 山东 济南 250014)

**摘 要:**随着全球经济的迅速发展,电网的规模也在不断扩大,电网互联成为电力系统发展的必然趋势。但是由于近年来世界范围内大停电事故频频发生,带来了巨大损失,因此,引起了科学界对电网的研究热潮。用复杂网络理论分析了电网的拓扑结构和特性,说明其具有小世界和无标度特性。其次分析说明了研究电网的几个模型和各自的不足之处,这有利于科学家提出更好的模型来降低大停电事故带来的损失。

**关键词:**复杂网络;小世界;无标度;大停电事故;电网

**中图分类号:**TM711

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2008)10-0247-03

## Analysis on Power Grids and Blackouts with Complex Network Theory

LI Jing-jing, WANG Hong

(Sch. of Info. Sci. and Eng., Shandong Normal Univ., Jinan 250014, China)

**Abstract:** With the rapid development of the global economy, the power grid size is also growing, power grid interconnection becomes the inevitable trend of the power system development. But recently, successive power blackouts of large scale occurred in the world, result in a great loss, which attracts researchers attention to the reliability of power grid. Firstly, analyzes the topology and property of the power grid, explains it has the small-world and the free-scale. Secondly, analyzes and explains the model and the shortage of the power grids. It is advantageous to put forward the better model in order to lower the loss of the blackouts.

**Key words:** complex network; small-world; free-scale; blackouts; electric power grids

## 0 引言

自然界中的许多复杂系统都可以用复杂网络来描述,复杂网络总的来说可分为四大类:社会网络、信息网络、技术网络、生物网络。这些网络都可以用复杂网络的理论来进行研究,以便找出这些网络的特征。电网也不例外,它也具有复杂网络的一些特性,如小世界和无标度特性等。

随着世界经济的迅速发展,电网规模也在不断扩大,电网互联成为电力系统发展的必然趋势。电网具有能将电能输送到上千公里以外的能力,这种能力可以引起局部故障迅速传播到大区域乃至整个网络。近年来,国内外曾发生多次大规模连锁性停电事故。1996年美国发生了两次大停电事故,涉及11个州,影响了400多万人口的正常生活。2003年发生在美国

东北部及加拿大东部地区的大范围停电事故,涉及两国5000多万人口,经济损失约300亿元,这是北美历史上最大范围的停电事故。其后,在英国、丹麦及瑞典和意大利都发生了大停电事故。停电事故的频频发生,引起了科学界和工程界的高度关注。因此,用复杂网络理论分析电网及大停电事故的内在原因并寻找有效解决途径成为必然,也是具有重大意义的研究课题。

电网是一个强非线性的大规模动态系统,它认为是由电站、高压输电线等通过不同连接方式组成的规模庞大的复杂网络。复杂网络理论为研究电网提供了一个全新的视角和方法,有助于从整体上把握电网的复杂性。

## 1 电网的拓扑结构和特性

### 1.1 电网的拓扑结构

研究电网首先抽象出电网的拓扑模型,具体构造算法如下<sup>[1]</sup>:

①只考虑高压输电网,不考虑配电网、发电厂和变电站的主接线;

收稿日期:2008-01-08

基金项目:山东省博士后科研择优资助项目(200602005)

作者简介:李晶晶(1983-),女,山东聊城人,硕士研究生,研究方向为复杂网络理论与应用;王 红,博士,教授,研究方向为复杂网络理论与应用,计算机网络,移动计算。

②高压输电线和变压器支路为网络中的边,且所有边为无向边;

③所有传输线的拓扑特性均被认为是相同的,不考虑输电线的各种特性参数和传输电压的不同;

④合并同杆并架的输电线,不计并联电容支路,即消除自环和多重边,使模型成为简单图;

⑤电网模型中的节点包括发电厂、变电站和变压器,不考虑大地零点,各节点被认为是无差别的节点。

## 1.2 小世界特性

小世界网络有与随机网络类似的较短的平均路径长度,又有与规则网络类似的较高的聚类系数。经研究表明,美国西部电力网是典型的小世界网络,其平均路径长度略大于具有相同节点数和平均度的随机网络,并具有较高的聚类系数。用复杂网络理论研究的美国西部电网的节点数  $N = 4941$ ,平均度  $k = 2.67$ 。电网与完全随机网络结果比较见表 1<sup>[2]</sup>。

表 1 电力网络和随机网络平均最短路径和聚类系数比较

网络特征长度	完全随机网络	美国西部电力网络
$L$ (平均距离)	12.4	18.7
$C$ (聚类系数)	0.005	0.080

何大韧教授等研究的中国电力网的复杂网络共性,得出了中国电力网也具有小世界和无标度的特性。

## 1.3 电网的度分布和累积度分布

设  $p(k)$  是网络中节点的度恰好为  $k$  的概率。 $q(k)$  是度不小于  $k$  的节点占总节点数的比例,称为节点的累积度分布。研究表明美国西部电网度分布服从幂律形式,即  $p(k) \sim k^{-\gamma}$ ,其中  $\gamma = 4.0$ 。Amaral 和 Albert 等人证明了美国西部电网度分布更符合指数形式,可以近似表示为:  $q(k) \sim e^{-0.5k}$ 。与同等规模的网络相比,电网中高度节点出现的概率小于无标度网络,大于随机网络,这一点在中国电力网络的实际数据中也得到了验证<sup>[3]</sup>。

## 1.4 网络的抗毁性和级联效应

Albert 等人在研究了网络遭受突发故障和蓄意攻击后的拓扑变化,得出度分布服从幂律形式的网络对突发故障是鲁棒的,对蓄意攻击是脆弱的。利用这个结论可知,电网在遭受突发故障时比完全随机网络鲁棒性好,但是在遭受蓄意攻击时更为脆弱。最近研究表明,大规模的停电事故与大面积的网络拥塞并非电力网络上很多节点和链路同时故障或被攻击,而是一种动态的级联效应造成的<sup>[4]</sup>。这种动态的级联表现为节点的移除能够影响其他节点,例如把它上面的负荷传给其它节点,但这有可能导致其它节点故障,从而造成大面积停电事故。

## 2 用复杂网络理论分析大停电事故

### 2.1 自组织临界状态

沙堆模型具有自组织临界状态,假设在一个平面上不停地堆沙子,随着沙堆的慢慢变大,它的坡面变陡,这时新添加的沙子引发沙崩的可能性也愈大,把这种沙崩前的临界状态称为自组织临界状态。可以把这种自组织临界性应用于电网中,对电网进行分析。研究人员发现,两次相邻停电事件的间隔服从幂律分布。把负荷过载引起故障看成某个局域的沙粒数达到了崩塌阈值,而将应急工作人员切换电路以及其它电站与输电线路的负载分流看作是崩塌的沙粒向周围扩散,则电网的级联故障与沙堆模型极为相似,Carreras 等人分别用能量和功率丢失以及被影响的用户数表征停电规模,结果发现,停电规模近似服从幂律形式,表明电力网络可能处于自组织临界状态<sup>[5]</sup>。但是现在还没有一个公认的标准来衡量停电规模,不过在不同度量方法下停电规模分布都表现出幂律特征,足以说明停电规模分布的无标度性可能是普遍适用的。

### 2.2 节点和边作用的动态相继故障模型

Kinney 等人用该模型对北美电网作了分析,当从网络中移去负荷最大的发电节点或者输电节点时,会导致其他节点过载,网络的稳态整体性能  $E(G)$  相比于正常状态下网络的整体效率  $(E(G_0) = 0.04133)$  会有所下降,且随着过载容许参数  $\alpha$  的减小(节点负荷容许值  $C_i = \alpha * L_i, 0(\alpha \geq 1)$ ),效率下降的越多;而随机移去节点对网络效率几乎没有影响,除非网络容许参数  $\alpha$  较小。无过载情况下网络效率  $E(G_0) = 0.04133$ 。随着容许参数的增加,整体效率的稳态值逐渐接近初始值。

进一步分析发现,网络中节点按照其对网络效率的影响可分为三种:移去那些度和负荷比较小的节点,对网络整体效率不会造成影响。这类节点占网络总体的近 60%。若移去那些度或者负荷较大的节点,则对网络效率会造成较大影响,而且影响程度大多数情况下与容许参数  $\alpha$  有关。也有少数节点在  $\alpha$  较小时对网络性能有影响,不过当  $\alpha$  较大时从网络中移去这些节点不会造成影响。定义网络效率损失  $D = (E(G_0) - E(G_f)/E(G_0))$ ,其中  $E(G_f)$  表示网络稳态效率。

当  $\alpha = 1.2$  时,  $D$  的分布近似为指数等于 1.1 的幂律分布,这与 Carreras 等人研究结果相似。这个结果说明北美电力网络的负荷容许参数偏小。如果每隔一段时间就移去当前网络中负荷最大的节点,那么第一次移去的节点对网络性能的影响最大。

### 2.3 OPA 模型

Dobson 等人提出了一个电网由初始状态向自组

组织临界状态转化的模型,称为最优潮流方法(OPA)模型。该模型探讨输电系统大停电的全局动力学行为特征,分别对电网状态演化过程中,用户负荷的增加、电网容量改变、故障的修复,以及故障发生时电网对功率分配的控制等过程都进行了建模分析。他们指出,对各种小型故障的防护性工程反应,是导致电网状态向自组织临界状态发展的一个不可缺少的动因。

OPA 模型采用标准性规划方法进行功率调整,当出现输电线路故障、过载或者发电机节点功率超过最大限制时,电网必须对节点功率重新调整,使得各个节点的功率能够满足系统限制。使代价函数  $Cost = \sum p_i(t) - 100 \sum p_j(t)$  最小,其中,  $\sum p_i(t)$  是  $t$  时刻所有发电机发出的总功率,  $\sum p_j(t)$  表示  $t$  时刻所有负荷节点的总负荷。这样处理是保证拉闸限电的代价远大于提高发电机功率的代价,即在发电功率能满足的前提下,要尽可能减少对节点进行限电处理。

利用该模型对大停电动力学行为仿真的结果表明:当负荷需求接近临界点时,系统所输送的电力达到最大值,且停电的概率密度出现一个“幂律尾”。但该模型所用的节点数远小于实际网络并假设所有系统元件相同的理想情况,没能揭示模型所体现出的自组织特性在电网运行和控制的分配原则,因此具有一定的局限性。

#### 2.4 CASCADE 模型

通过 OPA 模型的研究可知,电网负荷增加是产生电网大规模相继故障的一个重要因素。为进一步了解电网负荷增加过程中,相继故障频率和故障规模的概率分布变化特征,Dobson 等人提出了 CASCADE 模型<sup>[6]</sup>,该模型有如下假设:

(1)网络中有多个类似的节点,并且各自有随机的初始负荷及初始扰动;

(2)某一节点过载后会失效并将一个固定大小为  $P$  的负荷传给其它节点。

该模型比较简单,但可以用于研究电网在不同负载条件下故障规模的概率分布特征。利用该模型对电网仿真,文献<sup>[6]</sup>对  $n = 1000$ ,小扰动  $d = 0.0001$  恒定不变的情况下进行模拟。随着故障时刻每个元件转移负荷量的不断增加,可得到故障元件数目 PDF 曲线的变化趋势,如图 1 所示。

概率分布曲线由“指数尾”变化到“幂律尾”,再变化到系统崩溃概率的“指数尾”。而一旦出现“幂律尾”或系统崩溃概率的情况,产生连锁故障的风险就会增加。由图可知,某一元件故障后转移到其它元件的平均负荷值  $p = 0.001$  是可能导致大多数甚至所有线路同时发生停电事故的临界值。该模型虽然可对大规模停

电事故进行模拟和分析,但也有不足之处:模型假设了传输线及其相互作用均相同;过负荷情况下负荷的再分配没有考虑网络结构;没有体现出发电变化和故障等。

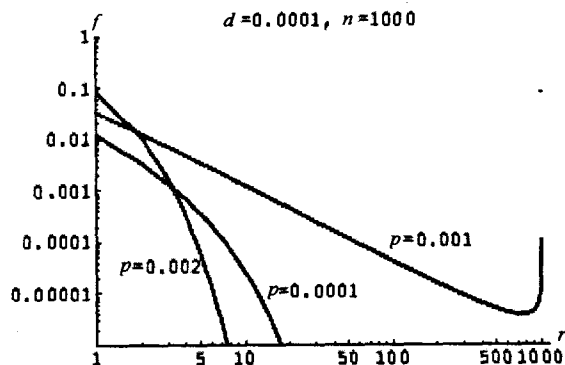


图 1 当  $d=0.0001$  时不同  $p$  值条件下的概率分布

#### 2.5 其它模型

Watts 模型利用图论中的渗流模型原理,结合生成函数法给出了构造模型拓扑下的连锁故障模型<sup>[7]</sup>,对故障规模进行了数字仿真。模型假设节点故障阈值随机取自  $\int_0^1 f(\Phi) d\Phi = 1$  的分布,初始故障只发生在  $\Phi_0 \ll 1$  的少数孤立节点上。仅当节点为易攻击节点时才会发生故障。当这类易攻击节点在网络上连接形成渗流群时意味着连锁故障可能传播开来。

Home 和 Kim 模型假设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,这样定义负荷和容量来衡量共有多少条最短路径通过了某个节点或某些边,并体现节点与边对过负荷故障的敏感性。由于该模型以无标度网络模型为基础,模型中的网络是一直变化的并假设了每个节点容量的最大值相同,所以将其应用于电力系统具有一定的局限性。

### 3 结束语

文中利用复杂网络理论对电网模型和大停电事故进行了分析,总结了近年来在电网工作上的一些研究进展。但取得的这些成果离实用还有很大的距离。可以从研究电网发生事故前的临界值着手,也可以从元件方面着手,其实归根到底就是从复杂网络上发生大停电事故的原因着手。电网是一个动态网络,复杂网络的结构特征、传播动力学、同步等理论的发展为研究电网的安全性提供了新思路,从传播动力学方面研究故障是怎样在网络中传播的,链式反应是怎样在网络中产生的具有重要的意义。在电网中可以对关键节点进行重点保护,以减少事故的发生。但是如何利用复杂网络理论来构造电网真实模型并改善现有电网,完

(下转封三)

果采用路由器或高性能交换机作为 GRE 终结器,会使得设备成本增加,而 GRE 代理转发器可以使用相对较为便宜的 Linux 服务器实现,会使得整体成本下降。

(6)GRE 驱动已经在 Linux 系统上实现,GRE 代理转发器的开发成本较低。

(7)GRE 隧道在建立时需要三个 IP 地址信息,客户端在动态建立隧道的时候,需要服务器提供这个地址信息。我们的办法是在拨号认证的时候返回这个信息。普通的 Radius 服务不能满足这样的要求。因此需要一个认证转换机制。这里,采用了认证代理方案。

(8)GRE 认证代理服务器接受客户端的认证申请,将这个认证申请转换成标准的 Radius 认证申请,并根据客户端的相关信息判断其地域位置,以选择相应的 GRE 代理转发器与 IP 地址信息,将 Radius 认证响应与建立隧道所需的信息一同返回给客户端。

(9)GRE 认证代理服务器可以通过配置成固定的 URL 来完成客户端的发现。

### 3.2.2 通讯流程简述

(1)当用户需要通过隧道直接访问时,可以通过使用 GRE 客户端设备,向 GRE 认证服务发起认证请求。并将本机 IP 校园网地址 IP<sub>a</sub> 传递过去。

(2)GRE 认证服务向 Radius 客户端发起认证请求认证通过后 GRE 认证服务根据 IP<sub>a</sub> 选择对应的 GRE 代理转发器,并获得校园网 IP 地址 IP<sub>p</sub>、电信网 IP<sub>p'</sub>,从 IP 池中分配的电信 IP 地址 IP<sub>a'</sub>,发出隧道建立指令并建立隧道。

(3)客户端 A 通过 GRE 驱动封装数据报发送到 GRE 代理转发器。

(4)GRE 代理转发器通过事先与 GRE 终结器建立好的 GRE 隧道将客户端发送的书包转发到 GRE 终结器上,由终结器转发到 Internet。

(5)GRE 终结器将 Internet 发送到 A 的数据报通过 GRE 隧道传递到 GRE 代理转发器上。

(上接第 249 页)

善电网规划,预防大停电事故将成为科学界研究的热点之一。可见,复杂网络理论在电网研究中具有不可忽视的作用。

### 参考文献:

- [1] 孟仲伟,鲁宗相,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.
- [2] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [3] 陈洁,许田,何大韧.中国电力网的复杂网络共性[J].科技导报,2004(4):11-14.
- [4] Lai Y C, Motter A, Nishikawa T, et al. Complex networks: dy-

(6)GRE 代理转发器将收到的数据报通过 GRE 隧道传递给客户端。

(7)GRE 代理转发器监控隧道流量,以观察客户端是否一直在线,若隧道长时间没有流量,可认为客户端意外下线,这时,连接管理向 GRE 认证代理发送用户下线通知,并释放隧道。

(8)GRE 客户端控制模块在客户端对网络通讯进行监控,若发现长时间没有 GRE 代理转发器的报文,可认为代理转发器关闭了 GRE 隧道,GRE 客户端会发起下线命令。

## 4 结束语

虽然同属校园网络,但教学区与教工、学生宿舍区,家属区子网有着明显不同。教学区用户一般侧重于在网上查询信息、应用多媒体教育和电子图书馆进行教学等,而学生宿舍区的需求主要以收发电子邮件、聊天、视频点播与互动游戏为主,对网络性能提出了无瓶颈传输效率、高可靠与高稳定等要求。家属区及教工宿舍区的用户类似于商业用户群。在校园网的改建过程中,通过将以上两种方案结合使用,可以在更大的程度上满足不同用户的需求。此方案目前已在实践中测试通过,结果证明它能够有效地提高用户上网速度。

### 参考文献:

- [1] 周伟,郭海波.策略路由技术在高校校园网中的应用[J].成都信息科学学院学报,2006,21(3):355-357.
- [2] 赵玉亭,张治.安全 RADIUS 认证、授权、计费系统的构建[J].计算机工程,2006,32(9):144-148.
- [3] 徐霖洲,丘海明. PPPoE 原理、应用及改进建议[J].中山大学学报:自然科学版,2002,41(6):111-113.
- [4] 李方敏,叶澄青.安全 Web 隧道技术[J].计算机应用,1999,19(1):33-36.
- [5] Hanks S, Farinacci D, Traina P. Generic routing encapsulation (GRE)[S]. RFC1701. 1994.
- [6] Thorp J S, Chen J, Parashar M. Analysis of electric power system disturbance data[C]//Proceeding of 34th Hawaii International Conference on System Sciences. [s.l.]:[s.n.], 2001.
- [7] Dobson I, Carreras B A, Newman D E. A probabilistic loading-dependent model of cascading failure and possible implications for blackouts[C]//Proceedings of 35th Hawaii International Conference on System Sciences. [s.l.]:[s.n.], 2003: 1-8.
- [8] Newman M E J. The structure and function of complex networks[J]. SIAM Review, 2003, 45(1): 167-256.