

电力网络连锁故障研究综述

占 勇,程浩忠,熊虎岗

(上海交通大学 电气工程系,上海 200240)

摘要: 电力网络连锁故障是由某一个故障引发的一系列故障过程,其后果是造成大规模的停电事故和许多关键元件的开断。由于电网故障模式较多,故障参数(包括各种连续参数和离散变量)形式各异,因此连锁故障模式的搜索和后果分析十分困难。近年来,研究人员建立了多种方法和模型,如模式搜索法、模型分析法等。综述了电力网络连锁故障领域的一些研究成果,并指出应从提高故障模式搜索速度、计及稳定性问题、采用复杂网络理论进行模型分析和连锁故障的预防控制、校正控制和紧急控制等方面进行深入研究。

关键词: 电力网络; 连锁故障; 模式搜索法; 模型分析法

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)09-0093-06

0 引言

如何保持电力系统的安全稳定运行一直是电力系统研究、运行和管理的中心任务之一。近年来的电网事故统计表明,虽然电网事故发生的频次在下降,但后果却日益严重^[1]。事故记录表明,大型停电事故多由多重故障、特别是连锁故障引起的,如1994年12月、1996年7月美国的WSCC(Western Systems Coordinating Council)电网和1998年6月美国MAPP(Mid-continent Area Power Pool)电网发生的解列事故。2003年8月14日美国东北部部分地区以及加拿大东部地区出现了一次震动世界的大范围停电。这是北美历史上最大范围的停电事故,受影响的人估计在加拿大有一千万(相当于加拿大三分之一的人口),在美国有四千万。美国8个州以及加拿大安大略省的电力全部中断。尽管电网的特大规模的连锁故障不会经常发生,但是一旦发生,往往具有极强的破坏力,对人们的生产生活造成很大影响。因此,如何寻找潜在危险并提出应对措施,对保证电网运行的安全性和供电可靠性十分重要^[2,3]。

由于电网的连锁故障较多,故障参数形式各异,且搜索连锁故障需要模拟保护动作性能和安全自动装置的控制措施,因此连锁故障模式的搜索和后果分析十分困难^[4]。为解决该难题,研究人员通过模式搜索、抽象、简化、降阶、统计等各种方法建立了多种模型分析电力网络连锁故障的机理和行为特点,并取得了许多成果。

本文综述了目前的一些研究成果,并作了研究展望。

1 模式搜索法

模式搜索法是通过解析法、随机模拟、状态空间等方法对电网进行故障仿真计算,搜索出导致电网连锁故障的故障模式。解析法基于确定性判据,如 $N-1$ (或 $N-K$)判据^[5],它便于理解和实现,但不便于处理连续参数和不确定因素,处理连锁故障或多重故障比较困难。为避免盲目的开断选择,一个解决方法就是采用启发式搜索方法,如文献[6]提出了tie-cutting和Q-reduction指标,并根据该指标分别进行线路和发电机开断的选择,通过仿真计算快速寻找导致电压失稳的连锁故障模式。

随机模拟基于蒙特卡罗概率抽样算法^[7-10],如果模拟时间足够长,可以搜索所有故障模式。如Rios, Kirschen等人用该法对电力系统进行仿真,仿真过程中计及了输电线路连锁过载效应、保护的误动作、暂态不稳定发生的概率等^[10]。

随机模拟方法存在的问题是:对基于时间序列的连锁故障,特别是长时间的保护动作特性模拟不够;风险指标多以概率期望值表示,不易理解;计算时间太长,不适合在线应用^[4]。

综合解析法和随机模拟法的优点,文献[4]提出了两者结合的方法确定故障模式,根据扰动过程交替进行稳定计算和潮流计算,快速自动筛选出后果严重且较易发生的连锁故障模式。

由于导致重大事故的连锁性故障是小概率事件,文献[11]指出,通过蒙特卡罗随机模拟算法进行随机模拟并不能有效地进行分析,该文提出了状态空间分析和网络分析相结合的方法进行连锁故障的分析。

2 模型分析法

为探寻电力网络连锁故障发生的机理,Dobson等人对电力网络进行了抽象和简化,建立OPA,CASCADE等模型。通过对北美电力网络的分析,Dobson等人研究得到的一个重要结论是:当前北美电力网络是一个自组织临界系统,在临界负荷附近,系统故障规模的增长表现出幂律分布。许多发展中国家的电网,尽管各种小规模停电事故的发生频率要远大于北美电网,但却很少发生类似于北美电网的大规模连锁事故。他们认为,正是这些频繁的小规模停电事故缓解了整个电网日渐增加的某种大规模停电事故的压力,而不至于引发大范围停电。

下面着重介绍OPA模型。

2.1 自组织临界理论

自组织临界理论SOC(Self-Organized Criticality)认为,由大量相互作用成分组成的系统会自然地 toward 自组织临界态发展;当系统达到自组织临界态时,微小的干扰事件也可导致系统发生一系列灾变^[12]。Dobson在文献[13]中用著名的“沙堆模型”(sandpile model)形象地说明自组织临界态的形成和特点。在一块平台上缓缓地添加沙粒,逐渐形成一个沙堆。开始时,由于沙堆平矮,新添加的沙粒落下后不会滑得很远。但是,随着沙堆高度的增加,其坡度也不断增加,沙崩的规模也相应增大,但这些沙崩仍然是局部性的。到一定时候,沙堆的坡度达到一个临界值(即对于一个有限大的平台,添加沙粒和沙粒散落平台的平均速率相等)。这时,新添加一粒沙子(代表来自外界的微小干扰)可能引起不同大小的沙崩,小到一粒或数粒沙子,大到涉及整个沙堆表面的所有沙粒。这时的沙堆系统处于“自组织临界态”。临界态时沙崩的大小与其出现的频率呈幂函数

$$N(s) \propto s^{-\tau}$$

式中 N 是大小为 s 的沙崩的数量; τ 是一个常数。

所谓“自组织”是指该状态的形成主要是由系统内部组份间的相互作用产生,而不是由任何外界因素控制或主导所致。所谓“临界态”是指系统处于一种特殊敏感状态,微小的局部变化可以不断放大、扩延至整个系统^[13]。

在文献[14]中,Carreras等人通过分析北美电网15年的停电数据,发现北美电网停电事故规模的概率分布函数(PDF)满足幂律分布。这一点,同对一个具有SOC特征沙堆模型数据有类似的结果,见图1(λ 为概率值, P_{lost} 为损失功率;下同)。说明电网确实存在自组织临界性质。

2.2 OPA模型

Dobson等人文献[13]中首次提出了一个电网由初始状态向自组织临界态转化的OPA模型。该模型分别对电网状态发展过程中,负荷的增加、电网容量随时间改变、故障的修复及故障发生时电网对功率的重新分配等过程都进行了建模。文章指出:对各种

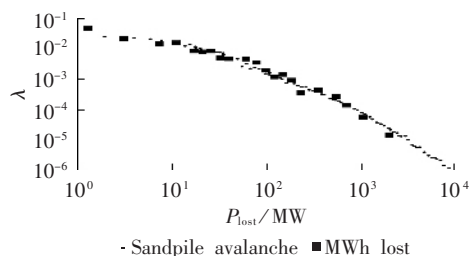


图1 电网故障损失功率与沙堆坍塌大小的概率分布比较

Fig.1 The probability distribution comparison between power lost during network failure and sandpile cascading quantity

小型故障的防护性控制策略(engineering responses to blackouts)是引发电网状态向自组织临界态发展的一个不可缺少的动因,即这种对小型停电事故的简单防护和避免实际上是在为一次大规模连锁故障做积累。该理论对北美电网的大规模连锁故障和发展中国家电网的频繁小故障特征作了很好的理论解释。以下对OPA模型作简要介绍。

OPA模型按时间尺度可分为两个过程,一是慢动态过程,描述电网用户负荷的缓慢增长及其相对应的各种防护性控制策略相互作用下电网状态逐渐向自组织临界态演化。这是一个漫长的过程,可能经过几年甚至十几年的演化,此时模型的时间单位是天。另一过程被称作快动态过程,描述连锁故障发生和传播。该过程一般只需要几个小时甚至几分钟。快动态过程的时间单位是分。

2.2.1 慢动态过程

2.2.1.1 网络模型

假设网络中有 n 个节点,这些节点分为两类:一类是负荷节点,另一类是发电机节点。定义负荷功率为负值,发电机功率为正值。

令 P_{ik} 为第 k 天节点 i 的功率, $\mathbf{P}_k$ 为第 k 天所有节点功率的向量,即

$$\mathbf{P}_k = (P_{1k}, P_{2k}, P_{3k}, \dots, P_{nk})^T$$

所有节点的功率应该满足功率平衡,即 $\sum_i P_{ik} = 0$ 。

设网络有 m 条输电线,令 k 天输电线 j 上所承载的功率为 F_{jk} ,则

$$\mathbf{F}_k = (F_{1k}, F_{2k}, F_{3k}, \dots, F_{mk})^T \quad (1)$$

式(1)表示 k 天所有输电线承载的功率,输电线承载功率不能超过它的最大值,即

$$-F_{jk}^{\max} \leq F_{jk} \leq F_{jk}^{\max} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

在OPA模型中,所有输电线均被视作一个理想的电感,输电线本身没有功率损耗。而所有的负荷均认为是直流负荷,则电网中所有节点的功率和输电线承载的功率之间满足方程

$$\mathbf{F}_k = \mathbf{A} \mathbf{P}_k \quad (3)$$

式中 $\mathbf{A}$ 为一个和网络结构相关的常数。

2.2.1.2 负载增加

设第 λ 天与 $\lambda-1$ 天的负荷之比为 λ_λ ,则

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_0 \prod_{\lambda=1}^k \lambda_\lambda \quad (4)$$

其中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ 是一组相互独立的, 具有相同概率分布且平均值略大于 1 的参数。同理, 输电线负荷也随着节点负荷的增加而有相应的增加:

$$F_k = A P_k = A P_0 \prod_{\lambda=1}^k \lambda_{\lambda} = F_0 \prod_{\lambda=1}^k \lambda_{\lambda} \tag{5}$$

2.2.1.3 控制策略

如果一条输电线出现故障, 输电线在维修后其容量 $F_{jk}^{\max}$ 将被人为扩充, 以保证这条输电线有一定的安全裕量, 并防止相同的故障再次发生, 即

$$F_{j(k+1)}^{\max} = \begin{cases} \mu_k F_{jk}^{\max} \\ F_{jk}^{\max} \end{cases} \tag{6}$$

其中参数 $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots$ 是一组相互独立、具有相同概率分布的变量, 满足

$$1 < \lambda_{\max} < \mu_{\min} \tag{7}$$

随着负载负荷的增加, 发电机节点的出力也必须要有相应的增加。

$$P_{ik}^{\max} = (\bar{\lambda})^{k+1} P_{i0}^{\max} \tag{8}$$

OPA 模型假定发电机节点不会出现故障。电网对故障或是负荷过载的控制策略是引领电网状态向自组织临界态演变的一个不可或缺的动因。用电负荷的增加和电网控制策略两者相互作用的结果使所有输电线的承载功率 F_{jk} 缓慢地逐渐趋近于 $F_{jk}^{\max}$, 设系统的状态为 $M_{jk} = F_{jk} / F_{jk}^{\max}$, 那么所有系统的状态 M_{jk} 都将趋向于 1。

2.2.2 快动态过程

2.2.2.1 初始化

设电网在第 k 天发生连锁故障, f_j 为故障时刻输电线 j 的承载功率, 向量 f 表示输电线的功率:

$$f = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_m)^T$$

p_i 为故障时刻节点 i 的功率, 向量 p 表示此时所有节点的功率:

$$p = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)^T$$

初始化为

$$f = F_k \tag{9}$$

$$p = P_k \tag{10}$$

输电线可能有两种故障, 一种是在没有过载条件下的随机故障, 即由天气、误操作等原因所导致的输电线故障, 此时的故障概率是个很小的值, 有

$$\text{Probability}\{\text{line } j \text{ outaged}\} = h^0(M_{jk}) \tag{11}$$

式中 h^0 是一个正的非减函数。

另一种是在输电线过载条件下的故障, 此时的故障概率很高, 有

$$\text{Probability}\{\text{line } j \text{ outaged}\} = h^1(M_{jk}) \tag{12}$$

式中 h^1 是一个正的非减函数, 且 $h^1 \gg h^0$ 。

2.2.2.2 功率分配控制

当出现输电线故障、过载或者发电机节点功率超

过最大限制, 电网必须对节点功率进行重新调整, 使得各节点功率能够满足系统限制。功率调整用线性规划(linear programming)算法实现。极小化如下的代价函数:

$$\sum_{\text{generators}} |p_i - P_{ik}| + \sum_{\text{loads}} 100(p_i - P_{ik}) \tag{13}$$

其中发电功率变化的系数是 1, 而负载功率改变量的系数是 100, 这样处理的目的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, 尽可能减少对节点进行限电处理。极小化目标函数的同时, 还必须满足以下约束条件:

$$\sum_{i=1}^n (p_i - P_{ik}) = 0 \tag{14}$$

$$-F_{jk}^{\max} \leq f_j \leq F_{jk}^{\max} \quad j = 1, 2, \dots, m \tag{15}$$

$$P_{ik} \leq p_i \leq 0 \tag{16}$$

$$0 \leq p_i \leq P_{ik}^{\max} \tag{17}$$

这种简单的最优化模型只是电网操作者应对各种故障和过载的一种近似, 而实际的电网操作中, 操作者并不一定对每一次故障都能够及时做出反应。

2.2.2.3 故障传播算法

OPA 模型的连锁故障传播算法流程如下:

- a. 按式(9)(10)初始化每个节点功率及输电线的承载功率;
- b. 由式(11)确定输电线故障;
- c. 按线性规划算法重新调整电网功率分配;
- d. 对 b 中的过载输电线按式(12)计算其是否出现故障, 若 $\text{Probability}\{\text{line } j \text{ outaged}\} = 0$ (j 为过载输电线), 退出循环;
- e. 若 $\text{Probability}\{\text{line } j \text{ outaged}\} = 1$ (j 为过载输电线), 返回 b。

2.2.3 OPA 模型的一些实验结果

2.2.3.1 工程参数 μ 和网络结构对电网故障影响^[15]

OPA 模型中, 参数 μ 是一个主要的可控参数。参数 μ 的大小直接影响着电网故障的规模和频率的统计性质, 见图 2~4 (图中 ε = 系统供给功率/负荷总需求; F 为网络故障频率; N 为每次停电断开的线路数)。

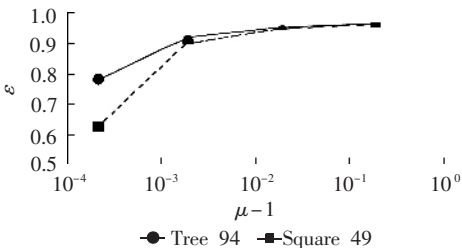


图 2 两种网络结构下, 系统供给功率与负荷总需求的比值随 $\mu-1$ 变化的曲线

Fig.2 The variation of power served-power demand ratio vs. $\mu-1$ in two network structures

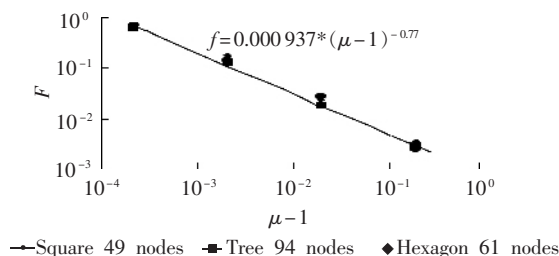


图 3 在三种不同网络结构下,网络故障频率随 $\mu-1$ 变化的曲线

Fig.3 The variation of network failure frequency vs. $\mu-1$ in three network structures

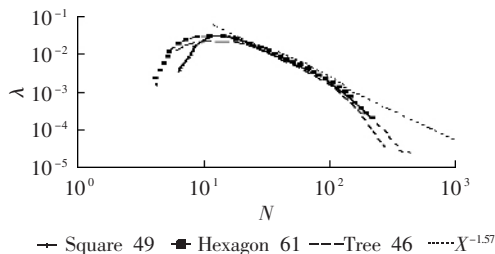


图 4 当 $\mu=1.002$ 时,不同网络结构网络的故障规模的概率分布曲线

Fig.4 The probability distribution of failure scale in different network structures with $\mu=1.002$

图中的 Tree, Square, Hexagon 分别为文献[15]用于比较的几种不同类型的网络。图 4 的 $X^{-1.57}$ 表示对其他三条曲线在横坐标为 10^1 与 10^2 之间的部分的指数函数拟和曲线。由仿真结果可知:第一,增大参数 μ ,能使电网故障的规模和频率都随之减小,这是显而易见的;第二,网络的拓扑结构对电力网络故障的频率和规模的影响很小。然而在实际运行中,增大参数 μ 意味着扩大电网的安全裕量,会影响电网运行的经济效益。

2.2.3.2 OPA 模型的临界点

随着用户负荷的增加,当电网的需求功率达到一个固定值时,电网的总出力达到最大,在该值附近,电网故障大小的概率满足幂律分布。同时发生停电事故的风险会在达到该点以后突然迅速增加。这时,电网的需求功率达到了一个临界点[16]。

电网的停电事故可分为两种形式:一种是由于负载太大,超过了电网的供电功率,电网操作者被迫对部分节点进行拉闸限电处理;另一种则是由于输电线过载,输电线故障引起的停电事故。

在 OPA 模型中,这两种故障形式分别对应不同的临界点。在电网中到底哪类临界点起主导作用,取决于电网的操作条件和这两个临界点距离远近[17]。在 OPA 模型的用户平均负荷增长过程中,系统的动态过程有两个临界点。在临界点附近,故障大小的概率分布函数(PDF)满足幂律分布,发生停电事故的风险会在接近临界点以后迅速增加,同时,电网的切断功率比(被切断的节点功率和总功率的比值)会

在临界点处出现突变,如图 5 所示(S 为电力总供给功率; P_L 为电力需求功率; N 为开断线路数;下同)。这些临界点产生于电网的两种限制:电网的发电功率限制和输电线的容量限制。

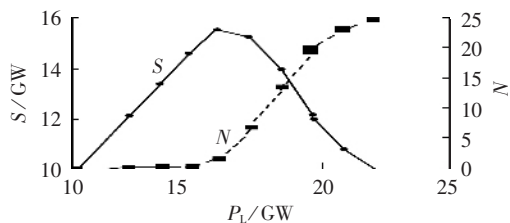


图 5 190 节点的树型网络,总供给功率和开断输电线路数目随负荷功率变化的函数曲线

Fig.5 The variations of power served and number of lines outaged vs. load power in a 190-bus tree network

这两种限制产生了系统动态过程中的两种不同的临界点。如图 6 所示(图中 η = 停电功率/系统供给功率; P_L 为电力需求),对于一个 382 节点(12 个发电机节点,370 个负荷节点)的网络,以均匀速率增加节点负荷,当负荷增加到 31.48 GW(发电机节点的总功率)时,部分节点开始出现断电。如果负载节点的负荷继续增加,断电节点会继续增加。当网络负荷达到 45.725 GW 时,网络中的部分输电线达到了其最大承载容量,输电线故障开始出现。输电线的故障导致更多的节点出现断电[18]。

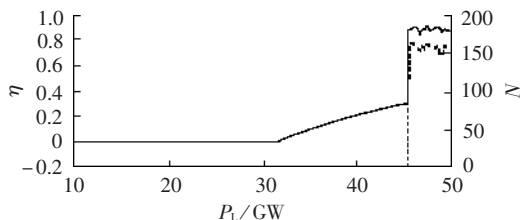


图 6 382 节点的树型网络,停电功率比及开断输电线路数目随负荷功率的变化

Fig.6 The variations of normalized power shed and number of lines outaged vs. load power in a 382-bus tree network

目前,OPA 模型的实验结果还被局限于理想的仿真模型和几个简单的实验网络中,对于更加接近实际网络的实验结果还有待研究。从 OPA 模型得到的一个结论是:电网的负荷增加是产生电网大规模连锁故障的一个决定性因素,为了进一步深入了解电网负荷增加过程中连锁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[19,20]。除了以上模型外,Pepyne 等人使用 Markov 模型分析离散状态电力系统,研究了传播概率的影响以及降低隐藏故障概率的策略[21]。Jie Chen 等人在文献[22]中提出了隐藏故障模型(hidden failure model),并指出隐藏故障的概率越小,系统的可靠性越高;保持发电机组有足够的热备用可以降低大范围停电的风险;快速准确的控制可以防止连锁故障。

3 展望

虽然连锁故障的研究取得了很大的进展,但离实用化还有很大的差距。笔者认为:可以从提高故障模式搜索速度、计及稳定性问题、采用复杂网络理论进行模型分析和连锁故障的预防控制、校正控制和紧急控制等方面进行深入研究。

a. 提高搜索速度的一个方法是寻找启发式判据,通过判据大大减少搜索空间。因此,如何建立有效的启发式判据是一个值得研究的课题。

b. 目前的模式搜索办法和模型分析法一般都不考虑稳定性问题,这样虽然提高了速度,但精度会降低。在仿真中考虑稳定性,可以采用扩展等面积准则EEAC、能量函数法等进行快速计算,另外 Parrilo 等人用混合非线性微分方程描述电力系统,经 Karhunen-Loeve 分解得到能够反应模型的大部分动力学行为的状态子空间,并用这些信息构造了降阶模型^[23]。实验结果表明用这种降阶模型计算得到的状态曲线与使用原始模型得到的基本吻合。

c. 近期有关复杂动力网络的研究^[24,25]引起了各学科的广泛重视和关注,从数学和工程技术领域渗透到社会科学、物理学、医学以及生物学等众多不同的学科。简言之,网络是指一组相互之间连接的点。所谓复杂网络就是具有复杂拓扑结构和动力行为的大规模网络,它是由大量的节点通过边的相互连接而构成的图,如电力网络、Internet、食物链网络、生物网络、通信网络、高速公路网等。电力系统作为一个典型的复杂动态网络系统,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其安全可靠提供了新的思路。从传播动力学的角度研究故障是如何在网络中传播的,链式反应是如何在大型电网中产生的。从网络结构特性分析链式反应发生的可能性,如何采取措施降低发生的可能性。

d. 进行连锁故障的分析最终要落实到连锁故障的预防控制、校正控制和紧急控制上。提高电力设备的可靠性、增加热备用、提高输电裕量等措施都可以降低连锁故障的发生概率。一旦发现系统处于自组织临界状态,进行校正控制使系统离开自组织临界态。当发生故障时,快速准确的保护动作可以防止故障的进一步扩大。对于可能发生的连锁故障,制定相应的紧急控制措施,保证电网的最后一道防线。一旦发生预料中的连锁故障,安全自动装置正确动作,保证事故不进一步扩大。由于技术的局限,目前的保护系统和安全控制系统都是对某个元件或一个局域系统的保护,因此,进行基于广域网测量的保护和安控系统研究,建立一个基于广域网测量的保护和安控系统,是从根本上解决连锁故障问题的重要措施。

4 结语

本文综述了近年来在电力网络连锁故障领域的一些研究工作。北美电网不断发生的大规模停电事故使这个领域越来越受重视。目前取得的成果为电网连锁故障的动力学与控制的研究提供了先进的理论分析方法,有助于揭示电力系统的复杂动力学行为,为电网系统的控制和设计提供更加准确的理论依据。由于电网本身和控制手段的复杂性,电网连锁故障是一个非常复杂的课题,为使理论达到实用化,还有许多工作需要开展。

参考文献:

- [1] U.S.-Canada Power System Outage Task Force. Final report on the August 14th blackout in the United States and Canada; Causes and recommendations[R]. [s.l.]: [s.n.], 2004.
- [2] 袁季修. 电力系统安全稳定控制的规划和应用[J]. 中国电力, 1999, 32(5): 29-32.
YUAN Ji-xiu. Planning and application of power system security and stability control[J]. **Electric Power**, 1999, 32(5): 29-32.
- [3] 周孝信. 我国电网技术的现状和未来[J]. 电网技术, 1995, 19(2): 1-4.
ZHOU Xiao-xin. Current state and prospects of power system technology in China[J]. **Power System Technology**, 1995, 19(2): 1-4.
- [4] 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.
LI Sheng-hu, DING Ming, WANG Min, et al. Search of power system chained failure mode considering uncertainty of element fault and performance of protective relaying[J]. **Power System Technology**, 2004, 28(13): 27-31.
- [5] KHAN M E. Bulk load points reliability evaluation using a security based model[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1998, 13(2): 456-462.
- [6] KOYAMA Y, SASAKI T, IHARA S, et al. Voltage collapse scenario search[A]. **Proceedings of International Conference on Power System Technology [C]**. Kunming, China: [s.n.], 2002. 344-348.
- [7] REI A M, SILVA A M L, JARDIN J L, et al. Static and dynamic aspects on bulk power system reliability evaluation[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 2000, 15(1): 189-195.
- [8] 丁明, 李生虎, 吴红斌. 电力系统概率充分性和概率稳定性的综合评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 20-25.
DING Ming, LI Sheng-hu, WU Hong-bin. Integrated evaluation of power systems adequacy and stability[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2003, 23(3): 20-25.
- [9] 王成山, 余旭阳. 基于能量函数的暂态稳定概率分析方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(6): 5-9.
WANG Cheng-shan, YU Xu-yang. Transient stability probabilistic analysis method based on fitting curve[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2003, 27(6): 5-9.

- [10] RIOS M A, KIRSCHEN D S, JAWAYEERA D, *et al.* Value of security: Modeling time - dependent phenomena and weather conditions [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 2002, 17(3): 543-548.
- [11] BIE Zhao-hong, WANG Xi-fan. Evaluation of power system cascading outages [A]. **Proceedings of International Conference on Power System Technology** [C]. Kunming, China: [s.n.], 2002. 415-419.
- [12] BAK P, TANG C, WIESENFELD K. Self-organized criticality: An explanation of $1/f$ noise [J]. **Physical Review Letter**, 1987, 59(7): 381-384.
- [13] DOBSON I, CARRERAS B A, LYNCH V, *et al.* An initial model for complex dynamics in electric power system blackouts [A]. **34th Hawaii International Conference on System Sciences** [C]. Maui, Hawaii: [s.n.], 2001. 2017-2023.
- [14] CARRERAS B A, NEWMAN D E, DOBSON I, *et al.* Evidence for self-organized criticality in electric power blackouts [A]. **34th Hawaii International Conference on System Sciences** [C]. Maui, Hawaii: [s.n.], 2001. 4038-4045.
- [15] CARRERAS B A, LYNCH V E, SACHTJEN M L, *et al.* Modeling blackout dynamics in power transmission networks with simple structure [A]. **34th Hawaii International Conference on System Sciences** [C]. Maui, Hawaii: [s.n.], 2001. 719-727.
- [16] CARRERAS B A, LYNCH V E, DOBSON I, *et al.* Dynamics, criticality and self-organization in a model for blackouts in power transmission systems [A]. **35th Hawaii International Conference on System Sciences** [C]. Hawaii: [s.n.], 2002. 163-169.
- [17] DOBSON I, CHEN J, THORP J S, *et al.* Examining criticality of blackouts in power system models with cascading events [A]. **35th Hawaii International Conference on System Sciences** [C]. Hawaii: [s.n.], 2002. 63-70.
- [18] CARRERAS B A, LYNCH V E, DOBSON I, *et al.* Critical points and transitions in an electric power transmission model for cascading failure blackouts [J]. **Chaos**, 2002, 12(4): 985-994.
- [19] DOBSON I, CARRERAS B A, NEWMAN D E. A probabilistic loading-dependent model of cascading failure and possible implications for blackouts [A]. **36th Hawaii Intl. Conf. System Sciences** [C]. Hawaii: [s.n.], 2003. 65-71.
- [20] DOBSON I, CARRERAS B A, NEWMAN D E. A loading-dependent model of probabilistic cascading failures [EB/OL]. <http://www.pserc.wisc.edu/ecow/get/publication/2004public/dobsoncascadepreprint03.pdf>, 2003.
- [21] PEPYNE D L, PANAYIOTOU C G, CASSANDRAS C G. Vulnerability assessment and allocation of protection resources in power systems [A]. **Proceedings of the American Control Conference** [C]. Arlington, VA: [s.n.], 2001. 4705-4710.
- [22] CHEN Jie, THORP J S, DOBSON I. Cascading dynamics and mitigation assessment in power system disturbances via a hidden failure model [J]. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, 2005, 27(3): 318-326.
- [23] PARRILO P A, LALL S, PAGANINI F, *et al.* Model reduction for analysis of cascading failures in power systems [A]. **Proceedings of the American Control Conference** [C]. San Diego, California: [s.n.], 1999. 4208-4212.
- [24] STROGATZ S H. Exploring complex networks [J]. **Nature**, 2001, 410(3): 268-276.
- [25] NEWMAN M E J. The structure and function of complex networks [J]. **SIAM Review**, 2003, 45(2): 167-256.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

占勇(1975-),男,安徽休宁人,博士研究生,主要从事电力系统运行与控制方面的研究工作(E-mail: zhanyong@sjtu.edu.cn);

程浩忠(1962-),男,浙江东阳人,教授,博士研究生导师,主要从事电压稳定、电网规划、电能质量、电力市场等方面的教学科研工作(E-mail: hzcheng@sjtu.edu.cn);

熊虎岗(1974-),男,安徽望江人,博士研究生,主要从事电力系统安全稳定等方面的研究工作(E-mail: gloryxiong@sjtu.edu.cn)。

Review of cascading failures in electric power network

ZHAN Yong, CHENG Hao-zhong, XIONG Hu-gang

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Cascading failure is a series of successive failures caused by one failure, which may result in large-scale blackout and unexpected trips of many critical components. Due to multiple failure modes and different failure parameters, continuous and discrete, the search of cascading failure modes and their effect analysis become very difficult. In recent years, many methods and models have been put forward to study the mechanism and behaviors of cascading failures, such as mode search method, model analysis method and so on. Some are reviewed, and it is pointed out that the further research should be done in the improvement of failure mode search speed, consideration of stability, application of complex network theory, preventive control, corrective control and emergency control.

This project is supported by Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Teachers in Higher Education Institutions of MOE, P.R.C..

Key words: electric power network; cascading failure; mode search method; model analysis method