

电力系统和通信网络交互影响下的连锁故障分析

曹一家^{1,2}, 张宇栋¹, 包哲静¹

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:传统的对于电力系统连锁故障的研究仅限制在电力网络,很少考虑电力网络和通信网络间的交互作用。以IEEE 118节点系统和新英格兰39节点系统为例,基于直流潮流模型建立了较为符合电力系统运行实际的电力网络和通信网络交互作用模型,通过调节相关参数研究了电力通信网络不同的路由策略对于电力系统连锁故障大停电的影响,并结合复杂网络的理论讨论了复杂网络之间的内在相似性。仿真结果表明通过调整通信网络参数设置恰当的路由策略,可以降低大规模连锁故障的概率。而且在不同电力系统中仿真发现,网络间最优相似策略是相同的,采用该相似策略可以有效地降低大规模连锁故障的概率。

关键词:电力系统; 通信网络; 交互; 连锁故障; 复杂网络; 内在相似性; 故障分析

中图分类号: TM 711.2; TN 915

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.01.002

0 引言

随着经济的高速发展,我国对于电力的需求不断增长,电力一次网络不断扩大,特别是我国能源经济分布的不平衡促使跨区域、大规模的电网互联,电力网络已发展成复杂的人工网络之一。目前,国内外的学者已经应用复杂网络理论对电网安全开展了研究^[1-2]。与此同时,由于近年来通信和信息技术的长足发展,电力通信系统也在发生深刻的变革。电力通信系统的节点不断增多,覆盖面逐步增大,电力通信网络也发展成为一个复杂网络,其网络拓扑的统计特性也表现出复杂网络的一般特征。文献[3]运用复杂网络理论,从结构的角度分析电力调度数据网的复杂性及脆弱性。

以往对于电力系统一次网络或者是电力通信网络的研究工作基本都是分开的,并没有考虑2个复杂网络之间的交互影响,而实际上这2个复杂网络是相互依赖、相互影响的。例如文献[4]对意大利电力网络和数据采集与监视控制(SCADA)系统相互影响进行了建模,电力网络节点依靠通信网络节点进行控制,同时通信网络节点需要电力网络节点提供电力。文献[5]对2个相互依赖的无标度网络^[6]连锁故障过程建立模型,研究发现2个无标度网络相互依赖的特性对于随机攻击表现出很强的脆弱性。但是在单个无标度网络上,其对于随机攻击有较强的鲁棒性^[7]。因此,交互影响的复杂网络的复杂特性引起了学者广泛的关注。

但是电力系统的连锁故障中,文献[4]所假设的电力网络与通信网络的交互影响机制并不合理,因为在实际运行中连锁故障的发展过程相对较快,而不间断电源会提供至少几个小时的电力保障通信系统的正常运行,电力网络节点即使出现故障也不会引起SCADA系统节点的缺电。同时,文献[5]中关于2个复杂网络节点间相互关联的假设也不合理,其认为网络节点间的相互依赖关系是随机对应的。但是实际网络中,一个网络高度数节点不可能对应另一网络的低度数节点。比如在交通运输中,一个地区的陆地运输中心往往也是此地区的航空运输的中心。所以文献[8]在研究复杂网络间的连锁故障时认为网络间节点的对应关系并不是随机的,而是应该具有内在相似性(inter-similarity),即2个网络在相互关联时,拓扑特性相似的节点更倾向于相互对应。其研究结果表明,网络间节点不同的对应关系对2个复杂网络之间的连锁故障的影响并不相同。

现以IEEE 118节点系统和新英格兰39节点系统为例,基于直连锁故障模型,建立了更符合电力系统运行实际的电力网络和通信网络的交互作用模型,并结合复杂网络的相关基本理论,研究了电力系统一次网络节点和其通信网络节点的对应关系对电力系统大停电连锁故障的影响。最后,通过设置网络间不同的内在相似策略,从宏观的角度初步揭示电力系统一次网络节点和通信网络节点的最优对应关系。

1 电力通信系统的仿真

电力系统信息系统通常包括计算、通信、传感三部分,分别用于信息的处理、传输和采集,涉及到的电力系统状态信息和控制信息可能来自发电机组、负荷、储能设备、输电设备等。本文仅考虑电力系统调度过程中主要信息的传输对连锁故障的影响,并

收稿日期:2012-10-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51137003,50977022,60804045);浙江省自然科学基金资助项目(Y1110229)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51137003,50977022,60804045) and the Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China(Y1110229)

不涉及信息的采集和处理。传输的信息包括电力线路的切除信息和调度中心优化调度时产生的调整发电机出力及切除负荷的信息。信息传输的过程大致为:电力一次网络出现线路故障产生线路切除的信息,调度中心接收到线路切除信息后对电力网络进行优化调度,同时将调整发电机出力和切除负荷的信息送往各目标信息节点。

1999年Barabási与Albert构建了无标度(scale-free)网络的复杂网络模型^[6],并且无标度特性广泛存在于各种现实网络中,是复杂网络的一种典型特性,同样文献[3]的研究也表明双星形电力调度数据网也是一个无标度网络。因此假设电力通信网络是规模为 N 的无标度网络,其中 $N-1$ 个节点一一对应电力一次网络节点,另外一个信息节点为调度中心节点。通信网络按照文献[6]的方法生成,即随机选择2个节点和调度中心节点共3个节点两两相连,每次增加1个网络节点,增加的网络节点具有2条边,新增节点的每条边按照 $p(k_i) = k_i / \sum_j k_j$ 连接到节点 i 上, k_i 为网络节点的度数, $\sum_j k_j$ 为已有所有节点的度数总和,直到网络规模增加到 N 为止。

与www网络类似,假设每个信息节点既是一个主机又是一个路由器,即节点在每个时间步都有2个基本的行为:向邻近的1个节点传输1个或多个信息包;从邻近的节点接收1个或多个信息包。在线路切除信息上送至调度中心的过程中,调度中心节点是唯一的目标节点,被切除的线路对应的信息节点为源节点。由于通信网络在建模过程中的信息节点仅与电力一次网络的物理节点相对应,并未跟物理线路一一对应,因此本文对电力一次网络节点进行编号,并假设被切除的线路信息由此线路两端节点编号较小的物理节点对应的信息节点来传输。而在调度中心下达调度命令时,调度中心节点是唯一的源节点,与调度命令相关的信息节点为目标节点。

在信息传输过程中,首先由源节点产生1个或多个包含上述主要信息的信息包。然后在每一个时间步中,如果源节点的邻居中包含有目标节点,则直接与其进行信息交换,完成信息传输过程;否则,信息包所在源节点依照选择概率 P 在其所有的邻居中选择一个节点,将信息传递给该节点,该节点将作为新的“源节点”在下一时间步重复以上过程直至信息包到达目标节点,完成信息传输过程。当信息包到达目标节点时就在网络中自动消失。

概率 P 大小的设定涉及到通信网络中不同路由策略的选择,本文根据文献[9]提出的改进路由策略确定概率 P 。假设源节点 i 的邻居节点的集合为 L_i ,节点 $j \in L_i$ 。定义节点 j 到目标节点的有效距离为:

$$H_j = h_d d_j + (1 - h_d) c_j \quad (1)$$

其中, d_j 为节点 j 到目标节点的最短距离; c_j 为节点 j 上的队列长度; h_d 为路由策略控制系数。当 $h_d=0$ 时,有效距离与节点上的队列长度相等;当 $h_d=1$ 时,有效距离为该节点到目标节点的最短距离。节点 j 被选择为新的源节点的概率 P_j 定义如下:

$$P_j = \frac{e^{-\beta H_j}}{\sum_{m \in L_i} e^{-\beta H_m}} \quad (2)$$

其中, β 为路由概率控制系数。 $\beta=0$ 时邻居节点是被随机选择的; $\beta>0$ 时,有效距离短的节点被选中的概率较大; $\beta<0$ 时,有效距离长的节点被选中的概率较大。显然, $\beta>0$ 的情况更利于信息在通信网络上的传输,故而本文仅考虑 $\beta>0$ 的情况。

设网络中除调度中心节点以外的每个信息节点在每一单位时间步内,只能处理或传递1个信息包。信息传递时应遵循2个基本原则:每一信息节点处的信息包队列长度为无限长,而每个信息节点基于先进先出(FIFO)的原则按照次序传输信息包;路径重复规避原则(PIA),即任何一个节点只能被同一个信息包访问一次。可以通过此原则避免同一信息包在同一条边上反复传输,而降低通信网络的效率。

2 电力网络和通信网络的交互作用模型

2.1 模型简介

考虑到电力系统连锁故障的主要原因是有功潮流的大规模转移和保护的不恰当动作,本文在建立电力网络和通信网络的交互作用模型时的主要思路为:随机断开一条线路,有功潮流出现大规模转移形成部分线路过载,调度中心在收到线路切除信息后对电力系统一次网络进行优化控制以保证每条线路运行在其热极限以下。从线路切除信息的上送到相应电力网络节点收到调度中心的调整信息,系统将完成一次完整的优化控制。但是,当线路潮流大于热稳定极限时,线路的过电流保护装置会动作,其动作时限与线路的潮流大小有关,线路潮流越大,其动作时间越短。因此,当整个优化控制未完成时将可能出现新线路的过载,直接导致优化控制的失效,电力系统将进行下一次的优化控制。在此过程中,通信网络中的信息包数量将会逐步增多,如果形成通信网络的拥塞,那么优化控制命令将不能及时传达到相应节点,这样会进一步加剧连锁故障的传播。

2.2 模型仿真流程

电力网络和通信网络的交互作用模型仿真流程如下。

a. 电力网络和通信网络初始化。包括设定发电机旋转备用 g 和线路冗余 u ,对电力网络进行LP优化,同时清除通信网络的信息包,令单次连锁故障的

持续时间 $t=0$ 。

b. 随机选择一条线路切除形成初始故障,修改实际电气网络参数,并在相应信息节点上产生线路切除信息。

c. 根据实际电气网络参数采用直流法计算线路潮流,判断是否有线路潮流超限,如果存在过载的线路,通过线路的反时限动作特性函数计算所有过载线路的动作时限;否则,退出单次连锁故障仿真。

d. 通信网络按照路由规则完成一个时间步的信息传输, $t=t+1$ 。

e. 查看过载线路中是否存在动作时限小于 t 的线路,如果存在,过负荷保护动作,切除相应线路,同时在相应信息节点上产生线路切除信息,并进入步骤 d; 否则进入下一步。

f. 查看调度中心是否接收到新的线路切除信息,如果收到新的切除信息,则对电力网络进行 LP 优化控制,同时给相应的电网节点下达调度命令,假设调度中心的命令是同时下达的,并在一个时间步内,按照路由规则下达所有控制信息,并进入步骤 d; 否则进入下一步。

g. 判断所有最新的调度命令是否通过通信网络传输到相应电网节点,如果是,单次连锁故障模拟结束,并统计最终损失负荷;否则进入步骤 d。

3 模型参数设定和结果分析

本文选取 IEEE 118 和新英格兰 39 节点系统作为电力系统的一次网络,并结合具有无标度特性的电力通信网络,以此研究 2 个网络之间的交互作用对连锁故障传播的影响。

目前,国内外常用的过电流反时限动作特性曲线由下列函数拟合:

$$t_i = \frac{K}{|I_i/I_{\max}|^{\alpha} - 1} \quad (3)$$

其中, K 为比例系数, K 越大,动作时间 t_i 越长,本文取 $K=7$; I_i 为线路 i 潮流值; I_{\max} 为线路 i 最大潮流值; α 为常数,通常取值 0~2,本文取 $\alpha=0.3$ 。电力系统运行的基本参数为 $g=0.2, u=1.25$ 。

3.1 通信网络路由参数对大停电的影响

为了保证一般性,在研究通信网络路由参数对大停电的影响时,本文首先假设电力网络和通信网络的对应关系是随机的,对应关系对连锁故障的影响将在 3.2 节中阐述。

3.1.1 路由策略控制系数对大停电的影响

路由策略控制系数 h_d 决定了电力系统通信网络的路由策略。通信网络在路由过程中选择下一跳的信息节点时,如果 h_d 从小变大,那么对下一跳节点到目标节点的最短距离的依赖逐渐增强,而对下

一跳信息节点上的信息包队列长度的依赖逐渐减弱。当 $h_d=0$ 时,信息节点的路由概率仅由信息包队列长度决定;而当 $h_d=1$ 时,路由概率由最短距离决定。因此,分别令 h_d 取 0, 0.25, 0.5, 0.75 和 1, β 暂取 5, 在 IEEE 118 节点系统上随机选择一条线路跳开,为保证结果可靠性进行 10 000 次连锁故障仿真。

当 $h_d=0$ 和 $h_d=0.25$ 时,通信网络的路由过程经常出现不满足路径重复规避原则的情况,以致信息无法传输,所以在图 1 中仅列出 h_d 取 0.5, 0.75 和 1 时的负荷损失 x 与累积概率 $P(X>x)$ 分布双对数曲线。

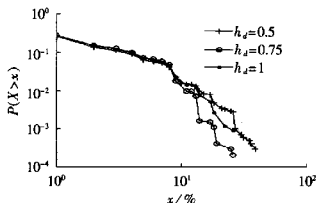


图1 不同路由策略控制系数下负荷损失与概率取双对数的分布曲线

Fig.1 Log-log plots of probability vs. load loss at different h_d

由图1所示,随着 h_d 的增大,小规模停电概率基本没有变化,但是却对大规模停电概率有非常大的影响。当 $h_d=0.75$ 时,连锁故障的大规模停电概率最小,说明此时通信网络的信息传输效率最高,出现拥塞的可能性较低。文献[9]在对单一通信网络研究时也得出相似结论,当 $h_d=0.75$ 时,通信网络路由策略最为恰当,网络传输效率最高。这表明,在信息路由的过程中,信息节点到目标节点的最短路径大小占主导作用,而节点上的信息包排列长度仅起到辅助作用,单独考虑单一因素或者平等对待 2 种因素都是不可取的。特别地,在本文通信网络的模型中信息包的数量比较少,在信息传输过程中,通信网络大部分节点上的信息包的数量都是 0 或者 1,此时如果以信息点上的信息包排列长度为主导,式(2)中每个信息节点对应的指数相差都不大,路由策略是近似随机路由的,所以网络传输效率比较低,进而造成大规模停电概率的增大。因此,当 $h_d=0$ 和 $h_d=0.25$ 时,通信网络的路由处于随机状态,很容易出现不满足路径重复规避原则的情况。

3.1.2 路由概率控制系数对大停电的影响

路由概率控制系数 β 从零到无穷大的变化过程中,路由策略完成由随机到确定的转变,该系数越大,通信网络的路由对式(1)定义的有效距离的依赖越强。分别令 β 取 3.5 和 10, $h_d=0.75$, 其余参数保持不变,在 IEEE 118 节点系统上随机选择一条线路跳开,进行 10 000 次连锁故障仿真,得到负荷损失与累积

概率分布双对数曲线如图2所示。

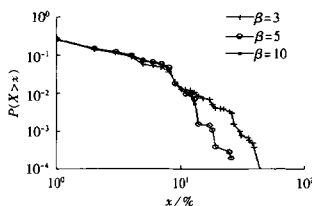


图2 不同路由概率控制系数下负荷损失与概率取双对数的分布曲线

Fig.2 Log-log plots of probability vs. load loss at different β

由图2所示,随着 β 的增大,大规模停电的概率逐渐减小,特别是当 $\beta=10$ 时的负荷损失累积概率曲线与 $\beta=5$ 时的曲线的前段和中段完全重合,但是却没有出现当 $\beta=5$ 时的大规模故障。这表明路由概率控制系数 β 越大,有效距离较短的信息节点被选中作为下一跳节点的概率越大,通信网络传输的效率越高,出现拥塞的可能性越低,大规模连锁故障出现的概率越小。

3.2 网络内在相似性对连锁故障的影响

基于复杂网络理论,网络节点的重要程度可以用度数或者是介数大小来表征,但是因为电力通信网络调度中心节点地位的特殊性,其仅作为最短路径的起点或者是终点,并没有被任何最短路径经过,所以在计算通信网络节点介数时,对通信网络介数的算法进行了改动,即调度中心只能作为最短路径的终点或者起点,而不能作为其中途经过的点,因此调度中心节点的介数等于零。电力一次网络中关于介数的算法并未改变。考虑到文献[8]中关于网络内在相似性的度量方式,本文设置了以下的内在相似策略以寻找网路间的最优对应关系。

首先分别计算电力网络和通信网络的各个节点的度数和介数并排序,假设共有4种网络间的内在相似策略,分别为:

- 电力网络和通信网络按照度数的大小排序一一对应,称为“度数-度数对应”;
- 电力网络和通信网络按照介数的大小排序一一对应,称为“介数-介数对应”;
- 电力网络节点按照介数大小排序,通信网络节点按照度数大小排序,然后按照各自从大到小的顺序一一对应,称为“介数-度数对应”;
- 与c中情况完全相反,称为“度数-介数对应”。

3.2.1 IEEE 118 节点系统

令 $h_d=0.75$ 和 $\beta=10$,分别对上述4种内在相似策略进行10000次连锁故障仿真,得到负荷损失与累积概率分布曲线由图3所示。

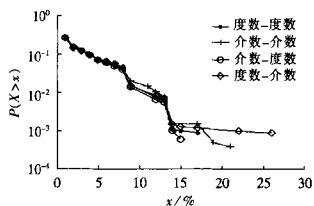


图3 IEEE 118 节点系统不同内在相似策略下概率取对数与负荷损失分布曲线

Fig.3 Log plots of probability vs. load loss at different inter-similarity strategies for IEEE 118-bus system

由图3可以看出,不同的内在相似策略对连锁故障的影响是不同的,所以在考虑2个网络之间的交互影响时必须要考虑它们之间的相互关联的关系。由图所示,“度数-度数”和“介数-度数”的内在相似策略可以更好地减小连锁故障的大规模停电概率,这2种方式的共同点是通信网络都采用的是度数来表征其重要性,信息节点度数越大,信息更容易被分散地传播出去,减少信息拥塞的发生概率。但是,在“介数-度数”的对应方式下大规模停电概率比“度数-度数”对应方式下更小。这表明在研究不同网络交互影响时,电力网络节点的介数相比度数更能表征其重要性。在复杂网络中,与介数最高的电力网络节点相连的输电线路,其线路介数往往也最高。并且,以往的研究表明线路介数大的线路切除更容易引起负荷的大规模转移,所以其切除信息更应该及时上送至调度中心。因此,电力网络介数较大的节点应与度数较大信息节点相对应,以此可以保证电力网络上的重要信息更快地在通信网络上传输。

3.2.2 新英格兰39节点系统

为了验证3.2.1节结论的有效性,本节将电力一次网络替换为新英格兰39节点系统,并随机选择一条线路跳开,分别对上述4种内在相似策略进行1000次连锁故障仿真,得到负荷损失与累积概率分布曲线由图4所示。通信网络按照相同方法生成,其余所有参数均与3.2.1节保持一致。

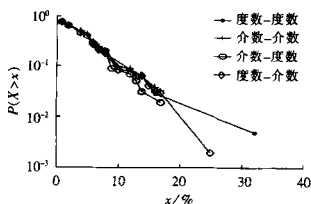


图4 新英格兰39节点系统不同内在相似策略下概率取对数与负荷损失分布曲线

Fig.4 Log plots of probability vs. load loss at different inter-similarity strategies for New England 39-bus system

图4显示,2个网络之间的“介数-度数”相似策略能很好地降低大规模故障的概率,甚至不出现大规模故障,与3.2.1节的结论保持一致。结果表明,当电力网络和通信网络之间拥有“介数-度数”这样对应的内在相似性时,可以有效地降低大规模连锁故障发生的概率,并进一步验证了从宏观角度揭示不同网络之间内在相似性的可行性。

4 结论

本文基于直流连锁故障模型,建立了电力网络和其通信网络的交互作用模型,并结合复杂网络的理论从宏观的角度设置了复杂网络之间的内在相似策略。仿真结果表明,通过设置恰当的路由策略,调整通信网络的相关参数可以提高信息的传输效率,并以此降低大规模连锁故障的概率。而且,不同电力系统下的最优相似策略是相同的,采用此相似策略可以有效地降低大规模连锁故障的概率。本结论初步揭示了电力网络和通信网络的交互作用,验证了从宏观角度揭示不同网络之间内在相似性的可行性,对电力系统及通信网络的规划和设计具有一定指导意义,下一步将进一步完善交互作用模型,深入研究网络间交互影响的机理。

参考文献:

- [1] WATTS D J. Small worlds: the dynamics of networks between order and randomness[M]. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1998.
- [2] 于群,郭剑波. 中国电网停电事故统计与自组织临界性特征[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 16-21.
- YU Qun, GUO Jianbo. Statistics and self-organized criticality characters of blackouts in China electric power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 16-21.
- [3] 胡娟,李智欢,段献忠. 电力调度数据网结构特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 53-59.
- HU Juan, LI Zhihuan, DUAN Xianzhong. Structural feature analysis of the electric power dispatching data network[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 53-59.
- [4] ROSATO V, ISSACHAROFF L, TIRITICO F, et al. Modelling interdependent infrastructures using interacting dynamical models[J]. International Journal of Critical Infrastructures, 2008(4): 63-79.
- [5] BULDYREV S V, PARSHANI R, PAUL G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010(464): 1025-1028.
- [6] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [7] ALBERT R, JEONG H, BARABÁSI A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000(406): 378-382.
- [8] PARSHANI R, ROZENBLAT C, IETRI D, et al. Inter-similarity between coupled networks[J]. Europhys Lett, 2010(92): 68002-68006.
- [9] ECHENIQUE P, COMEZ-CARDENES J, MORENO Y. Improved routing strategies for internet traffic delivery[J]. Physical Review E, 2004(70): 1-4.

作者简介:

曹一家(1969-),男,湖南益阳人,副教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统优化与控制、信息技术在电力系统中的应用(E-mail: yjcao@hnu.cn);

张宇栋(1985-),男,陕西韩城人,博士研究生,主要研究方向为复杂电力系统连锁故障风险和大电网安全分析(E-mail: ydzhang@zju.edu.cn);

包哲静(1974-),女,浙江乐清人,副教授,主要研究方向为复杂系统建模与智能控制(E-mail: zjbao@zju.edu.cn)。

Analysis of cascading failures under interactions between power grid and communication network

CAO Yijia^{1,2}, ZHANG Yudong¹, BAO Zhejing¹

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

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The conventional research on cascading failures in the power system is only limited in the physical power grid, in which interactions between power grid and communication network are seldom considered. With IEEE 118-bus system and New England 39-bus system as examples, the model of interaction between power grid and its communication network in accord with the practical power system is presented based on the DC power flow model. The impact of various routing strategies on the cascading failures of power system is investigated by adjusting the responding parameters of communication network and the inter-similarity between coupled networks is discussed based on the complex network theory. Simulative results indicate that, with proper routing strategy of communication network, the probability of cascading failures of power system can be reduced and the optimal inter-similarity strategy between coupled networks of different power systems is same, which can be adopted to effectively decrease the probability of large-scale blackout.

Key words: electric power systems; communication network; interaction; cascading failures; complex network; inter-similarity; failure analysis