

DOI: 10.7667/PSPC160342

基于自组织临界性的电力异构通信网络稳定性研究

李映雪, 朱文广, 黄超, 熊宁

(江西省电力公司经济技术研究院, 江西 南昌 330043)

摘要: 电力异构通信网络在未来的智能电网中起着重要的作用, 但是其结构复杂, 极易发生大面积网络的瘫痪。针对此问题, 利用复杂网络中的自组织临界性理论, 将电力异构网络按照三角剖分理论划分为多个子区域, 根据各个节点发生关联故障的概率指标, 提出了一种改进的遗传算法。此算法搜索关键的故障网络节点, 对关键的故障网络节点进行维护或切断, 从而使电力异构通信网络处于自组织而远离临界状态, 最终避免了大面积网络瘫痪事件的发生。仿真结果表明, 所提算法在多种网络拓扑结构下具有鲁棒性。

关键词: 电力异构通信网络; 自组织临界性; 关键网络节点; 遗传算法; 复杂网络

Research on power heterogeneous communications network stability with SOC

LI Yingxue, ZHU Wenguang, HUANG Chao, XIONG Ning

(Jiangxi Electric Power Company Economic Research Institute, Nanchang 330043, China)

Abstract: Power heterogeneous communication networks plays an important role in the future smart grid. Due to its complex structure, power heterogeneous communication networks can be easily paralyzed in large-area network. To solve this problem, according to a complex network of self-organized criticality theory, the power of heterogeneous networks using the theory of triangulation is divided into some sub-regions, and according to the each node failures associated probability as metrics, an improved genetic algorithm to search for key network node failures is proposed, and the critical failure network nodes are maintained or cut off, so that the power of heterogeneous communication network is in self-organized and keeps away from critical state, thus avoiding a large area network paralysis event. Simulation results show that the algorithm is of effectiveness and robustness in variety of networks.

Key words: power heterogeneous communications network; self-organized criticality; key network nodes; genetic algorithm; complex network

0 引言

随着能源互联网概念的提出, 特别是智能电网的构建, 电力网络的智能化的地位日益凸显, 其中电力网络智能化的基础是电力通信网络。电力通信网络覆盖范围之广、拓扑结构之复杂以及节点变化之快, 其网络的统计参数符合复杂网络的特征。故不能用一般的网络的随机过程方式进行分析。随着复杂网络理论的发展, 人类对复杂网络认识也逐步更加深刻。复杂网络随着网络规模变大、网络拓扑结构的复杂, 其根据随机几何理论推导, 其拥有许多宏观特性, 如: 小世界理论、自相似性、不可逆性以及自组织临界性 (Self-Organized Criticality, SOC) 等^[1-3], 其中自组织临界性在网络分析中具有不可替代的重要地位。在相关的研究中, 可以得到

电力通信调度数据网络具有网络的复杂性和脆弱性。除了电力通信调度数据网络外, 用于计量采集以及大数据分析的电力异构通信网络, 其网络更为复杂, 其网络更易发生大面积故障。自组织临界性对于分析网络故障, 特别是由于一个微小的故障引起的连锁故障模型, 是有效的理论分析工具, 在电力系统一次网络中, 对于大电力网络的自组织临界性的分析已有相关研究^[4-5]。然而电力通信异构网络的自组织临界性的分析, 以及相关网络安全运行的研究相对较少, 正是基于此问题, 本文拟采用自组织临界性分析电力异构通信网络的稳定性, 根据推导, 找到故障的关联度, 根据故障关联度以及自组织临界性的假设, 分析数据积累驱动预测时间阈值, 判定电力通信异构网络的故障类型以及故障发生关系, 提出避免电力通信异构网络连锁故障的措施,

从而提高电力通信异构网络的稳定性。

电力系统的自组织临界性的相关研究已经很成熟了。文献[6]分析了直流潮流的大停电事故模型,其主要解决的是应用自组织临界性分析直流输电大电网条件下的网络安全,此文从大量电力网络直流数据中按照时间序列的顺序进行分析,用随机几何统计学理论分析和预测电网的故障行为。文献[7]对电力系统的交流特性分析,根据交流数据建立了最优潮流计算模型,根据此数据模型分析系统由于无功功率不足引起的电压崩溃故障,根据电力网络模拟数据对模拟模型进行设计,分为快动态过程和内动态过程,根据此模型分析其自组织临界特性。

电力通信网络,特别是电力异构通信网络,其系统复杂性体现在传输介质多^[8-11],如无线介质、光纤介质、微波介质以及电力线介质;并且分布节点多,包括变电站、电力设备以及部分电线均分布着通信节点;同时需要传输的数据多,包括调度数据,采集数据以及电量计量数据等,故不能用传统的单一模式下的电力通信网络的方法分析。复杂网络为多种介质异构通信网络的分析提供了理论基础,特别是自组织临界性^[12-15],其考虑了异构电力通信网络内在的特点,以动力学和随机几何为理论分析工具,建立自组织临界性模型,根据自组织临界的特点,提出防止连续大面积故障的措施。

1 系统模型

传统的自组织临界性的网络分析中,主要是考虑了最小的故障概率作为分析参数的,然而这不是一个理想的分析参数,本文采用一个二维的阿贝尔沙堆模型,此模型建立在 $L \times L$ 的方形无边界的区域。设在这个面积为 L^2 的区域中,每个单位面积存在数量为 n_i 个网络节点,其中,单位面积区域编号为 $i=1, \dots, L^2$ 。其连接规则为:网络节点增加是随机选择在第 i 个区域,则 $n_i \rightarrow n_i + 1$ 。并且若任意网络面积区域中 $n_i > 1$,则表明网络区域网络分布合理,此时, $n_i \rightarrow n_i - 2$,并且两个节点在最近的区域随机独立的分布, $n_{iN} \rightarrow n_{iN} + 1$ 。按照此规则就可以把长时间条件下电力异构通信网的拓扑结构模型进行构建。

由于电力异构通信网络覆盖面积很大,需要对其的无标度特性进行描述,其度分布函数为

$$P_i(k_i) = C_i k_i^{-\alpha_i} \quad (1)$$

$$P_o(k_o) = C_o k_o^{-\alpha_o} \quad (2)$$

式中: C_i 和 C_o 是归一化常数; k_i 和 k_o 是对于一个网络节点的入度和出度,其取值范围为 $[k_{\min}, \infty)$,

其中 k_{\min} 是出度和入度的最小值。 α_i 和 α_o 是异构网络无标度的指数特性,由于在电力异构通信网络的特性相似,故在本文中假设 $\alpha_i = \alpha_o = \alpha$ 。在本文的模型中,根据网络的基本理论,其整个网络的平均出度和平均入度是相等的。

考虑到网络中的度相关和网络自身的相关程度,可以对描述的电力异构通信网络进行简化,将电力异构通信网络进行随机规则图形划分,每个规则图形之间的节点没有任何联系。在每个规则的图形区域里面,存在 n 个节点,这些节点用有向的边连接,其入度与出度相等,均为固定值 k ,并且 $1 \ll k < n$ 。随机选择两个网络节点,分别是 j 和 j' ,其分别来自于两个规则的区域 u 和 u' ,同时在两个规则的区域 u 和 u' 中随机选择两个不同于 j 和 j' 的网络节点 i 和 i' ,通过有向连线两个网络节点,如果规则区域的有向连线数大于规则区域出度与入度的和,则可以认为异构电力通信网络就有复杂网络的特性,即可以通过自组织临界性进行分析。其标志性的参数一模块度的计算方法为

$$Q = \frac{nk}{nk + v_c - 1} - \frac{1}{v_c} \quad (3)$$

定义异构电力通信网络中,故障相互关联的函数为

$$H(m) = \binom{M}{m} \frac{1}{(N-3)^m} \left(1 - \frac{1}{N-3}\right)^{M-m} \quad (4)$$

式中: m 代表有 m 种关联类型;而 N 代表整个网络的节点数;而 M 是整个网络的节点之间的连线。根据 $H(m)$ 函数,可以有效地判断系统是否处于临界状态。电力异构通信网络发展存在自组织状态、临界状态和耗散状态等过程。在临界状态下,有一个微小的故障,就可能通过连锁效应扩大成影响整个电力异构通信网络的大事故,为了有效防止电力异构通信网络的大面积故障,需要对此网络的状态进行监控。本文提出了一种适合于电力异构通信网络的自组织临界性的遗传算法,通过此算法,可以有效快速地寻找到电力异构通信网络的临界状态。

2 基于自组织临界性的遗传算法

传统的遗传算法进行搜索,是根据变化的均匀因子或者基本因子进行搜索的。并且按照一个方向进行搜索。然而,根据电力异构通信网络中,节点故障发生的概率服从幂律分布。在自组织状态条件下,发生的概率较小,但是演变到临界状态,其出现故障的概率会陡然上升,设每个网络节点发生故障的概率为 p_m ,在电力异构通信网络处于自组织状态时,其概率较小,从而可以准确地确定被划分区

域的节点的故障。当处于临界性，可以通过概率的变大，增大搜索范围，从而有效地增加系统的应变能力，避免系统出现大面积故障。

按照系统模型，构建电力异构通信网络的沙堆模型，根据电力异构网络的拓扑结构以及每个节点的相关函数，可以进行节点故障搜索。为了寻找搜索的起始节点，随机选择起始坐标，其横坐标为 x ，纵坐标为 y ，则此节点可以构建出现故障的路线序列，这个路线是决定搜索的趋势，用 $e(x, y)$ 代表节点数目，其步骤为

步骤 1. 设在方格的节点数值为 $e(x, y)$ ，并且确定临界值为 e_c 。

步骤 2. 随机选择一个方格 $e(x, y)$ ，增加节点，判断是否处于临界值。

$$e(x, y) = e(x, y) + 1 \quad (5)$$

步骤 3. 若 $e(x, y) > e_c$ ，则

$$e(x, y) = e(x, y) - 4 \quad (6)$$

$$e(x \pm 1, y) = e(x \pm 1, y) + 1 \quad (7)$$

$$e(x, y \pm 1) = e(x, y \pm 1) + 1 \quad (8)$$

步骤 4. 存储坐标，形成坐标序列 $N(t)$ 。

根据以上的迭代过程，其搜索的概率确定为

$$p_m(t) = \sigma N^\beta(t) + p_m(t-1) \quad (9)$$

式中： $p_m(t-1)$ 为故障概率； σ 为比例系数； β 为调整因子，此因子可以加速搜索算法的收敛性，其取值范围为 $0 \leq \beta \leq 1$ 。

根据迭代的节点故障概率，对区域内的节点概率进行排序，确定搜索的下一个网络节点，并对此网络节点进行故障进行分析，并根据最近两次节点的故障关联函数 $H(m)$ 的大小，决定两个节点的故障关联度，根据区域内网络节点路径的故障关联度，确定网络所处的状态。

当判断所处状态为自组织状态时，无需对电力异构通信网络进行操作。当处于临界状态时，需要对电力异构通信网络中关联度较大的节点以及业务进行重启操作，防止整个网络出现大面积的通信中断的情况，使得电力异构通信网络远离临界状态，从而为电力系统的通信和操作提供了有力的通信保证。

此算法的关键在于收敛性，若收敛较慢，会延迟网络的操作时间，从而使得整个电力异构通信网络处于自组织临界状态，发生大面积通信中断现象。接下来，本文针对改进的遗传算法的收敛性进行分析，并对其远离临界状态进行分析。

3 收敛性分析

对改进的遗传故障搜索算法收敛性进行分析，首先定义在通信故障类型 C 下发生故障的概率为

$$1 - (1 - p_m(t))^{(C)} \quad (10)$$

在 $p_m(t) \ll 1$ 的条件下，其可以近似等于

$$1 - (1 - p_m(t))^{(C)} \approx \bullet(C) p_m(t) \quad (11)$$

式(11)中表示故障类型的阶数，故在此故障类型的不发生概率为

$$p \approx 1 - \bullet(C) p_m(t) \quad (12)$$

在网络处于自组织状态下， $p_m(t)$ 的数值通常较小，故这种状态下，各个节点保持通信的能力的概率较大；而在临界状态下， $p_m(t)$ 的概率较大，故发生节点保持通信的概率较小，说明整个网络出现瘫痪的可能性增大。

根据迭代过程所提算法，由于每一次迭代到下一次迭代的过程看成一个马尔科夫链，则各次迭代的转移概率与时间无关，故可以认为迭代过程是以转移概率矩阵 P 的齐次马尔科夫链。

设最优状态为 S_0 ，而中间多个非最优状态为 S_n ，则如果收敛于最优状态 S_0 的概率为 1，则经过齐次马尔科夫链的性质可以得到

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P\{P_t \in S_n\} > 0 \quad (13)$$

这与假设的“收敛于最优状态 S_0 的概率为 1”这个条件矛盾，根据反证法，可以得到结论，传统算法收敛于最优状态的概率小于 1。

而针对于本文所提算法，由于对每次搜索的概率进行了修正，特别是加入了式(9)中的比例系数 σ 和调整因子 β ；从而保证了每次迭代过程中，选择的是出现故障概率最大的节点，即

$$p_m(t+1) = \max\{p_m(t), S_0\} \quad (14)$$

从式(14)可以看出，任意状态开始搜索，其转移概率均会大于零，即

$$P(t) = P(0)(P)^t \quad (15)$$

从而可以看出，本文所提算法可以以概率 1 收敛到最优状态。

4 仿真结果

根据电力异构通信网络的特点，其分布范围广、拓扑结构复杂并且分布不均匀，本文通过常见的 3 种分布方式对电力异构通信网络进行仿真，分别是泊松分布、均匀分布以及幂律分布。其中在小范围

内, 电力异构通信网络服从均匀分布, 而在中等范围内, 其网络节点服从泊松分布, 而在大范围内, 网络节点服从幂律分布。

在电力异构通信网络中, 基本采用规则的网络结构, 即临近的通信网络的节点数是耦合网络, 全局网络也是耦合网络。本文从一个含有局部网络构建开始, 逐次展开网络的布局。根据文献[8]的设置, 对随机故障的概率设为 $p = 0.005$, 在电力异构通信网络中, 可以认为网络具有复杂性, 特别是具有无标度性。根据此方法建立一个节点为 300 个的无标度复杂网络的局部观测区域, 其网络的平均度为 5, 度的最大值为 30。为了具有与实际网络一样的特点, 特别是连锁故障的设置, 为 20 000 次, 可以得到平均损失速率与平均断开度的比例值 η 之间的曲线如图 1 所示。

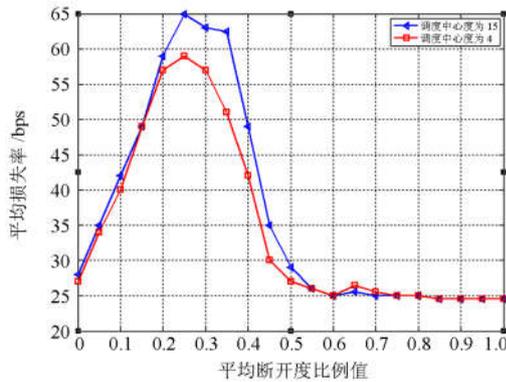


图 1 随机故障下的平均速率损失

Fig. 1 Average rate loss with different scales of edge failures

由图 1 所示, 根据网络通信链接故障比例的增大, 电力通信网络的平均速率损失增大, 特别是在 0.3 附近的情况下, 平均速率损失陡然上升。然而根据自组织临界性设计的遗传算法的处理下, 其平均速率损失逐渐下降到比例较小的水平, 即出去自组织状态, 故达到了控制电力通信网络大面积故障的损失的目的。而没有应用自组织临界性的网络, 其速率损失一直上升, 从而发生了大面积电力异构通信网络瘫痪的事件。

如图 2 所示, 在不同类型的复杂网络和耦合规则网络中, 由于采用了本文所提出的基于自组织临界性改进遗传算法, 能够有效搜索到决定整个系统的网络故障节点, 从而使得整个网络处于自组织状态, 远离临界状态, 可以看到算法具有鲁棒性。故可以得到, 此算法可以有效地避免电力异构通信网络的大面积瘫痪事件的发生。

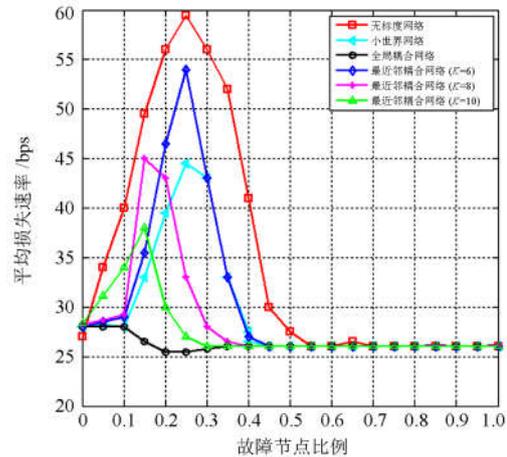


图 2 4 种网络故障控制曲线

Fig. 2 Fault control comparison of four scenarios

5 结论

本文根据复杂网络的自组织临界性, 结合电力异构网络的特点, 提出了一种搜索关键故障节点的改进遗传算法。仿真结果表明, 此算法能够有效避免大面积节点发生连锁故障, 有力保障了网络的正常运行。

参考文献

- [1] 郑涛, 潘玉美, 郭昆亚, 等. 基于免疫算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 77-83.
ZHENG Tao, PAN Yumei, GUO Kunya, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 77-83.
- [2] 高志远, 姚建国, 曹阳, 等. 智能电网发展机理研究初探[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 116-121.
GAO Zhiyuan, YAO Jianguo, CAO Yang, et al. Primary study on the development mechanism of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 116-121.
- [3] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 115-123.
YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 115-123.
- [4] 黎永昌, 王钢, 梁远升, 等. 基于 IEC61850 的电动汽车充电站远动通信建模[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 137-142.

- LI Yongchang, WANG Gang, LIANG Yuansheng, et al. IEC61850-based electric vehicle charging station telecontrol communication information modeling[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 137-142.
- [5] 张栋梁, 谢业华, 刘娟, 等. 基于遗传算法的有源电力滤波器滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 69-74.
- ZHANG Dongliang, XIE Yehua, LIU Juan, et al. Sliding mode control of active power filters based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 69-74.
- [6] MARKOVIĆ D, GROS C. Power laws and self-organized criticality in theory and nature[J]. Physics Reports, 2014, 536(2): 41-74.
- [7] WANG S, HILGETAG C C, ZHOU C. Modular organization enables both self-organized criticality and oscillations in neural systems[M] // Advances in Cognitive Neurodynamics (III). Springer Netherlands, 2013: 207-212.
- [8] ASCHWANDEN M J. A macroscopic description of a generalized self-organized criticality system: astrophysical applications[J]. The Astrophysical Journal, 2014, 782(1): 54.
- [9] 谷云东, 张素杰, 冯君淑. 大用户电力负荷的多模型模糊综合预测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 110-115.
- GU Yundong, ZHANG Sujie, FENG Junshu. Multi-model fuzzy synthetic prediction of large power loads[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 110-115.
- [10] 周斌, 宋艳, 李金茗, 等. 基于多群组均衡协同搜索的多目标优化发电调度[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 181-189.
- ZHOU Bin, SONG Yan, LI Jinming, et al. Multi-objective optimal generation scheduling based on multi-group balanced cooperative search[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 181-189.
- [11] 田中大, 李树江, 王艳红, 等. 基于小波变换的风电场短期风速组合预测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 112-120.
- TAN Zhongda, LI Shujia, WANG Yanhong, et al. Wind-wind combined forecasting of short-term wind speed based on wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 112-120.
- [12] 何科雷, 曾鸣, 乔红. 基于系统动力学的电网投资优化模型研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(12): 62-65.
- HE Kelei, ZENG Ming, QIAO Hong. Study on power network investment optimization model based on system dynamics[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(12): 62-65.
- [13] 郭东, 王佩成, 李亚, 等. 基于多层次模糊评估的配电网节能潜力综合评价方法[J]. 陕西电力, 2015, 43(1): 66-70.
- GUO Dong, WANG Peicheng, LI Ya, et al. Numerical evaluation method for energy saving potential of distribution network based on multi-level fuzzy evaluation[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(1): 66-70.
- [14] 白峪豪. 基于智能配电网关键技术城市配电网规划[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 79-83.
- BAI Yuhao. On urban distribution network planning based on key technologies of intelligent distribution network[J]. Power System & Clean Energy, 2015, 31(3): 79-83.
- [15] 李兆昀, 刘崇新, 燕并男. 基于混沌理论的电力系统谐波检测[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 18-23, 57.
- LIU Zhaoyang, LIU Chongxin, YAN Bingnan. Harmonic detection of power system based on chaos theory[J]. Power System & Clean Energy, 2015, 31(3): 18-23, 57.

收稿日期: 2016-03-15; 修回日期: 2016-06-29

作者简介:

李映雪(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力线通信方面的研究。E-mail: andyzaoster@163.com

(编辑 周金梅)