

# 基于复杂网络理论的电力通信网加边保护策略

刘涤尘<sup>1</sup>, 冀星沛<sup>1</sup>, 陈 果<sup>2</sup>, 王 波<sup>1</sup>, 魏大千<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 悉尼大学 电气与信息学院, 澳大利亚 悉尼 NSW2006)

**摘要:** 基于复杂网络理论, 对华中电力通信网进行了网络建模和拓扑统计特性分析, 得出华中电力通信网是一个典型的无标度网络的结论。其结构特点造成华中电力通信网对随机攻击具有较强的鲁棒性, 而在蓄意攻击尤其是高介数节点攻击下十分脆弱。针对华中电力通信网的结构特点, 从连通脆弱性和网络效率 2 个角度, 对比了随机加边策略、低度数节点加边策略、低介数节点加边策略和代数连通性加边策略对华中电力通信网鲁棒性的影响, 研究表明: 上述加边策略可以有效地提高华中电力通信网的鲁棒性, 低度数节点加边策略在保护效果及计算效率上明显优于其他 3 种策略。

**关键词:** 复杂网络; 电力通信网; 加边策略; 脆弱性; 连通性; 网络效率

**中图分类号:** TM 712

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.10.018

## 0 引言

电力系统实时监测的发展趋势与精细化控制的业务需求, 使得一次电网更加依赖于电力通信网的可靠运行<sup>[1-3]</sup>。近年来发生多次大停电事故, 如 2003 年北美大停电<sup>[4]</sup>、意大利大停电<sup>[5]</sup>、2004 年罗马大停电<sup>[6]</sup>, 其间通信系统的故障都起了推波助澜的作用。研究电力通信网的脆弱性并提出针对性的保护措施具有重要的理论价值与现实意义。

针对电力通信网的保护, 目前主要有以下 2 种思路。

(1) 第一种思路以现有的电力通信业务为研究重点, 通过更新硬件设备<sup>[7]</sup>、优化软件系统<sup>[8]</sup>、建立合理的安全评估指标<sup>[9]</sup>等策略提高其可靠性。文献<sup>[10]</sup>针对电力通信网中业务分布不均衡的问题, 提出了面向业务的风险均衡路由分配机制以降低通道段和网络整体风险。文献<sup>[11]</sup>基于业务平均风险度和业务风险均衡度, 提出了一种基于电力通信网可靠性的业务路由分配优化算法。文献<sup>[12]</sup>针对电力通信网安全评估指标中专家打分的不确定性问题, 提出了一种基于电力业务重要度的电力通信网业务层脆弱性分析方法。

(2) 第二种思路基于网络理论, 通过优化电力通信网的拓扑改善其结构脆弱性。文献<sup>[13]</sup>提出了基于节点重要度的平衡度网络拓扑优化算法。文献<sup>[14]</sup>对调度数据网的拓扑特性进行了研究并指出现有的调度数据网大致可分为双星形和网状 2 种典型结构, 双星形网是典型的无标度网络, 而网状网是典型的小世界网络。文献<sup>[15]</sup>基于复杂网络理

论, 从网络效率的角度评估了电力通信网的脆弱性。

拓扑是电力通信网最直观、本质的属性, 通信业务的有效传输建立在可靠的物理网络基础上。除此之外, 由于电力通信业务种类繁多、运行方式复杂, 拓扑脆弱节点更容易成为攻击对象。基于复杂网络理论, 可以有效地识别电力通信网固有的结构脆弱性并提出针对性的保护策略。虽然已有学者提出了通过增加多条地理上相互独立的线路以改善网络脆弱性的思路<sup>[16-18]</sup>, 但是缺乏对各种加边策略的对比研究且其有效性尚未在实际电力通信网中得到检验。电力系统长期重一次侧轻二次侧, 对一次电网的拓扑结构已进行了较为充分的研究<sup>[19-22]</sup>, 而对实际电力通信网尤其是区域级电力通信网的拓扑结构尚不清楚。因此, 有必要对电力通信网的拓扑结构进行深入分析, 并对现有加边策略的有效性进行对比研究。

借鉴复杂网络的已有成果, 本文以华中电力光传输网为研究对象, 分析了其网络结构特性, 并从连通性和网络效率的角度分析了电力通信网在随机故障和蓄意攻击下的脆弱性。针对华中电力通信网的结构特点, 对比了随机加边 RA (Random Addition) 策略、低度数节点加边 LBA (Low Betweenness nodes link Addition) 策略和代数连通性加边 ACB (Algebraic Connectivity Based link addition) 策略对网络鲁棒性的影响。

## 1 电力通信网拓扑统计特征

本节基于复杂网络理论, 首先对电力通信网的建模过程进行了解释, 然后对表征电力通信网复杂网络特性的统计参数以及小世界、无标度网络特性进行了说明。

### 1.1 电力通信网建模

中国的电力通信网是服务于一次电网的专网, 与

公共通信网物理隔离。由于各厂站内部通信设备的部署与连接情况难以获取且站点间存在差异,本文从简化分析的角度出发,以厂站级为研究单位并根据获取的电力通信网地理接线图进行如下假设。

a. 除重庆市电力通信网外(包含 110 kV 电力通信网),其他省市只考虑 220 kV 及以上高压输电网的通信系统,不考虑配电网的通信系统。

b. 按照功能区分,电力通信网中包含 2 类节点:各厂站(包含发电厂、变电站、换流站)的通信节点和各级调度中心的通信节点。

c. 将站点之间的通信线路(光纤复合架空地线(OPGW)光缆、全介质自承式(ADSS)光缆等)建模为电力通信网的边,忽略通信线路间的差异且认为通信线路双向通信,即认为所有边为无向边。

d. 合并同一方向上的多条通信线路以消除多重边和自环。

e. 忽略华中电力通信网与其邻接省份电力通信网间的联络线。

基于以上假设,华中电力通信网可以表示为一个无权无向图  $G_c=(V,E)$ ,其中  $V=\{1,2,\dots,N\}$  表示网络的节点集, $E=\{e_{ij}\}$  表示网络的边集合。 $A=\{a_{ij}\} \subset \mathbf{R}^{N \times N}$  为电力通信网的邻接矩阵,且  $a_{ij}=1 \Leftrightarrow e_{ij}=(i,j) \in E$ ,如果 2 个电力站间不存在通信线路,则  $a_{ij}=0$ 。

## 1.2 电力通信复杂网络的基本概念

a. 节点数  $N$  表示通信站点数目。

b. 边数  $M$  表示通信线路数目。

c. 平均度数  $\langle K \rangle = 2M/N$ ,表示平均每个节点连接的通信线路数,反映了网架的强度。

d. 特征路径长度  $L$ :最短路径算法下,电力通信网中任意 2 个站点间进行通信所需的平均跳数。

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

其中, $N$  为通信站点数目; $d_{ij}$  为在最短路径算法下,节点  $i$  到节点  $j$  所经过的节点的数目。

e. 聚集系数  $C$  描述节点与其邻接节点之间相互连接的程度。节点  $i$  的局部聚集系数表示为:

$$C(i) = \frac{\lambda(i)}{\lambda(i) - \tau(i)} \quad (2)$$

其中, $\lambda(i)$  与  $\tau(i)$  分别为与节点  $i$  相连的闭三角数与开三角数。

网络的全局聚集系数  $C^{[23]}$  等于所有节点局部聚集系数的平均值:

$$C = \sum_{i=1}^N C(i) / N \quad (3)$$

f. 节点介数  $B$  为网络中所有最短路径中经过该节点的路径的数目占最短路径总数的比例<sup>[24]</sup>,用

于评估站点承担储存、转发信息的业务量。

## 1.3 小世界特性和无标度特性

小世界网络是介于规则网络与随机网络之间的一个网络模型,网络小世界特性的判断标准为:

$$\begin{cases} L \geq L_{\text{random}} \\ C \gg C_{\text{random}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} C_{\text{random}} \approx \langle K \rangle / N \\ L_{\text{random}} \approx \ln N / \ln(\langle K \rangle) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $L$  为特征路径长度; $C$  为网络的聚集系数; $C_{\text{random}}$  和  $L_{\text{random}}$  分别为随机网络的特征路径长度和聚集系数。

网络的无标度特性<sup>[25]</sup>指节点的度分布服从幂律分布的特性:

$$P(k) = ck^{-\lambda} \quad (6)$$

其中, $P(k)$  为网络中节点度数为  $k$  的节点所占的比例; $c$  为系数; $\lambda$  为幂律值。

## 2 华中电力通信网复杂网络特性分析

本节对华中 220 kV 及以上电压等级的电力光传输网的复杂网络特性进行分析。其中,重庆市包含 110 kV 电力光传输网。

基于复杂网络理论,对华中电力通信网的拓扑统计参数进行了计算,结果见表 1。由表 1 可知,华中电力通信网的网架建设相对薄弱:平均度数  $\langle K \rangle$  略大于 2,仅仅维持了电力通信网基本的连通需求,在中长期规划过程中值得注意。根据式(4)、(5)和表 1 可以判定华中电力通信网具有小世界特性。

表 1 华中电力通信网拓扑特征参数

Table 1 Characteristic parameters of CCPCN topology

特征参数	参数值	特征参数	参数值
$N$	1436	$L_{\text{random}}$	6.97
$M$	2037	$C$	0.158
$\langle K \rangle$	2.84	$C_{\text{random}}$	0.002
$L$	12.66		

网络的度分布特性直接影响其结构脆弱性:随机网络的度分布服从泊松分布,在随机攻击和蓄意攻击下都具有较强的鲁棒性,无标度网络在随机攻击下表现出较强的鲁棒性,而在蓄意攻击下十分脆弱并表现出有效节点比例陡降的现象<sup>[26]</sup>。因此,有必要对华中电力通信网度分布特性进行深入研究。图 1 描述了华中电力通信网在双线性坐标下的度数分布概率曲线。由图可知,华中电力通信网具有无标度网络的特征,即具有大量的低度数节点与少量的高度数节点,且节点度数大于 1 时,节点的度数分布概率随节点度数的增加而急剧减小。

采用最小二乘拟合度数大于 1 时的度分布曲线

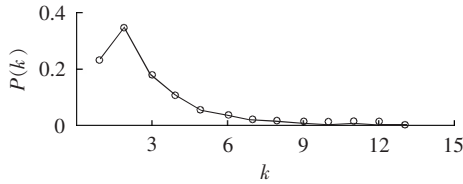


图 1 双线性坐标下的华中电力通信网节点度分布

Fig.1 Node degree distribution of CCPCN in linear-linear coordinates

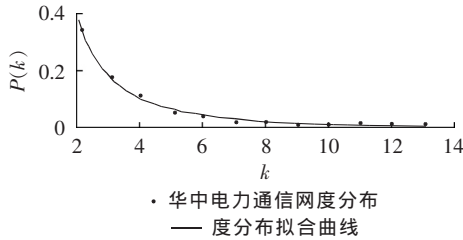


图 2 华中电力通信网度分布拟合曲线

Fig.2 Fitted curve of CCPCN node degree distribution

(如图 2 所示), 得到其度分布函数为:

$$P(k) = 1.147k^{-1.64} - 0.021 \quad k > 1 \quad (7)$$

式(7)表明, 当  $k > 1$  时, 华中电力通信网的度分布可等效为幂律值为  $-1.64$  的无标度网络。

### 3 脆弱性分析

本节首先基于复杂网络理论, 从连通性和网络效率 2 个角度对比了华中电力通信网在随机攻击、高度数节点攻击和高介数节点攻击模式下的脆弱性; 然后针对其结构特点, 评估了 RA 策略、LDA 策略、LBA 策略和 ACB 策略对网络脆弱性的影响。

本文将电力通信网的脆弱性定义为电力通信网在遭受攻击或故障下能够继续提供服务的能力, 并从连通性和网络效率 2 个角度进行评估。定义  $f_a$  为故障节点占网络节点总数的百分比:

$$f_a = N_f / N \times 100\% \quad (8)$$

其中,  $N_f$  和  $N$  分别为故障节点的数目和电力通信网的节点数。

为了对攻击策略进行模拟, 文中设定了以下 3 种攻击模式。

a. 随机节点攻击模式: 随机选择并移除一定比例的节点。

b. 高度数节点攻击模式: 计算网络各节点的度数并进行排序, 选择并移除一定比例的高度数节点。

c. 高介数节点攻击模式: 计算网络各节点的介数并进行排序, 选择并移除一定比例的高介数节点。

#### 3.1 脆弱性评估

站点之间的连通是保障彼此间能够进行通信的最基本要求。连通脆弱性以最大连通子集中的节点数与网络节点总数之比  $G$  为指标, 评估了电力通信网在遭受攻击或故障下网络的最大连通能力。华中

电力通信网络的最大连通子集如图 3 所示。

$$G = N' / N \quad (9)$$

其中,  $N$  和  $N'$  分别为攻击前和攻击后最大连通子集中的有效节点数目。

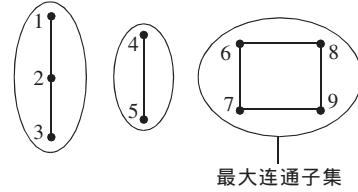


图 3 华中电力通信网解列后的 3 个区域

Fig.3 Three regions of split CCPCN

连通脆弱性仅仅从拓扑的角度评估了通信网的最大连通能力, 并没有考虑故障对通信业务的影响。如图 3 所示, 电力通信网在攻击下解列为 3 个相互独立的连通区域, 区域之间的通信虽然中断, 但各区域内的通信站点仍可保障部分业务的正常运行。

实时性是电力通信网最重要的指标之一, 厂站间的通信延时取决于经过站点的数目与通信线路的长度。网络效率  $E$  用于评估电力通信网在遭受攻击或故障时各厂站之间进行通信的效率, 网络的相对效率  $R$  用于评估网络效率的下降趋势。

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (10)$$

$$R = E / E_0 \quad (11)$$

其中,  $E_0$  为原网络的网络效率值。

图 4 为华中电力通信网连通脆弱性及网络效率脆弱性评估结果。图 4 表明: 华中电力通信网对随机节点攻击具有较强的鲁棒性, 而在蓄意攻击下十分脆弱, 且连通鲁棒性和相对网络效率存在陡降现象。以连通脆弱性为例, 在高介数节点攻击模式下破坏 1% 的节点 (即 14 个节点), 华中电力通信网的有效节点比例竟降至约 46%; 在高度数节点攻击模式下破坏 3% 的节点, 华中电力通信网的有效节点比例下降至约 35%。这反映了高度数节点与高介数节点在维持网络鲁棒性上具有极其重要的作用。

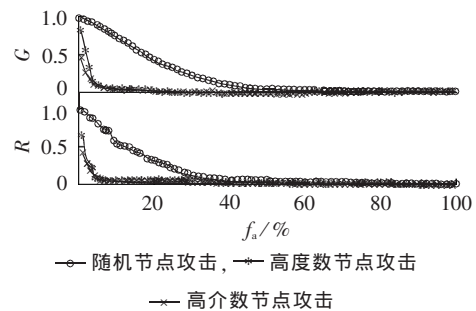


图 4 华中电力通信网连通脆弱性及网络效率脆弱性评估结果

Fig.4 Results of connectivity vulnerability and efficiency vulnerability evaluation for CCPCN



### 3.2 加边保护策略研究

由图1和表1可知,华中电力通信网的平均度数较小且具有大量的低度数节点。低度数节点对于维持故障下的鲁棒性具有消极影响。因此,可以考虑通过增加多条地理上独立的通信线路以提高网络的鲁棒性。定义 $f_M$ 为加边率:

$$f_M = M' / M \times 100\% \quad (12)$$

其中, $M'$ 为加边数量; $M$ 为原网络的边数。

本文主要研究了4种加边策略。

**a. RA 策略:**随机选择网络中的2个节点并增加1条边,不允许出现自环或重边。重复上述算法直至达到规定的加边数。

**b. LDA 策略:**对网络的节点度数进行计算,选择2个最低度数的节点并增加1条边,不允许出现自环或重边。重复上述算法直至达到规定的加边数。

**c. LBA 策略:**对网络的节点介数进行计算,选择2个最低介数的节点并增加1条边,不允许出现自环或重边。重复上述算法直至达到规定的加边数。

文献[18]指出,代数连通度对网络的鲁棒性具有重要影响。网络的鲁棒性与其拉普拉斯矩阵对应的第二小特征根的值 $\lambda_2$ 有关联,且 $\lambda_2$ 越大,网络越健壮。 $\lambda_2$ 对应的特征根向量称为Fiedler向量。

**d. ACB 策略:**求解网络的Fiedler向量,并选取Fiedler向量元素中绝对值之差最大时对应的2个节点,在该节点间增加1条边。重复上述算法直至达到规定的加边数。

增加通信线路固然可以提高电力通信网的鲁棒性,但是需要付出较大的经济代价,出于对经济成本的考虑,本文研究了 $f_M = 20\%$ 时上述加边策略对电力通信网鲁棒性的影响。

图5对比了随机攻击模式下4种加边策略对华中电力通信网连通脆弱性和网络效率的影响。由图5可知,4种加边策略的效果近似,且RA策略在故障节点比例 $f_a > 30\%$ ,即故障节点数目大于341时略优于其他3种加边策略。由于同时摧毁300多个节

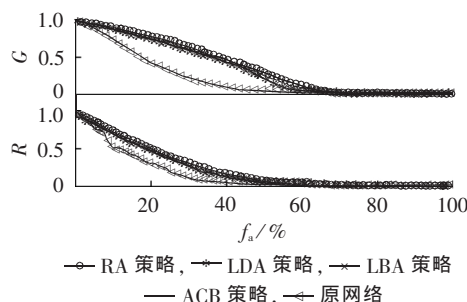


图5 在随机攻击下,采用不同加边策略后的华中电力通信网连通脆弱性及网络效率脆弱性对比

Fig.5 Comparison of connectivity vulnerability and efficiency vulnerability among different link addition modes for CCPCN under random attack

点不现实,因此,可认为4种加边策略在随机攻击下保护效果近似。

图6对比了在高介数节点攻击模式下4种加边策略对华中电力通信网连通脆弱性和网络效率的影响。由图6可知,在高介数节点攻击模式下,4种加边策略均可以有效地改善原网络有效节点比例及网络效率陡降的现象。加边策略效果对比方面,LDA与LBA策略效果近似且优于其他2种加边策略,而在故障节点比例 $f_a < 30\%$ 时,LDA策略的效果略优于LBA策略,可表示为 $LDA \approx LBA > ACB > RA$ 。

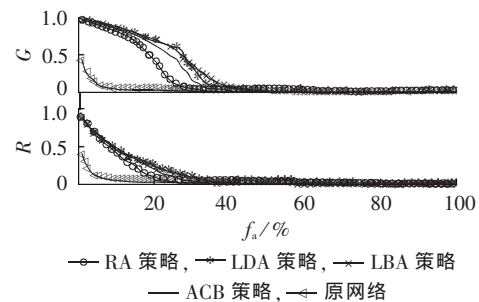


图6 在高介数节点攻击下,采用不同加边策略后的华中电力通信网连通脆弱性及网络效率脆弱性对比

Fig.6 Comparison of connectivity vulnerability and efficiency vulnerability among different link addition modes for CCPCN under high betweenness node attack

图7对比了在高度数节点攻击模式下4种加边策略对华中电力通信网连通脆弱性和网络效率的影响。由图7可知,在高度数节点攻击模式下,对连通脆弱性而言,4种加边策略的效果排序为 $LDA \approx ACB > LBA > RA$ ;对网络效率而言,4种加边策略的效果排序为 $ACB \geq LDA \approx LBA > RA$ 。即LDA策略与ACB策略优于其他2种加边策略。

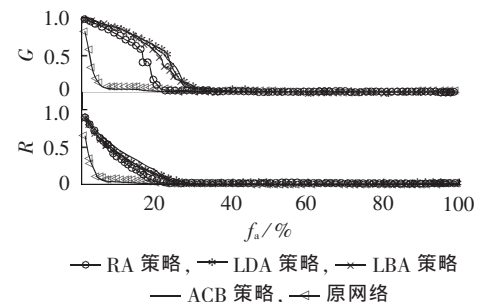


图7 在高度数节点攻击下,采用不同加边策略后的华中电力通信网连通脆弱性及网络效率脆弱性对比

Fig.7 Comparison of connectivity vulnerability and efficiency vulnerability among different link addition modes for CCPCN under high degree node attack

通过对上述4种加边策略在随机节点攻击、高介数节点攻击和高度数节点攻击模式下进行对比,可以得出如下结论。

**a. 通过增加通信线路可以有效地提高电力通信网的鲁棒性,且可以避免有效节点比例及网络效率**

陡降的现象。

b. 各种加边策略在不同攻击模式下互有优劣;在高介数节点攻击模式下,LDA 与 LBA 策略效果最好;在高度数节点攻击模式下,LDA 与 ACB 策略最好。因此,整体而言,LDA 策略在不同攻击模式下均具有较好的适应能力。

c. 相比 LBA 策略与 ACB 策略,LDA 策略的计算复杂度更小。

#### 4 结论

本文基于复杂网络理论,对华中电力通信网的网络结构特性进行了分析,并从连通性和网络效率的角度对电力通信网的脆弱性进行了研究。针对电力通信网的结构脆弱性,对比了 RA 策略、LDA 策略、LBA 策略和 ACB 策略对电力通信网鲁棒性的影响,并得出以下结论。

a. 华中电力通信网具有小世界特性,且当其节点度数大于 1 时,其度分布符合无标度网络的特点。正是这种结构特点,造成了华中电力通信网在随机节点攻击下具有较强的鲁棒性,而在蓄意攻击下,尤其是高介数节点攻击下十分脆弱,破坏具有最高介数值的 14 个节点后,有效节点比例下降至约 46%,相对网络效率下降至约 42%。因此,应对此类节点的保护予以格外重视。

b. 通过在不同攻击模式下对上述 4 种加边策略的效果进行对比发现:通过增加多条地理上相互独立的通信线路可以有效地提高电力通信网的鲁棒性,尤其可以改善华中电力通信网在蓄意攻击下有效节点比例和相对网络效率陡降的现象。

c. 低度数节点加边策略在实际保护效果及计算复杂度上均优于其他 3 种加边策略。上述结论对于电力通信网的规划与改造具有一定的指导意义。

#### 参考文献:

- [1] LU Xiang,WANG Wenye,MA Jianfeng. An empirical study of communication infrastructures towards the smart grid:design, implementation,and evaluation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2013,4(1):170-183.
- [2] 曹一家,张宇栋,包哲静. 电力系统和通信网络交互影响下的连锁故障分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):7-11.  
CAO Yijia,ZHANG Yudong,BAO Zhejing. Analysis of cascading failures under interactions between power grid and communication network[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(1):7-11.
- [3] ANCILLOTTI E,BRUNO R,CONTI M. The role of communication systems in smart grids:architectures,technical solutions and research challenges[J]. Computer Communications,2013,36(17-18):1665-1697.
- [4] VESPIGNANI A. Complex networks:the fragility of interdependency[J]. Nature,2010,464(7291):984-985.
- [5] BULDYREV S V,PARSHANI R,PAUL G,et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature,2010,464(7291):1025-1028.
- [6] BOBBIO A,BONANNI G,CIANCAMERLA E,et al. Unavailability of critical SCADA communication links interconnecting a power grid and a Telco network[J]. Reliability Engineering & System Safety,2010,95(12):1345-1357.
- [7] 周静,吕天光,陈希,等. 省级电力调度数据网带宽分析与容量规划研究[J]. 电网技术,2012,36(5):173-177.  
ZHOU Jing,LÜ Tianguang,CHEN Xi,et al. Study on bandwidth analysis and capacity planning of provincial dispatching digital network[J]. Power System Technology,2012,36(5):173-177.
- [8] 蔡伟,杨洪,熊飞,等. 考虑电力通信网可靠性的业务路由优化分配方法[J]. 电网技术,2013,37(12):3541-3545.  
CAI Wei,YANG Hong,XIONG Fei,et al. An optimized service routing allocation method for electric power communication network considering reliability[J]. Power System Technology,2013,37(12):3541-3545.
- [9] 苑津莎,高会生,孙逸群,等. 电力光纤通信网的安全性评估指标体系[J]. 高电压技术,2009,35(4):960-964.  
YUAN Jinsha,GAO Huisheng,SUN Yiqun,et al. Security evaluation indicator system for electric optical-fiber communication network[J]. High Voltage Engineering,2009,35(4):960-964.
- [10] 曾庆涛,邱雪松,郭少勇,等. 基于风险均衡的电力通信业务的路由分配机制[J]. 电子与信息学报,2013,35(6):1318-1324.  
ZENG Qingtao,QU Xuesong,GUO Shaoyong,et al. Risk balancing based routing mechanism for power communications service[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2013,35(6):1318-1324.
- [11] 蔡伟,杨洪,熊飞,等. 考虑电力通信网可靠性的业务路由优化分配方法[J]. 电网技术,2013,37(12):3541-3545.  
CAI Wei,YANG Hong,XIONG Fei,et al. An optimized service routing allocation method for electric power communication network considering reliability[J]. Power System Technology,2013,37(12):3541-3545.
- [12] 樊冰,唐良瑞. 电力通信网脆弱性分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(7):1191-1197.  
FAN Bing,TANG Liangrui. Vulnerability analysis of power communication network[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(7):1191-1197.
- [13] 施继红,宗容,刘宇明,等. 电力通信网的抗毁性和拓扑优化研究[J]. 电力系统通信,2009,30(9):11-13.  
SHI Jihong,ZONG Rong,LIU Yuming,et al. Study on the invulnerability and topology optimization of power communication network[J]. Telecommunications for Electric Power System,2009,30(9):11-13.
- [14] 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. Transmission characteristics analysis of the electric power dispatching data network[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(4):53-59.
- [15] 郭静,王东蕊. 基于复杂网络理论的电力通信网脆弱性分析[J]. 电力系统通信,2009,30(9):6-10.  
GUO Jing,WANG Dongrui. Vulnerability analysis on power communication network based on complex network theory[J]. Telecommunications for Electric Power System,2009,30(9):

- 6-10.
- [16] BEYGELZIMER A, GRINSTEIN G, LINSKER R, et al. Improving network robustness by edge modification[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2005, 357(3): 593-612.
- [17] JIANG Z, LIANG M, GUO D. Enhancing network performance by edge addition[J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2011, 22(11): 1211-1226.
- [18] SYDNEY A, SGOGLIO C, GRUENBACHER D. Optimizing algebraic connectivity by edge rewiring[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2013, 219(10): 5465-5479.
- [19] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. *电力自动化设备*, 2006, 26(12): 1-5.  
CAO Yijia, CHEN Xiaogang, SUN Ke. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2006, 26(12): 1-5.
- [20] 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.  
MENG Zhongwei, LU Zongxiang, SONG Jingyan. Comparison analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2004, 28(15): 21-24.
- [21] 史进, 涂光瑜, 罗毅. 电力系统复杂网络特性分析与模型改进[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(25): 93-98.  
SHI Jin, TU Guangyu, LUO Yi. Complex network characteristic analysis and model improving of the power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(25): 93-98.
- [22] 曹一家, 王光增, 包哲静, 等. 一种复杂电力网络的时空演化模型[J]. *电力自动化设备*, 2009, 29(1): 1-5.  
CAO Yijia, WANG Guangzeng, BAO Zhejing, et al. Temporal and spatial evolution model of power grid[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2009, 29(1): 1-5.
- [23] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of small-world networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [24] GUAN Z L, QIAN T. Routing in scale-free networks based on expanding betweenness centrality[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2011, 390(6): 1131-1138.
- [25] AACUTE B, SI A. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [26] ALBERT R, JEONG H, BARABASI A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. *Nature*, 2000, 406(6794): 378-382.

#### 作者简介:



刘涤尘

刘涤尘(1953—),男,湖北红安人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统通信、电力电子技术应用等;

冀星沛(1988—),男,河南许昌人,博士研究生,研究方向为复杂网络理论、电力系统通信技术等(E-mail: jixing1988@gmail.com)。

## Link addition strategy based on complex network theory for power communication network

LIU Dichen<sup>1</sup>, JI Xingpei<sup>1</sup>, CHEN Guo<sup>2</sup>, WANG Bo<sup>1</sup>, WEI Daqian<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, The University of Sydney, Sydney NSW2006, Australia)

**Abstract:** Based on the complex network theory, a network model of CCPCN (Central China electrical Power Communication Network) is built and its topological characteristics are analyzed, which shows that CCPCN is a typical scale-free network, being robust to random failures but vulnerable to deliberate attacks, especially the high betweenness node attack. According to the structural features of CCPCN, the impact of link addition strategy on its robustness is compared in the aspects of connectivity and network efficiency among four modes, i.e. random link addition, low degree link addition, low betweenness link addition and algebraic connectivity based link addition. Results show that, the link addition strategy can effectively improve the robustness of CCPCN, and the low betweenness link addition is superior to other three modes in the aspects of protective effect and computing efficiency.

**Key words:** complex network; electrical power communication network; link addition strategy; vulnerability; connectivity; network efficiency