

基于小世界网络的电网连锁故障实时搜索系统

郑阳¹, 刘文颖¹, 温志伟², 平德明²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206;

2. 甘肃电力科学研究所, 甘肃省 兰州市 730000)

A Real-Time Searching System for Cascading Failures of Power Grids Based on Small-World Network

ZHENG Yang¹, LIU Wen-ying¹, WEN Zhi-wei², PING De-ming²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 2. Electric Power Research Institute of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu Province, China)

ABSTRACT: Based on small-world characteristics, the spreading mechanism of cascading failure in power network is analyzed. Experiment results show that due to the long-range connectivity the cascading failure spreads in wider range and deeper extent, thus the long-range connectivity intensifies the spreading of cascading failure. On this basis, a real-time searching system of cascading failure, in which the priority module is utilized to rapidly and effectively search the springhead of the cascading failure from the massive real-time data acquired by WAMS, is built. The effectiveness and correctness of the proposed method are verified by cases.

KEY WORDS: cascading failures; small-world network; long-range connectivity; real-time searching; power grid

摘要: 基于小世界特性分析了电网连锁故障的传播机制,指出长程连接的出现增加了故障传播的广度和深度,从而对连锁故障的传播起到推动作用。以此为基础,建立了连锁故障实时搜索系统。采用优先级模块可从广域测量系统采集到的海量实时数据中,快速有效地搜索到故障源头。实例验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: 连锁故障; 小世界网络; 长程连接; 实时搜索; 电网

0 引言

电网的大规模互联提高了经济性,但也使电力系统运行的安全性和可靠性不断受到新的挑战。自美加“8.14”大停电等^[1]以来,国内外对连锁故障的分析和研究一直很重视。目前的研究主要在2方面进行:一是通过模拟连锁故障过程,解释连锁故障的发生机制。文献[2-3]基于 Monte Carlo 算法,提出考虑继电保护隐性故障模型的搜索方法; OPA

模型^[4]、DCfuse 模型^[5]等,则是通过不断进行潮流计算,得到并断开潮流越限的线路来模拟电力系统中连锁故障的发展过程;文献[6]将物理学中的自组织临界理论应用到电力系统中,得出了事故规模与事故发生的概率成幂律特性的结论;文献[7]提出了小世界模型并验证了美国西部电网是个小世界网络,对巴西电网和中国电网也有类似的分析^[8-9]。二是利用概率分析模型对连锁故障进行风险评估,找到系统的薄弱环节,从而预防连锁故障的发生。文献[10]提出了一种复杂电力系统连锁故障的风险评估方法;文献[11]建立了一种电网连锁故障的概率分析方法。

然而以上模型分析方法不能适应现实电网瞬息万变的故障情况。随着广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)的普遍应用,如何利用其数据进行实时分析控制已成为研究重点。本文将分析电网的小世界特性,建立基于 WAMS 的连锁故障实时搜索程序。该程序可从 WAMS 采集到的海量数据中由电压最低节点,快速有效地搜索到故障源头,即初始故障发生的地点,为电力系统运行人员提供有力的决策支持。

1 基于小世界网络的连锁故障传播机制

1.1 小世界网络

小世界网络是一种介于规则网络与随机网络之间的网络模型。对规则网络中的每一个节点,以概率 p 断开与其连接的边,并从网络中的其他节点随机选择进行重新连接,则形成小世界网络^[12]。随机重新连线的过程如图 1 所示。

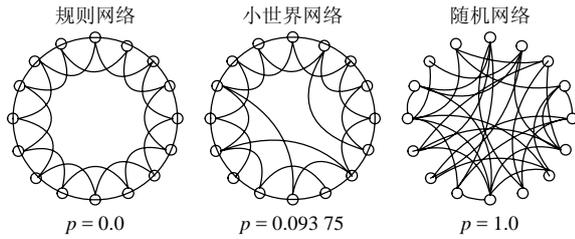


图 1 小世界网络随机连线过程

Fig. 1 The random connecting process of small-world network

进行重连的线路称为长程连接。由图可见，长程连接缩短了两节点之间的距离，使小世界网络同时具备大的聚类系数 C 和小的平均距离 L ^[13]。因此验证一个网络是否为小世界网络的标准如下：

$$\begin{cases} C \gg C_{\text{random}} \\ L \geq L_{\text{random}} \end{cases} \quad (1)$$

式中 C_{random} 和 L_{random} 分别为与小世界网络具有相同节点数和平均度数的随机网络的聚类系数和平均距离。小世界网络的聚类系数远大于随机网络，平均距离略大于随机网络。

1.2 中国某区域电网的小世界特性验证

文献[7-8]分别验证了美国西部电网、巴西电网是小世界网络。本文对中国某区域电网进行分析，考察其是否具有小世界网络特性。

在电网的拓扑模型中，用稀疏的连通图表示电网的拓扑结构，图中的节点代表实际电网中的发电厂和变电站，边代表实际电网中的高压线路，边的权值为电网中各输电线路的阻抗^[14]。该区域电网的拓扑图，如图 2 所示，其中粗线为长程连接。

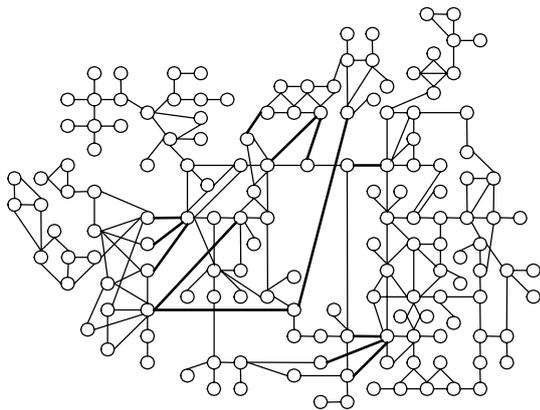


图 2 2008 年中国某区域电网网络拓扑

Fig. 2 The network topology of a regional power grid of China in 2008

根据复杂网络理论中的定义，描述网络性质的几个基本量^[15]如下：

1) 聚类系数 C 。聚类系数是一个衡量网络节点聚集程度的概念。设网络共有 n 个节点，其中某

一节点 i 有 k_i 个节点与其相连， k_i 个节点之间现存在 t_i 条边，定义 $C_i = 2t_i / (k_i(k_i - 1))$ 为节点 i 的聚类系数。则整个网络的聚类系数为

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2t_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (2)$$

式中 C 对应信息传播的广度， C 越大，信息传播的广度越宽。

2) 平均距离 L 。在一个网络中，2 个节点之间的距离 d_{ij} 定义为连接它们之间最短路径所包含的边数，平均距离 L 是指所有节点对之间距离的平均值

$$L = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (3)$$

式中 L 代表信息传播的深度， L 越小，信息在网络中传播的深度越大^[9]。

利用式(2)(3)计算该电网的拓扑特征参数如表 1 所示。其中 C_{random} 和 L_{random} 可用下列公式估算： $C_{\text{random}} \sim K/n$ ， $L_{\text{random}} \sim \ln n / \ln K$ 。 n 、 K 分别为网络的总节点数和节点平均度数。

表 1 中国某区域电网的拓扑特征参数
Tab. 1 The topology characteristic parameters of a regional power grid of China

K	C	C_{random}	L	L_{random}
2.813	0.294	0.018	7.151	4.876

将表 1 数据与小世界标准(式(1))对比，该电网的聚类系数 C 远远大于相应的随机网络 C_{random} ，平均距离 L 与随机网络 L_{random} 相近，符合小世界特性，因此该电网是一个典型的小世界网络。

1.3 小世界特性对连锁故障传播机制的解释

经验证，该区域电网是小世界电网，因此它具备较高聚类系数和较小平均距离的特性。而聚类系数和平均距离分别对应着故障传播的广度和深度。小世界网络兼具宽的广度和大的深度，意味着故障的影响范围和传播速度大大高于相应的规则网络和随机网络。其原因是长程连接的出现。

为研究长程连接对于故障传播的影响，定义经过各联节点的输电路径的条数为节点度数^[16]。定义具有相应度数的节点数与全网总节点数的比值为累积比率。通过节点所承担的输电线路条数，即度数，比较它们在整个电能输送过程中的地位和作用。该区域电网节点度数与累积比率关系如表 2 所示。

根据表 2 画出该电网中节点的度数分布的双对数曲线如图 3 所示。

可以看出，度数较大的节点占总节点的比率反

表 2 中国某区域电网节点度数与累积比率关系
Tab. 2 The relationship between the degree and the cumulative rate of a regional power grid of China

节点度数	具有相应度数的节点数	累积比率
11	3	0.019 355
10	2	0.012 903
9	7	0.045 161
8	10	0.064 516
7	11	0.070 968
6	12	0.077 419
5	14	0.090 323
4	23	0.148 387
3	15	0.096 774
2	44	0.283 871
1	14	0.090 323

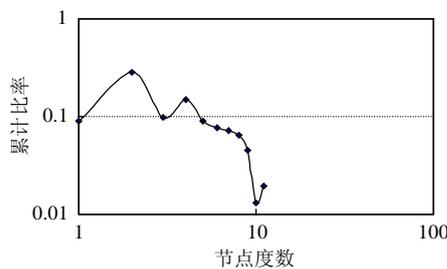


图 3 中国某区域电网联络节点度数双对数分布曲线
Fig. 3 Log-log curve of the degree of a regional power grid of China

而较小。即电网中存在少部分联络节点，它们承担的输电任务远远高于其他节点。而这少部分联络节点恰恰为跨区域联络线两端的节点，即长程连接两端的节点。而长程连接多为 500 kV 及以上超高压线路，它本身很难达到过负荷，但会将大功率向下传播，引起周围的其他诸多线路过负荷。因此长程连接在确保电能有效传播的同时，也对故障的传播起到了推波助澜的作用。当这些与长程连接相关的节点受到攻击而退出运行时，过负荷形式会通过长程连接继续快速传播，导致相关线路相继跳闸，电网的失负荷值迅速增加。

2 基于 WAMS 和小世界特性的连锁故障实时搜索程序

2.1 基于小世界特性的搜索程序优先级模块

传统的连锁故障分析方法都是对故障模型进行仿真，而不能应对真实电网运行时瞬息万变的情况。随着 WAMS 在电力系统中的应用与普及^[17-18]，本文提出一种搜索程序，能有效利用 WAMS 信息，判别可能引起连锁故障的关键事故，快速搜索初始故障发生的地点，从而及时采取预防校正措施。

本文提出的搜索程序是以 WAMS 监测到的电压最低点为搜索起点，以引发系列过负荷跳闸的初

始故障点为搜索终点。由于搜索终点并不确定，采取传统的随机搜索算法时需要遍历所有节点，难以快速地找到目标节点。即使找到符合条件的目标节点，其路径也未必是故障传播的路径，很可能对调度员产生误导。

结合小世界电网中的长程连接对故障传播所起的重要作用，对长程连接支路和潮流变化率较大支路赋予较高的权重系数，相当于用随机搜索算法寻找支路，从而避免了搜索的盲目性，提高了搜索效率，保证了实时性，从而能在大规模连锁故障发生前，及时扭转不利局面，防患于未然。

1) 根据小世界特性对连锁故障传播机制分析，长程连接能加快故障的传播速度，因而如果与节点相连的某条支路是长程连接，则其优先级最高，权重系数 W_1 最大。

2) 越靠近故障中心，线路潮流变化率越明显，因而如果节点相连的某条支路潮流变化率最大，则其优先级排第 2，权重系数为 $W_2(W_2 < W_1)$ 。

3) 连锁故障的最直接传播形式是非故障线路过负荷跳闸，因而如果节点相连的某条支路开关信息为断开状态，则其优先级排第 3，权重系数为 $W_3(W_3 < W_2 < W_1)$ 。

本文仅考虑以上 3 个评价指标，若要考虑连锁故障传播的其他影响因素，可通过增加优先级评价指标对程序进行完善。各评价指标的权重系数通过以下方法确定^[19]。

设有 p 个被评价单元， q 个评价指标，各指标的标准量化值为 X_{ij} ($i=1, 2, \dots, p; j=1, 2, \dots, q$)。与各指标相对应的权重系数为 W_j ($j=1, 2, \dots, q$)，各被评价单元的综合评价价值(目标值)为 $Y_i = \sum W_j X_{ij}$ ，按照 Y_i 的大小进行排序，排在前 1/2 的支路为最有可能故障传播路径。为使综合评价价值 Y_i 尽可能分散(均方差最大)，同时又使 W_j 的平方和为 1，进行以下计算：

1) 将原始数据标准化，建立矩阵 $X = \{X_{ij}\}_{p \times q}$ 。 X_{i1} 、 X_{i3} 为是否判断，取值为 1 或 0； $X_{i2} = \Delta P_j / N$ ， ΔP_j 为支路 j 在所有支路潮流变化率从小到大排序中的名次， N 为参与排序的支路条数。

2) 建立并计算矩阵 $W = X^T X$ 的特征根。设最大特征根为 λ_{\max} ，则有 $XW = \lambda_{\max} X$ 。

3) 计算矩阵 W 的最大特征根所对应的特征向量，并进行单位化，即为所求权重系数。

2.2 小世界电网连锁故障搜索程序

基于小世界特性，在搜索过程中加入优先级模

块，搜索程序的流程如图 4 所示。

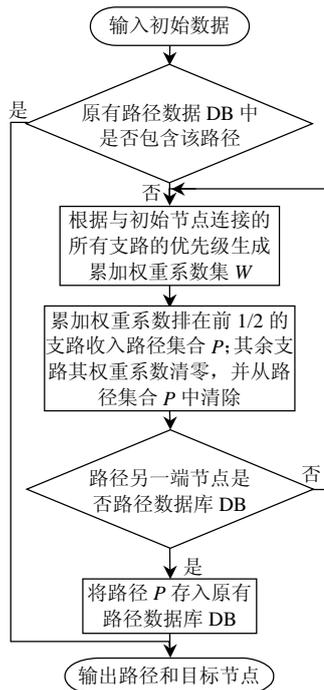


图 4 基于小世界电网的连锁故障实时搜索程序流程
Fig. 4 The flow chart of the real-time searching program for cascading failures based on small-world network

如果在原有路径数据库 DB 中已有包含源节点到目标节点的路径 P ，则直接使用该路径，这样可以节省大量的计算时间，是一个“以空间换取时间”的典型例子。当数据库 DB 中没有现成路径可用时，则寻找新的路径 P 。为了将新的路径 P 加入到路径数据库 DB 中，需要判断数据库 DB 是否已满。如果已满，则置换掉旧的路径。

该算法的时间复杂度下限即在最理想的情况下，数据库 DB 中包含有该路径 P ，这只是一个数据库检索过程，故其时间复杂度为 $O(r/2)$ ，其中 r 为 DB 中的路径数；该算法的时间复杂度上限即在最坏的情况下，在数据库 DB 中没有该路径 P ，必须形成新的路径 P ，而在传统组播路由算法泛洪式算法中，搜索每进行一步，新增被访问节点将以指数级速度增加，与之相比，小世界电网连锁故障搜索算法按优先级舍去了一半新增节点，显然是高效的。

3 算例分析

3.1 某区域电网连锁故障实时搜索程序

前面验证了某区域电网为小世界电网，因此以该电网为计算平台。根据该电网 WAMS 中的实时数据建立数据库。实时数据库中的数据为时间断面数，每 20 ms 刷新一次。图 5 为带有实时数据的该电网局部地区网络拓扑。

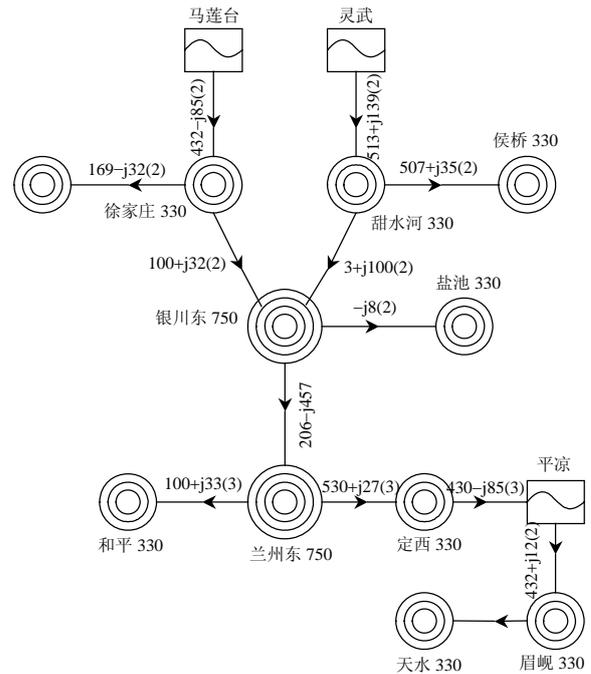


图 5 中国某区域电网局部地区实时数据网络
Fig. 5 The real-time data network diagram in local area of a regional power grid of China

启动连锁故障实时搜索系统，监测到系统最低电压为盐池 330 变电站，原有路径历史库中未搜索到以盐池 330 为源节点的路径，因此启动新路径的搜索。

1) 程序 1 次循环。与盐池 330 连接的只有 1 条支路，因此下一节点为银川东 750。该线路不是过负荷元件，继续搜索。

2) 程序 2 次循环。与银川东 750 连接的有 3 条支路，相应的对端节点为兰州东 750、徐家庄 330、甜水河 330。优先级排在前 1/2 的支路末端节点分别为兰州东 750，甜水河 330。这 2 个节点对应的线路不是过负荷元件，继续搜索。

3) 程序 3 次循环。与兰州东 750 节点连接的有 2 条支路，相应的对端节点为和平 330、定西 330；与甜水河 330 连接的只有 1 条支路，对端节点为侯桥 330。优先级排在前 1/2 的支路末端节点分别为定西 330、侯桥 330。其中定西 330 对应的线路是过负荷元件，搜索结束。

输出目标节点 $t=$ 定西 330，路径 $P=\{\text{盐池 330} \rightarrow \text{银川东 750} \rightarrow \text{兰州东 750} \rightarrow \text{定西 330}\}$ ，并将此路径存入路径历史数据库 DB。该电网连锁故障实时搜索系统的搜索过程界面如图 6 所示。

连锁故障搜索程序经过 3 个循环，搜索到目标元件为定西—兰州东 II 线。经当地采集的信息核实，初始故障为定西—兰州东 II 线过负荷跳闸，重



图6 电网连锁故障实时搜索系统运行界面

Fig. 6 The running interface of the real-time searching system for cascading failures of power grid

合不成功。采取切负荷措施后，定西—兰州东 II 线恢复正常运行。

3.2 某区域电网连锁故障发展过程仿真

连锁故障搜索程序能搜索到故障源头，及时采取措施。如果不采取措施，将引发连锁故障。表3为对该故障形式进行仿真后得到的故障发展过程。

表3 连锁故障发展过程仿真结果
Tab. 3 The simulation results of development of the cascading failure

跳闸线路	引起过负荷线路	过负荷线路功率/MW
定西—兰州东 II 线	定西—兰州东 I 线	996.17
定西—兰州东 I 线	定西—平凉 I、II 双回线	753.79
定西—平凉 I、II 双回线	平凉—眉岷 I、II、III 3 回线	711.34
平凉—眉岷 I、II、III 3 回线	眉岷—雍城	862.53

由表3可以看出，定西—兰州东 II 线过载跳闸，引起定西—兰州东 I 线过载跳闸，进而引起定西与兰州东双回线全部断开。相继导致定西—平凉电厂双回线过载跳闸，平凉—眉岷 3 回线过载跳闸，眉岷—雍城单回线过载跳闸。

一般地，线路过负荷达到额定功率的 20% 以上时，由调度下令紧急拉开线路，通常做出反应的时间为 1 min。在 4~5 min 内，定西、平凉、眉岷大部分地区已经停电，且与受端电网的联络线断开，还将造成更大范围的停电。而连锁故障搜索系统在 5 s 之内就发现了故障源，及时采取措施，有效地避免了连锁故障的发生。

电网初始故障发生之前，全网电压最低点已经是盐池变电站。故障发生后，初始故障周围的变电

站，由于无功补偿设备的支撑，电压并未达到全网最低，具有一定的隐蔽性。故障形式通过长程连接传播，全网电压最低点仍为盐池变电站，而盐池变电站周围又并未出现过负荷元件，这样很可能错过采取措施的最佳时机，导致连锁故障的严重后果。

基于小世界模型的连锁故障实时搜索算法可以快速有效地搜索到初始故障所在处，及时采取校正措施。采取措施后，可继续在线跟踪起始节点至目标节点的路径，将其状态量反馈给控制中心，从而将隐患消除在萌芽之中，有效地预防连锁故障的发生。

4 结语

本文在分析了电网小世界特性的基础上，提出基于 WAMS 和小世界模型的连锁故障实时搜索算法。并用算例进一步说明了本文所提搜索算法在电力系统中应用的合理性和有效性，为电力系统预防和控制连锁故障走向实时化、在线化、智能化，奠定了良好的基础，并且具有较好的可扩展性。随着人们对电网连锁故障产生机制的深入研究，将发现连锁故障新的影响因素，此时只需增加优先级评价指标，即可进行程序的升级。该程序具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] US-Canada Power System Outage Task Force. Final report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada: causes and recommendations [R/OL]. [2009-06-12]. <http://www.nerc.com>.
- [2] Carreras B A, Lynch V E, Dobson I, et al. Blackout mitigation in an electric power transmission system[C]. The 36th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, USA, 2003.
- [3] Dobson I, Chen J, Carreras B A, et al. Examining criticality of blackouts in power system models with cascading events[C]. The 35th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, USA, 2002.
- [4] Dobson I, Carreras B A, Lynch V E, et al. An initial model for complex dynamics in electric power system blackouts[C]. The 34th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, USA, 2001.
- [5] Chen J, Thorp J S, Dobson I. Cascading dynamics and mitigation assessment in power system disturbances via a hidden failure model [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2005, 27(4): 318-326.
- [6] Carreras B A, Newman D E, Dobson I, et al. Evidence for self-organized criticality in electric power system blackouts[C]. The 34th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, USA, 2001.
- [7] Watts D J. Small worlds: The dynamics of networks between order and randomness[M]. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1998: 27-35.
- [8] Surdutovich G, Cortez C, Vitilina R, et al. Dynamics of "small world"

- networks and vulnerability of the electric power grid[C]. VIII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Brasilia, Brasil, 2002.
- [9] 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 grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24(in Chinese).
- [10] 李蓉蓉, 张晔, 江全元. 复杂电力系统连锁故障的风险评估[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 18-23.
Li Rongrong, Zhang Ye, Jiang Quanyuan. Risk assessment for cascading failures of complex power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 18-23(in Chinese).
- [11] 邓慧琼, 艾欣, 余洋洋, 等. 电网连锁故障的概率分析模型及风险评估[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 41-46.
Deng Huiqiong, Ai Xin, Yu Yangyang, et al. Probability analysis model and risk assessment of power system cascading failure[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 41-46(in Chinese).
- [12] 曾宪钊. 网络科学[M]. 北京: 军事科学出版社, 2006: 95-99.
- [13] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 22-24.
- [14] 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 Shenghu, 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(in Chinese).
- [15] Albert R, Barabasia L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74 (1): 47-97.
- [16] Albert R, Albert I, Nakarado G L. Structural vulnerability of the North American power grid[J]. Physical Review E, 2004, 69(2): 1-4.
- [17] Bhargava B. Synchronized phasor measurement system project at Southern California Edison Co[C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Edmonton, Alberta, Canada, 1999.
- [18] 许树楷, 谢小荣, 辛耀中. 基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 44-49.
Xu Shukai, Xie Xiaorong, Xin Yaozhong. Present application situation and development tendency of synchronous phasor measurement technology based wide area measurement system[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 44-49(in Chinese).
- [19] 邓慧琼, 艾欣, 张东英, 等. 基于不确定多属性决策理论的电网连锁故障模式搜索方法[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 50-55.
Deng Huiqiong, Ai Xin, Zhang Dongying, et al. Search technique for power system cascading outages based on uncertain multiple attribute decision-making[J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 50-55(in Chinese).



郑阳

收稿日期: 2010-01-12。

作者简介:

郑阳(1984—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制, E-mail: wangziheng8079@sina.com;

刘文颖(1955—), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制及电力系统智能调度;

温志伟(1973—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制;

平德明(1953—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制。

(责任编辑 王晔)