

基于 P、Q 网分解的有向加权拓扑模型下的电网脆弱性分析

魏震波, 刘俊勇, 李俊, 韩卫恒, 潘睿

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对拓扑模型下的电网脆弱性分析问题, 提出了基于 P、Q 网分解的电网有向加权拓扑模型。在分析电网物理与运行特性的基础上, 对有功网络和无功网络进行分解建模, 给出两种网络拓扑模型下线路方向选取与线路权重大小的计算方法, 由此应用复杂网络理论对电网脆弱性进行分析。IEEE-14 节点系统算例结果表明: 在不同网络拓扑模型下, 单元脆弱强度存在显著差异, 有功与无功网分解建模更符合电网拓扑模型特征; 与其他电网脆弱分析结果相比, 有向加权拓扑模型对电网脆弱环节有较高辨识精度, 验证了模型的有效性。

关键词: 电网脆弱性; 拓扑模型; P、Q 网分解; 有向加权拓扑网络; 复杂网络理论

Vulnerability analysis of electric power network under a directed-weighted topological model based on the P-Q networks decomposition

WEI Zhen-bo, LIU Jun-yong, LI Jun, HAN Wei-heng, PAN Rui

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: As to the vulnerability analysis of electric power network under the topological model, a directed-weighted topological model based on P-Q networks decomposition is proposed in this paper. Based on a physical and operational characteristic analysis of electric power network, active and reactive network decomposition model is conducted, and the computations of direction and weight of lines under two network topological models are given. Then based on complex networks theory the vulnerability of electric power network is analyzed. Results of a numerical example show that there is a distinct difference of vulnerability value in different topological units, and active and reactive networks decomposition model is more suitable for the feature of power network topological model. Comparing with other vulnerability evaluation models, the proposed model is more precise and effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50977059).

Key words: vulnerability of electric power networks; topological model; P-Q network decomposition; directed-weighted topological network; complex networks theory

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0019-04

0 引言

电网作为一类典型复杂网络系统, 在拓扑模型下, 应用复杂网络理论^[1-2]解析电网脆弱特性成为一研究热点。研究内容主要包括: 1) 利用复杂网络参数从整体上揭示电网的本质特性, 如小世界网络特性, 无尺度特性及脆弱性等。文献[3-4]从电网拓扑结构出发, 分析并验证了电网的脆弱强度与拓扑结构的关系, 及电网小世界特性对连锁故障的影响。2) 利用网络中的行为特性解析电网连锁故障的传播机理。文献[5]分析了电网小世界特性在连锁故障传

播过程中的影响, 指出较短平均距离及较高聚类系数等小世界特性是发生连锁故障的原因所在。3) 结合电网特性与复杂网络理论的电网脆弱性研究。如文献[6]将线路的电抗值引入电网的拓扑模型中, 提出了带权重的线路介数作为脆弱线路指标的辨识方法; 文献[7]在构建基于线路电抗的加权电网拓扑模型基础上, 提出了新的电网脆弱性评估指标。

与其他复杂网络系统相比, 电网有着自身的物理特性及运行特性: 1) 电网中同时传输着由基尔霍夫定律决定的有功功率和具有区域解耦特性的无功功率; 2) 输电线路阻抗的存在, 造成线路有功与无功功率的损耗; 3) 输电线路材质、长度及电压等级的差异使得线路权重归一化处理存在明显弊端, 虽

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50977059)

已有少数文献对上述部分问题进行了考虑，但少见有对三者综合考虑的。

针对上述研究分析，本文提出了基于 P、Q 网分解的有向加权电网拓扑模型，给出了相关参数定义及计算方法，应用复杂网络理论对电网进行脆弱性进行分析。IEEE14 节点算例结果表明：1) P、Q 分解建模更符合电网本质特征，对无功网络的区域解耦特性有较好反映；2) 对电网状态变量方向及线路权重的考虑是电网拓扑建模分析不可忽略的因素；3) 与其他模型比较，所提模型对电网脆弱环节有较好的辨识效果。验证了模型的合理性及有效性。

1 电网网络拓扑化

电网网络拓扑化是应用复杂网络理论进行电网分析的第一步，其规则可简单描述为：节点代表发电厂、负荷和变电站，边代表输电线路，详细拓扑化原则可参考文献[5-7]。由此得到一个由 n 个节点与 m 条边的无向无权拓扑图形。

2 基于 P、Q 网分解的有向加权拓扑模型

根据前文分析，由于电网自身物理特性与运行特性使得直接应用复杂网络理论解析电网问题存在不足，需要对电网初始网络拓扑进行改进。因此，本文提出了基于 P、Q 网分解的有向加权拓扑建模方法，具体如下。

电网中同时存在有功功率与无功功率传输，且两者间仅存在较弱联系，分解建模符合研究需要。在有功网络中，由电网传输特性可知，有功功率一般由发电机节点到负荷节点。但考虑到情况：当发电机节点自身带负荷，且当负荷量大于发电量时，此节点对于网络来说是汲取能量，表征为“负荷”节点。因此，本文定义电网最短有功电气路径为由有功注入节点指向有功汲取节点，所经线路权重之和最小的有向加权路径。其中线路权重为线路电阻与线路电压因子倒数的乘积，线路有功潮流方向与最短路径方向一致；同理，在无功网中，根据选定的无功传输正方向，定义最短无功电气路径为由无功注入节点指向其他无功汲取节点，所经线路权重之和最小的有向加权路径。其中线路权重为线路电抗与线路电压因子倒数的乘积，线路无功潮流方向与最短路径方向一致。则有向加权最短电气路径数学表达有：

$$\bar{L}_s \rightarrow \text{Min} \left(\sum_{l_{ij} \in \Omega} \alpha_{ij} \right) \quad (1)$$

其中： \bar{L}_s 为加权有向最短电气路径； Ω 为最短电气

路径 \bar{L}_s 所含线路的集合； α_{ij} 为线路的权重。

输电线路的传输能力不仅取决于线路自身材质（阻抗），而且与其电压等级密切相关。根据最短电气路径中线路权重的定义，令线路权重 α_{ij} 有：

$$\alpha_{ij} = Z_{ij} \cdot \frac{1}{\lambda_{ij}} = \frac{Z_{ij}}{\left(\frac{V_{ij}}{V_0}\right)^2} = \frac{Z_{ij} \cdot V_0^2}{V_{ij}^2} \quad (2)$$

其中： $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$ 为线路 ij 的阻抗，在有功网络模型中取值 $\text{Re}(Z_{ij})$ ，在无功网络模型中取值 $\text{Im}(Z_{ij})$ ；

$\lambda_{ij} = (V_{ij}/V_0)^2$ 为线路电压等级因子， V_{ij} 为线路 ij 的电压等级， V_0 为考察电网中线路选定基准电压等级值，可选取网络中电压等级最低线路为基准值。

对线路权重 α_{ij} 的物理意义分析如下：对于任意两节点 i, j 之间存在 N 条输电路径 l_1, l_2, \dots, l_N ，每条输电路径长度与节点数各不相同或不完全相同，如图 1 (a) 所示。

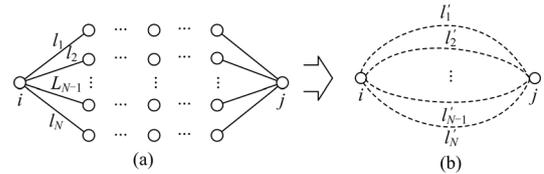


图 1 简单拓扑示意图

Fig.1 The simple topological example graph

将 N 条输电路径简化为 N 条输电线路 l'_1, l'_2, \dots, l'_N 如图 1 (b) 所示。对于任意线路 l'_1, l'_2, \dots, l'_N 来说，节点 i, j 间电压落差是相同的，阻抗越小，线路传输的电能就越多，根据式 (2) 线路权重就越小。因此，选其作为节点 i, j 间的最短电气路径是合理的；而对于相同输电材质及长度的线路来说，即阻抗相等，电压等级越高，输送电能（有功功率）就越多，线路产生的无功也越大，且与线路电压平方成正比关系。因而，引入电压等级因子是合理的。当然，如果考虑到电网实时状态的变化，也可选取线路实际线电压来作为电压因子的计算值。

对于线路损耗问题，提出通过增加线路虚拟节点的方法，对网络进行无损化处理。所增虚拟节点性质（能量汲取或注入）由线路实际损耗决定。一般来说，在有功网络中，增加节点性质一般为有功汲取（负荷）节点；而在无功网络中，根据无功正方向的选取，增加节点性质可能为无功汲取节点，也可能为无功注入节点。此时，虚拟节点所在线路被分为两段，令每段线路阻抗值为原来线路的一半，即：

$$Z_{ik} = Z_{kj} = \frac{1}{2} Z_{ij} \quad (3)$$

其中: 节点 k 为线路 ij 中增加的虚拟节点; Z 为线路阻抗。

经过上述模型处理, 一个初始无向无权的电网拓扑网络模型便转化为两个 (P 网与 Q 网) 有向加权的拓扑网络模型。根据电力系统中有功功率 (P) 平衡与节点相角 (θ)、无功功率 (Q) 平衡与电压幅值 (V) 密切相关的物理特性, 针对不同问题, 在不同网络拓扑模型下进行具体分析是必要的。

3 基于复杂网络理论的电网脆弱性分析

应用复杂网络理论解析电网脆弱性, 可通过拓扑模型下的相关复杂网络参数或结合电力系统参数的脆弱评估指标, 对电网的结构脆弱或状态脆弱进行分析^[8]。本文将采用有向加权拓扑模型下的复杂网络参数结合电网运行状态脆弱参数的方法对电网脆弱性进行分析, 构建脆弱评估指标有:

$$\begin{cases} M = \sqrt{\varepsilon \cdot B} \\ \varepsilon = \frac{1}{|x(t) - x_{cr}|} \end{cases} \quad (4)$$

其中: ε 为电网运行状态脆弱参数; B 为拓扑单元介数; $x(t)$ 为 t 时刻系统运行状态值; x_{cr} 为临界值。

考虑增加虚拟节点后, 拓扑单元介数计算有:

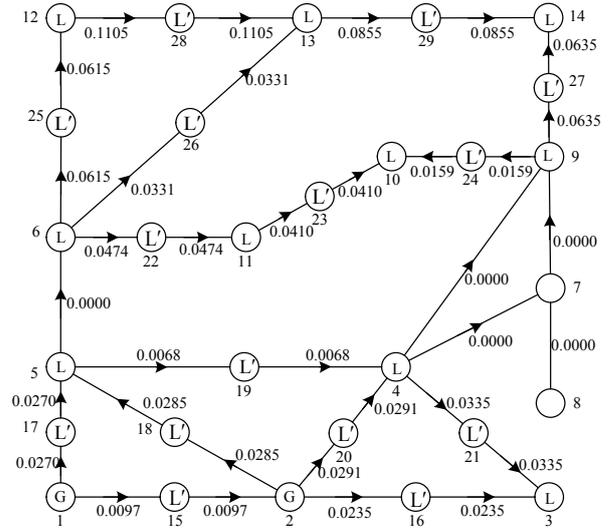
$$\begin{cases} B_{ij} = \frac{B_{ik} + B_{kj}}{2} \\ B_i = \sum_{m, n \in \Omega} \frac{n_{mn}(i)}{n_{mn}} \end{cases} \quad (5)$$

其中: B_i 、 B_{ij} 分别为节点 i 与线路 ij 的介数值; k 为线路 ij 上的虚拟节点; n_{mn} 为节点 m , n 之间的最短电气路径条数; $n_{mn}(i)$ 为 m , n 之间的最短电气路径中经过节点 i 的条数; Ω 为电网节点集合。

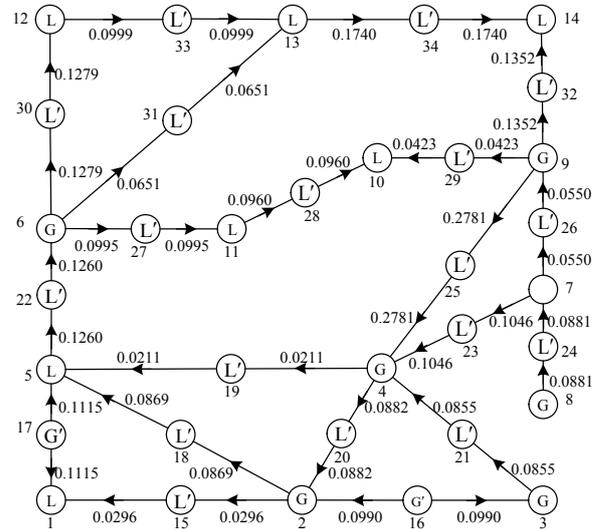
4 算例分析

以 IEEE14 节点系统为例, 其中节点 1 为平衡节点, P、Q 网分解有向加权拓扑模型如图 2 所示。其中, 图 2(a)为有功拓扑网络, 以发电机节点 1 有功注入方向为有功网正方向, G 为有功注入节点, L 为有功汲取节点, L' 为有功汲取虚拟节点, 其他为传输节点; 图 2(b)为无功拓扑网络, 以发电机节点 2 的无功注入方向为正方向, G 为无功注入节点, L 为无功汲取节点, G', L' 为无功注入、汲取虚拟节点, 其他为传输节点。

根据最短电气路径定义, 计算系统节点介数如表 1 所示。



(a) 有向加权无损有功拓扑网络



(b) 有向加权无损无功拓扑网络

图 2 IEEE-14 节点系统有向加权拓扑模型

Fig.2 The directed-weighted topological graph of IEEE 14 bus power system

表 1 有向加权拓扑模型下的节点介数值

Tab.1 Betweennesses of nodes

节点	介数		节点	介数	
	有功模型	无功模型		有功模型	无功模型
1	25	7	8	0	24
2	27	45	9	10	26
3	2	21	10	2	8
4	14	69	11	4	22
5	31	87	12	4	16
6	20	84	13	4	22
7	5	23	14	2	8

数据分析如下：

在有功模型中，介数值大的节点主要为发电机节点（1、2）与变压器支路节点（4、5、6、9），反映这些节点在系统中活跃程度，符合电能传输一般规律。节点3虽为发电机节点，但对系统来说，表现为能量汲取节点，因此在模型中为“负荷”节点。与远端（终端）负荷节点（10、14）都表现较低的活跃程度。而节点8并没有功注入或汲取，因此活跃度为0；在无功模型中，与有功相比，介数值有了较大变化，表现出了一定的区域性{2、4、5、6}与{7、8、9}，符合无功功率具有区域解耦的特性。结果验证了P、Q网分解建模思想的合理性。

选取节点电压 V 为系统状态变量，取系统正常运行某时刻 t 的节点电压值 $V_i(t)$ ，以节点电压鞍结分岔值（SNB）作为临界值，根据文中分析，在无功拓扑模型下，由式（4）计算系统节点脆弱强度值 $M_i(t)$ ，如表2所示。

表2 节点 $V_i(t)$ 、SNB及 $M_i(t)$ 值（标么值）

Tab.2 The voltage values, SNB values and the vulnerability values of nodes (per-unit value)

节点	$V_i(t)$	SNB	$M_i(t)$	节点	$V_i(t)$	SNB	$M_i(t)$
1	1.060 0	/	/	8	1.090 0	0.797 4	9.06
2	1.045 0	0.909 8	18.24	9	1.056 3	0.708 5	8.65
3	1.010 0	0.771 0	9.37	10	1.051 3	0.697 7	4.76
4	1.018 6	0.748 4	15.98	11	1.057 1	0.710 7	7.97
5	1.020 3	0.748 6	17.89	12	1.055 2	0.705 4	6.76
6	1.070 0	0.739 1	15.93	13	1.050 4	0.694 6	7.86
7	1.062 0	0.744 4	8.51	14	1.035 8	0.660 2	4.62

将上述结果与其他模型指标^[8-10]进行对比，如表3所示。

表3 IEEE14节点系统排序结果对比

Tab.3 Indices comparison taxis to IEEE14 bus power system

	本文模型	文献[8]模型	V-Q灵敏度指标	无功裕度关于无功负荷的灵敏度指标
节点排序	5	4	9	9
	4	5	5	14
	9	9	14	10
	7	7	10	5
	11	13	4	4
	13	12	7	7
	12	14	11	11
	10	11	13	13
	14	10	12	12

数据分析如下：

本文模型与文献[8]模型结果基本一致，验证了

模型的有效性。节点10、14作为网络中远端负荷节点，从脆弱性角度考虑，网络“活跃”程度相对较低，故障影响较小，在本文模型中排序靠后；从电压与无功的灵敏度考虑，负荷发生改变时，电压影响较大，表现为灵敏度值较大，在V-Q灵敏度与无功裕度关于无功负荷模型中排序靠前。节点4、5、7、9作为变压器支路节点，承担着网络中主要电能传输任务，且节点4、5与节点7、9分别作为无功解耦区域{2、4、5、6}与{7、8、9}的中心节点，具有较高的网络“活跃”程度及相应的故障影响。因此，在本文模型中排序靠前，验证了模型的合理性。

5 结束语

电网中有功功率与无功功率传输的同时存在，及输电线路材质、长度与电压等级的差异，使得直接应用复杂网络理论分析电网问题存在明显弊端。针对以上问题，本文提出了基于P、Q网分解的有向加权拓扑模型方法加以解决，并通过理论分析及算例计算进行了验证。得到以下结论：1)有功网络与无功网络的分解建模思想，更符合电网拓扑建模分析需要，如无功网络具有的区域解耦特性；2)根据电网辨识目的，在不同网络（P、Q）拓扑模型下，选取不同的线路权重计算因子有效提高了模型的精度；3)利用复杂网络理论能快速对电网脆弱性问题等进行分析。

本文研究及结论为进一步应用复杂网络理论研究电网问题提供了参考。

参考文献

- [1] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks[J]. Nature, 1998, 393: 440-442.
- [2] Alberts R, Barabási A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Review of Modern Physics, 2002, 74: 47-91.
- [3] 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 Zhong-wei, LU Zong-xiang, SONG Jing-yan. 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.
- [4] 丁明, 韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 7-11. DING Ming, HAN Ping-ping. Small-world topological model based vulnerability assessment algorithm for large-scale power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 7-11.

（下转第29页 continued on page 29）

- 参数的识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (13): 84-90.
- SUONAN Jia-le, JIAO Zai-bin, KANG Xiao-ning, et al. Algorithm to identify leakage inductances of power transformer with Y-delta connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (13): 84-90.
- [16] 索南加乐, 康小宁, 宋国兵, 等. 基于参数识别的继电保护原理初探[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19 (1): 14-20.
- SUONAN Jia-le, KANG Xiao-ning, SONG Guo-bing, et al. Survey on relay protection using parameter identification[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2007, 19 (1): 14-20.
- [17] 索南加乐, 杨铖, 杨忠礼, 等. 基于模型识别的输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (24): 30-34.
- SUONAN Jia-le, YANG Cheng, YANG Zhong-li, et al. New type of transmission line pilot protection based on model identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (24): 30-34.
- [18] 索南加乐, 陈福锋, 齐军, 等. 串补线路故障点位置的模型识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (1): 66-72.
- SUONAN Jia-le, CHEN Fu-feng, QI Jun, et al. New method for identifying the fault location on series compensated lines based on different fault models[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (1): 66-72.
- [19] 索南加乐, 谈树峰, 何世恩, 等. 基于模型识别的串补线路方向元件[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (14): 66-70.
- SUONAN Jia-le, TAN Shu-feng, HE Shi-en, et al. Directional element for series compensated lines based on model identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (14): 66-70.
- [20] 康小宁, 杜岩平, 索南加乐, 等. 基于模型误差的自适应方向元件[J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (5): 43-47.
- KANG Xiao-ning, DU Yan-ping, SUONAN Jia-le, et al. Adaptive directional element based on model error[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29 (5): 43-47.

收稿日期: 2009-12-17; 修回日期: 2010-03-12

作者简介:

索南加乐 (1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事新型继电保护技术研究;

杨铖 (1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统输电线路保护. E-mail: xjtu_cyang@yeah.net

(上接第 22 页 continued from page 22)

- [5] 丁明, 韩平平. 小世界电网的连锁故障传播机理分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (18): 6-10.
- DING Ming, HAN Ping-ping. Study of failure spreading mechanism in the small-world power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (18): 6-10.
- [6] 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 Yi-jia, CHEN Xiao-gang, SUN Ke. Identification of vulnerability lines in power grid based on complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (12): 1-5.
- [7] 丁明, 韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (10): 20-25.
- DING Ming, HAN Ping-ping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (10): 20-25.
- [8] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 基于电网状态和结构的综合脆弱评估模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (8): 11-14.
- WEI Zhen-bo, LIU Jun-yong, ZHU Guo-jun, et al. A new intergrative vulnerability evaluation model to power grid based on running state and structure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (8): 11-14.
- [9] 邱晓燕, 邱红兵. 基于潮流计算的电压稳定性指标的比较研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2002, 34 (6): 95-98.
- QIU Xiao-yan, QIU Hong-bing. Comparative study of voltage stability indices based on load flow calculation[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2002, 34 (6): 95-98.
- [10] 刘丽霞, 曹国云, 陈陈. 基于静态电压稳定性指标的等价性研究[J]. 华东电力, 2005, 33 (12): 1-4.
- LIU Li-xia, CAO Guo-yun, CHEN Chen. Equivalent study based on static voltage stability indices[J]. East China Electric Power, 2005, 33 (12): 1-4.

收稿日期: 2010-01-04; 修回日期: 2010-03-26

作者简介:

魏震波 (1978-), 男, 博士, 从事电力系统稳定与控制及电力市场研究; E-mail: weizhenbo1978@yahoo.com.cn

刘俊勇 (1963-), 男, 博士生导师, 博士, 研究方向为电力系统稳定性分析及电力市场。