

四川特/超高压电网脆弱度分析及应用

李燕¹, 苟竞², 汪彦含², 陈晨², 魏震波²

(1. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 在传统电网脆弱性分析基础上, 结合特/超高压电网的特点, 运用基于复杂网络的结构脆弱性和基于潮流熵的状态脆弱性理论, 对四川特/超高压电网脆弱度进行分析, 以此识别四川特/超高压电网的脆弱元件。分析结果表明: 四川电网具有典型的小世界网络结构特性, 同时在不同的运行方式下, 四川电网的脆弱节点和脆弱支路会发生转移, 其结果可以为电网的调度运行提供参考。

关键词: 结构脆弱度; 状态脆弱度; 小世界网络; 脆弱节点; 脆弱支路

Abstract: Based on the vulnerability analysis of the traditional power grid and the features of EHV and UHV power grid, the vulnerability of Sichuan EHV and UHV power grid is analyzed in order to identify the vulnerable components of Sichuan EHV and UHV power grid by using the theory of structural vulnerability based on complex network and the state vulnerability based on power flow entropy. The results show that Sichuan power grid has the typical structural features of small world network, and under the different operating modes, the vulnerable buses and vulnerable branches of Sichuan power grid will shift. The results can provide a reference for the dispatching and operation of power grid.

Key words: structural vulnerability; state vulnerability; small world network; vulnerable buses; vulnerable branches

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)04-0019-04

0 引言

随着电力工业的快速发展, 特/超高压电网输电技术的运用成为电力系统新的发展方向。以节能减排及拉动内需为主旨的新一轮电力改革及电网建设正在进行当中, 电网规模的不断扩大及系统元件的日益复杂为电网安全稳定与控制提出了新的更高要求。电力系统由于自身原因和外部因素的影响, 电网事故时常发生, 近年来随着全球气候环境的恶化, 冰雪灾害、地震、泥石流等地质灾害频发, 对电网的安全稳定带来重大挑战^[1-3]。

随着特/超高压电网在四川电网相继投运, 特/超高压电网的输电优势可以提高四川电网的输电能力, 因此确保特/超高压电网安全稳定运行就显得尤为重要。传统基于 EMS 的调度人员潮流计算和优化调度模式, 以及 $N-1$ 、 $N-2$ 设备模拟开断计算分析安全性能否适应这种大规模复杂电网的实时运行分析是急需考虑的问题。因此, 结合特/超高压电网的特点, 运用基于复杂网络的结构脆弱性和基于潮流熵的状态脆弱性理论, 对四川特/超高压电网脆弱度

进行分析, 以此识别四川特/超高压电网的脆弱元件。

1 基于复杂网络的电网结构脆弱性

复杂网络是对复杂系统(指由具有许多不同状态的大量基本单元的非线性作用下形成的有机整体)的一般抽象和描述方式, 它突出强调了系统结构的拓扑特征。一个具体网络可抽象为一个有点集 V 和边集 E 组成的图 $G=(V, E)$ 。节点数记为 $N=|V|$, 边数记为 $M=|E|$ 。 E 中每条边都有 V 中一对点与之相对应。如果任意点对 (i, j) 与 (j, i) 对应同一条边, 则该网络称为无向网络, 否则称为有向网络。如果给每条边富裕相应的权值, 那么该网络就称为加权网络, 否则称为无权网络。

在实际电网拓扑建模的基础上, 运用复杂网络理论来研究电网结构脆弱性, 首先要将电网简化为网络拓扑模型, 进而对电网的平均距离、聚类系数、节点度数、节点介数等特征参数进行计算、分析。简化方法可以描述为^[4-5]: 考虑除电厂和变电站母线外的所有线路, 将电网中所有节点分为发电机节点集合、负荷节点集合、变电站节点集合等 3 类, 合并

同杆并架的输电线路,忽略线路的并联电容支路,输电线路和变压器支路均简化为无向有权边,边的权重即线路的效能。经过上述简化原则,电力网络简化为一个由 N 个节点和 k 条线路组成的稀疏连通图,由 $N \times N$ 阶连接权矩阵 $\{e_{ij}\}$ 表示。

复杂网络中典型的特征参数如下。

(1) 网络平均距离 L 。网络中两个节点 i 和 j 之间的距离 d_{ij} 定义为连接这两个节点的最短路径权重和^[6]。对所有节点之间的最短距离求平均值,即可得到该网络的平均距离为

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

(2) 聚类系数 C 。聚类系数是一个表征近邻节点联系紧密程度的特征参数。假设网络中的一个节点 i 有 l_i 条边将它和其他点相连,这 l_i 个节点之间最多存在 $l_i(l_i-1)/2$ 条边,而这 l_i 个节点之间实际存在的边数 E_i 和总的可能的边数之比就定义为节点 i 的聚类系数,即

$$C_i = \frac{2E_i}{l_i(l_i-1)} \quad (2)$$

(3) 节点度数 K 。节点 i 的度 K_i 为与节点 i 连接的边权和。

$$K_i = \sum_{j \in i} w_{ij} \quad (3)$$

其中 w_{ij} 表示节点 i, j 之间边的权重。

(4) 节点介数 B 。网络中不相邻的节点 i 和 j 之间的路径主要依赖于节点 j 和 k 的路径上所经过的节点,如果某个节点被其他许多路径经过,则表示该节点在网络中很重要,定量地描述某个节点在网络中的影响力或重要性可以用顶点的介数来衡量,定节点 i 的介数 B_i 定义为

$$B_i = \sum_{j, k \in v} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \quad (4)$$

其中 n_{jk} 表示节点 j, k 之间的最短路径的条数; $n_{jk}(i)$ 表示 j, k 之间的最短路径中经过节点 i 的条数。

2 基于潮流熵的电网状态脆弱性

2.1 基于节点潮流分布熵的节点脆弱度评估模型

系统正常工况下处于平衡基态,此时系统支路 i 的潮流为 P_{i0} ;当节点 a 负荷单位增加即系统在受到扰动冲击工况下,支路 i 潮流为 P_{ia} ;节点 a 受到扰动后过支路引起的潮流增量为

$$\Delta E_{ia} = P_{ia} - P_{i0} \quad (5)$$

将 ΔE_{ia} 定义为节点 a 对支路 i 的潮流冲击,则节点 a 对系统的潮流冲击为

$$\Delta E_a = \sum_{i=1}^L (P_{ia} - P_{i0}) \quad (6)$$

支路 i 所承担节点 a 对系统潮流冲击的比例用支路 i 的潮流冲击率 η_{ia} 来表示。

$$\eta_{ia} = \frac{\Delta E_{ia}}{\Delta E_a} \quad (7)$$

因此节点 a 的潮流分布熵为

$$H_D(a) = - \sum_{i=1}^L \eta_{ia} \ln \eta_{ia} \quad (8)$$

$H_D(a)$ 的大小反映了不同节点过负荷扰动下系统所受潮流冲击的分布特性。因此,结合节点的潮流分布熵定义节点的脆弱度为

$$VN_a = \frac{\Delta E_a}{H_{D_{\max}}(a)} \quad (9)$$

ΔE_a 表示节点单位扰动对系统的潮流冲击, ΔE_a 越大,节点 a 受扰对系统潮流冲击越大,节点 a 的潮流分布熵越小,系统的潮流冲击分布越聚集在少数几条支路上,则节点脆弱指标 $H_{D_{\max}}(a)$ 越大,节点 a 的过负荷越容易导致支路越限。

2.2 基于潮流熵的支路综合脆弱度评估模型

由式(7)可知节点 a 在支路 i 上的潮流冲击率表示为 $\eta_{ia} = \frac{\Delta E_{ia}}{\Delta E_a}$,定义节点 a 的负荷扰动在支路 i 的潮流分布熵为

$$H_{Di}(a) = - \eta_{ia} \ln \eta_{ia} \quad (10)$$

“发电机—负荷”节点对的负荷扰动在支路 i 的潮流分布熵为

$$H_{Di}(g, d) = H_{Di}(g) - H_{Di}(d) = \eta_{id} \ln \eta_{id} - \eta_{ig} \ln \eta_{ig} \quad (11)$$

其中 g 为发电机节点; d 为负荷节点。

由负荷波动的随机性,支路受到的潮流冲击分为全局冲击和局部冲击。全局冲击为支路受到的来自每一组“发电机—负荷”节点对间负荷波动引起的潮流冲击在该支路的叠加,局部冲击为支路受到的来自“发电机—负荷”节点对间负荷波动引起的最大冲击,因此,基于支路潮流分布熵的支路冲击脆弱度为

$$V1_i = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{N_C N_L} + \sum_{g \in G} \sum_{d \in L} (H_i(g, d) + \max(H_i(g, d))) \right\} \quad (12)$$

其中 N_G, N_L 分别为发电机节点与负荷节点数目; G 为发电机节点集合; L 为负荷节点集合。

当电网中支路 l_i 断开时支路 l_k 分担支路 l_i 转移的潮流为

$$\Delta\lambda_{ki} = P_{ki} - P_{k0} \quad (13)$$

其中 P_{ki} 为支路 i 断开后支路 k 上的潮流, 将 ΔE_{ki} 定义为支路 i 对支路 k 的潮流转移冲击, 则支路 i 对支路 k 的潮流转移冲击率为

$$\beta_{ki} = \frac{\Delta\lambda_{ki}}{\sum_{k=1}^L \Delta\lambda_{ki}} \quad (14)$$

定义支路 i 的潮流转移熵为

$$H_T(i) = - \sum_{k=1}^L \beta_{ki} \ln \beta_{ki} \quad (15)$$

因此定义基于支路潮流熵的支路转移脆弱度为

$$V_{2i} = \frac{P_i}{H_T(i)} \quad (16)$$

P_i 表示支路 i 的潮流, 断开支路的潮流 P_i 越大, 其断开后对其他支路冲击越大, 支路 i 断开后的潮流转移熵 $H_T(i)$ 越小, 系统的潮流转移冲击分布越聚集在少数几条支路上, 则支路 i 的后果脆弱指标 V_{2i} 越大, 支路 i 的断开潮流转移的冲击越大对系统造成的影响后果越严重。更容易造成系统中支路超限, 甚至连锁故障的发生。

因此, 提出结合线路冲击和后果的综合脆弱评估模型 V_i 。

$$V_i = V_{1i} V_{2i} \quad (17)$$

式(17)中, V_{1i} 表示支路 i 抵抗扰动的能力大小即支路 i 退出运行的难易程度; V_{2i} 表示支路 i 退出运行后对系统造成的后果严重程度。因此, 支路综合脆弱度指标 V_i 的物理意义为支路 i 受扰动的影响越大, 且退出运行后对系统的危害越大, 则支路 i 越脆弱。故对支路的脆弱度评估结果进行归一化处理, 以提取相对脆弱强度, 便于比较排序。

3 四川特/超高压电网脆弱度分析

为进一步落实国家“西电东送”战略, 四川电网在“十二五”期间将形成特高压交直流并列的外送通道, 外送功率将超过 30 GW。四川电网电源结构特殊, 水能资源丰富且占比重大, 主要分布在川西地区, 丰富的水电资源需要外送, 其主要外送华中、华

东电网^[7]。而枯水期由于水电资源不能满足本地及外送负荷欲求, 需靠西北火电支援。因此, 在不同的运行方式下, 四川特高压电网的脆弱元件也会有所不同。

3.1 结构脆弱度分析

运用第1节中建立的复杂网络结构脆弱度评估模型, 对四川特/超压电网的复杂网络结构特性进行分析, 具体计算内容如下: ①将电网作为一个无向无权网络, 计算其小世界特性; ②将电网的输电线路长度作为权重, 计算其小世界特性。其中权重将由每条输电线路长度除以所有统计中最大的线路长度得到; ③将电网运行方式中计算出流过线路潮流作为权重, 计算其小世界特性。结果如表1~4所示。

表1 复杂网络结构特性

网络性质	节点个数	网络平均距离	聚类系数
无向无权网络	201	8.386	0.114 0
输电线路长度为权重	201	8.717	0.124 0
丰大有功潮流为权重	195	6.322	0.111 0
枯大有功潮流为权重	194	6.370	0.098 0
丰小有功潮流为权重	189	6.835	0.082 0
枯小有功潮流为权重	189	6.795	0.084 0
同等随机网络	201	6.092	0.011 9

表2 复杂网络节点介数特征

网络性质	节点介数最高的前10位
无向无权网络	龙王、朱坎、东坡、平春、石羊、凉水井、棉丰、孙家坝、松柏、新棉
输电线路长度为权重	龙王、朱坎、东坡、平春、石羊、凉水井、棉丰、孙家坝、松柏、新棉
丰大有功潮流为权重	向家岭、园湾、松柏、广惠、双堰、大方、桥沟、九里、朱坎、南充
枯大有功潮流为权重	舒平、松林、铜街子、向家岭、东坡、园湾、范坝、松柏、广惠、双堰
丰小有功潮流为权重	向家岭、园湾、松柏、广惠、双堰、大方、桥沟、九里、朱坎、南充
枯小有功潮流为权重	舒平、松林、铜街子、向家岭、东坡、园湾、范坝、松柏、广惠、双堰

从上表可以看出, 四川电网及相应的考虑线路长度、线路流过的功率方式的网络都具有小世界特性。现有四川电网中: 洪沟、龙王、南充、谭家湾、东坡、茂县、普提、尖山、广安、朱坎、平春、石羊、新棉、石板箐、大面铺、凉水井、二台山、向家岭、棉丰、孙家

坝、松柏、园湾、广惠、双堰、大方、桥沟、九里、舒平、松林、铜街子、范坝、丰谷、西昌、二滩、普提串补、蜀州、玉观、代市等节点是网络的薄弱环节,和这些节点相连的线路发生故障易导致故障向连锁故障方向纵深。特别是介数最高的节点受到蓄意攻击时,对小世界电网的破坏程度比小型随机电网造成的破坏程度要大得多。

表3 复杂网络节点度数特征

网络性质	节点度数最高的前10位
无向无权网络	龙王、谭家湾、新棉、尖山、洪沟、大面铺、二台山、茂县、东坡、普提
输电线路长度为权重	洪沟、普提、南充、丰谷、西昌、新棉、尖山、谭家湾、东坡、茂县
丰大有功潮流为权重	普提、二滩、普提串补、洪沟、尖山、南充、蜀州、玉观、板桥、茂县
枯大有功潮流为权重	普提、二滩、普提串补、洪沟、南充、谭家湾、尖山、龙王、东坡、广安
丰小有功潮流为权重	普提、二滩、普提串补、洪沟、南充、尖山、蜀州、板桥、玉观、广安
枯小有功潮流为权重	南充、洪沟、谭家湾、普提、二滩、龙王、广安、尖山、东坡

表4 复杂网络节点聚类系数特性

网络性质	节点聚类系数最高的前10位
无向无权网络	龙王、东坡、新棉、茂县、大面铺、二台山、石板箐、南充、洪沟、丰谷、谭家湾
输电线路长度为权重	龙王、新棉、茂县、大面铺、二台山、东坡、向家岭、南充、石羊、丰谷
丰大有功潮流为权重	龙王、茂县、二台山、东坡、丰谷、大面铺、向家岭、新棉、洪沟、南充
枯大有功潮流为权重	龙王、新棉、二台山、东坡、洪沟、南充、向家岭、大面铺、丰谷
丰小有功潮流为权重	龙王、茂县、二台山、东坡、丰谷、向家岭、代市、洪沟、普提、南充
枯小有功潮流为权重	龙王、新棉、二台山、东坡、洪沟、南充、向家岭、大面铺、丰谷

要提高整个电网的可靠性水平,尤其是具有小世界特性的大型电网,必须加强对那些与网络结构密切关联节点的保护和防范,避免由于这些节点而造成故障的连锁反应,进而减少大规模连锁故障发生的概率。这种从网络拓扑的结构对电网进行分析的结果可以对电网的运行管理起辅助作用。

3.2 状态脆弱度分析

运用第2节中建立的潮流熵状态脆弱度评估模型,分别计算四川特/超高压电网丰大、枯大运行方式下的节点脆弱度和支路脆弱度,其计算结果如表5~表7所示(仅列出排序前10的结果)。

表5 丰大/枯大方式下节点脆弱度

排序	节点名称	丰大脆弱度	节点名称	枯大脆弱度
1	雅安	3.445 3	康定	3.445 3
2	南天	3.420 2	南天	3.420 2
3	东坡	3.404 3	沐川	3.404 3
4	资阳	3.345 4	资阳	3.395 2
5	眉山	3.312 5	桃乡	3.388 4
6	九龙	3.286 2	内江	3.345 4
7	石棉	3.278 9	雅安	3.286 2
8	龙头石	3.271 6	泸定	3.278 9
9	尖山	3.193 0	石棉	3.271 6
10	普提	3.113 2	九龙	3.150 9

表6 丰大方式下支路脆弱度

排序	线路名称	冲击脆弱度 (归一值)	转移脆弱度 (归一值)	综合脆弱度 (归一值)
1	黄岩—广安	1	0.470 7	1
2	黄岩—达州	0.990 7	0.470 6	0.990 6
3	叙府—福溪	0.466 2	0.373 3	0.369 7
4	甘谷地—康定	0.130 2	0.744 3	0.205 8
5	泸定—甘谷地	0.187 9	0.455 8	0.181 9
6	复龙—叙府	0.158 3	0.411 3	0.138 4
7	谭家湾—德阳	0.122 1	0.471 7	0.122 4
8	毛尔盖—色尔古	0.079 8	0.701 8	0.119 0
9	内江—云潭	0.125 9	0.437 3	0.117 0
10	谭家湾—南充	0.096 9	0.466 7	0.096 0

表7 枯大方式下支路脆弱度

排序	线路名称	冲击脆弱度 (归一值)	转移脆弱度 (归一值)	综合脆弱度 (归一值)
1	黄岩—达州	0.994 9	0.164 9	1
2	黄岩—广安	1	0.161 3	0.983 6
3	泸定—甘谷地	0.203 3	0.751 9	0.931 9
4	二滩—石板箐	0.152 0	0.648 0	0.600 4
5	谭家湾—南充	0.089 8	0.972 9	0.532 5
6	色尔古—茂县	0.081 4	0.975 5	0.484 0
7	福龙—叙府	0.072 9	0.968 6	0.430 3
8	甘谷地—康定	0.140 9	0.323 4	0.277 8
9	龙头石—石棉	0.052 6	0.843 4	0.270 4
10	长寿—万县	0.043 8	0.931 9	0.248 6

从计算结果可以看出,现有的四川特超高压电网中:丰大方式下,雅安、南天、东坡、资阳、眉山、九龙、石棉、龙头石、尖山、普提节点脆弱,黄岩—广安、黄岩—达州、叙府—福溪、甘谷地—康定、泸定—甘谷地、复龙—叙府、谭家湾—德阳、内江—云潭、毛尔盖(下转第45页)

[6] A. Anderman. The Challenge to Fulfil Electrical Power Requirements of Advanced Vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2004, 27(1): 2-7.

[7] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

[8] 杨秦. 混合动力汽车发展将分“三步走” [N]. 中国经济导报, 2008-12-20.

[9] Denholm P. and Short W. An Evaluation of Utility Sys-

tem Impacts and Benefits of Optimally Dispatched Plug-in Hybrid Electric Vehicles [R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2006.

[10] M. Duvall and E. Knipping. Environmental Assessment of Plug-in Hybrid Electric Vehicles - Volume 1: Nationwide Greenhouse Gas Emissions [R]. EPRI, 2007.

(收稿日期: 2013-05-21)

(上接第22页)

盖一色尔古、谭家湾—南充支路脆弱; 枯大方式下, 康定、南天、沐川、资阳、桃乡、内江、雅安、泸定、石棉、九龙节点脆弱, 黄岩—达州、黄岩—广安、泸定—甘谷地、二滩—石板箐、谭家湾—南充、色尔古—茂县、福龙—叙府、甘谷地—康定、龙头石—石棉、长寿—万县支路脆弱。这些节点和支路相连的线路发生故障易导致故障向连锁故障方向纵深。综合从线路受能量冲击的大小强度和线路故障后对这个系统造成的后果两方面来定义线路的脆弱性, 更加接近实际电网的脆弱本质。

脆弱度大的节点在过负荷下对系统冲击大, 导致支路过载潮流转移的节点, 快速切除这些节点的过负荷量对系统的安全稳定起到十分重要的作用。综合脆弱度大的支路, 由于过载支路的跳闸, 必将引起系统潮流的重新分布, 其影响范围是全局的, 在过负荷保护切除支路前消除薄弱支路过载, 从而避免了连锁故障的发生。

综上所述, 要提高整个四川特/超高压电网的安全稳定水平和运行可靠性, 对这些脆弱节点和脆弱线路要加强监视控制, 采取必要的安保措施使其坚强可靠, 避免由于这些脆弱元件造成故障的连锁反应, 进而减少大规模连锁故障发生的概率。对于脆弱度大的节点, 其上的过负荷应该快速消除, 避免引起支路过载。对于脆弱度大的支路, 过载后不能让过负荷保护切除, 而应通过紧急控制迅速消除过载, 以免引起连锁故障。

4 结论与展望

四川电网具有水电资源非常丰富、比重大, 水电分布不均匀、负荷分布主要分布在川东地区, 丰水期窝电, 枯水期缺电等特点。对四川特/超高压电网脆

弱度分析表明, 四川电网具有典型的小世界网络特性, 其较小的特征路径长度和较高的聚类系数对故障的传播会起到推波助澜的作用。同时, 在不同运行方式下, 四川电网的脆弱节点和脆弱线路会发生转移, 丰大方式下主要水电输送通道较脆弱, 枯大下外购电和川内火电输送通道较脆弱, 其结果对四川电网的运行控制具有一定的参考意义。

参考文献

[1] Enquiry Committee. Report of the Enquiry Committee on Grid Disturbance in Northern Region on 30th July 2012 and in Northern, Eastern & North-eastern Region on 31st July, 2012 [R/OL]. [2012-08-16]. http://www.powermin.nic.in/pdf/GRID_ENQ_REP_16_8_12.pdf.

[2] 方俊杰. 美国“9·8”大停电对连锁故障防控技术的启示 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 1-7.

[3] 陈向宜, 陈允平, 李春艳, 等. 构建大电网安全防御体系——欧洲大停电事故的分析及思考 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 4-8.

[4] 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.

[5] 陈晓刚, 孙可, 曹一家. 基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 138-144.

[6] 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.

[7] 杨可, 刘俊勇, 贺星棋, 等. 四川电网黑启动恢复控制研究及试验(一)——指导原则及电压控制 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 100-104.

作者简介:

李燕 (1986), 女, 助理工程师, 硕士, 从事电力系统稳定分析与控制研究。

(收稿日期: 2012-06-15)