

# 基于节点脆弱性的电力系统抗毁性分析

李艳卿 李华强 李 迁 黄昭蒙

(四川大学电气信息学院, 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 大停电事故一般由个别元件故障开始并最终导致全系统崩溃, 而其中极少数带有重负荷的节点往往起到助推作用, 因此寻找这些关键节点, 分析该部分节点失效情况下的电力系统的抗毁性, 具有重要的研究价值。基于静态能量函数, 建立相关的脆弱性评估指标模型, 对电力系统的节点脆弱性进行评估, 从而确定电力系统的脆弱环节。在此基础上, 对电力网络拓扑模型进行蓄意攻击和随机攻击, 分析比较电力系统在这两种攻击下的网络抗毁度指标, 结合系统能量和网络图论分析研究电力系统的抗毁性。通过对某地区电网的实际仿真, 验证了该方法的合理性与有效性。

**关键词:** 电力系统抗毁性; 静态能量函数; 节点脆弱性; 网络抗毁度

**Abstract:** The blackouts usually start from the individual component failure and eventually lead to system crash, and a very few nodes with heavy load play a promoting role in the tendency, therefore, it is very important to find out these key nodes and analyze the system invulnerability under the conditions of node failures. The relevant vulnerability evaluation index model is established based on the static energy function, and the node vulnerability of power system is evaluated so as to confirm the fragile link of power system. On this basis, the intentional attacks and random attacks to the topology model of power grid are carried out, and then the network invulnerability index during the two types of attacks is analyzed and compared. Finally, the invulnerability of power system is analyzed and studied combining system energy with network graph theory. The rationality and effectiveness of the proposed method are verified by the simulation of the actual regional power grid.

**Key words:** invulnerability of power system; static energy function; node vulnerability; network invulnerability

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0026-03

## 0 引 言

在电网规模迅速扩大、结构变得愈加复杂的情况下, 电网不可预知因素更多, 不确定性更大, 甚至会发生大面积、连锁性的大停电事故<sup>[1-2]</sup>, 而确保电力系统的安全稳定运行也更加重要和困难。因此, 电力系统抗毁性分析的提出不仅有着很好的理论研究意义, 更具有潜在的应用价值。

网络抗毁性是从网络连通性的角度来描述网络拓扑结构安全性的一个静态指标。一个网络的抗毁性是指至少破坏网络中多少个节点或边才能中断节点间的联系, 即是衡量破坏一个网络的困难程度<sup>[3]</sup>。目前网络抗毁性的定量分析大部分通过不同方法计算网络拓扑结构中的节点的重要度, 从而得到网络的抗毁度。文献[4]介绍了网络连通度和虚拟节点的概念, 阐述了基于连通度的网络抗毁性评价模型, 并将其应用到电力系统应急通信网络。

文献[5]提出了以节点电气介数指标来衡量元件的脆弱程度。文献[6]应用复杂网络理论, 借鉴有权网络的抗毁性评估方法, 构建了中压配电网网络结构抗毁性评估模型。文献[7]提出了一种基于最短路径数的网络抗毁评价方法, 通过对计算节点之间的最短路径数, 将待评价网络与全连通网络进行网络抗毁性评价。

但是, 在电力系统的抗毁性评估中, 考虑电力系统自身特性, 结合其运行状态进行抗毁性分析也是不可或缺的一方面。文献[8]在网络动态性基础上, 研究级联失效条件下复杂网络的抗毁性能, 认为网络的动态特性对网络抗毁性影响很大。文献[9]在脆弱性评估的基础上, 考虑实际电网中负荷的大小和发电机的出力, 提出系统最大供电区域指标, 利用该指标分析了电力系统在连锁故障下的抗毁性。

根据脆弱性的定义, 电网中最脆弱的环节是电网运行状态最接近临界运行状态, 且故障后对整个

电网的安全稳定运行造成的影响后果最严重的环节。基于能量的观点<sup>[10-11,13]</sup>,建立有效和快速的脆弱性评估指标模型对电网的脆弱性进行分析评估,筛选出电网的脆弱环节。对筛选出的电网脆弱节点进行排序,依次对脆弱节点施加扰动,结合抗毁性评估的理论、模型以及方法,利用电网抗毁度指标来进一步分析电网的抗毁性。并通过与随机故障法对比,验证了所提方法的正确性与有效性。

## 1 节点静态能量函数和脆弱性指标

### 1.1 节点静态能量函数

由静态能量函数模型<sup>[10]</sup>可得多母线系统中第  $i$  节点的静态能量函数  $E_i$  的表达式,如式(1)。

$$\begin{aligned}
E_{ij} &= \int_{(\delta_{ij}^s, V_{ij}^s)}^{(\delta_{ij}, V_{ij})} [f_{p_{ij}} f_{q_{ij}}] d \left[ \begin{matrix} \delta_{ij} \\ V_{ij} \end{matrix} \right] \\
&= \int_{\delta_{ij}^s}^{\delta_{ij}} (P_{ij} - P_{ij}^s) d\delta_{ij} + \int_{V_{ij}^s}^{V_{ij}} \left( \frac{Q_{ij} - Q_{ij}^s}{V_{ij}} \right) dV_{ij} \\
&= \int_{\delta_{ij}^s}^{\delta_{ij}} [V_i^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - P_{ij}^s] d\delta_{ij} \\
&+ \int_{V_{ij}^s}^{V_{ij}} \left[ \frac{-V_i^2 B_{ij} + V_i V_j (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) - Q_{ij}^s}{V_{ij}} \right] dV_{ij}
\end{aligned} \tag{1}$$

### 1.2 节点脆弱性指标

当电力网络中某一个脆弱节点发生故障,而该故障所引起的其他因素的变化将会对与其相关联的其他环节产生影响。由于这些相关联的环节自身也存在脆弱性,在这些因素的共同作用下,可能导致许多保护装置相继动作,使得故障影响在一定范围内传播和扩大,形成级联崩溃,甚至大面积的系统灾变<sup>[12]</sup>。因此,在研究电力网络的抗毁性前预先找出电网的脆弱环节是非常重要的。

定义各节点的脆弱性指标<sup>[13]</sup>为

$$\eta_i = \frac{\partial E_i}{\partial U_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{2}$$

具体对于某一节点  $i$  有

$\eta_i > 0$  时,该节点承受系统中负荷增长的能力较强; $\eta_i = 0$  时,能量及电压均处于临界状态; $\eta_i < 0$  时,承受负荷增长的能力较弱,且其  $|\eta_i|$  的数值越大,表示该节点越难在负荷增长情况下,维持电压稳定。

据此,可有效地判别出系统的薄弱节点。

## 2 抗毁性指标建立

### 2.1 自然连通度

当一个节点与其他任意节点连接的部分路径出现故障时,与这个节点连通的不同路径数越多,发生故障时可替代的路径就越多。在复杂网络抗毁性分析中,该特性可用自然连通度表示,即

$$\bar{\lambda} = \ln \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i} \right) \tag{3}$$

式中,  $N$  为网络节点数;  $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, N)$  为网络邻接矩阵  $A(G)$  的特征根。

### 2.2 抗毁度指标

将网络  $G$  的抗毁度指标<sup>[14]</sup>定义为

$$s(G) = \frac{\ln \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\lambda_i} \right)}{S_0} \tag{4}$$

式中,  $S_0$  为考虑所有可行路径的“完全网络图”的自然连通度。对于不同的网络结构,当网络中各节点的备用路径越多,则网络的抗毁度越大,其在遭受扰动或攻击时能维持系统稳定运行的性能越好。

## 3 电力系统抗毁性评估流程

在电力系统抗毁性分析中,电力网络可能面临两种方式的攻击,即蓄意攻击和随机攻击<sup>[15]</sup>。故这里采用的抗毁性分析步骤如下。

#### 1) 蓄意攻击模式

- ① 计算算例系统各节点的脆弱性指标;
- ② 把各节点按其脆弱性指标从大到小依次排序,并移除最脆弱的一个节点;
- ③ 判断网络运行状态是否达到崩溃,若没有,返回①,否则进入④;
- ④ 根据式(4)计算得到网络抗毁度指标。

#### 2) 随机攻击模式

- ① 在仿真模型的节点中随机移除一个;
- ② 判断网络运行状态是否达到崩溃,若没有,返回①,否则进入③;
- ③ 根据式(4)计算得到网络抗毁度指标。

## 4 算例分析

以四川省某地区电网为例,将该电网中的 500

kV 和 220 kV 变电站等效为仿真模型中的节点, 110 kV 及以下的变电站均等效为对应 220 kV 节点所带的负荷。节点间支路连接关系不变, 支路参数由该地区电业局给定。该地区电网与周边电网联系紧密, 自己只有 1 个独立发电厂, 负荷密度较大, 属于典型受端网络系统, 考虑实际情况将周边电网供电等效为发电机接入相应节点。故该仿真模型包含 4 台发电机, 26 个节点, 34 条支路, 系统节点编号如图 1 所示。

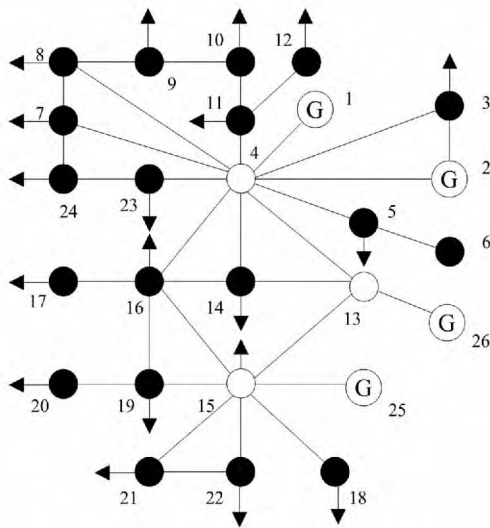


图 1 某地区电网等效结构图

#### 4.1 按脆弱度蓄意攻击最脆弱节点

在系统正常运行的情况下, 由式 (4) 计算出算例系统的抗毁度指标值为: 0.986 5。同时, 在系统处于初始潮流时分析各节点的脆弱程度, 由大到小排序如表 1 所示。

表 1 初始潮流下的脆弱性排序前十节点

节点编号	趋势指标
7	-17.611 0
3	-11.329 0
23	-11.043 0
4	-6.854 9
13	-6.671 3
5	-6.241 3
6	-6.240 1
11	-4.760 1
10	-3.916 6
8	-3.656 2

攻击步骤如下。

①初始潮流下最脆弱的节点为节点 7, 移除节点 7。

②重新计算系统各节点脆弱度并排序如表 2。

表 2 移除节点 7 后的脆弱性排序前 10 节点

节点编号	趋势指标
4	-27.763 0
3	-21.161 0
23	-14.007 0
13	-10.414 0
5	-9.962 1
9	-9.777 1
2	-8.790 5
11	-7.676 9
8	-7.675 6
12	-27.763 0

此时最脆弱节点为 4 节点, 移除 4 节点。

此后系统运行状态严重恶化, 不能继续运行。

#### 4.2 随机攻击节点

①随机移除节点 22; ②随机移除节点 9; ③随机移除节点 17; ④随机移除节点 6。此后系统运行状态严重恶化, 不能继续运行。

表 3 蓄意攻击与随机攻击的系统抗毁度比较

蓄意攻击	系统抗毁度
7	0.872 2
7-4	0.484 4
随机攻击	系统抗毁度
22	0.946 3
22-9	0.923 5
22-9-17	0.905 9
22-9-17-6	0.896 2

由仿真结果可知: 由于节点 7 带有负荷比例较重, 所以脆弱性较高, 移除节点 7 导致潮流严重不平衡, 与其相连的节点 4 脆弱性上升, 移除节点 4 直接导致系统解列, 丢失大量负荷, 系统功率严重不平衡, 直至系统崩溃; 在随机攻击中, 依次攻击网络中的 4 个节点 22、9、17、6, 前期对系统运行状态影响不大, 直至移除节点增多, 导致负荷损失严重, 才对整个网络的运行状态造成破坏性的影响。

通过系统仿真分析比较, 系统在遭受蓄意攻击后的抗毁度远低于遭受随机攻击后的抗毁度, 说明按照脆弱度筛选出的脆弱节点确实是系统中非常薄弱环节, 移除此类脆弱节点对系统造成的破坏力巨大, 对最终导致系统崩溃起到助推的作用。脆弱节点退出运行极大改变了系统结构, 同时造成潮流分布等的急剧变化, 若此时电网的安全与稳定保护装

(下转第 58 页)

作者简介:

陈熙平(1986),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

季杰(1986),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

曹钢(1985),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

蔡显岗(1986),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

王文松(1986),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;

张伟(1986),本科,助理工程师,从事发电厂继电保护工作。

(收稿日期:2013-08-06)

(上接第 28 页)

置不能及时动作,则会导致系统电压全面下降,逐渐拉垮整个系统电压水平,抑或功率严重不平衡,功角不稳定,最终导致系统崩溃。

仿真结果表明,按脆弱度指标来攻击电力网络中的节点,确实对电网的破坏性更强,电力系统运行状态的恶化速度更快。基于电力系统的脆弱环节分析其抗毁性合理且有效。

### 5 结 论

基于静态能量函数,构建节点脆弱度指标,找出系统的脆弱环节,利用抗毁性分析原理对其进行蓄意攻击和随机攻击,然后结合电力系统网架结构构建系统抗毁度指标,分析评估电力系统抗毁性。通过对电力系统的基于脆弱性评估的抗毁性研究,在传统抗毁性分析方法的基础上计及了能量的分布,首先找出系统中存在的薄弱环节,然后通过预想的攻击模式分析薄弱环节故障对电网造成的各种影响,为电力系统的安全及稳定运行提供有价值的参考和指导信息。

参考文献

[1] 邹江峰,章显亮.巴西“2009.11.10”和“2011.2.4”大停电事故及启示[J].中国电力,2011,44(11):19-22.

[2] 陈竟成,黄瀚.印度大停电事故分析与启示[J].中国电力,2012,45(10):12-16.

[3] 程克勤,李世伟,周健.基于边权值的网络抗毁性评估方法[J].计算机工程与应用,2010,46(35):95-100.

[4] 高强,刘献伟,邱丽君.电力系统应急通信网络及其抗毁性分析[J].电网技术,2009,33(11):104-108.

[5] 张向亮,吕飞鹏,张向军,等.考虑节点电气介数的多组同基最小断集选取方法[J].中国电力,2012,45(6):10-13.

[6] 杨丽徙,林茂盛,张宏伟,等.中压配电网典型网络结构抗毁性评估[J].电力系统自动化,2012,36(1):28-31.

[7] 饶育萍,林竞羽,侯德亨.基于最短路径数的网络抗毁评价方法[J].通信学报,2009,30(4):113-117.

[8] 谢丰,程苏琦,陈冬青,等.基于级联失效的复杂网络抗毁性[J].清华大学学报:自然科学版,2011,51(10):1252-1257.

[9] 张国华,张建华,杨京燕,等.基于有向权重图和复杂网络理论的大型电力系统脆弱性评估[J].电力自动化设备,2009,29(4):21-26.

[10] Overbye T J, Demarco C L. Voltage Security Enhancement Using Energy Based Sensitivities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3): 1196-1202.

[11] 刘群英,刘俊勇,刘起方.节点势能架构下的电压脆弱性评估[J].中国电机工程学报,2008,28(25):30-37.

[12] 丁道齐.深入研究复杂电网动态行为特征构建中国特高压电网安全保障[J].中国电力,2008,41(8):1-7.

[13] 郑武,李华强,刘慧,等.基于静态能量函数法的电压弱节点分析[J].电力系统保护与控制,2010,38(14):79-83.

[14] 田田,吴俊,谭跃进.基于自然连通度的复杂网络抗毁性仿真优化研究[J].复杂系统与复杂性科学,2013,10(2):88-94.

[15] 杨丽徙,曾新梅,方强华,等.基于抗毁性分析的中压配电网拓扑结构[J].电力系统自动化,2013(8):65-69.

[16] 丁道齐.降低电力系统物理脆弱性应对自然灾害和恶意攻击[J].中国电力,2009,42(6):26-31.

作者简介:

李艳卿(1989),硕士研究生,研究方向为电力系统分析、稳定及优化问题研究;

李华强(1965),博士,教授,从事电力系统分析、稳定及优化问题研究。

(收稿日期:2013-09-14)