

基于电网状态与结构的综合脆弱评估模型

魏震波¹, 刘俊勇¹, 朱国俊², 朱 康², 刘利民¹, 方 涛¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川省成都市 610065; 2. 四川省电力公司, 四川省成都市 610061)

摘要: 系统规模的不断扩大及元件的日益复杂,使得电网安全问题成为关注焦点。在已有脆弱性研究基础上,给出了状态脆弱性及结构脆弱性的准确定义及新评估模型;提出了结合两脆弱因子的评估思想,即在考虑元件运行状态的同时,兼顾其网络结构特性,由此建立了可基于不同运行状态变量以获取不同脆弱评估目的与结果的评估模型通式。算例结果表明所提出的模型可基于不同状态变量对电网进行脆弱性评估,且对电网中的薄弱环节有较好的辨识能力及较高的辨识精度,可为电网脆弱性评估及电网运行维护提供参考,验证了模型的合理性及有效性。

关键词: 脆弱性; 状态脆弱性; 结构脆弱性; 复杂网络理论; 评估模型

中图分类号: TM732; TM712

0 引言

近年来,大规模停电事故的发生使得电力系统安全问题成为关注焦点,脆弱性^[1]作为该范畴中的新兴理论已被不少学者所研究,但目前还没有公认的定义和统一的分析标准。从元件运行状态及电网结构角度分析电网脆弱特性是目前的研究热点。文献[2-3]基于能量函数方法考虑系统电压模型及无功负荷模型,定义了当前系统到电压崩溃点的脆弱安全尺度,分析了发电机无功出力极限变化与电压崩溃的联系;文献[4]在定义了母线隔断率、负荷损失率、负荷削减期望及系统稳定概率的基础上,提出了基于四者的系统脆弱性评估指标;文献[5-6]分析了电网的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;文献[7]基于小世界拓扑模型分析,给出了电网结构脆弱性评估算法,验证了小世界电网对关键点的强依赖性;文献[8]提出了基于电网运行状态和拓扑参量的二维平面拟合的脆弱分析方法,该方法对电网脆弱线路有一定的识别能力,但缺乏直观的脆弱强度表达及严格的数学基础。

上述文献及大量研究成果表明电力系统作为实时非线性复杂网络系统,元件(拓扑模型下为节点或线路,统称为单元,详细拓扑化原则参考文献[5-7],这里不再赘述)的脆弱强度不仅与运行状态($P, Q,$

V, θ 等)有关,而且与其网络结构紧密联系。其中,结构特性是电网固有的属性,一旦网络结构确定,外界的影响因素不能从根本上改变这个弱点^[9]。然而,鲜见有兼顾两脆弱因子的评估算法,目前的算法大都为单一考察角度的方法,这些算法难以全面、准确地反映电网的脆弱特性及强度。

针对上述问题及研究现状,本文在给出了状态脆弱性及结构脆弱性的准确定义及新评估模型的基础上,提出了结合两脆弱性的综合电网脆弱性评估模型。模型特点如下:①结合复杂网络理论的单元状态脆弱强度;②考虑负荷经济因子的单元结构脆弱强度;③结合状态脆弱强度与结构脆弱强度的综合评估模型。算例结果验证了该模型的合理性与有效性。

1 电力系统脆弱性

电力系统脆弱性是用来描述系统在正常运行情况或各种随机因素的作用下,系统承受干扰或故障的能力及系统不能维持正常运行的可能趋势及其影响。其中,系统承受干扰的能力及其受影响的程度是电力系统脆弱性的 2 个重要衡量标准,缺一不可。

从已有文献来看,按研究角度的不同,主要有状态脆弱性研究及结构脆弱性研究这 2 个方面。虽同为脆弱性研究,但研究机理及方法却大不相同。状态脆弱性是研究状态变量偏离正常状态或距离临界值的程度,研究方法以裕度计算、灵敏度分析及能量函数分析为主;而结构脆弱性则是研究某一单元在其网络结构中的“重要程度”,即该单元退出后对电网的影响程度,研究方法以复杂网络理论及小世界网络理论为主。

收稿日期: 2008-11-24; 修回日期: 2009-01-15。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2004CB217905)。

2 状态脆弱性及其模型

状态(指元件或单元的运行状态)脆弱性是指系统在遭受扰动或故障后,元件状态变量发生变化(如电压下降或呈现下降趋势),并可能向临界值(电压崩溃点)逼近的特性。该特性反映的是从稳定向临界失稳的过渡过程,是对当前系统状态安全水平及变化趋势的反映,即2个重要衡量标准中的“承受干扰的能力”。分析方法与传统稳定分析方法比较接近的数学表达式如下:

$$\begin{cases} \Delta = |\alpha(t) - \alpha_{\text{临界}}| \\ \rho = \frac{|\alpha(t) - \alpha_{\text{临界}}|}{|\alpha_0 - \alpha_{\text{临界}}|} \\ \mu = \frac{\partial \Delta}{\partial t} \left(\frac{\partial \Delta}{\partial t} \right)^{-1} = \frac{\partial \Delta}{\partial f} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δ 为绝对脆弱强度,是状态变量当前值 $\alpha(t)$ 与临界值 $\alpha_{\text{临界}}$ 的裕度大小; ρ 为相对脆弱强度,是当前裕度与初始安全裕度的百分比; μ 为灵敏度脆弱强度,是状态变量变化与参考函数变化的比值(如母线电压变化与母线功率变化之比)。

从数学表达式可以看出, Δ, ρ, μ 有着较为明显的优缺点。 Δ 在“程度”反映上存在缺陷。例如具有同样大小500 V裕度的500 kV母线与10 kV母线来说,脆弱程度明显不同; ρ 和 μ 虽能较好地反映程度问题,但此类基于百分比或灵敏度的强度指标存在无法区别相同 ρ 和 μ 大小的单元间主次关系的问题,即两重要衡量标准中的“重要程度”区别。上述问题也是传统稳定分析方法的不足之处,即通过解微分方程或代数方程,对系统当前运行状态进行判别。如电力系统暂态稳定分析中,通过比较故障切除瞬间的系统总能量与临界能量,判别系统稳定状态;电压稳定中,通过计算奇异值大小或负荷裕度的大小,判别电压稳定状态。此类结果往往只是对稳定状态是与否的判别或裕度绝对大小的计算,缺乏对每个元件主次的区别。从实际电网运行角度考虑,对于系统操作人员来说,最关心的应是那些运行状态差、逼近临界状态速度快,且发生故障后影响严重的元件。这也是脆弱性辨识的主要目的。而往往系统中运行情况最差的元件不一定会是造成影响最严重的;而会造成严重影响的往往又不是运行情况最差的。如何计算各元件的脆弱强度并加以区别对待是本文研究的目的所在。

基于上述分析,本文提出了引入复杂网络理论^[8-9]中的参数——介数,作为单元状态脆弱权重,对相同 Δ, ρ, μ 大小单元进行区别。在复杂网络理论中,介数的大小反映了节点的吞吐量、访问量、通行能力以及节点在网络中的活跃程度。对应到电网

中,则反映了节点对电能的输入量、输出量、承载能力及节点在电网中的活跃程度。定义单元状态脆弱强度为状态脆弱强度倒数与单元介数的乘积:

$$\begin{cases} \Delta_i' = \frac{B_i}{\Delta_i} = B_i \frac{1}{|\alpha(t) - \alpha_{\text{临界}}|} \\ \rho_i' = \frac{B_i}{\rho_i} = B_i \frac{|\alpha_0 - \alpha_{\text{临界}}|}{|\alpha(t) - \alpha_{\text{临界}}|} \\ \mu_i' = \frac{B_i}{\mu_i} = B_i \frac{\partial \Delta}{\partial f} \end{cases} \quad (2)$$

式中: B_i 为单元介数。

不难理解,此处采用介数作为权重的意义在于:对“活跃”单元的状态脆弱强度进行有效放大,即具有相同脆弱程度的单元,其中活跃者更脆弱,因为其影响面更广,程度更深。将 Δ, ρ, μ 用 Γ 统一表示,则单元状态脆弱强度 Γ_i' 为:

$$\Gamma_i' = \frac{B_i}{\Gamma_i} \quad (3)$$

值得注意的是,由于复杂网络理论诞生发展于社会网、因特网等,该类网络与电力网的最大不同在于:网络中每个节点既是人际关系或信息的发出者,也是接收者或传递者,即每个节点都可能产生新的人际关系或信息;而电网中,电能由发电机产生,其他元件不产生新的电能。拓扑模型下表现为电能由发电机节点输出,其他节点为电能的传输(中继)或接收(消耗)者。因此在介数计算中,需对其中的最短路径定义进行修改。定义如下:在电网中,最短路径为连接发电机节点与其他节点之间边数之和最小的路径。介数仍为单元被最短路径经过的次数。

3 结构脆弱性及其模型

复杂网络理论,特别是小世界网络理论的诞生和发展对研究电网结构脆弱性及电网大规模连锁故障传播的内在机理提供了很好的理论工具^[5-9]。结构脆弱性^[10-11]是指网络中某一单元或某一些单元退出或相继退出(连锁故障模式)后,网络保持其拓扑结构完整并正常运行的能力。一般可选取一定的评估指标,考察这些单元退出后,对网络造成的影响,即2个重要衡量指标中的“系统受影响的程度”。在复杂网络理论及小世界网络理论中,常见的评估指标有:最大连通域 G 、网络冗余性 R 及网络负荷损失量 Q 。考虑到电网的规模性,同一电网中不同负荷节点的经济性有所差别,即单位负荷损失造成的损失有所不同,由此提出了基于负荷经济因子的网络负荷损失经济性后评估指标 M_k :

$$M_k = \sum_{i \in \Omega} \epsilon_i L_i \quad (4)$$

式中: M_k 为单元 k 退出网络后造成的损失; ϵ_i 为节

点 i 的负荷经济因子; Ω 为网络负荷损失节点集合; L_i 为节点 i 负荷损失。

下面通过一个简单示例进行说明。图 1 所示为某一大型电网简图,其中 $G_1 \sim G_n$ 为电网中发电机节点, $L_1, L_2, \dots, L_i, L_k$ 为电网中的负荷节点。

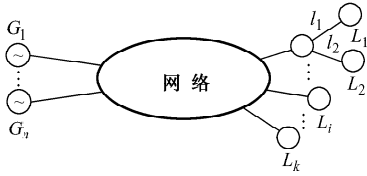


图 1 大型电网简单拓扑示意图

Fig. 1 A simple graph of large electric power grid

在该网络结构中,负荷 L_1 和 L_2 是具有相同结构特征的两节点,即线路 l_1 和 l_2 及节点 L_1 和 L_2 具有相同大小的介数。如果 L_1 和 L_2 负荷大小一样,则无法区别。因此,采用负荷经济因子进一步细化各节点结构脆弱强度是合理的,也是可行的。

考虑以下问题:如果网络中单元 m 与单元 n 退出后所造成的影响程度相等,即 M 值大小相等,如何对两者脆弱强度进行辨识?由此,考虑引入结合单元运行状态强度进行辨识是合理的。

4 电网脆弱性评估模型

从前面分析可知,单一地从运行状态或网络结构角度考察电网脆弱强度势必存在不足。在单元状态脆弱强度 Γ_i' 中引入介数作为权重便是结合了结构因素,而采用经济性后评估指标 M_k 可以进一步细化结构脆弱强度的差别。由此,本文提出结合元件状态脆弱性与结构脆弱性的电网脆弱评估模型:

$$V_i = \Gamma_i' M_k \quad (5)$$

式中: V_i 为网络单元 i 的脆弱值。

Γ_i' 中的脆弱强度 (Δ, ρ, μ) 类型与状态变量 $\alpha(t)$ (P, Q, V, θ 等)类型可根据不同评估目的进行选择。当然,变量类型还可以是上述变量的组合构造,如能量函数等。可以看出,本文提出的是一种新的脆弱评估思想及评估模型通式。

5 算例

以 IEEE 14 节点系统(见附录 A 图 A1)为例,选择节点电压 V 为评估状态变量,采用脆弱强度模型 ρ' 。系统初始电压 V_0 值、某一时刻 t 电压 V_t 值及计算系统鞍结分岔值(SNB)见附录 B 表 B1。根据前文最短路径定义,计算各节点的介数值,并根据式(2)计算状态脆弱强度 ρ' 值(见附录 B 表 B2)。将

结果与相对脆弱强度 ρ 及其他常见指标——V-Q 灵敏度与无功裕度关于无功负荷灵敏度进行对比,结果如表 1 所示。

表 1 IEEE 14 节点系统排序结果对比(一)
Table 1 Indices comparison taxis 1 to IEEE 14 bus power system

脆弱指标	状态脆弱强度 ρ'	相对脆弱强度 ρ	V-Q 灵敏度指标	无功裕度关于无功负荷的灵敏度
节点排序 ↓	4	5	9	9
	5	4	5	14
	9	14	14	10
	7	10	10	5
	13	9	4	4
	11	12	7	7
	14	11	11	11
	10	13	13	13
	12	7	12	12
	强			

分析对比表 1 中数据可知:

1)对比第 2 列、第 3 列数据,其中节点 7,14 排序有较大变化。分析如下:节点 7 作为 PV 节点 8 接入网络的唯一路径的连接节点,在获取节点 8 较好的电压稳定保障的同时,即无功备用充裕,也决定了其具有较高的网络“活跃度”,即表现为唯一路径,因此在本文模型中排序有了较大提升;而节点 14 作为网络远端负荷,当负荷发生变化时,其电压变化会比较明显,如负荷加重时,电压下降幅度相对较大,因而其 ρ 值、V-Q 灵敏度及无功裕度关于无功负荷的灵敏度值较大,表现出在第 3 列~第 5 列中排序靠前。然而该负荷位于网络远端,“活跃”程度相对较低,表现为该节点退出网络后,对电网造成影响不大,进而在本文模型中排序有了较大幅度的下降。

2)对比第 2 列与第 4 列、第 5 列数据,其中节点 4,14 排序有较大变化。节点 14 已进行了分析;节点 4 作为发电机节点与负荷节点间的主要连接点之一(在电网中,一般为高压输电线路的升压端),担当着网络电能传输的重要任务,一旦发生故障,对系统影响严重,加之较高的相对脆弱强度值,进而 ρ' 高,符合实时电网特征。

考虑各节点负荷经济因子 ϵ_i (见附录 B 表 B3),基于 MATLAB 中 PSAT^[12-13] 工具包进行仿真计算。考虑连锁故障模型,计及线路越限情况,以初始线路有功潮流的 10% 为上限,不计系统隐性故障,假设所有保护装置都正确动作,根据式(4)、式(5)计算各单元 M_k 值(见附录 B 表 B4)及脆弱值 V_i (见附录 B 表 B5),将结果与表 1 排序进行对比,如表 2 所示。

表 2 IEEE 14 节点系统排序结果对比(二)
Table 2 Indices comparison taxis II to IEEE 14 bus power system

脆弱指标	脆弱值 V_i	状态脆弱强度 ρ'	相对脆弱强度 ρ	V-Q 灵敏度指标	无功裕度关于无功负荷的灵敏度
节点排序 ↓ 弱	4	4	5	9	9
	5	5	4	5	14
	9	9	14	14	10
	7	7	10	10	5
	13	13	9	4	4
	12	11	12	7	7
	14	14	11	11	11
	11	10	13	13	13
	10	12	7	12	12
	强				

分析对比表 2 中数据可知:

1)对比第 2 列、第 3 列数据,节点 12 排序发生了一定变化。原因在于:当节点 12 退出网络时,所引发的系统连锁故障损失 M_k 值如附录 B 表 B5 所示,较节点 10,11,14 大,进而排序有一定提高。验证了基于经济后评估的结构脆弱指标的有效性。

2)对比第 2 列与第 5 列、第 6 列数据,在考虑了元件结构特性的本文模型下,节点 4,5,9,7 排序靠前。节点 4,5 作为发电机与负荷的主要传输路径,表现为变压器支路(在实际电网中一般为高压输电线路)的升压端。一旦发生故障,都会对网络造成严重影响,排序靠前是合理的。而在其他模型,相对脆弱强度 ρ 、V-Q 灵敏度、无功裕度关于无功负荷灵敏度中,节点 10,14 虽其自身运行状态表现较为脆弱,排序靠前,但其退出后对系统造成影响不大,进而不是系统操作人员关心的重点,排序应该靠后,表明了其不合理性。

综上所述,算例结果进一步验证了“元件的脆弱强度不仅与运行状态有关,而且与其网络结构紧密联系”的结论,即元件的脆弱值大小应该是对自身运行状态(传统稳定分析方法)及在网络中重要程度的反映,单一从某一角度进行衡量是不完整的。将传统稳定分析方法与复杂网络理论相结合,综合考虑电网运行与结构两脆弱因子是合理的,也是可行的。因此本文提出的是一种新的评估思想与模型。

6 结语

本文提出了结合元件运行状态和网络结构特性的电网脆弱评估模型。在传统稳定分析方法的基础上,引入脆弱性概念,结合复杂网络理论对电网进行脆弱评估。其中,电网与其他网络的区别是应用复杂网络理论的难点,亦是重点。从模型的辨识效果来看,通过介数对单元状态脆弱强度的有效放大作用及经济性后评估指标进一步细化区别了各单元的

脆弱强度,提高了模型的辨识精度。由此对系统中那些担当角色重要、影响面广、一旦发生故障将造成严重损失且自身脆弱强度薄弱的环节进行准确定位,为电网的脆弱性评估及运行维护提供了参考。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] FOUAD A A, ZHOU Qin, VITTAL V. System vulnerability as a concept to assess power system dynamic security. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 1009-1015.

[2] DEMARCO C L, OVERBYE T J. An energy based security measure for assessing vulnerability to voltage collapse. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 419-427.

[3] OVERBYE T J, DEMARCO C L. Voltage security enhancement using energy based sensitivities. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(3): 1196-1202.

[4] YU Xingbin, SINGH Chanan. A practical approach for integrated power system vulnerability analysis with protection failures. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1881-1820.

[5] 丁明,韩平平.小世界电网的连锁故障传播机理分析.电力系统自动化,2007,31(18):6-10.

DING Ming, HAN Pingping. Study of failure spreading mechanism in the small-world power grid. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(18): 6-10.

[6] 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.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. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24.

[7] 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.电力系统自动化,2006,30(8):7-11.

DING Ming, HAN Pingping. Small-world topological model based vulnerability assessment algorithm for large-scale power grid. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 7-11.

[8] 丁剑,白晓民,赵伟,等.基于二维平面拟合的电网脆弱性分析.电力系统自动化,2008,32(8):1-4.

DING Jian, BAI Xiaomin, ZHAO Wei, et al. Grid vulnerability analysis based on two-dimensional accumulation means. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 1-4.

[9] 丁明,韩平平.加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估.中国电机工程学报,2008,28(10):20-25.

DING Ming, HAN Pingping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 20-25.

[10] DODDS P S, MUHAMAD R, WATTS D J. An experimental study of search in global social networks. Science, 2003, 301(5634): 827-829.

[11] ALBERT R, JEONG H, BARABASI A L. Error and attack tolerance of complex networks. Nature, 2000, 406: 378-382.

(下转第 55 页 continued on page 55)

- [12] 常勇,徐政,王超. 基于 Matlab 的电力系统分析工具包 PAST 及其有效性检验. 电力自动化设备,2007,27(7):102-105.
CHANG Yong, XU Zheng, WANG Chao. Matlab-based power system analysis toolbox and its validity check. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(7): 102-105.
- [13] 常永吉. PSAT 在电力系统稳定性仿真中的应用. 电气应用, 2008,27(14):61-64.
CHANG Yongji. The application of PSAT in power system stability simulation. Electrotechnical Application, 2008, 27(14): 61-64.

魏震波(1978—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力系统稳定与控制及电力市场。E-mail: weizhenbo1978@yahoo.com.cn

刘俊勇(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统稳定性分析及电力市场。

朱国俊(1957—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:特高压输电工程的建设管理和研究。

A New Integrative Vulnerability Evaluation Model to Power Grid Based on Running State and Structure

WEI Zhenbo¹, LIU Junyong¹, ZHU Guojun², ZHU Kang², LIU Limin¹, FANG Tao¹

(1. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610061, China)

Abstract: With the continual increment of system scale and the gradual complication of components, security problem of power grid has been a focus. Based on the existing researches, respective definitions and evaluation models of running state vulnerability and structural vulnerability are presented. Then a new evaluation method combining intensity of state variables and structural characteristics of components is proposed, and a corresponding evaluation model through which different assessment motives and results can be obtained in different state variables is established. Results of a numerical example show that the model can assess the vulnerability of power grid based on different state variables, and it has a preferable ability and precision in identifying the vulnerable components of power grid. The method can be a useful reference for power grid vulnerability assessment and operation and maintenance. Meanwhile, it is verified that the method is rational and available.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217905).

Key words: vulnerability; running state vulnerability; structural vulnerability; complex network theory; evaluation model

附录 A 仿真试验系统图及数据

IEEE-14 节点系统如图 A1 所示。其中节点 1、2、3、6、8 为发电机节点，节点 1 为平衡节点，其他为 PV 节点。

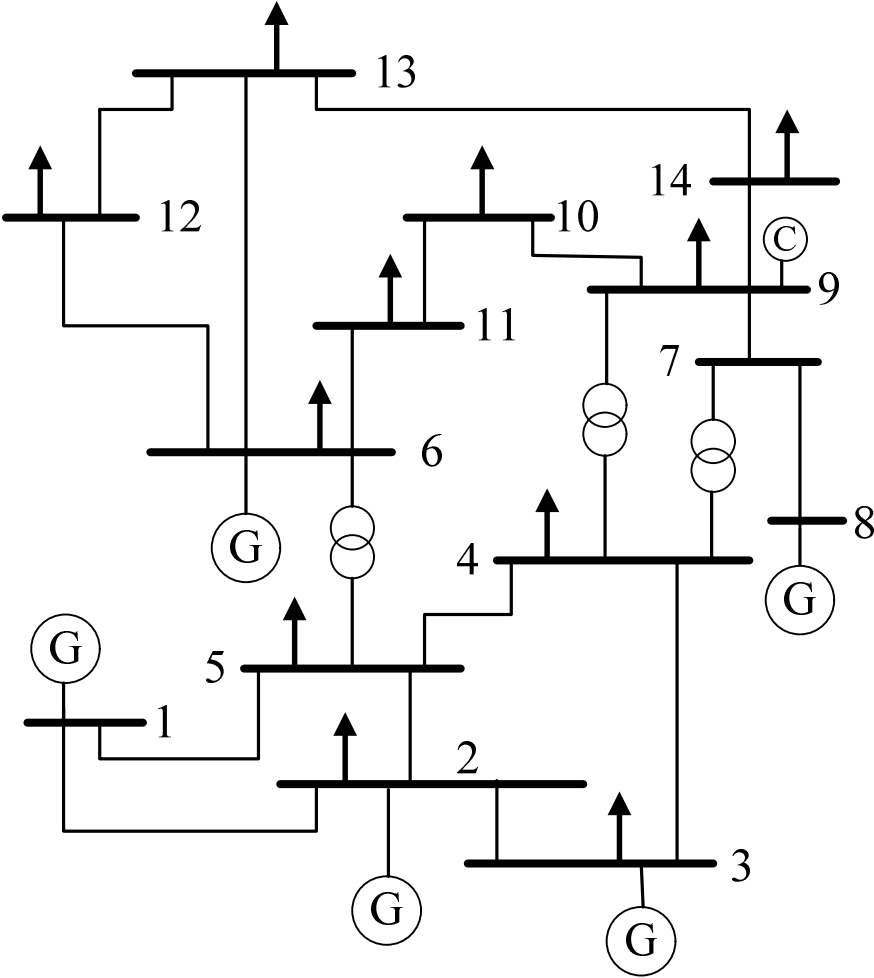


图 A1 IEEE 5 机 14 节点系统

Fig.A1 IEEE 14 bus power system with 5 generators

附录 B 仿真试验数据及相关参数

系统初始电压 V_0 值、某一时刻 t 电压 V_t 值及计算系统 SNB 值如表 B1 所示。

表 B1 节点电压值(p.u)
Table B1 Voltage of nodes (p.u)

节点	4	5	7	9	10	11	12	13	14
V_0	1.0180	1.0200	1.0620	1.0560	1.0510	1.0570	1.0550	1.0500	1.0360
V_t	0.9712	0.9722	1.0250	1.0151	1.0039	1.0191	1.0158	1.0168	0.9717
SNB	0.7484	0.7486	0.7444	0.7085	0.6977	0.7107	0.7054	0.6946	0.6602

根据式（2）计算状态脆弱强度 ρ' 值如表 B2 所示。

表 B2 单元状态脆弱强度
Table B2 Running state vulnerability of units

节点	4	5	7	9	10	11	12	13	14
ρ'	36.30	32.77	16.98	23.80	10.38	11.23	7.88	12.13	10.86

节点负荷经济因子 ε_i 大小如表 B3 所示。

表 B3 负荷节点经济因子
Table B3 Economical factor of loads

节点	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14
ε_i	0.39	0.40	0.40	0.42	0.43	0.40	0.41	0.42	0.45	0.42	0.44	0.45

根据式（4）计算各单元 M_k 值如表 B4 所示。

表 B4 单元 M_k 值
Table B4 M_k of units

节点	4	5	7	9	10	11	12	13	14
M_k	0.9495	0.9822	0.7487	0.6479	0.0378	0.0536	0.5077	0.5573	0.1049

根据式（5）计算各单元脆弱值 V_i 如表 B5 所示。

表 B5 单元脆弱值
Table B5 Vulnerability value of units

节点	4	5	7	9	10	11	12	13	14
V_i	34.47	32.19	12.71	15.42	0.39	0.60	4.00	6.76	1.14