

# 电力系统脆弱性理论研究

魏震波<sup>1</sup>, 刘俊勇<sup>1</sup>, 朱国俊<sup>2</sup>, 贺星棋<sup>1</sup>, 龚 薇<sup>1</sup>

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 四川省电力公司 特高压办公室, 四川 成都 610061)

**摘要:** 在对比传统电力系统安全性分析与脆弱性分析的基础上, 给出了绝对脆弱性、相对脆弱性及灵敏度脆弱性 3 种典型脆弱性的分析模型。对脆弱性研究的主要方面, 如基于能量函数的电压脆弱性和基于复杂网络理论的结构脆弱性进行了分析。指出由于电网是一个强实时非线性的复杂网络系统, 单一从节点的运行状态(电压)脆弱强度进行分析, 忽略网络整体连接效应, 存在一定误差与失真。而单一从网络结构, 不考虑运行状态及网络约束, 也与电网实际运行相违背。提出构建考虑系统固有脆弱特性、系统运行参数、风险评估及其他可能脆弱因素的综合脆弱性指标。

**关键词:** 电力系统脆弱性; 电压脆弱性; 能量函数; 电网结构脆弱性; 复杂网络理论; 脆弱指标

**中图分类号:** TM 711

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2009)07-0038-05

## 0 引言

电网规模不断扩大化及系统元件复杂化是当前电力系统发展的主要特点。电网大规模互连实现了更大范围内资源的优化配置, 但同时也降低了系统的安全稳定程度。局部故障波及整个网络, 造成大面积停电事故屡有发生, 传统的安全性分析已显不足。过去的电力系统安全性只包括系统的稳定性和可靠性, 安全分析大部分是在预想事故筛选排序的基础上, 通过离线计算和在线匹配的方法, 对预想事故的后果进行比较分析来实现动态安全评估的(即  $N-1$  计算), 这无疑在精度和实时性上存在缺陷, 更无法反映系统中某一项或多项运行参数变化对系统稳定裕度及变化趋势的影响。如何保障电力系统的安全运行, 对其运行状态及变化趋势进行快速准确分析, 提高系统操作员意识, 避免灾难性事故的发生是当前电力系统安全分析发展的主要方向。脆弱性理论便是由此发展出来的理论成果之一。本文旨在通过电力系统脆弱性这一新兴概念的描述及定义, 对已有理论方法进行分析与研究, 针对其中可能存在的问题提出相应的看法与观点, 进而对其在电力系统安全分析中的应用和发展做出总结与展望。

## 1 电力系统安全性

电力系统安全性定义为在突发性事故扰动下, 如系统发生短路或元件退出等, 系统保证避免发生广泛波及性供电中断的能力。由于安全性是对突发事件引起的后果进行分析, 涉及到系统事故后的稳态

行为和暂态行为, 因此安全性分析往往也被称之为预想事故分析。安全分析包括静态安全分析和动态安全分析, 其中静态安全分析只考虑事故后系统重新进入新稳态运行情况的安全性, 而不考虑从当前运行状态向事故后状态转变的暂态过程; 动态安全分析则是根据实时潮流对预想事故后系统的暂态稳定性进行评定<sup>[1]</sup>。数学模型上主要是对系统的等式约束条件与不等式约束条件进行考察, 简写如下:

$$\begin{cases} g(x) = 0 \\ h(x) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $g(x)$  是系统有功、无功的平衡约束;  $h(x)$  是有关电气设备的运行参数约束。

由此将系统运行状态划分为安全正常、警告、紧急、危急和恢复 5 种状态。

可以看出, 以往的安全分析在以下 3 个方面存在不足:

a. 系统状态变化的暂态过程, 包括安全水平的变化及网络结构从  $N$  到  $N-1$  的变化过程;

b. 系统参数变化对系统安全裕度的影响, 包括裕度容量程度及变化快慢;

c. 系统隐性故障的影响(事实证明, 多次大停电事故与系统保护装置的误动与拒动有直接联系)。

## 2 电力系统脆弱性

脆弱性概念源于环境、生态、计算机网络等领域, 它是描述系统及其组成部分易于受到影响和破坏, 并缺乏抗拒干扰、恢复初始状态的能力。电力系统脆弱性是近年来针对电力系统安全性及可靠性提出的一个新概念, 目前还没有公认的定义和统一的分析标准。但从已有参考文献看, 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

收稿日期: 2008-08-18; 修回日期: 2009-03-26  
基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2004 CB217905)

行的可能趋势及其影响。可以看出,电力系统脆弱性主要包括系统安全水平和变化趋势2方面内容,它反映系统某一参数或多个参数发生变化时对系统安全裕度的影响及变化趋势。

脆弱性早期引入电力系统分析是用以评估电力系统的动态安全性<sup>[2]</sup>。文献[3]利用暂态能量函数(TEF)方法提出了基于脆弱性概念的系统安全评估方法,引入能量差 $\Delta v$ 作为系统安全水平指标及灵敏度 $\partial\Delta v/\partial f$ 系数作为系统安全变化趋势指标,设定一安全水平基准值,对各母线或支路进行指标计算并排序,进而确定脆弱单元。其中,安全水平指标 $\Delta v$ 与变化趋势指标 $\partial\Delta v/\partial f$ 的极限值与系统参数临界稳定极限相联系。脆弱性的总体思想一般可用以下数学表达式进行描述:

$$\begin{cases} \Delta v = |v(t) - v_{\text{cri}}| \\ \kappa = \frac{|v(t) - v_{\text{cri}}|}{|v_{\text{ini}} - v_{\text{cri}}|} \\ \rho = \frac{\partial\Delta v}{\partial\Delta f} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $v(t)$  是系统当前考察函数值;  $v_{\text{cri}}$  是给定考察函数临界值;  $\kappa$  是考察函数脆弱度;  $v_{\text{ini}}$  是考察函数初始安全水平基准值;  $\Delta f$  是系统变化值(文献[3]取系统有功);  $\rho$  是变化趋势指标。

从数学思想及定义可以看出,脆弱性研究旨在通过脆弱指标的构建,对系统当前安全水平及变化趋势进行判断,由此确认系统中脆弱单元。对系统可能发生的故障或由此引发的大规模供电服务中断,采取措施排除或减小相应故障,加强对故障的回应,提高系统运行人员意识,使得系统操作程序标准化<sup>[4-5]</sup>。

国内外文献表明,当前电力系统脆弱性的研究主要包括对脆弱性机理与脆弱性评估指标2方面,其中机理研究主要有节点电压脆弱性(voltage vulnerability)及电网结构脆弱性(structural vulnerability)2个方面。对电压脆弱性的研究方法主要有能量函数法和基于概率的风险理论分析法;对结构脆弱性的研究方法主要有基于复杂网络理论、基于概率的风险理论及与人工智能相结合的方法<sup>[6]</sup>等。

## 2.1 电压脆弱性及评估指标

电压脆弱性是指系统在遭受扰动后母线电压降低或呈现降低趋势,并向临界崩溃点逼近的特性,该特性侧重体现电压从稳定向临界失稳的过渡过程;而电压脆弱性指标则是对当前系统电压安全水平及变化趋势的反映。

可以看出,电压脆弱性研究是以电压稳定分析为基础,通过构建脆弱指标对系统进行安全评估,大量电压稳定分析方法应用于其中。考虑无功源出力约束对系统电压稳定<sup>[7]</sup>的影响,文献[8]基于灵敏度分析方法,提出了基于线性潮流等式的受约束考察点的无功预测/修正指标,由此对系统电压崩溃点进行估计。虽然文中的预测/修正指标并未定义为脆弱性指标,但其思想已较为接近。文献[9-10]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,并指出当系统负荷大幅度增加时,其脆弱指标相应变化为线性,有利于对电压崩溃的预测;文献[11]则基于能量安全尺度定义电压稳定的脆弱度,并提出通过分析安全极限与不同控制动作的灵敏度来提高系统安全度;文献[12]基于静态负荷无功潮流等式和不等式计算系统全局和局部指标,定义最大极限负荷增加方向为对应发电机无功出力增加最大需求方向,由此计算系统及节点电压脆弱值,并进行脆弱度排序,定位系统最薄弱点及薄弱区域。文献[13]基于VSM(Voltage Stability Margin)对故障前后电压稳定水平进行了评估,同时考虑系统有功与无功约束的影响,基于微分的方法对节点电压稳定进行排序,即电压脆弱度排序,进而对系统脆弱部分定位。文献[14]基于概率的风险理论,通过计算节点电压崩溃的风险指标及风险指标变化率,从系统不确定性角度评估了电压脆弱性;文献[15]在其基础上,结合模糊推理的方法及运行人员的经验,由电压风险指标和风险指标变化率推理出了易于理解的归一化电压脆弱度。文献[16]结合系统运行指标和拓扑方法,通过定义网络贡献因子(NCF)、发电机分布因子(GDF)、负荷分布因子(LDF)和最小切负荷值(SMLS)确定系统脆弱性部分。由于该法也是通过离线故障试验办法评估系统脆弱度,因此在实时性上存在着一定缺陷;文献[17]则提出一种新的动态母线电压脆弱度指标(DBVVI),基于时域解耦方法对其进行筛选、排序和评估(FRA)。

从上述文献可以看出,由于节点电压与节点无功密切相关,且从能量观点出发,节点无功对应节点势能(有功对应动能),而能量函数法对系统暂态稳定分析有较好优势,因此目前对节点电压脆弱性的研究大都以能量函数结合经济学中的风险理论为主要途径(其中风险理论的引入,主要是针对系统可能故障后的经济性评估问题),通过脆弱指标构建、筛选、排序和评估,最终确定系统脆弱单元。

但是,电力系统并不是孤立节点的简单连接,而是一个相互制约和影响的整体。单独考虑每个节点的脆弱度,而忽略整体连接效应,必然会带来误差与失真<sup>[18-19]</sup>。例如,根据上面提到的方法,对系统节点电压进行脆弱排序。在排序正确情况下,考虑以下问题:当系统最高脆弱度节点发生故障后,是否意味着一定是脆弱排序第2的节点将成为最高脆弱源,即可能发生 $N-2$ 故障的下一对象?分析如下,当系统某一节点退出后,其能量转移特性与故障后网络结构密切相关,此时网络结构已经发生了变化,可能使得某些“关系密切”节点的能量发生了较大改变,即安全裕度有较大改变,而这些“关系密切”节点可能并不是初始排序第2的脆弱单元。因此,可以肯定的是当系统某一节点或单元退出后,其脆弱排序会发



生变化,但绝不会是序位的依次向前提升的变化,而应该是一个由能量转移特性决定的升降非一致性的重列排序。因此,基于能量函数与风险理论研究电压脆弱性的同时,考虑系统整体运行参数和网络结构因素是下一步研究重点。

## 2.2 结构脆弱性及评估指标

结构脆弱性是指电力系统正常运行情况下,保持其拓扑结构完整性的能力。对一给定电网,其网络拓扑结构是唯一的,它是电网内在的本质特性。因此,结构脆弱性是电网固有脆弱强度的反映;电网结构的鲁棒性是电力系统“强壮”的基础。大量研究表明,电网结构与系统连锁故障有着密切的联系,应用复杂网络理论研究电网连锁故障传播的内在机理成为结构脆弱性研究的主要方向。

文献[20-22]基于网络拓扑及图论,通过以各节点的负荷大小或节点介数衡量该节点重要程度。结果显示当超过 2% 的高负荷节点退出时,就会引发系统连锁故障造成系统崩溃。电网结构的小世界<sup>[23-25]</sup>特性为进一步研究电网自身结构与故障传播的关系提供了重要参考<sup>[25-26]</sup>。文献[27]基于复杂网络理论,通过拓扑结构参数(节点度数、特征路径长度、聚类系数等)对电网结构特征进行了描述,并引入小世界理论对电网崩溃机理与模型进行分析。文献[28]提出了基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估的综合算法。由于电力系统是一个动态连续的系统,仅从拓扑结构和图论出发,忽略系统运行约束考察系统脆弱性是明显不足的。文献[29]基于静态安全分析方法,根据发电机、母线及支路的运行状态值与其最大极限值之比定义了发电机脆弱指标、母线脆弱指标及支路脆弱指标。但由此得出的脆弱指标是系统各独立元件的脆弱权重指标,仅通过各独立部分的权重考察对系统的影响无法体现系统实际运行状态。

事实证明,由于系统保护装置的拒动、误动引起的大规模连锁性停电事故屡有发生,隐性故障给系统造成的影响已不容忽视。文献[30]基于蒙特卡罗概率的方法,提出了通过隐性故障<sup>[31-32]</sup>分析系统脆弱性。定义了母线隔断概率、负荷损失概率、负荷削减期望、系统稳定概率及基于四者的系统整体脆弱性指标。该方法较好反映了系统隐性故障对系统造成的损害,但概率的方法过于依赖于实验次数,不同的负荷水平及运行模式对实验结果有很大影响。

文献[33]定义电网结构脆弱性为当部分元件失灵或退出服务时,系统保持完整并正常运行的能力。在考虑系统运行条件约束下,提出了 4 种系统结构脆弱性指标:系统元件越限指标(节点电压和线路电流越限);系统调控能力指标;系统负荷损失指标;基于系统潮流方程的灵敏度指标。

文献[34-35]基于复杂网络理论,提出了带权重的线路介数作为脆弱线路指标的辨识方法,对系统中那些承担功率不多但因其在电网结构中的特殊位置而对系统脆弱性有重大影响的线路有较好辨识效

果。文献[36]基于复杂理论,提出了带方向和权重的拓扑图考察系统元件的耐受度,进而定位系统重要元件及脆弱区域。

针对结构脆弱性,不少文献也提出了相应的解决办法。文献[37-39]从连锁故障的理论建模入手,在分析已有电网连锁故障模型的基础上,指出多 Agent 系统对控制连锁传播的可行性。文献[40-41]提出了基于 Agent 技术和多 Agent 系统处理复杂动态分部系统,指出多 Agent 系统对电力系统重大事故的预防控制性与纠正自愈性。

从上述文献可以看出,从起初单一的基于拓扑和图论的纯网络结构研究,发展到结合系统参数及带权重的网络结构参数的研究,电网结构脆弱性理论已能较好地定量关系上对系统脆弱部分进行表达及定位,并尝试提出了一些改善电网结构脆弱度的可行性办法。复杂网络理论,特别是小世界理论为电网连锁故障机理的探索与研究提供了又一崭新的方法。如何更好地应用复杂网络理论研究电网结构脆弱性,特别是对电网连锁故障机理的表达与描述,还需要继续研究和探索。

然而电力系统不仅仅是一个复杂网络系统,而且还是一个强非线性的实时系统。这与典型复杂网络如因特网、全球贸易网、食物网等有着根本的区别。如果单纯从拓扑结构和图论出发,将节点及支路归一化,即所有节点等同,所有支路等同,无区别对待,研究结构脆弱性。由于每个节点、每条支路都有自身的参数约束,这样从一开始便造成了与实际系统有很大出入。文献[34-35]对此提出了改进,通过带权重的思想区别对待不同节点与支路,取得一定的辨识效果。但思考以下问题:假设现已得到系统正确的结构脆弱度排序,当系统最高脆弱度单元发生故障,退出系统。利用复杂系统理论,特别是小世界理论,“成功”找到了下一个脆弱单元,即可能发生  $N-2$  故障的单元,并得到了新的结构脆弱排序。问题分析如下:从初始状态到故障后状态的分析似乎没有问题,但问题就可能发生在系统结构发生改变过程当中,如果忽略系统元件的网络约束,就可能造成某一元件或部分元件在系统结构转变过程中其网络约束已不满足,如支路潮流越限问题,而由此得到的结果当然会与实际系统相违背。这也是目前众多文献在研究结构脆弱性时存在的不足之处。因此,在应用复杂网络理论研究电力系统结构脆弱性时,考虑系统实时运行参数及网络约束条件是不可忽略的因素。

## 2.3 电力系统其他脆弱因素

现代电力系统是一个涵盖领域广、受影响因素多的综合性复杂系统,传统安全因素及可靠因素已不能全面反映系统可能遭受的干扰与损害。随着计算机及通信网络技术在电力系统中大量应用,通信网络安全性已对电力系统的安全与稳定造成了威胁<sup>[42-44]</sup>,如:网络通信故障、电脑病毒及黑客攻击等。文献[45]突破传统电力系统可靠性观念,基于概率的方法提

出了在强外力骚扰下评估电网安全度的脆弱性概念及其算法,其中强外力主要包括人为破坏、恐怖袭击、战争等。这些脆弱源的真实存在加大了电力系统不安全因素的范畴,增加了系统安全分析的难度。近段时间的灾变性气候及地质灾害对电力系统造成了严重损失,这些因素都是应该考虑的对象。在对电力系统进行整体脆弱性评估时,加入这些脆弱因子无疑将提高系统安全评估的准确性与真实性。

### 3 研究展望

电力系统脆弱性理论从诞生到发展时间还很短,需要不断完善与发展。从过去单一的预想事故集与状态匹配计算的安全性分析发展到系统暂态安全水平及动态变化趋势判断的脆弱性分析,电力系统脆弱性分析是对以往电力系统安全分析的有力补充与发展。从目前研究成果看,脆弱性理论在系统安全水平、裕度及状态变化趋势描述上有着较好的优势,使得进一步提高电力系统安全动态分析与事故预判断及预处理能力的思想得到升华。

从文中论述可以看出,已涉及了基于能量函数法的电压稳定分析、基于复杂系统的拓扑结构分析、基于蒙特卡罗的隐性故障分析及基于风险理论的经济性后评估分析等的电力系统脆弱性分析,已从某些角度对系统的某个或多个参数进行脆弱分析,如从能量角度考察系统节点电压脆弱性,从复杂网络角度考察系统结构脆弱性等。但由分析可知,单一从系统参数、拓扑结构、隐性故障或经济性后评估的其中之一或部分考察系统脆弱性势必会存在不足。目前还没有一种脆弱指标能将几者综合考察,这是难点亦是重点。因此,如何能将上述几方面有机地联系起来综合考察系统脆弱性是电力系统脆弱性下一步研究的主要方向。其数学思想可以简单表述如下:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4$$

其中, $\xi$ 是脆弱性指标,它可以是整个系统或某一元件的脆弱指标; $\xi_1$ 是固有脆弱性指标; $\xi_2$ 是实时运行情况下的参数脆弱指标; $\xi_3$ 是后评估脆弱指标,以经济性为主; $\xi_4$ 是其他脆弱因子(如2.3节中所述)。

### 4 结语

脆弱性概念的提出丰富和发展了电力系统安全性的研究范畴。从全文分析可知,电力系统脆弱性不仅与系统固有脆弱强度有关,即一定的网架结构及元件自身强度,而且与系统实时运行参数、网络约束条件等密切相关。一个综合的电力系统脆弱指标应该是自身固有强度的反映、实时运行参数变化的反映以及可能发生故障后的经济评估反映。由此对系统中那些角色重要、影响面广、一旦发生故障将造成损失严重且薄弱的环节进行准确定位,提高系统操作人员的预判断和预处理能力,从而制定更好的保护策略或改进措施,避免灾难性事故的发生,这才是脆弱性研究的根本目的。

### 参考文献:

- [1] 刘天琪. 现代电力系统分析理论与方法[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [2] EL-KADY M A, TANG C K, CARVALHO V F, et al. Dynamic security assessment utilizing the transient energy function method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1984, 1(3): 284-291.
- [3] FOUAD A A, ZHOU Qin, VITTAL V. System vulnerability as a concept to assess power system dynamic security[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 1009-1015.
- [4] U. S. Department of Energy Office of Energy Assurance. Vulnerability assessment and survey program - overview of assessment methodology[EB/OL]. (2001-09-28). [http://www.Esisac.com/publicdocs/assessment\\_methods/OEA\\_VA\\_Methodology.pdf](http://www.Esisac.com/publicdocs/assessment_methods/OEA_VA_Methodology.pdf).
- [5] U. S. Department of Energy Office of Energy Assurance. Draft: vulnerability assessment methodology - electric power infrastructure[EB/OL]. (2002-09-30). [http://www.Esisac.com/publicdocs/assessment\\_methods/OEA\\_VA\\_Methodology.pdf](http://www.Esisac.com/publicdocs/assessment_methods/OEA_VA_Methodology.pdf).
- [6] ZHOU Qin, DAVIDSON J, FOUAD A A. Application of artificial neural networks in power system security and vulnerability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 525-532.
- [7] 苏永春,程时杰,文劲宇,等. 电力系统电压稳定性及其研究现状(二)[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(7): 97-100.  
SU Yongchun, CHENG Shijie, WEN Jingyu, et al. Power system voltage stability and its present investigation (二)[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(7): 97-100.
- [8] HISKENS I A, CHAKRABARTI B B. Direct calculation of reactive power limit points[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1996, 18(2): 121-129.
- [9] DEMARCO C L, QVERBYE T J. An energy based security measure for assessing vulnerability to voltage collapse[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(2): 419-427.
- [10] 刘群英, 刘俊勇, 刘起方. 基于能量信息的电压稳定性量化指标研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(8): 8-13.  
LIU Qunying, LIU Junyong, LIU Qifang. Quantification index of voltage stability based on energy information[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(8): 8-13.
- [11] OVERBYE T J, DEMARCO C L. Voltage security enhancement using energy based sensitivities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3): 1196-1202.
- [12] BORNHARD E, CARPANETO E, CHICCO G, et al. Worst-load - increase direction method for fast identification of voltage - weakness indicators[J]. IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(1): 27-32.
- [13] AMJA N, ESMAILI M. Improving voltage security assessment and ranking vulnerable buses with consideration of power system limits[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2003, 25(9): 705-715.
- [14] HUA Wan, MCCALLEY J D, VITTAL V. Risk based voltage security assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1247-1254.
- [15] 刘新东, 江全元, 曹一家, 等. 基于风险理论和模糊推理的电力系统暂态安全风险评估[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(2): 15-20.  
LIU Xindong, JIANG Quanyuan, CAO Yijia, et al. Transient security risk assessment of power system based on risk theory and fuzzy reasoning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 15-20.
- [16] SONG Hongbiao, MLADEN K. A new analysis method for early detection and prevention of cascading events[J]. Electric Power Systems Research, 2006, 77(8): 1132-1142.



- [17] TIWARI A, AJJARAPU V. Contingency assessment for voltage dip and short term voltage stability analysis[C]//2007 IREP Symposium. Charleston, USA: [s.n.], 2007: 1-8.
- [18] LI Xiang, CHEN Guanrong, KO Kingtim. Transition to chaos in complex dynamical networks [J]. Physica A, 2004, 338(3/4): 367-378.
- [19] YUAN Wujie, LUO Xiaoshu, JIANG Pinqin, et al. Transition to chaos in small-world dynamical network [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2008, 37(3): 799-806.
- [20] ALBERT R, JEONG H, BARABASI A. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406(6794): 378-382.
- [21] GALLOS L K, ARGYRAKIS P, BUNDE A, et al. Tolerance of scale-free networks: from friendly to intentional attack strategies [J]. Physical A, 2004, 344(3/4): 504-509.
- [22] ALBERT R, ALBERT I, NAKARADO G L. Structural vulnerability of North American Power Grid[J]. Physical Review E, 2004(69): 1-4.
- [23] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [24] DODDS P S, MUHAMAD R, WATTS D J. An experimental study of search in global social networks [J]. Science, 2003, 301(5634): 827-829.
- [25] WATTS D J. Small-worlds; the dynamics of between order and randomness[J]. The American Mathematical Monthly, 2000, 107(7): 664-668.
- [26] 曹一家, 王光增, 包哲静, 等. 一种复杂电力网络的时空演化模型[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 1-5.  
CAO Yijia, WANG Guangzeng, BAO Zhejing, et al. Temporal and spatial evolution model of power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 1-5.
- [27] SUN Ke. Complex networks theory: a new method of research in power grid [C/CD]. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific. Dalian, China: [s.n.], 2005.
- [28] 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 Pingping. Small-world topological model based vulnerability assessment algorithm for large-scale power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 7-11.
- [29] SONG Hongbiao, KEZUNOVIC M. Static security analysis based on Vulnerability Index( ) and Network Contribution Factor(NCF) method[C/CD]//2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific. Dalian, China: [s.n.], 2005.
- [30] YU Xingbin, SINGH Chanan. A practical approach for integrated power system vulnerability analysis with protection failures [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 1811-1820.
- [31] TAMRONGLAK S, HOROWITZ S H, PHADKE A G, et al. Anatomy of power system blackouts: preventive relays strategies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 708-715.
- [32] BAE K, THORP J S. An importance sampling application: 179 bus WSCC system under voltage based hidden failures and relay misoperation [C]//The 31st International Conference on System Science. Hawaii, USA: [s.n.], 1998: 39-46.
- [33] MAO Anjia, YU Jiaxi, GUO Zhizhong. Electric power grid structural vulnerability assessment [C]//Power Engineering Society General Meeting. Montreal, Canada: [s.n.], 2006: 1-6.
- [34] 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 Yijia, CHEN Xiaogang, SUN Ke. Identification of vulnerability lines in power grid based on complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12): 1-5.
- [35] CHEN Xiaogang, SUN Ke, CAO Yijia, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory [C]//Power Engineering Society General Meeting. Florida, USA: [s.n.], 2007: 1-6.
- [36] ZHANG Guohua, WANG Ce, ZHANG Jianhua, et al. Vulnerability assessment of bulk power grid based on complex network theory [C]//The Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing, China: [s.n.], 2008: 1554-1558.
- [37] 孙可, 韩祯祥, 曹一家. 复杂电网连锁故障模型评述[J]. 电网技术, 2004, 29(13): 1-9.  
SUN Ke, HAN Zhenxiang, CAO Yijia. Review on models of cascading failure in complex power grid [J]. Power System Technology, 2004, 29(13): 1-9.
- [38] 占勇, 程浩忠, 熊虎岗. 电力网络连锁故障研究综述[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(9): 93-98.  
ZHAN Yong, CHENG Haozhong, XIONG Hugang. Review of cascading failures in electric power network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 93-98.
- [39] 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): 138-143.  
CHEN Xiaogang, SUN Ke, CAO Yijia. Structural vulnerability analysis of large power grid based on complex network theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 138-143.
- [40] 艾琳, 华栋. 电力系统智能型调度[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(10): 83-87.  
AI Lin, HUA Dong. Power system intelligent dispatch [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(10): 83-87.
- [41] JUNG Juhwan, LIU Chencheng. Multi-agent technology for vulnerability assessment and control [C]//Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle, USA: [s.n.], 2001: 1287-1292.
- [42] WATTS D. Security and vulnerability in electric power systems [C]//The 35th North American Power Symposium. Missouri, USA: [s.n.], 2003: 559-566.
- [43] MASSOUD A. Security challenges for the electricity infrastructure (supplement to computer magazine) [J]. Electric Power Research Institute, 2002, 35(4): 8-10.
- [44] YU Jiaxi, MAO Anjia, GUO Zhizhong. Vulnerability assessment of cyber security in power industry [C]//Power Systems Conference and Exposition, 2006. Atlanta, USA: [s.n.], 2006: 2200-2205.
- [45] 王鹏, 徐东杰, 王雪东, 等. 强外力骚扰下电力系统脆弱性评估与防护问题初探[J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(1): 14-18.  
WANG Peng, XU Dongjie, WANG Xuedong, et al. Preliminary research on vulnerability evaluation and safeguard of power system under external force harassment [J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, 32(1): 14-18.

(责任编辑: 李育燕)

#### 作者简介:

魏震波(1978-), 男, 四川成都人, 博士研究生, 从事电力系统稳定与控制研究(E-mail: weizhenbo1978@yahoo.com.cn);  
刘俊勇(1963-), 男, 四川成都人, 教授, 博士研究生导师, 从事电力系统稳定与控制及电力市场研究;  
朱国俊(1957-), 男, 四川成都人, 主任, 硕士, 从事特高压输电工程的建设管理和研究工作;  
贺星棋(1978-), 男, 四川成都人, 博士研究生, 从事电力系统稳定与控制研究;  
龚薇(1980-), 女, 贵州贵阳人, 博士研究生, 从事电力市场研究。

## 利用空间电磁场感应检测小电流接地故障

孙 波<sup>1</sup>, 孙同景<sup>1</sup>, 薛永端<sup>2</sup>, 徐丙垠<sup>2</sup>, 韩金鲁<sup>1</sup>

(1. 山东大学 控制学院, 山东 济南 250061;

2. 山东科汇电力自动化有限公司, 山东 淄博 255087)

**摘要:** 针对架空线路小电流接地故障信号不易获取的问题, 提出一种利用电磁场感应实现非接触式故障检测的新方法。对三相架空线路周围故障前后的电场和磁场特征进行了深入研究, 发现线路下方水平磁场与零模电流基本成比例关系, 垂直电场与零模电压基本成比例关系。利用电磁场传感器感应水平磁场和垂直电场可以获取零模电流和零模电压信号, 利用获取的故障信号, 提取故障特征, 可以实现小电流接地故障选线与定位。提出了现场应用方案和需要解决的若干关键问题, 最后通过仿真验证了该方法的正确性。

**关键词:** 小电流接地系统; 单相接地故障; 电场; 磁场; 故障信号获取; 故障检测

中图分类号: TM 771; TM 15

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2009)07-0043-05

目前, 应用于小电流接地系统的单相接地故障检测方法, 大都是通过检测系统零模电压与零模电流来实现的<sup>[1-7]</sup>。电力系统中普遍采用的提取零模电流的方法是在架空线路上装设三相电流互感器, 再通过三相电流合成零模电流信号; 零模电压则是通过电压互感器获得<sup>[8]</sup>。

本文详细分析了线路周围电磁场的特征, 提出通过感应线路下方磁场可以获取零模电流信号, 感应电场可以获取零模电压信号, 利用获取的故障信号可以实现故障选线与定位。

### 1 架空线路下方电场特征分析

#### 1.1 架空线路下方电场计算方法

用等效电荷法<sup>[9-10]</sup>计算三相架空线路周围的电场强度。在与三相导线垂直的平面内建立坐标系,

见图 1。设三相导线坐标为  $(X_k, Y_k)$ ,  $k=a, b, c$ , 检测点  $P$  坐标为  $(x, y)$ 。设三相导线无限长并与地面平行, 地面电位为 0, A、B、C 三相导线的电位分别为  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ , 单位长度线路的等效电荷分别为  $q_a$ 、 $q_b$ 、 $q_c$ , 则

$$\begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

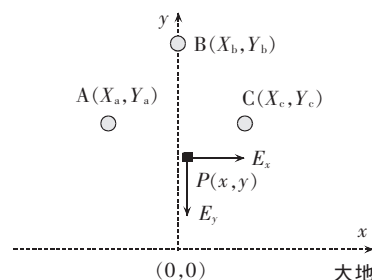


图 1 “三角形”排列三相导线与检测点坐标系

Fig.1 Reference frame of trigonal overhead lines and detection point

收稿日期: 2008-12-10; 修回日期: 2009-03-19

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (Z2006F05)

### Power system vulnerability

WEI Zhenbo<sup>1</sup>, LIU Junyong<sup>1</sup>, ZHU Guojun<sup>2</sup>, HE Xingqi<sup>1</sup>, GONG Wei<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. UHV Office of Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610061, China)

**Abstract:** Based on the comparison between the traditional security analysis and the vulnerability analysis for the electric power grid, three typical vulnerability assessment models are presented: absolute vulnerability, relative vulnerability and sensitive vulnerability. The main research aspects, such as the energy function based voltage vulnerability and the complex networks theory based structure vulnerability, are analyzed. It is pointed out that, as a real-time nonlinear complex network system, the vulnerability of electric power grid is correlated to both running state and net structure, and any analysis from one aspect is deficient. An integrated vulnerability index made up of inherent vulnerability, running parameters, risk evaluation and other vulnerable factors is proposed.

The project is supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (2004CB217905).

**Key words:** power system vulnerability; voltage vulnerability; energy function; structural vulnerability; complex networks theory; vulnerability index