电力系统脆弱性理论研究

复杂系统的脆弱性是指：对于一个复杂系统，存在一个子系统，对环境有强烈的敏感性，当受到内、外因素（包括信息、物质流等因素）的扰动或攻击产生崩溃时，会使其他部分或子系统也产生崩溃，进而导致整个复杂系统崩溃。对于复杂系统所具有的这一特性称之为复杂系统的脆弱性。

1. 电力系统的脆弱性定义

电力系统作为复杂系统的一种表现形式，可基于复杂系统理论对其脆弱性进行定义。定义如下：

在电力系统中，每个子系统或元件是相互关联的。电力系统作为复杂系统中的一种典型系统。其脆弱性是本身固有的一种属性，在正常运行和工作状态下不会显现。当子系统或单个元件由于外界扰动或自身参数变化而使正常运行状态改变时，会导致系统承受不确定性因素的能力变差，这种特性即为系统的脆弱性。它表现的是系统对外界扰动或自身参数变化的耐受程度。系统的耐受程度的有两个方面的体现，一是系统受影响的程度；二是系统抗干扰的能力。

这种耐受程度可通过系统性能指标进行分析，当外部扰动或内部参数改变时，系统的性能指标在稳定裕度范围内变化，说明系统的耐受程度高，系统脆弱性差，反之，系统性能参数超出稳定裕度范围，系统性能变差，系统脆弱性强。

按研究角度的不同可将电力系统的脆弱性分为结构脆弱性和状态脆弱性。结构脆弱性研究的是电力系统中某个单元在网络拓扑的重要程度；状态脆弱性则研究的是电力系统各状态变量偏离正常运行状态及距离临界状态的程度。

1. 数学描述

对于电力系统而言，系统性能变化的主要原因是外部扰动对系统元件的影响以及元件内部结构参数的变化。

设系统由个元件组成，且的状态用表示。如果存在一个元件，当其结构或状态发生变化，使得，有



式中，为系统初始稳态的性能指标，为元件的不稳定域，为不稳定域的阈值函数，是衡量元件的性能指标，为当前系统的性能指标。

复杂系统由元件、关系、环境组成的，元件在电力系统中对应着母线节点和线路，关系对应着节点之间的连接情况和潮流分布流向，环境对应的是一切影响电力系统结构或状态参数的集合。研究电力系统的脆弱性，主要就是研究在不确定的环境中各元件之间、元件与整体之间、元件与环境之间以及整体与环境之间的内在关系，本文的主要研究方向是电力系统的节点或线路受到不确定因素影响后结构或状态发生变化，对其他元件和整个系统产生的影响。

可以看出，系统脆弱性的数学描述和定义主要在于元件的存在性对于整个电力系统的影响，即存在能够引起整个系统性能改变的元件，量化系统中的元件对整个系统的重要程度，以及如何识别出这样的元件是电力系统脆弱性研究的一个重要方向，通过加强对脆弱环节的重点保护和电网拓扑的优化改进，从而为预防大规模停电事故和连锁故障的发生提供了参考方向。

电力系统脆弱性产生的原因：在结构上，一个完全均匀各元件无差异的网络不存在结构脆弱性；在状态上，各元件在功能上无差异的网络不存在状态脆弱性。因此，电力系统脆弱性的原因是电力系统的元件在拓扑结构和运行状态上存在差异性。

1. 脆弱性传递过程
2. 结构脆弱性定义与数学描述

电力系统的结构主要是指由发电节点、负荷节点和传输线路组成的网络拓扑。拓扑结构是电能传输和系统性能的基础，它决定了电能是否能够被安全、可靠、有效地从发电节点传输到负荷节点。当电力系统拓扑结构保持完整时，是保证电力系统稳定可靠运行的基础。但是，受外界环境的干扰，人为因素和保护设备内部故障等原因的影响，拓扑结构的完整性会受到破坏，导致电力系统无法安全可靠运行，甚至崩溃。因此，有必要分析各个节点在网络拓扑的重要程度，进而加强对重要节点的防范和预先保护，对电力系统的稳定、高效、可靠运行有重大意义。

对结构脆弱性的定义：

侧重于系统受影响的程度

结构脆弱性是指电力拓扑结构中节点或线路由于外界或内部因素的影响下，导致节点或线路性能改变或发生故障断开后，电网保持其网络连通性和维持基本稳定运行状态的能力，即保持拓扑结构完整的能力。在电网拓扑结构方面可选取一定的评估指标，考察某一单元或某些单元退出后系统的耐受程度——系统受影响的程度。对系统结构影响程度大的节点或线路，说明其对网络拓扑结构的完整性贡献程度高，对于这样的节点或线路称为系统结构的脆弱点。因此，可以认为对电力系统拓扑结构影响越大的节点或线路，其脆弱性程度越高。

数学描述：（<复杂系统脆弱性综合分析方法>论文中对结构脆弱性的描述可以借鉴）

结构脆弱性研究的是电力系统中某个单元在网络拓扑的重要程度。在电力系统结构方面，从不同角度可得到的结构脆弱性的数学描述不同，如电气度、电气介数等。每个方面都有其结构重要性指标来衡量一个元件在系统中的重要程度，其数学描述如下：



为元件有关联的元件的集合，为从不同角度考虑得到的结构脆弱性表达式，表示和在拓扑结构上的联结程度。

将定义为从某一方面考虑的结构脆弱性描述，那么从各个方面考虑的结构脆弱性数学描述定义为结构矩阵，，于是结构脆弱性矩阵的数学描述为：



为的结构矩阵，表示从个方面的结构脆弱性描述；为的选择矩阵，第行选择矩阵为，行向量中元素有且只能有一个元素为1，当，表示选择从方面考虑结构脆弱性描述，则不选择。

1. 状态脆弱性的定义与数学描述

电力系统运行中，每个节点或线路都有其对应的状态变量，对电力系统而言，环境的变化会导致系统运行状态变化。环境的变化主要是发电节点容量的变化和负荷节点的负荷容量变化。因此在电力系统状态研究中，潮流计算扮演了重要的角色。环境的每一次变化都会导致系统的运行状态发生改变，电力系统潮流分布进行重新分配。电力系统的潮流计算是计算每一种运行状态下系统的运行参数，如电压、功率和相角等，进而判断各个运行参数是否在安全裕度范围内运行，潮流的分布是否合理是潮流计算的基本目标。

（可以加一些潮流计算的原理）

对状态脆弱性的定义：

侧重于系统抗干扰的能力

状态脆弱性是指系统在受到外界扰动或内部自身故障后，节点或线路的状态变量发生变化，并由初始状态（额定状态）向临界点逼近的特性。表现了某个节点或线路从稳定状态向临界失稳状态的过渡过程。反映了系统的抗干扰能力。

数学描述：

状态脆弱性研究的是电力系统各状态变量偏离正常运行状态及距离临界状态的程度。电力系统的状态量包括功率、电压、相角等。分析方法与传统的稳定性分析方法比较接近，数学描述下：



表示节点或线路状态变量当前值，表示节点或线路状态变量初始值（额定值），表示当前状态值相较于初始状态值的偏离程度。

那么可用表示元件的状态偏离程度，那么电力系统各元件的状态偏离矩阵为



为状态变量当前与初始稳态值的差值与初始稳态值的百分比，它表示状态变量的变化相对于初始稳态值的偏离程度，为0表示无偏离。

可表示为电力系统各元件的状态变量的变化相对于初始稳态值的偏离程度。

定义为节点或线路状态变量当前值的关联函数，某一状态变量变化导致关联函数变化，当节点或线路当前状态值发生变化，其关联函数相对当前状态值变化的比值可用如下偏导式进行表达：



表示当前状态值的改变对关联函数的影响程度，可定义为状态灵敏度。可表示为电力系统各元件变化时的状态灵敏度。