电力系统脆弱性理论研究分析

1.一些背景介绍

对于电力系统而言，脆弱性的概念目前还没有清晰明确的定义。在进行电力系统脆弱性研究分析之前，有必要明确电力系统脆弱性的概念，不可避免要涉及到系统的稳定性、可靠性以及鲁棒性。本章从复杂网络理论出发，分析电力系统稳定性、鲁棒性、可靠性概念之间的区别和联系，在此基础上结合电力系统脆弱性的特征，得到较为明确的电力系统脆弱性概念。

为了量化分析电力系统的脆弱性，需要将电力系统的脆弱性问题用数学表达式进行描述，从结构和状态两个方面分别进行数学描述，用数学的方式表示电力系统的脆弱性问题。在此基础上结合复杂系统理论，为下一章脆弱性评价指标的提出提供了理论依据，为后续电力系统脆弱性量化评价模型的建立奠定了理论基础。

2.电力系统概念区别：

对于电力系统而言，在工程人员构建和设计电力系统网络之初，首先要考虑的是电力系统的稳定运行，保证电力系统网络拓扑结构的合理性，以及节点所承受负荷的稳定裕度。稳定性对电力系统而言是最基本的要求。在稳定性的基础上，要求电力系统能够长时间可靠运行，可靠性是检验电力系统长时间运行的性能要求。针对系统承受不确定因素这一问题，如外界扰动和内部结构故障对电力系统的影响，其中有涉及到鲁棒性的概念。

这些概念分别是侧重于不同方面考虑而提出的，是为了解决不同的工程问题，而这些概念之间有存在联系，因此在进行电力系统脆弱性研究分析之前，需要剖析电力系统稳定性、可靠性、鲁棒性的概念及本质特征，找出这些概念之间的区别和联系。

2.1电力系统稳定性、可靠性、鲁棒性的联系与区别

（1）稳定性  
 电力系统的稳定性是当电力系统受到外界扰动时发生的稳定性问题。主要表现在两个方面。当电力系统受到瞬态干扰时，电力系统会偏离原平衡状态，产生偏差，在瞬态扰动消失后，电力系统可以恢复到原平衡状态；另一方面，当电力系统受到永久性扰动时，如电力系统的节点或线路遭到破坏时，电力系统在经历一个过渡过程后，偏离原平衡状态，达到一种新的平衡状态。通过上述的定义，电力系统稳定性主要的关注点在于扰动消失后，系统能否恢复到原平衡状态，以及在永久性扰动情况下，系统能否达到新的平衡状态，实现系统稳定运行。

（2）可靠性

广义上来说，可靠性是评价元件、产品、系统在一定时间及一定条件下无故障运行的能力或可能性。电力系统的可靠性是指元件、设备或系统在预定时间内，在规定条件下执行规定功能的能力[1]。具体来讲，对于用户而言，电力系统的可靠性是指系统向用户长时间不间断持续提供满足质量要求的电能的能力。这种能力可以通过可靠度、失效率、平均无故障间隔等来评价。由以上定义可知，电力系统的可靠性主要的关注点在于系统在规定时间内，在规定参数下工作的能力。

（3）鲁棒性

鲁棒性一词是原先统计学中的一个专业术语，20世纪70年代才开始在控制理论的研究中流行起来，用来表征控制系统对特征或参数扰动的不敏感性[2]。所谓控制系统的鲁棒性是指系统在自身内部模型不确定性扰动及外部摄动的影响下，系统某个性能指标保持不变的能力。在电力系统中，电力系统的鲁棒性是指系统受到外界扰动或内部自身故障后，系统中绝大部分节点或线路的状态值保持在稳定裕度范围内变化的能力。也就是说电网中绝大部分节点仍然保持连通。电力系统鲁棒性的主要关注点在于电力系统的抗干扰能力。

联系：

稳定性是电力系统的基本保障。可靠性是在稳定性的基础上，针对具体的性能指标，强调在规定时间保持规定指标要求运行的能力。鲁棒性是在稳定性的基础上，研究在外界扰动和内部参数变化后，系统在保持在稳定裕度范围内的能力。

经过研究分析后，提出脆弱性的概念。

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。

与鲁棒性概念有一点类似，不同之处在于，一是脆弱性是电力系统固有的属性，任何一个电力系统都存在脆弱性，系统正常运行的情况下，不会显现；二是其耐受程度不但包括系统抗干扰的能力，还包括系统受影响的程度；三是电力系统的脆弱性包括结构脆弱性和状态脆弱性两个方面。电力系统可靠性概念可为研究系统状态脆弱性指标提供借鉴的思路。

[1] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 清华大学出版社, 1986.

[2] Biocca F, Harms C, Burgoon J K. Toward a More Robust Theory and Measure of Social Presence: Review and Suggested Criteria. Presence, 2015, 12(5):456–480.