电力系统量化评估指标

一：电网全局指标

1. 电网结构熵定义及网络特性

电力系统网络作为具有幂律分布的无标度网络来说，存在极少数具有大量连接的核心节点和大多数具有商量连接的末梢节点，这样的网络是不均匀的，表现在节点度分布上，就是度分布曲线呈递减状态。熵是系统的一种无序的度量。如果网络是随机连接的，各节点的度分布大致相当，则认为网络是无序的；反之，如果网络是无标度的，网络中有少量的具有高连通度的中枢节点和大量低连通度的节点，在这方面可以看出，节点的重要程度存在差异，可认为这种网络是有序的。电网结构熵定义可以简洁地度量电力系统的有序程度。

定义：

假设网络中的节点的度为，则其重要度定义可以定义为[1]：



节点度表示节点所连接边的数量。

对于的节点不做考虑，可以定义网络结构熵为：



当网络完全均匀时，网络为规则网络，如图1.1所示（插图），即时，。当网络中所有节点都与某一个中心节点相连，假设所有节点都与节点相连如图1.2（插图），即，时，网络最不均匀，此时网络结构熵最小。此时，，时，网络结构熵最小值。根据这个可进行电网结构熵标准化。



图1.1 规则网络



图1.2

网络特性：

用电网结构熵可研究复杂网络的异质性（相同的结果可以由不同的原因引起），电网结构熵是由节点度和度分布确定的，因而电网结构熵可以精确简洁地度量电网的异质性。有对电网结构熵的定义可知，当电力系统网络具有无标度性时，其值会相对较小，此时网络的连通性较好。当网络受损或节点遭受破坏时，电力系统会发生裂解，其熵值会变大。

综上所述，电网结构熵可以衡量网络网络连通性和研究网络中节点的重要性提供度量标准，可作为电力系统脆弱性的评估指标，这样可以确定电网中的重要节点，识别电力系统中的薄弱环节，对保护整个电力系统网络予以重要的指导价值。

1. 网络平均效率

在复杂网络理论的发展过程中，在描述复杂网络结构的统计特性上提出了许多概念和方法，其中包含三个基本的概念：度分布、平均路径长度和聚类系数。

网络中两个节点和之间的距离定义为连接这两个节点的最短路径上的边数，它的倒数称为节点和之间的效率。通常效率用来度量节点间的信息传递速度。当和之间没有路径连通时，，而效率为0。

在复杂网络中，平均路径长度是衡量网络信息传输效率的重要特征参数，一个含有N个节点的复杂网络，其平均路径长度表达式为：



由于网络有些节点对处于非连通状态，因此路径长度会出现无穷大的情况，影响后续的研究分析。为了避免这种情况的发生，在研究网络结构脆弱性方面，采用网络平均效率E代替平均路径长度L。描述的是：节点间传输单位能量，沿最短路径传播时的效率，该指标用于描述整个网络能量传递的效率。表达式如下：



为网络节点的个数；为所有的节点对个数；为节点、间的最短路径距离，若节点、不可达，则。在电力系统中，由于电网的网络拓扑等效为有权无向网络，为了更接近电网实际运行状态，和潮流实际流向，相邻节点不再用边数来刻画最短距离，而用电抗值表示相邻节点间的电气距离。

最短距离的计算采用Floyd算法求出任意节点之间的最短距离。

二：结构脆弱性指标

在上一章中，对于电力系统而言，系统中的母线可视为节点，母线之间的电气连接可视为边，线路上的阻抗可作为权重，因此整个系统可以被等效为一个有权无向图。

1. 基于复杂网络

（1）电气度

复杂网络理论中描述网络的特征参数有特征路径长度、节点度和节点度累计分布、聚类系数、介数和介数分布等。其中，度是复杂网络中的一个基本且 常用的参数，其公式化的定义如下：



其中，为复杂网络的邻接矩阵元素，为0代表不相连，为1代表相连。

对于有权网络，节点度的概念扩展为节点的连接强度，公式定义如下：



其中，为节点之间的连接强度。

两种定义只考虑单方面的度的定义太过片面，第一种侧重于节点的连接数量，适合无权网络；第二种则考虑节点的连接强度，适合有权网络。因此，本文综合考虑节点连接数量与连接强度，结合电力网络的特点，采用“电气度”的概念：



其中，为网络中邻接节点的连接情况，为代表不相连，为代表相连。而代表支路潮流上的视在功率的大小。电气度衡量了节点在拓扑形成与结构中承担的应力大小，是网络中衡量节点重要性的重要参数。

（2）电气介数

介数作为复杂网络的关键参数之一，被用来描述节点或者边在信息、能量传递中的重要程度。介数的概念在电力系统被称为电气介数，它反映了网络节点、支路在整个电能输送过程中的贡献程度[72-74]。

介数的概念在电力系统被称为电气介数，它反映了网络节点、支路在整个电能输送过程中的贡献程度。假设一个电网具有个母线节点，条电气连接的边，那么支路 的电气介数计算公式如下：



其中，分别为发电节点、负荷节点的集合。是单位有功功率注向发电节点i和负荷节点j时，支路上产生的有功功率。 是发电节点和负荷节点的节点对间传输电能的权重值，大小为 ，分别代表了发电节点在发电节点功率总和的比率和负荷节点在负荷节点功率总和的比率。

电网中节点的分类分为发电节点，负荷节点，中间节点。所有的功率都是从

发电节点向负荷节点传输，因此需要对上述公式进行修正得到如下的节点电气介数计算公式。指的是与节点*k* 相连的所有边的集合，为对应支路的电气介数。节点的电气介数与拓扑中所连支路的电气介数有直接关系。



电气介数流程图

从流程图可以看出，节点的电气介数综合考虑了所连支路对其的影响。而支路的电气介数则衡量了所有发电-负荷节点对支路潮流的影响，从而在分析时，不仅考虑了拓扑的影响而且增加了能量变化的考虑，使得结构的衡量更完善。电气介数不局限于能量、信息沿着网络的最短路径传播，更体现了电能在整个网络支路的分布情况。同时，电气介数还分别考虑了发电节点和负荷节点的变化影响，改变他们的容量，网络各节点的重要性也会发生变化，因此，电气介数更符合实际电网的变化情况。

1. 基于PageRank