基于电压稳定裕度概念定义的状态运行指标（index1）

1. 电压稳定裕度概念

通过比较节点实际的运行电压和临界电压之间的裕度的临界电压指标来评估负荷节点功率变化下电网各节点的状态脆弱性。

简言之，电压稳定裕度就是当前运行电压到临界电压的距离，距离越大说明稳定裕度越大。

2．指标定义

在电网中，每个节点的运行状态指标都存在一个临界值，在电网中，存在三类节点，负荷节点（PQ节点）、发电节点（PV节点）和平衡节点，在涉及到电压指标分析时，由于发电节点是PV节点，在进行潮流计算时，电压恒定。所以只能分析负荷节点的电压稳定裕度变化情况。

理论上，在负荷节点发生变化时，节点电压稳定裕度越低，电压越线率越高，分别定义电压越线率和电压稳定裕度，当然也会存在相反的结果，通过实验分析二者的内在联系。

2.1 电压稳定裕度

我国规定，300KV及以上的母线：正常运行电压不得超过系统额定电压的+10%；最低运行电压不应影响电力系统同步稳定、电压稳定、厂用电的正常使用及下一级电压调节。电压稳定性指标：



其中，为电压临界值，为当前运行电压值，为电压稳定阈值，为电压最大允许的波动率（偏差率）。为负荷节点额定电压值。

2.2 电压越线率

经过蒙特卡洛的方法统计电压超过的概率，该指标从某些负荷需求的角度对电能质量进行了评价。



2.3灵敏度指标

负荷节点的负荷功率变化率对系统支路功率损耗的灵敏度。（基于电网损耗的灵敏度，从经济方面考虑）

电力系统中负荷节点的功率变化会影响电网的潮流流向和状态变量的稳定裕度，因此在进行电力系统的潮流计算时，会对电力系统的各母线节点进行潮流重分配，这就使得各节点的母线注入功率和输出功率发生变化，各母线电压也会发生变化，进而导致电力系统支路功率损耗受到不同程度的影响。

由于各负荷节点在网络结构和运行状态方面的重要程度的不同，理论上讲，负荷节点的变化造成电网的损耗也不同。通过研究支路损耗对和负荷节点功率变化率的灵敏度，若平均损耗对某一母线节点负荷变化的灵敏度处于较高的水平，则对此节点进行用电需求限制和改善，有利于降低电网的功率损耗，保证用电安全。

方法：负荷节点从额定功率值到临界值的变化对电网支路功率损耗的影响。

为此先研究各负荷节点的功率临界值。

灵敏度分析的理论方法：

灵敏度的物理意义为：控制量每变动一个单位引起的输出量的变化值。

在电力系统中，灵敏度一般是指以输出或状态向量表征的系统运行状况对控制向量和扰动向量变化的敏感程度。

在电力系统脆弱性研究中的灵敏度分析大部分是建立在潮流方程基础上的，不同学术文献中所用到方法的不同之处，除了在所提出的评价指标的差别外，还体现在潮流计算中对所用变量的分类和其相互关系的处理上。基于潮流计算的灵敏度分析的基本方程是节点功率平衡方程，其极坐标形式如下所示，

 （1）

在灵敏度分析中，按照各变量的数学作用，可将变量分为如下四类：

独立参数向量：包括线路导纳参数,等不变量；

状态参数向量，（潮流计算待求量）包括负荷节点的电压、相位；发电节点的无功功率、相位，平衡节点的有功功率、无功功率；

控制参数向量，（电网模型数据给定（输入）量）包括负荷节点的有功功率和无功功率，发电节点的有功功率和电压幅值，平衡节点的相角和电压幅值，以及电网支路的导纳和电纳参数等；

输出参数向量，（潮流计算输出量计算结果）包括平衡节点的有功功率和无功功率，以及电网的有功损耗和无功损耗等。

下标，和表示所对应的量为节点，节点和平衡节点。

在电网指标的研究中，状态参数向量也可以归为输出参数向量中，作为状态脆弱性指标研究的重要参考。

按照以上变量的划分，灵敏度分析的数学方程可以表示为：

 （2）

 （3）

状态方程（2）中包括节点的有功功率和无功功率平衡方程，以及节点的有功功率平衡方程，输出方程（3）中可以包含节点的无功功率方程、网损方程、平衡节点方程、支路潮流方程等输出方程。

由于电力系统网络的复杂性，以及潮流状态方程为非线性方程，因而只能用迭代方法求其数值解，所以本文在灵敏度研究分析上，采用简便灵敏度分析方法，简化灵敏度分析过程，忽略潮流方程变量之间的相互关系，借助牛顿潮流计算方法对其进行迭代求解。在状态方程（2）和输出方程（3）中对控制向量求全微分：

 （4）

 （5）

从式（4）和式（5）中可得到两种灵敏度矩阵表达式：

 （6）

将式（6）代入式（5）整理得到：

 （7）

式（6）为状态参数灵敏度矩阵表达式，式（7）为输出参数灵敏度矩阵表达式。

从以上的状态方程和输出方程可以看出，灵敏度指标从不同的变量来考虑可以构造出不同的灵敏度指标。本节所研究的灵敏度指标为负荷节点的负荷功率变化率对系统支路功率损耗的灵敏度指标。所以其灵敏度表达式为：

 （8）

公式推导：

上述方法利用参数变量分类的方式进行了灵敏度分析的概念式表达，为此进一步推导网损对负荷变化的灵敏度表达式：

网络损耗的表达式为：

参考上式定义电网有功损耗表达式：



式中为节点和的电压差，为节点和的电导矩阵，根据节点功率平衡方程式可得：



那么电网有功损耗对负荷节点有功功率变化的灵敏度可表式为：





从上式可以看出，电网有功损耗对负荷节点的灵敏度不仅和节点注入的有功功率有直接关系，还与电网其他的控制向量参数和状态向量参数有关。所以灵敏度指标是在潮流计算的基础上得出的。

本文所采用的潮流计算方法为牛顿潮流法，这是一种求解非线性代数方程的一种有效且收敛速度快的迭代计算方法。根据节点功率平衡方程式，通过泰勒级数展开保留一阶导数部分，不断进行迭代，缩小精确解和近似解之间的误差，直到满足精度要求为止。

在潮流计算中，会得到功率不平衡方程式，需要构建雅克比矩阵，其表达式如下：



式中 为潮流方程中的雅克比分块矩阵。

通过雅可比矩阵不断修正，得到状态参数向量近似解，直至满足节点功率不平衡量的容许误差。

式（8）表达式为负荷节点有功功率对系统有功网损的灵敏度表达式。

从上述的表达式来看，负荷节点的有功功率对电网有功损耗的灵敏度关系，不仅与负荷节点有功负荷的变化直接相关，还与其所在的功率平衡方程式所含的参数向量，以及线路电流及线路阻抗值有关，电网有功损耗的计算方法为计算各支路有功损耗之和，各支路有功损耗的计算的计算方法是根据各节点有功功率注入量和输出量来计算的，例如节点1和节点2的支路，设定潮流方向从1流向2，那么节点1有功负荷输出量与节点2有功负荷注入量的差值即为在线路1-2的有功损耗。所以，在理论上，当节点输出负荷越大，线路的阻抗值越大，其支路的有功损耗越多，当然还要考虑到潮流计算的结果和其他支路对其产生的影响。

实验方法：

在实验分析时，负荷节点的功率为给定量，从额定值到临界点以及以后的过渡过程按潮流计算原则进行：负荷节点有功功率从额定值到临界点进行增量变化，其无功功率不变，支路阻抗值按给定值变化，发电节点无功功率按照负荷节点的无功损耗以及支路无功损耗进行调整，平衡节点用于平衡全系统的功率和损耗，随电网各节点的功率变化和支路损耗进行调整。

在考虑实际的电网负荷水平的情况下，一般情况下，负荷节点的用电负荷波动不大，故在仿真实验分析时，选取电网负荷节点稳定运行工作点附近的区间进行研究分析，为此，在负荷节点额定功率值的基础上。取±10%的功率区间来进行仿真分析。

2.4能量裕度指标

为了防止电力系统电压失稳现象的发生，必须要计算当前负荷下的系统能量裕度值以及预测随负荷增长时在哪些薄弱节点采取补偿措施最为有效。

涉及到裕度问题，本文研究的是两个点，一是当前状态运行点，即当前能量值。二是临界状态能量点，即临界能量值。为此定义节点能量距离。并称此能量距离为能量裕度。能量裕度越大时，表明当前运行状态点距离临界状态越远，电网运行稳定。反之，能量裕度越小时，当前运行状态点越接近临界状态，电网越接近不稳定运行域。

本文从静态能量函数的角度，求取各个节点的临界能量值。从系统各负荷节点的能量状态出发，建立能量裕度指标计算系统的裕度值。

静态能量函数的数学模型：（略）

节点功率临界值的研究

发电节点：PV节点，在潮流计算中其有功功率和电压幅值不变，发电负荷主要用于发电设备的消耗和向外供电。

负荷节点：PQ节点，在潮流计算中其有功功率和无功功率不变，其用电负荷是电网负荷端所有用电设备消耗的功率总和，包括电动机、照明系统、家用电器设备、工厂生产设备等其他电力消耗设备。

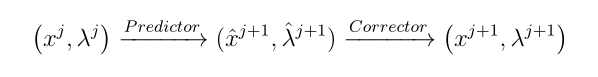
平衡节点：一般指处理较大的发电节点，其相角为0，在潮流计算中用于功率平衡。

为了简化，在实际操作中，通常将一条母线上连接的所有消耗设备等效为总负荷进行计算。在电力系统中，当某个负荷节点功率增加时，对其他节点的电压幅值会产生影响，影响趋势为当某一负荷节点功率增加时，其他负荷节点和其自身节点的电压会降低，这其中会存在一个功率临界值，在临界值附近，负荷节点的电压会急剧下降，在该点意味着负荷功率不能继续增加了，已经到达系统运行的临界点。对应的功率称为有功功率裕度，对应的称为无功功率裕度。

具体实现方法，基于matpower6.0的连续潮流计算方法，制定功率增加的步长，分别从额定值增加各负荷节点的功率，然后进行连续潮流计算分别得到各负荷节点的电压值，统计出各负荷节点电压的作为一次潮流计算的电压结果。

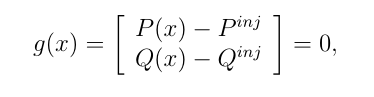
连续潮流计算的原理：

电力系统的n维非线性功率平衡方程式：，引入一个连续参数和一个方程式，会跟踪的变化，得到的系统具有n+1的维度。这是一个参数化的方程，每次计算出来的解向量将是决定下一步参数的参考，上一步的计算结果可以预测下一步的校正计算。



表示第j步当前的计算结果，表示下一步的预测值，表示下一步的校正结果。

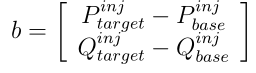
在电力系统中采用连续方法来确定稳态即持续潮流的稳定性极限，该限制由鼻子曲线确定，其中鼻子代表系统在给定功率传输计划时可以处理的最大功率传输。确定稳态负载极限，基本功率方程：



那么，系统可重构成：



其中，，为功率转换向量，表达式为：



Target功率为预先设定的目标功率值即最大功率值，base功率为额定功率值。通过适当的配置b向量，使用连续潮流计算方法可以研究系统的电压和负荷功率的变化。

1. 参数化：量化下一步的结果。
2. 预测：预测器用于生成下一个解决方案的估计值。预测越好，解决方案点的收敛就越快。
3. 校正：得到预估值，设定为矫正环节的初值，通过修正方程不断迭代，直到满足误差要求为止。

关于电网的功率损耗

从电网的主要运行设备这个角度来分析电网的损耗，可将电网损耗分为：输电线路损耗，变压器损耗和其他设备损耗，如下图所示，



1.输电线路损耗

输电线路损耗主要包括导线损耗和电晕损耗。导线损耗是指电流流过线路导线时，在导线电阻上产生的损耗，大小与导线的电阻和所流过的电流大小有关。电晕损耗是指由于导线带电后表面场强超过周围空气的击穿强度，使导线周围的空气薄层产生电离形成电晕放电而造成的电能损失，大小与表面电场强度、表面的状况、天气条件、地理状况等有关。

2.变压器损耗

变压器损耗包括空载损耗(铁损)、负载损耗(铜损)和杂散损耗。当用额定电压施加于变压器的一个绕组上，而其余的绕组均为开路时，变压器所吸收的有功功率叫空载损耗。空载损耗指发生于变压器铁芯叠片内，因周期性变化的磁力线通过材料时，由材料的磁滞和涡流产生的，其大小与运行电压和分接头电压有关。负载损耗是由变压器绕组中的电阻引起，由流过绕组中的负荷电流产生的。杂散损耗是指发生在引线和外壳以及其他结构性的金属零件上的损耗，大小与负荷有关，由于损耗较小且不易测算，理论计算时一般不作考虑。

3.其他设备损耗

其他设备，如电容器、电抗器、开关等在电网的运行中也会产生损耗，损耗的电量相对较小。电容器在运行的过程中有一定的有功损耗，通过介质发热而散失。电抗器通过电流时，会产生导线损耗、磁滞损耗和涡流损耗。理论上，开关处于导通和断开状态时，损耗为零，当开关处于实际通/断切换状态时，会有一个电压、电流重叠存在的时间段，此时电流和电压将会以热、光、噪声、电磁能等形式产生损耗。

在本文实际的研究分析中，由于将负荷节点的用电设备种类繁多、复杂多样，故将其有功和无功损耗不做考虑，全部归于用电负荷。结合给定的标准的电网数据模型，在实际潮流计算中，只考虑输电线路损耗和变压器损耗，通过给定的电抗值和电阻值经过潮流计算进行潮流重分配，可得到各支路的有功损耗和无功损耗。