电网运行风险在线评估中基于灵敏度分析的负荷削减模型

张 哲[1],杨 航[1],尹项根[1],韩杰祥[1],陈国炎[2]
(1. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074;
2. 广州供电局有限公司,广东 广州 510000)

摘要:传统负荷削减模型通常采用全局寻优得到负荷削减范围,难以满足电网运行风险在线评估的时效性要求。为解决现有的负荷削减模型存在的问题,提出了一种基于灵敏度分析的负荷削减模型,通过计算各支路对母线节点的灵敏度,筛选对越限支路潮流影响显著的母线节点作为负荷削减范围,将全局寻优转换为局部寻优。综合考虑负荷重要程度和计及设备电气耦合关系的临近原则,以各类负荷削减量加权求和最小为目标,采用原对偶内点法计算负荷削减量。所提模型可在保证负荷削减结果正确的前提下,大幅提高计算效率。以IEEE 300节点等系统为例,验证了所提负荷削减模型的正确性和高效性。

关键词:电网运行风险在线评估;灵敏度分析;负荷削减模型;原对偶内点法;时效性要求
中图分类号:TM 761 **文献标识码:**A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.05.013

0 引言

近年来全球发生了多起大面积停电事故,造成了巨大的经济损失[1-2]。为了保证电网运行安全,及时发现和消除安全隐患,电网运行风险在线评估受到了广泛关注和高度重视。电网输变电设备故障造成的负荷损失是表征风险后果的主要方面,其是电网运行风险评估的核心内容之一。由于电网运行风险评估需考虑的预想故障场景数量众多,大量故障场景,尤其是多重故障场景存在支路潮流越限,需要对各支路潮流越限故障场景进行负荷削减计算。因此,负荷削减模型的高效计算是提升电网运行风险评估计算效率、实现电网运行风险评估在线计算的关键。

目前电力系统中所采用的负荷削减方法主要有:按重要程度削减负荷[3]、平均削减负荷、最优削减负荷[4-9]、随机削减负荷、就近削减负荷[10]。其中,优化规划类算法应用较为广泛,将规划方法应用于负荷削减问题,目标函数为负荷削减量的函数,结合等式约束和不等式约束条件,利用线性规划或者非线性规划的方法求解该模型。文献[4]介绍了基于直流潮流的负荷削减线性规划模型和基于交流潮流的负荷削减非线性规划模型的基本原理,对2种原理的优缺点进行了分析。文献[11]利用基于灵敏度的线性优化方法求得各支路对节点注入功率的灵敏度,以切负荷量最小为优化目标,由于该方法忽略了潮流方程,计算结果存在误差。上述负荷削减模型在电力系统进行全局寻优,计算耗时严重,且没有考虑负荷重要度,不符合实际切负荷情况。文献[3]在基于直流潮流的负荷削减模型的目标函数中设置负荷权重和临近原则的加权因子,优先削减重要度低的负荷,再削减重要度高的负荷,并尽量削减相对靠近故障元件母线上的负荷。临近原则虽然能够较好地符合实际切负荷情况,但并不能真实地反映距离故障元件的远近,而只是从拓扑结构上定义“母线度值”。文献[12]运用潮流追踪理论求出发电机与线路、负荷与线路之间的贡献系数和分配系数,确定最合适的节点削减集合。由于分配系数和贡献系数不能反映由节点注入功率的微小变化引起的越限支路功率的改变程度及改变趋势,并且在确定节点集合时依靠经验设定门槛值,理论依据不强。因此,有必要进一步开展高效、准确的负荷削减模型和计算方法的研究,以更好地满足电力系统运行风险在线评估的应用要求。

针对传统负荷削减模型采用全局寻优导致的变量数目众多、计算规模庞大的问题,本文提出了一种基于灵敏度分析的负荷削减模型。该模型首先通过求解越限支路功率对各母线节点的灵敏度,筛选对越限支路潮流影响显著的母线节点,以此作为负荷削减的寻优范围,以将全局寻优转化为局部寻优。然后综合考虑负荷重要程度和计及设备电气耦合关系的临近原则,以各类负荷削减量加权求和最小为目标,建立了负荷削减模型,并采用原对偶内点法实现了对提出的负荷削减模型的求解。最后采用IEEE 300节点等系统作为算例,对提出的负荷削减模型进行了验证分析。

1 计及灵敏度分析的负荷削减范围求取方法

1.1 灵敏度分析基本原理

负荷削减范围的灵敏度分析实质是求取支路功率对节点注入功率的偏微分,因此灵敏度指标反映

收稿日期:2018-03-29;**修回日期:**2018-04-02
基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015AA050201)
Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2015AA050201)

了节点注入功率的微小变化引起的支路功率的改变程度及改变趋势。如果某越限支路功率对部分节点注入功率的灵敏度很高,意味着该部分节点的注入功率对该支路功率影响很大,注入功率的变化对消除该支路的越限情况有积极作用。负荷削减范围的灵敏度主要包含节点注入功率对节点电压相角和幅值的灵敏度和支路功率对节点电压相角和幅值的灵敏度 2 个部分,根据 2 个灵敏度得到支路功率对节点注入功率的灵敏度。

a. 节点注入功率对节点电压相角和幅值的灵敏度。

节点注入功率对节点电压相角和幅值的灵敏度 $\boldsymbol{J}$ 如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{P}\\ \Delta\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=\boldsymbol{J}\times\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{\delta}\\ \Delta\boldsymbol{V}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}_1 & \boldsymbol{N}_1\\ \boldsymbol{K}_1 & \boldsymbol{L}_1\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{\delta}\\ \Delta\boldsymbol{V}\end{bmatrix}\tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{H}_1$ 为 $(n-1)\times(n-1)$ 阶方阵,n 为电力系统节点数,$\boldsymbol{H}_1$ 的元素为 $\boldsymbol{H}_{1\_ij}=\partial\boldsymbol{P}_i/\partial\boldsymbol{\delta}_j$,$\boldsymbol{P}_i$ 为节点 i 的有功注入功率,$\boldsymbol{\delta}_j$ 为节点 j 电压相角;$\boldsymbol{K}_1$ 为 $m\times(n-1)$ 阶矩阵,m 为 PQ 节点数,$\boldsymbol{K}_1$ 的元素为 $\boldsymbol{K}_{1\_ij}=\partial\boldsymbol{Q}_i/\partial\boldsymbol{\delta}_j$,$\boldsymbol{Q}_i$ 为无功注入功率;$\boldsymbol{N}_1$ 为 $(n-1)\times m$ 阶矩阵,其元素为 $\boldsymbol{N}_{1\_ij}=\partial\boldsymbol{P}_i/\partial\boldsymbol{V}_j$,$\boldsymbol{V}_j$ 为节点 j 的电压幅值;$\boldsymbol{L}_1$ 为 $m\times m$ 阶方阵,其元素为 $\boldsymbol{L}_{1\_ij}=\partial\boldsymbol{Q}_i/\partial\boldsymbol{V}_j$。

b. 支路功率对节点电压相角和幅值的灵敏度。

支路功率对节点电压相角和幅值的灵敏度 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}$ 如式(2)所示。

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}}=[\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}1}\quad\cdots\quad\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}d}]^{\mathrm{T}}\tag{2}$$

其中,$\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}1}$ 为支路 1 功率对节点电压相角和幅值的灵敏度;$\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}d}$ 为支路 d 功率对节点电压相角和幅值的灵敏度,d 为待分析的支路总数。

式(2)中,第 $f(1\leqslant f\leqslant d)$ 条支路功率对节点电压相角和幅值的灵敏度 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}f}$ 如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{P}_f\\ \Delta\boldsymbol{Q}_f\end{bmatrix}=\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}f}\times\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{\delta}\\ \Delta\boldsymbol{V}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}_{2\_f} & \boldsymbol{N}_{2\_f}\\ \boldsymbol{K}_{2\_f} & \boldsymbol{L}_{2\_f}\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{\delta}\\ \Delta\boldsymbol{V}\end{bmatrix}\tag{3}$$

其中,$\boldsymbol{H}_{2\_f}$ 为 $1\times(n-1)$ 阶矩阵,其元素 $\boldsymbol{H}_{2\_fj}=\partial\boldsymbol{P}_f/\partial\boldsymbol{\delta}_j$,$\boldsymbol{P}_f$ 支路 f 的有功功率;$\boldsymbol{K}_{2\_f}$ 为 $1\times(n-1)$ 阶矩阵,其元素为 $\boldsymbol{K}_{2\_fj}=\partial\boldsymbol{Q}_f/\partial\boldsymbol{\delta}_j$,$\boldsymbol{Q}_f$ 为支路 f 的无功功率;$\boldsymbol{N}_{2\_fj}$ 为 $1\times m$ 阶矩阵,其元素为 $\boldsymbol{N}_{2\_fj}=\partial\boldsymbol{P}_f/\partial\boldsymbol{V}_j$;$\boldsymbol{L}_{2\_fj}$ 为 $1\times m$ 阶矩阵,其元素为 $\boldsymbol{L}_{2\_fj}=\partial\boldsymbol{Q}_f/\partial\boldsymbol{V}_j$。

在判定支路是否过载时需要将该支路的视在功率与支路传输容量上限进行比较,因此需要求出支路视在功率对节点电压相角和幅值的推导式,如式(4)所示。

$$\Delta|\boldsymbol{S}_f|=\left[\left(\boldsymbol{P}_f\frac{\partial\boldsymbol{P}_f}{\partial\boldsymbol{\delta}}+\boldsymbol{Q}_f\frac{\partial\boldsymbol{Q}_f}{\partial\boldsymbol{\delta}}\right)/|\boldsymbol{S}_f|,\right.$$
$$\left.\left(\boldsymbol{P}_f\frac{\partial\boldsymbol{P}_f}{\partial\boldsymbol{V}}+\boldsymbol{Q}_f\frac{\partial\boldsymbol{Q}_f}{\partial\boldsymbol{V}}\right)/|\boldsymbol{S}_f|\right]\times\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{\delta}\\ \Delta\boldsymbol{V}\end{bmatrix}\tag{4}$$

其中,$|\boldsymbol{S}_f|$ 为支路 f 的视在功率。

在引入支路 f 的功率因数角 θ_f 后,考虑到 $\cos\theta_f=P_f/|S_f|$,$\sin\theta_f=Q_f/|S_f|$,则支路对节点电压相角和幅值的灵敏度计算可简化为式(5)。

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}f}=[(\cos\theta_f\boldsymbol{H}_{2\_f}+\sin\theta_f\boldsymbol{K}_{2\_f}),$$
$$(\cos\theta_f\boldsymbol{N}_{2\_f}+\sin\theta_f\boldsymbol{L}_{2\_f})]\tag{5}$$

c. 支路功率对节点注入功率的灵敏度。

联立式(1)—(3),可以得到支路 f 的功率对节点注入功率的灵敏度 $\boldsymbol{T}_f$,其具体计算公式如式(6)所示。

$$\Delta|\boldsymbol{S}_f|=\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}f}\times\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{\delta}\\ \Delta\boldsymbol{V}\end{bmatrix}=\boldsymbol{J}_{\mathrm{s}f}\times\boldsymbol{J}^{-1}\times\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{P}\\ \Delta\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=\boldsymbol{T}_f\times\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{P}\\ \Delta\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}\tag{6}$$

1.2　负荷削减范围的求取方法

根据 1.1 节提出的支路功率对节点注入功率的灵敏度的求解方法,通过计算可以得到网络内各支路对各母线节点的注入功率灵敏度。如果节点的灵敏度为正值,则该节点的注入功率为正值,即发电机节点或外网等值电源功率注入节点;如果节点的灵敏度为负值,则该节点的注入功率为负值,即该节点带有相应的负荷。对于灵敏度为正值的节点,可以通过调节该发电机自身的出力或调整外网等值电源的注入功率大小来消除对应支路的越限,因此这些节点可以不纳入负荷削减范围。而对于灵敏度为负值的节点,其灵敏度的绝对值越大,表示该节点消除对应的越限支路的能力越强,因此需要筛选保留灵敏度绝对值较高的负荷母线节点以构成负荷削减范围。

目前,负荷母线节点筛选方法主要有门槛值筛选法、按比例筛选法[13]和 k-均值聚类筛选法等。门槛值筛选法简单易操作,但是门槛值的选取具有经验性,形成的负荷削减范围不能适应电网的变化;按比例筛选是指将灵敏度计算结果按序排列,通过百分比直接选取灵敏度结果,该方法能够在一定程度上减少变量数,但形成的变量数仍较大,对计算效率的提高不明显;k-均值聚类法选取满足聚类准则函数的聚类结果中聚类均值最小的一类形成母线集合,该方法能筛选出灵敏度较高的母线集合,但是不能确定该方法的聚类数目,筛选出母线所带负荷能否有效消除支路越限也未可知。

对比上述筛选方法的优劣,本文以高灵敏度(即灵敏度的绝对值大)与该灵敏度对应节点有功负荷量的乘积的绝对值之和不小于该支路越限量为原则,将满足条件的负荷节点构成负荷削减范围。为了保证有足够的负荷量进行削减,支路越限量按照该支路越限量的 1.2 倍进行选取。对于设备故障造成的多支路越限的情况,分别按照该筛选原则选出每条支路的负荷削减范围母线集,总的筛选范围即为各支路的负荷削减母线集的并集。具体的筛选策

略如下。

a. 断开故障设备对应的支路，并计算故障后的潮流分布，找出所有的越限支路，并记录各越限支路的功率越限量 S，越限支路的总数记为 d'。

b. 根据1.1节提出的灵敏度计算方法，分别计算各越限支路对各母线节点的灵敏度，形成灵敏度矩阵 $\boldsymbol{T}$，并令 $i=1$。

c. 将灵敏度矩阵 $\boldsymbol{T}$ 的第 i 行按升序排列形成 $\boldsymbol{T}_{\_i}$，去除 $\boldsymbol{T}_{\_i}$ 中数值为正的灵敏度，并设置循环次数 $p=1$。

d. 计算 $\boldsymbol{T}_{\_i}$ 中前 k 个灵敏度与该灵敏度对应节点有功负荷量的乘积之和的绝对值 L_{ik}，计算公式如式(7)所示。

$$L_{ik}=\left|\sum_{g=1}^{k}\left(T_{\_i\_g}\times P_g\right)\right| \tag{7}$$

其中，$T_{\_i\_g}$ 为 $\boldsymbol{T}_{\_i}$ 中第 g 个灵敏度；P_g 为 $\boldsymbol{T}_{\_i}$ 中第 g 个灵敏度对应的母线节点上的有功功率。

e. 若 $L_{ik}\geqslant 1.2S_i$，则 $\boldsymbol{T}_{\_i}$ 中前 k 个灵敏度对应的母线构成越限支路 i 的负荷削减范围，将该母线集记为 C_i；若 $L_{ik}\leqslant 1.2S_i$，则令 $k=k+1$，并返回步骤 **d**。

f. 若 $i<d$，则令 $i=i+1$，并返回步骤 **c** 继续计算，直至形成该越限支路的负荷削减母线集；若 $i\geqslant d$，则说明已完成所有支路的负荷削减母线集的计算。

g. 将所有越限支路的负荷削减母线集 C_i 取并集，得到最终的负荷削减范围母线集 C，如式(8)所示。

$$C=C_1\cup C_2\cup\cdots\cup C_d \tag{8}$$

2 基于灵敏度分析的负荷削减模型

2.1 负荷削减模型的构建

在实际的负荷削减中，通常需要考虑以下2个重要的负荷削减原则：

a. 临近原则，即尽量削减相对靠近的故障元件母线上的负荷；

b. 按重要度削减原则，即优先削减最不重要的负荷，然后削减次不重要负荷，最后削减最重要负荷。

根据第1节的论述，通过灵敏度分析得到了负荷削减范围母线集 C。该母线集考虑了设备间的电气耦合关系，可更准确地反映设备之间在电气关系上的远近，更好地满足临近原则的实质要求。对于按重要度削减原则，则通过在目标函数中引入负荷重要度因子实现。由此，建立的负荷削减目标函数如式(9)所示。

$$\min\sum_{i\in C}\sum_{l=1}^{3}\left(\beta_l X_{il}\right) \tag{9}$$

其中，β_l 为第 l 类负荷的重要度因子；X_{il} 为节点 i 的第 l 类负荷的削减量。

式(9)所示的目标函数需要满足以下约束条件。

a. 潮流约束。

$$\begin{cases}\sum\limits_{j=1}^{n}U_iU_j\left(g_{ij}\cos\theta_{ij}+b_{ij}\sin\theta_{ij}\right)=P_{gi}-\left(P_{di}-\sum\limits_{l=1}^{3}X_{il}\right)\\ \sum\limits_{j=1}^{n}U_iU_j\left(g_{ij}\sin\theta_{ij}-b_{ij}\cos\theta_{ij}\right)=Q_{gi}-Q_{li}\end{cases} \tag{10}$$

其中，P_{gi}、Q_{gi} 分别为节点 i 的发电机有功出力和无功出力；P_{di}、Q_{li} 分别为节点 i 在负荷削减前的有功负荷和负荷削减后的无功负荷；θ_{ij} 为节点 i 和 j 间的电压相角差；g_{ij}、b_{ij} 分别为支路 i-j 的电导和电纳。

b. 不等式约束。

$$\begin{cases}P_{gi}^{\min}\leqslant P_{gi}\leqslant P_{gi}^{\max}\\ Q_{gi}^{\min}\leqslant Q_{gi}\leqslant Q_{gi}^{\max}\\ U_i^{\min}\leqslant U_i\leqslant U_i^{\max}\\ 0\leqslant X_{il}\leqslant\lambda_{il}P_{di}\\ 0\leqslant Q_{li}\leqslant Q_{di}\\ P_{ij}^2+Q_{ij}^2\leqslant\left|S_{ij\max}\right|^2\end{cases} \tag{11}$$

其中，$P_{gi}^{\min}$、$P_{gi}^{\max}$ 分别为发电机有功出力下限和上限；$Q_{gi}^{\min}$、$Q_{gi}^{\max}$ 分别为发电机无功出力下限和上限；$U_i^{\min}$、$U_i^{\max}$ 分别为节点 i 的电压幅值下限和上限；λ_{il}、Q_{di} 分别为节点 i 的第 l 类负荷占比和负荷削减前节点 i 的无功负荷；P_{ij}、Q_{ij}、$\left|S_{ij\max}\right|$ 分别为支路 i-j 传输的有功功率、无功功率及其容量极限。

2.2 负荷削减模型的求解方法

负荷削减模型是一个非线性规划模型，合适的非线性规划求解方法对于负荷削减程序的收敛性及计算速度具有重要意义。内点法从理论上被证明是多项式时间算法，不需判别各个约束的有效情况，因此对不等式约束的处理能力较强[14]。而在其后出现的变形内点法中，原对偶内点法以其收敛迅速、可靠性强，对初值的选择不敏感的优势，已经在优化领域中得到了广泛应用。基于原对偶内点法求解非线性规划问题的诸多优点，本文采用原对偶内点法求解负荷削减模型，其综合了拉格朗日法、牛顿法和对数障碍函数法3种方法，求解过程如下：

a. 采用障碍函数，通过引入正障碍因子和松弛变量，将不等式约束转换为等式约束；

b. 采用拉格朗日法，将转换后的等式约束问题转换为无约束问题；

c. 采用牛顿法修正由拉格朗日法得到的解，根据步长修正因子和求得的各变量的修正值，可求出所有原始变量和对偶变量的修正值；

d. 重复步骤 **a—c**，即可得到所建立的负荷削减模型的解。

2.3　基于灵敏度分析的负荷削减模型的实施流程

根据前述分析,基于灵敏度分析的负荷削减模型的实施基本步骤如下:

a. 断开故障设备所在支路,计算系统潮流分布,选出所有越限支路;

b. 根据式(1)计算各节点注入功率对节点电压相角和幅值的灵敏度 $\boldsymbol{J}$,并根据式(3)计算各越限支路功率对节点电压相角和幅值的灵敏度 $\boldsymbol{J}_{sf}$,由此根据式(6)形成越限支路对母线节点功率的灵敏度矩阵 $\boldsymbol{T}$;

c. 根据 1.2 节中提出的灵敏度筛选原则,确定负荷削减范围母线集 C;

d. 以各类负荷削减量加权求和最小为目标函数,以节点功率平衡、设备负载能力、节点电压上下限、发电机出力上下限、负荷节点削减量上限为约束,建立基于灵敏度分析的负荷削减模型;

e. 在负荷削减范围母线集 C 中,采用原对偶内点法求解负荷削减模型。

3　算例分析

为验证所提出的基于灵敏度分析的负荷削减模型和计算方法的正确性和适用性,以 IEEE 300 节点系统、欧洲 1 354 节点系统和欧洲 2 736 节点系统等不同规模的电网为例进行了仿真分析。一、二、三类负荷的重要度分别设为 2.0、1.5、1.0[15],各母线节点的一、二、三类负荷占比均分别设置为 20%、30%、50%。仿真算例的测试环境采用 MATLAB 的 MATPOWER 5.0 版本;硬件配置:Intel(R) Core(TM) i5-3470 CPU@3.20 GHz,内存容量 4.00 GB。为比较传统的负荷削减模型和本文提出的基于灵敏度分析的负荷削减模型在各系统预想故障场景下得到的负荷削减结果差异和计算效率差异,选取文献[16]中基于直流潮流的最优负荷削减模型作为传统模型。仿真算例中设置了 3 个预想故障场景,如表 1 所示。

表 1　故障场景描述

Table 1　Descriptions of failure scenarios

场景	系统	断开支路	越限支路容量设置
1	IEEE 300 节点	支路 171-169	支路 133-1710 容量上限设为 600 MV·A
2	欧洲 1 354 节点	支路 3768-2763	支路 3768-2751 容量上限设为 10 MV·A
3	欧洲 2 736 节点	支路 284-234	支路 234-245 容量上限设为 30 MV·A

根据本文提出的灵敏度分析方法,求出场景 1、2、3 的负荷削减范围母线集分别为 $C_1=\{120,171,227,233,1200,1201\}$、$C_2=\{3768\}$、$C_3=\{234\}$。

由筛选出的负荷削减母线集可以看出,本文提出的灵敏度分析方法可准确筛选能有效消除支路越限(即灵敏度高)的负荷节点,并且筛选出的母线节点变量数目远小于系统总节点数,从而将全局寻优转化为负荷削减范围内寻优。在筛选出的负荷削减母线集中计算各场景的负荷削减量,计算结果如表 2 所示。

表 2　负荷削减量计算结果

Table 2　Calculation results of load reduction

场景	需要进行削减的母线节点	负荷削减量/MW	
		传统模型	本文模型
1	171	44	44
	233	20	20
2	3768	9.7	9.7
3	234	2.1	2.1

根据表 2 可知,本文的负荷削减模型与传统负荷削减模型在各预想场景下的削减母线节点编号一致,并且各节点的负荷削减量以及总的负荷削减量也保持一致。由此可见,采用本文方法求取的负荷削减范围并建立的负荷削减模型不影响计算结果,即验证了本文模型计算的准确性。

在各预想故障场景下,本文模型与传统模型的计算时间对比结果如表 3 所示。

表 3　计算效率对比结果

Table 3　Comparison of calculation efficiency

场景	计算时间/s		节省时间百分比/%
	传统模型	本文模型	
1	1.328 4	0.867 0	34.7
2	3.766 9	1.612 0	57.2
3	6.713 3	2.128 1	68.3

由表 3 可以看出,本文提出的计及负荷削减范围的负荷削减模型可大幅提高计算效率,尤其在节点较多的大型电力系统中,相比于传统负荷削减模型,可节省 50%甚至更多的时间。究其原因,在场景 2 对应的欧洲 1 354 节点和场景 3 对应的欧洲 2 736 节点系统中,传统负荷削减模型所考虑的负荷削减范围分别占各自总的母线节点数目的 1/3 和 1/2,而在本文提出的负荷削减模型中,由于负荷变量数大幅减少,可有效缩减内点法迭代过程中的时间开销,具有较高的计算效率。对于同一个电力系统,当待评估的风险场景数目较多时,本文提出的负荷削减模型在提高计算效率方面会具有更为明显的作用,能更好地满足在线风险评估的时效性要求,计算效率对比如表 4 所示。

表 4　多场景计算效率对比结果

Table 4　Comparison of calculation efficiency between traditional and proposed models under multiple scenes

系统类型	待评估的场景数目	计算时间/s		节省时间百分比/%
		传统模型	本文模型	
IEEE 300 节点	51	61	36	41.0
欧洲 1 354 节点	137	436	207	52.5
欧洲 2 736 节点	500	4 018	958	76.2

4 结论

针对传统负荷削减模型采用全局寻优，导致计算效率低下的不足，本文从在线风险评估对时效性的要求出发，提出了一种基于灵敏度分析的负荷削减模型，在保证负荷削减结果正确的前提下，大幅提高了计算效率。

本文的主要研究结论如下：

a. 提出了基于灵敏度分析的负荷削减范围筛选方法，综合考虑各支路对母线节点注入功率的灵敏度，以及消除支路越限的总功率需求，筛选待削减负荷的母线节点集，将全局寻优转换为局部寻优，从而大幅降低负荷削减模型的维数和计算量；

b. 建立了计及负荷削减范围的负荷削减模型，该模型在基于灵敏度分析得到的负荷削减范围母线集中，以一、二、三类负荷削减量与负荷重要度乘积的最小值为目标，采用原对偶内点法计算最优负荷削减量，可在有效消除支路越限的同时，提高重要负荷的供电可靠性；

c. 基于多个不同节点系统进行了仿真分析，仿真结果表明本文提出的负荷削减模型计算结果准确可靠，其计算速度与传统方法相比有显著提高，可较好地满足电网运行风险在线评估的应用要求。

参考文献：

[1] 毛安家，张戈力，吕跃春，等. 2011 年 9 月 8 日美墨大停电事故的分析及其对我国电力调度运行管理的启示[J]. 电网技术，2012，36(4)：74-78.
MAO Anjia，ZHANG Geli，LÜ Yuechun，et al. Analysis on large-scale blackout occurred in South America and North Mexico interconnected power grid on Sep. 8，2011 and lessons for electric power dispatching in China[J]. Power System Technology，2012，36(4)：74-78.

[2] MAKAROV Y V，RESHETOV I，STROEV V A，et al. Blackout in North America and Europe：analysis and generalization[C]∥2005 IEEE Russia Power Technology. St. Petersburg，Russia：IEEE，2005：1-7.

[3] LIU H，SUN Y，WANG P，et al. A novel state selection technique for power system reliability evaluation[J]. Electric Power Systems Research，2008，78(6)：1019-1027.

[4] 赵渊，周家启，刘洋. 发输电组合系统可靠性评估中的最优负荷削减模型分析[J]. 电网技术，2004，28(10)：34-37.
ZHAO Yuan，ZHOU Jiaqi，LIU Yang. Analysis on optimal load shedding model in reliability evaluation of composite and transmission system[J]. Power System Technology，2004，28(10)：34-37.

[5] ABOU A A，ZEIN EL-DIN A，SPEA S R. Optimal load shedding in power system[C]∥Eleventh International Middle East Power Systems Conference 2006. El-Minia，Egypt：IEEE，2006：568-575.

[6] KUMAR M R，KUMAR A，PAL Y. Optimal load curtailment based transmission management with FACTS[C]∥2012 IEEE Fifth Power India Conference. Murthal，India：IEEE，2012：1-6.

[7] MORADI M H，ABEDINI M. Optimal load shedding approach in distribution systems for improved voltage stability[C]∥Power Engineering and Optimization Conference. Shah Alam，Malaysia：IEEE，2010：196-200.

[8] RUSTAM V，SERGEY G，VLADISLAV O. Mathematical models and optimal load shedding strategies for power system generation adequacy problem[C]∥2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems. Oradea，Romania：IEEE，2017：41-46.

[9] 谢仕炜，胡志坚，宁月. 考虑最优负荷削减方向的电网多目标分层随机机会约束规划[J]. 电力自动化设备，2017，37(8)：35-42.
XIE Shiwei，HU Zhijian，NING Yue. Multi-objective hierarchical stochastic chance-constrained programming considering optimal load-shedding direction[J]. Electric Power Automation Equipment，2017，37(8)：35-42.

[10] 赵渊，周家启，周念成，等. 发输电系统可靠性评估的启发式就近负荷削减模型[J]. 电网技术，2005，29(23)：34-39.
ZHAO Yuan，ZHOU Jiaqi，ZHOU Niancheng，et al. A heuristic approach to local load shedding scheme for reliability assessment of composite generation and transmission system[J]. Power System Technology，2005，29(23)：34-39.

[11] 傅旭，王锡凡. 静态安全分析中的联动切负荷算法[J]. 中国电机工程学报，2006，26(9)：82-86.
FU Xu，WANG Xifan. New approach to load-shedding in static state security analysis of power system[J]. Proceedings of the CSEE，2006，26(9)：82-86.

[12] 李春燕，俞集辉，谢开贵，等. 基于扩展关联矩阵的电流跟踪模型和算法[J]. 电工技术学报，2008，23(4)：104-111.
LI Chunyan，YU Jihui，XIE Kaigui，et al. Model and algorithm of current tracing based on extended incidence matrix[J]. Transactions of China Eletrotechnical Society，2008，23(4)：104-111.

[13] 吴子美，刘东，周韩. 基于风险的电力系统安全预警的预防性控制决策分析[J]. 电力自动化设备，2009，29(9)：105-109.
WU Zimei，LIU Dong，ZHOU Han. Preventive control decision making based on risk analysis for power system security warning[J]. Electric Power Automation Equipment，2009，29(9)：105-109.

[14] 陈奇，郭瑞鹏. 基于改进遗传算法与原对偶内点法的无功优化混合算法[J]. 电网技术，2008，32(24)：50-54.
CHEN Qi，GUO Ruipeng. A hybrid reactive power optimization algorithm based on improved genetic algorithm and primal-dual interior point algorithm[J]. Power System Technology，2008，32(24)：50-54.

[15] 高学民. 基于优化理论的 DTS 系统教案自动生成[D]. 天津：天津大学，2013.
GAO Xuemin. Teaching plan for DTS system automatically：generated based on optimization theory[D]. Tianjin：Tianjin University，2013.

[16] 刘洋，周家启. 大电网可靠性评估最优负荷削减模型[J]. 重庆大学学报，2003，26(10)：52-55.
LIU Yang，ZHOU Jiaqi. The optimal load-shedding model in power system reliability assessment[J]. Journal of Chongqing University，2003，26(10)：52-55.

作者简介：

张 哲

张 哲(1962—)，男，湖南株洲人，教授，博士研究生导师，主要研究方向为电网风险评估、新能源及超导技术(**E-mail**：zz_mail2002@163.com)；

杨 航(1991—)，男，湖北武汉人，博士研究生，主要研究方向为电网风险评估、

输变电设备状态检修(**E-mail**:879296783@qq.com);

尹项根(1954—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**:xgyin@mail.hust.edu.cn)。

Load shedding model based on sensitivity analysis in on-line power system operation risk assessment

ZHANG Zhe[1], YANG Hang[1], YIN Xianggen[1], HAN Jiexiang[1], CHEN Guoyan[2]

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Guangzhou Power Supply Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: The traditional load shedding models usually use global optimization to get the load shedding region, which hardly meets the requirement of timeliness in on-line power system operation risk assessment. In order to solve the problems of the present load-shedding models, a load shedding model based on sensitivity analysis is proposed. By calculating the sensitivity of each branch to each bus, the buses having remarkable influence on the power flow of over-load branches are obtained as the load shedding range, which can convert the global optimization to local optimization. The importance of load bus and adjacency principle regarding the electrical coupling relationship are comprehensively considered, the minimum weighted sum of reduction of different kinds of loads is taken as the object, and the load reduction is calculated by the primal dual interior point method. The proposed model can greatly improve the calculating efficiency on the premise of ensuring correct load shedding results. Taking IEEE 300-bus system and other systems as study cases, the correctness and high-effectiveness of the proposed load shedding model are demonstrated.

Key words: on-line power system operation risk assessment; sensitivity analysis; load shedding model; primal dual interior point method; requirement of timeliness