

基于 AHP 考虑用户支付意愿的 输电阻塞管理综合方法

赵彩虹¹, 仇玉萍², 王 启¹

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042;
2. 安徽省电力公司, 安徽 合肥 230061)

[摘要] 电力市场环境下, 输电阻塞的发生概率加大. 当间接阻塞管理不能奏效的情况下, 只能由直接阻塞管理来消除. 在灵敏度法直接阻塞管理的基础上, 把用户支付意愿及在 IL 辅助市场中的中标信息, 作为用户用电效能的指标来考虑, 提出一种综合直接阻塞管理方法. 并采用层次分析法(AHP)的改进算法广义最小偏差排序方法(GLDM)快速确定节点的负荷削减量. 使缓解或消除阻塞后, 总的社会福利损失尽可能小. 经算例验证, 方法有效、可行.

[关键词] 阻塞管理, 支付意愿, 可中断负荷, 层次分析法

[中图分类号] TM73, F123.9 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2006)02-0001-07

A Composite Congestion Management Method Considering Consumer's Willingness-to-Pay based on AHP

ZHAO Caihong¹, QIU Yuping², WANG Qi¹

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China;
2. Electric Power Corporation of Anhui Province, Hefei 230061, China)

Abstract: In power market, the probability of transmission congestion is increased. When indirect congestion management doesn't work well, direct congestion management should be used. In this paper, a composite congestion management method is presented based on sensitivity-analysis direct congestion management. Consumer's willingness-to-pay and hitting bid in ILM (Interruptible Load Management) ancillary market are considered as criteria of power supply efficiency. The generalized least deviation sequencing method is used to decide the amount of load shedding. Optimal economic benefit can be achieved by using this method. At last, validity of the method is proved by an example given in this paper.

Key words: congestion management, willingness-to-pay, interruptible load, AHP

0 引言

与垄断环境下相比, 电力市场环境下的输电网开放、大区联网、分散自主报价和双边自主交易、跨区域电能交易等更容易导致输电阻塞. 输电系统阻塞的原因是: 输电线路的热容量限制和系统的稳定性限制. 系统输送容量的限制带来的影响是: 使系统的安全性、稳定性受到威胁; 使部分电能交易计划无法实现, 影响资源的优化配置和利用; 可能导致发电商的市场力滥用, 引起电价扭曲. 当某些输电线路在某时段发生传输阻塞时, 交易中心必须对各交易计划做出调整: 事先采取市场可接受的合理手段, 消除安全威胁, 即制定消除阻塞的交易计划和确定引导缓解阻塞的输电电价.

市场可接受的合理手段有两大类: 一类是间接阻塞管理, 即用电价手段进行阻塞管理; 另一类是直接阻塞管理, 即交易中心为消除阻塞, 以最优的方式削减负荷. 一般来说, 在根据竞价确定运行方式时, 如果预计会发生阻塞, 则可由电力市场设立的独立系统运行机构 ISO (Independent System Operator) 或联营体交易中心(pool)通过建立阻塞价格体系, 对那些造成线路阻塞的交易或传输, 在输电价格中收取高额的阻

收稿日期: 2005-09-28.

作者简介: 赵彩虹(1956-), 女, 教授, 主要从事电力系统自动化及电力市场方面的教学与研究. E-mail: zhaocaihong@njnu.edu.cn

塞费用来进行阻塞管理,如节点电价法^[1]和当量电价法 TEVE (Transmission Electricity Value Equivalent)^[2,3].但是这一类方法在许多情况下并不能完全消除阻塞.因为除输电网可利用的输电容量资源外,电网用户对阻塞价格的敏感程度是间接阻塞管理能否成功的重要因素.直接阻塞管理的目标应是为消除阻塞而削减负荷后的总社会福利损失最小(阻塞损失最小),即在电力市场运行过程中出现阻塞时,在上述目标下迅速确定参与调整的发电厂节点和负荷节点,以及确定它们的调整量.

文献[4]着重考虑电网公司获得充足合理的电网扩建资金,在 TEVE 定价模型的基础上引入支付意愿^[5,6]来进行直接阻塞管理.文献[7]针对实时运行中的快速阻塞管理提出了基于灵敏度分析的快速阻塞管理的数学模型及启发式算法.灵敏度方法尽管计算速度快,不存在收敛性问题,可有效解决快速阻塞管理问题,但该方法并没有考虑电网用户的用电效益,自然也就很难实现社会福利损失最小的目标.本文在基于灵敏度分析快速阻塞管理的基础上,引入反映电网用户用电效益的支付意愿,并根据用户在 IL 辅助服务市场中的中标信息^[8-10],采用层次分析法 AHP (Analytic Hierarchy Process) 的改进算法广义最小偏差排序方法 GLDM (Generalized Lowest Deviation Method), 快速确定节点的负荷削减量.既保证了阻塞损失最小又可实现实时运行中的快速阻塞管理.

1 考虑用户支付意愿的综合阻塞管理

1.1 基于灵敏度分析的快速阻塞管理

基于灵敏度分析的快速阻塞管理,是在某时段、某一运行方式下,若线路 k 出现阻塞,即:

$$|L_k| > \bar{L}_k \quad k \in N^T \quad (1)$$

式中, L_k 为线路潮流, \bar{L}_k 为允许的潮流上限, N^T 为输电线路集合. 为有效地消除阻塞,首先计算 k 支路潮流相对于各节点注入功率到灵敏度系数,然后根据灵敏度系数的大小寻找对消除 k 支路阻塞最灵敏的节点,并确定应调整的注入功率数量.调整可在发电机节点之间进行,也可在发电机节点和负荷节点之间进行.在确定参与调整的节点和调整量时,首先应查看阻塞线路的潮流方向是否与参考方向一致.如果线路正方向过载,应削减具有正的最大灵敏度节点的出力和具有负的最大灵敏度节点的负荷.在不考虑网损变化的情况下为保持系统总的功率平衡,削减到发电节点出力和负荷的数量应相等.灵敏度的快速求解可采用选择性计算雅可比矩阵逆矩阵元素的方法^[7].

要实现阻塞损失最小,显然不考虑用户用电效益的灵敏度而直接进行阻塞管理是做不到的.对基于灵敏度的快速直接阻塞管理中负荷削减量确定的分析可以说明这一点.线路 k 的稳态潮流表达式为:

$$L_k = \sum_{i=1}^N S_{ki} P_i \quad (2)$$

由此导出的阻塞情况下的负荷削减量为:

$$\Delta P_{gi} = \Delta P_{Lj} = \frac{L_k - \bar{L}_k}{S_{ki}^{+\max} - S_{kj}^{-\max}} \quad (3)$$

式中, N 为节点集合; $S_{ki} = \frac{\partial L_k}{\partial P_i}$ 为支路 k 的潮流相对于节点 i 注入功率的灵敏度系数; $S_{ki}^{+\max}$ 和 $S_{kj}^{-\max}$ 分别为具有正的最大灵敏度系数的发电机节点的灵敏度和具有负的最大灵敏度系数的负荷节点的灵敏度.若由(3)式确定的调整量不满足约束时,则根据约束条件修正削减量.负荷的削减量确定后,只削减具有正的最大灵敏度系数的发电机节点的有功出力和有负的最大灵敏度系数的负荷节点的负荷.而目标函数中并没有考虑电网用户的用电效益,要实现为缓解或消除阻塞而削减负荷后,使总的社会福利损失最小,自然是不可能的.

1.2 考虑用户支付意愿的阻塞管理方法

考虑用户支付意愿 (Willingness-to-Pay) 的直接阻塞管理方法有:基于输电当量电价 TEVE 的直接阻塞管理方法^[4]和基于短期边际成本 SRMC (Short Run Marginal Cost) 的直接阻塞管理方法^[5,6].从对电网容量成本的充分回收方面考虑,前者比后者更具优越性.基于输电当量电价的直接阻塞管理方法的基本框架是以削减负荷量为决策变量,削减负荷后的优化目标是总的社会福利最大化.其目标函数为:

$$\max(B_{\text{pool}} + B_{\text{bi}} - \Delta B_{\text{pool}} - \Delta B_{\text{bi}} - G - T) \quad (4)$$

式中, B_{pool} 、 B_{bi} 分别为原联营用户用电的社会效益和原双边交易用户用电的社会效益; ΔB_{pool} 、 ΔB_{bi} 分别为削减负荷后联营用户用电的社会效益减少量和双边交易用户用电的社会效益减少量; G 为发电市场成本; T 为输电市场成本. 当 B_{pool} 、 B_{bi} 为常量时目标函数化为:

$$\min(\Delta B_{\text{pool}} + \Delta B_{\text{bi}} + G + T) \quad (5)$$

即以发、输电市场成本和用户效益损失之和最小. ΔB_{pool} 、 ΔB_{bi} 采用用户上报的支付意愿与负荷削减量的乘积来计算. 支付意愿表示为削减单位负荷后用户的效益损失, 用削减每 MW 负荷的损失费用(元/MW)表示. 基于当量电价直接阻塞管理 TEVEK-CM (Transmission Electricity Value Equivalent-Congestion Management)^[4] 在目标函数中将社会效益的减少量 ΔB_{pool} 和 ΔB_{bi} , 采用用户上报的支付意愿 ω (元/MW) 乘以负荷削减量 ΔL (MW) 来计算. 即:

$$\Delta B_{\text{pool}} = \sum_{j \in N^{\text{PL}}} \omega_j^{\text{PL}}(t) \Delta L_j^{\text{PL}}(t) \quad (6)$$

$$\Delta B_{\text{bi}} = \sum_{l \in N^{\text{Bi}}} \omega_l^{\text{Bi}}(t) \Delta L_l^{\text{Bi}}(t) \quad (7)$$

$$G = \sum_{i \in N^G} \sum_{g \in G_i} R_{\text{EVE},ig}^G P_{ig}(t) \quad (8)$$

$$T = \sum_{k \in N^T} R_{\text{EVE},k}^T(t) \left| \sum_{i \in N^G} \sum_{j \in N^L} f_{ij,k} D_{ij}(t) \right| \quad (9)$$

式中, $\omega_j^{\text{PL}}(t)$ 、 $\omega_l^{\text{Bi}}(t)$ 分别为联营用户 j 和双边用户 l 在时段 t 的上报支付意愿(元/MW); $\Delta L_j^{\text{PL}}(t)$ 、 $\Delta L_l^{\text{Bi}}(t)$ 分别为联营用户 j 和双边用户 l 在时段 t 的负荷削减量(MW), 是决策变量; $R_{\text{EVE},ig}^G$ 为节点 i 上发电单元 g 在次日联营市场中的当量电价(元/MWh); $P_{ig}(t)$ 为时段 t 在节点 i 上的发电单元 g 的注入功率; $R_{\text{EVE},k}^T$ 为线路 k 在时段 t 应回收的输电当量成本(元/MW); $D_{ij}(t)$ 为节点 i 至节点 j 的传送量(MW); $f_{ij,k}$ 为传输 $D_{ij}(t)$ 在线路 k 上的分布系数; N^{PL} 为联营用户集合; N^{Bi} 为双边交易用户集合; N^G 为发电节点集合; G_i 为节点 i 的发电单元集合; N^T 为输电线路集合; N^L 为负荷节点集合^[4]. 在考虑了节点功率平衡约束、发电可用容量约束、输电线路正负传输容量约束、原决策变量的非负约束后, 增加负荷削减量约束和新决策变量的非负约束. 基于输电当量电价的直接阻塞管理方法引入用户支付意愿, 可以合理削减负荷; 同时利用输电当量电价使容量投资得到充分合理的回报.

要实现为缓解或消除阻塞而削减负荷后, 使总的社会福利损失最小, 理论上要事先知道各电网用户的“效益-电价”函数, 然而在实践中这几乎是不可能的. 上述令各负荷用户自报支付意愿就是一种替代电网用户的“效益-电价”函数的方法, 亦即用户为了避免被大量削减负荷愿付出多高的电价作为代价-支付意愿. 显然在不考虑策略报价的情形下, 用电效益高的用户将会报出高的支付意愿, 相反用电效益相对低的用户将会报出低的支付意愿. 可见支付意愿是反映电网用户用电效益的重要指标.

1.3 可中断负荷管理

在竞争的电力市场中, 电力市场与 ISO 负责对各种辅助服务的招标和供应. 可中断负荷管理 ILM (Interruptible Load Management) 可作为 ISO 提供辅助服务之一. 将 ILM 作为 ISO 提供的一项紧急备用措施, 以维护电网安全可靠运行并优化电力资源配置. 当电力系统引入需求侧管理实行可中断负荷管理 ILM 时, 电网用户为降低用电成本、获得电价折扣等优惠, 主动为 ISO 提供 IL 服务. 当前在许多国家的电力市场中, 都已经或准备把 ILM 作为电网可提供的一项重要的辅助服务^[8-12]. 文献[9]专门研究了二级备用(运行备用)辅助服务市场中可中断负荷招标的数学模型, 分析了 IL 市场投标设计和 IL 合同招标的优化. 电网用户为在 ILM 中标, 会申报较低的投标价格. 但是 ISO 为避免引发输电阻塞网损增加、以及无功支持的需求增加等, 不会仅以投标价格来签订 IL 合同. 地理位置信息、母线负荷发生单位变化时系统网损的变化值, 也做为 IL 服务招标评标的重要参数. IL 市场上的投标者提交投标方案给 ISO, 投标中包括每个小时中断负荷的价格即报价 β (元/MWh), 可中断负荷的数量 μ (MW). IL 投标价格会随着运行备用的减少而成正比的增加(设 IL 市场投标行为模拟为一个线性函数). 假定一个运行备用上限值 R_{LIM} , 采用这个限值使得只有几个关键工况下存在 IL 市场. 投标价格 β 表示如下^[9]:

$$\begin{cases} \beta_{i,\text{Type}} = \beta_{oi,\text{Type}}(1 - R/R_{\text{LIM}}) & R < R_{\text{LIM}} \\ \beta_{i,\text{Type}} = 0 & R \geq R_{\text{LIM}} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\beta_{oi, Type}$ 指当系统中完全没有备用容量 $R = 0$ 时投标者的报价, Type 表示用户类型; R 为运行边际备用容量需求 (MW), R_{lim} 为备用容量限额, 当备用超过该限额时, IL 市场不运行. ISO 按网损最小、二级备用容量服务成本最小、满足 ISO 对运行备用的需求以及系统运行在安全限值内为目标优化选择 IL 合同, 中标价统一为中标者最高报价. 文献[12] 将辅助服务市场也纳入了实时调度的框架, 在目标函数中考虑了按合同规定的运行备用采购成本和额外运行备用采购成本.

2 基于层次分析法的输电阻塞综合管理

2.1 广义最小偏差排序方法

层次分析法 AHP 是由美国学者 SAATY T L 最早提出的一种多目标评价决策方法. AHP 的基本思想是把一个复杂问题归纳、提炼、分解成一系列构成要素, 将各要素按支配关系分为目标、准则和排序对象, 建立递阶层次结构, 通过两两比较的 1-9 比例标度法确定层次中诸要素的相对权重, 构造比较判断矩阵, 计算相对重要程度. 一致性检验合格后, 最终得到决策方案综合重要程度的总排序. 广义最小偏差排序方法 GLDM 是层次分析法 AHP 的改进算法. 广义最小偏差排序方法无需求解判断矩阵的最大特征根, 而是直接求解判断矩阵的最佳排序向量.

递阶层次模型中的目标、准则和排序对象统称为系统要素. 设某层 n 个要素的 $n \times n$ 阶判断矩阵为 $A = [a_{ij}]_{n \times n}$, 其排序向量为: $W = [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_n]^T$, 且满足归一化约束条件 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, 记向量空间: $D = \{W = [w_1 \ w_2 \ \cdots \ w_n]^T \mid w_i > 0; i = 1, 2, \dots, n; \sum_{i=1}^n w_i = 1\}$ 集合 $\Omega = \{1, 2, \dots, n\}$, 当 A 满足完全一致

性条件: $a_{ij} = \frac{a_{ik}}{a_{jk}}$, $i, j, k \in \Omega$ 时 A 为一致性判断矩阵. 由一致性判断矩阵的特点则有: $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$ ($i, j \in \Omega$). 一致性判断矩阵的各要素相互关系是可以定量传递的. 由于实际系统的复杂性和人们认识上的多样性、主观上的片面性和不稳定性, 系统要素的重要性度量没有统一和确切的标尺, 决策者不可能精确度量 $\frac{w_i}{w_j}$, 只能对它们进行估计判断. 在实际应用中对每一层次作单排序时, 均需做一致性检验. 一致性比率 CR

表示为: $CR = \frac{CI}{RI}$, 一致性指标 CI 表示为: $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$. λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征根, n 为判断矩阵的阶数, RI 为平均随机一致性指标, RI 的数值是用随机模拟方法分别对 1 - n 阶各构造 500 个随机判断矩阵, 它们满足判断矩阵的单位性和倒数性, 但不保证判断矩阵满足一致性条件. 计算这些矩阵的一致性指标并取平均值 RI . 对于三阶判断矩阵 $RI = 0.58$. $CR < 0.1$ 则认为该层次单排序的结果有满意的一致性, 否则调整判断矩阵的元素取值.

判断矩阵 A 的一致性程度主要取决于判断者对系统各要素的把握程度. 对各要素优劣认识的越清楚一致性程度就越高, 排序结果的准确度就越高. 但判断矩阵 A 的一致性条件不满足是客观存在、无法完全消除的. 基于这种情况引入广义偏差项^[13]:

$$g_{ij} = \left(a_{ij} \frac{w_j}{w_i}\right)^{\alpha} + \left(a_{ji} \frac{w_i}{w_j}\right)^{\alpha} - 2 \quad i, j \in \Omega \quad \alpha \neq 0 \quad (11)$$

同时构造广义偏差函数:

$$G(W) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n g_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\left(a_{ij} \frac{w_j}{w_i}\right)^{\alpha} + \left(a_{ji} \frac{w_i}{w_j}\right)^{\alpha} - 2 \right] \quad (12)$$

显然, 从判断矩阵拟合角度考虑, $G(W)$ 总是愈小愈好. 因此合理的排序向量 W^* 应使 $G(W^*)$ 最小. 由此导出的排序方法称为广义最小偏差排序方法.

广义最小偏差排序方法无需求解判断矩阵的最大特征根, 而是直接求解判断矩阵的最佳排序向量. 因此传统的以判断矩阵最大特征根为已知条件的一致性检验公式不再适用, 经变换得如下以排序向量进行的一致性检验公式:

$$CI = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq n} \left[a_{ij} \frac{w_j^*}{w_i^*} + a_{ji} \frac{w_i^*}{w_j^*} - 2 \right] \quad (13)$$

式中, w_i^* , w_j^* 为判断矩阵最佳排序向量中的元素. 由此式进行一致性检验具有更广阔的适用范围, 适用于判断矩阵的所有排序方法.

2.2 基于层次分析法的输电阻塞综合管理模型

以负荷节点相对于阻塞支路的灵敏度系数、负荷节点用户的支付意愿以及该节点用户在 IL 辅助服务市场中的中标信息为准则, 以负荷节点为排序对象, 建立递接层次模型如图 1.

基于广义最小偏差方法的用户节点综合排序步骤为:

(1) 用 1-9 比例标度法构造准则层判断矩阵 $A-B$;

(2) 以广义最小偏差方法对判断矩阵进行排序;

(3) 对判断矩阵进行一致性检验, 若 $CR < 0.10$ 满足一致性指标进行下一步, 否则转(1) 重新构造判断矩阵;

(4) 节点用户的灵敏度、支付意愿、IL 信息 3 项指标已是具体的量化指标, 经分类归一化处理直接用于总排序;

(5) 按用户节点综合排序指标计算负荷削减量.

2.3 综合直接阻塞管理方法

负荷节点 i 注入功率相对于阻塞支路 k 的潮流的灵敏度系数, 反映了支路潮流与节点注入功率的关系. 采用交流潮流计算灵敏度比较精确, 能够反映系统实际. 采用选择性计算雅可比矩阵逆阵元素的方法^[7] 可以快速得到各节点与阻塞支路相关的灵敏度. 本文将负荷节点相对于阻塞支路的灵敏度系数、该负荷节点用户的支付意愿以及该节点用户在 IL 辅助服务市场中的中标信息相结合, 采用层次分析法 AHP^[14] 的改进算法广义最小偏差排序方法 GLDM^[13], 确定快速阻塞管理中调整节点及调整量, 并实现为缓解或消除阻塞而削减负荷后, 使总的社会福利损失尽可能小, 即考虑用户支付意愿及 IL 信息的综合直接阻塞管理方法. 利用上述方法进行直接阻塞管理的具体步骤如下:

(1) 采用交流潮流计算线路潮流;

(2) 判断是否存在过载严重支路, 若 $|L_k| \leq \bar{L}_k$ ($k \in N^T$) 程序结束. 否则确定过载最严重支路即阻塞支路 k , 并进行第 3 步;

(3) 选择性计算雅可比矩阵逆阵元素快速得到各节点与阻塞支路 k 相关的灵敏度;

(4) 确定最合适调整的发电机节点及调整量;

(5) 以灵敏度、用户支付意愿、用户的 IL 指标为准则的层次分析法确定最适合调整的用户节点及调整量;

(6) 按第 4、5 步的计算结果削减发电机出力及用户节点负荷;

(7) 转第 1 步, 重新采用交流潮流计算线路潮流.

3 算例分析

本文以文献[7] 的算例系统为例, 如图 2 所示. 线路潮流数据(标么值) 如表 1 所示.

由表 1 可知, 支路 1、2、3 发生阻塞, 其中支路 1 的过载量最大, 文献[7] 采用交流模型计算出各节点对于支路 1 的灵敏度系数为: 0、-0.871 03、-0.671 70、-0.719 48、-0.848 14.

节点 1 是最适合调整的发电机节点, 该节点出力的削减量为: $\Delta P_1 = 0.105 498$, 相应的负荷削减量为: $\Delta P_L = \Delta P_1 = 0.105 498$ (标么值). 根据图 1 所示递接层次模型, 对目标 A 来说, 由准则构成的判断矩阵 $A-B$

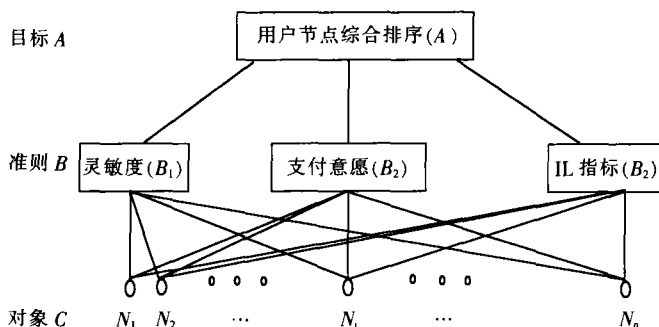


图 1 用户节点综合排序的递接层次模型

表 1 线路潮流数据

支路编号	有功潮流	传输容量	支路编号	有功潮流	传输容量
1	0.889 477	0.80	5	0.548 867	1.00
2	0.408 644	0.36	6	0.189 072	0.50
3	0.246 878	0.22	7	0.063 318	0.50
4	0.279 314	0.50			

为: $A - B = (B_{ij})$; $B_{ij} = B_i/B_j$. 准则 B_1, B_2, B_3 的相对重要程度, 是构成判断矩阵 $A - B$ 的信息基础. 然而这种相对重要程度本身具有一定的模糊性, 很难准确度量. 层次分析法中两两比较的 1-9 比例标度法可较好地解决这个问题. 当 B_2 与 B_3 具有相同的重要程度, B_1 与 B_2, B_3 相比为明显重要时, 以比例标度法建立判断矩阵 $A - B$, 以广义最小偏差排序方法对判断矩阵 $A - B$ 进行排序及一致性检验, 其结果如表 2 所示. 将负荷节点相对于阻塞线路的灵敏度绝对值、负荷节点的支付意愿(设 3 个负荷节点的支付意愿分别为: 220 元/MW、194 元/MW、250 元/MW)及 IL 信息(以 1 表示中标, 0 表示未中标)的原始数据进行分类归一化处理, 并进行总排序. 根据总排序指标得各负荷节点的负荷削减量. 结果见表 3.

表 2 判断矩阵 $A - B$ 及其排序

A	B_1	B_2	B_3	$W(\alpha = \pm 1)$
B_1	1	5	5	0.714 314
B_2	0.2	1	1	0.142 843
B_3	0.2	1	1	0.142 843

$$CI = 5.602 \times 10^{-8}, RI = 0.58, CR = 9.659 \times 10^{-8}$$

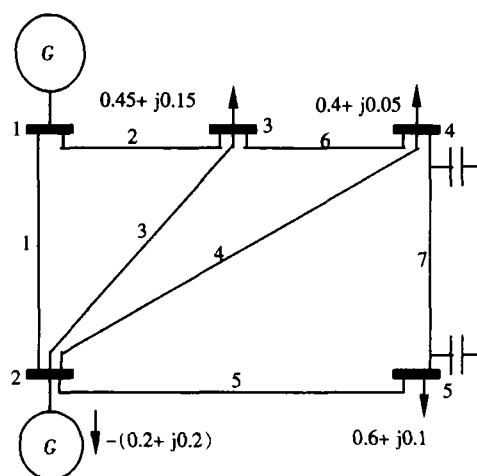


图 2 算例系统网络接线图

表 3 负荷节点三项指标及其削减量

节点序号	B_1	B_2	B_3	总排序指标	削减量
3	0.299 957	0.331 752	0.5	0.353 9	0.035 139
4	0.321 294	0.376 277	0.5	0.372 8	0.037 417
5	0.378 749	0.291 971	0	0.273 3	0.032 942

由表 3 结果可以看出, 引入支付意愿和 IL 信息后, 为消除支路 1 的阻塞第一次负荷削减 $\Delta P_L = 0.105 498$ (标么值), 由负荷节点 3、4、5、共同分担. 仅就第一次负荷削减结果而言, 基于灵敏度方法中全部的负荷削减量由节点 5 来承担, 然而灵敏度高的负荷节点不一定用电效益最低、支付意愿最小, 仅以灵敏度大小来决定负荷的削减量并不能实现总的社会福利损失最小. 引入支付意愿和 IL 信息后, 虽然节点 5 的灵敏度较高, 但由于节点 5 的支付意愿也较高且未参与 IL 辅助服务市场, 因而负荷被削减的较少. 支付意愿与负荷削减量的关系是显而易见的. 下面对 3 项指标不变时支付意愿在不同重要程度下, 即判断矩阵分别为 $A - B'$ 和 $A - B''$ 时的负荷削减给出结果, 如表 4 所示. 其中:

$$A - B' = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 5/3 \\ 1/5 & 3/5 & 1 \end{bmatrix} \quad A - B'' = \begin{bmatrix} 1 & 7 & 5 \\ 1/7 & 1 & 5/7 \\ 1/5 & 7/5 & 1 \end{bmatrix}$$

表 4 三项指标一定判断矩阵不同的排序及负荷削减量

$A - B'$				$A - B''$			
节点	$W(\alpha = \pm 1)$	总排序	削减量	节点	$W(\alpha = \pm 1)$	总排序	削减量
3	0.652 174	0.332 9	0.035 127	3	0.744 011	0.333 3	0.035 161
4	0.217 391	0.356 5	0.037 616	4	0.106 287	0.353 9	0.037 335
5	0.130 435	0.310 5	0.032 755	5	0.149 702	0.312 8	0.033 003

由以上结果可以得出支付意愿一定, 负荷削减与 B_1/B_2 的关系, 以节点 5 为例如图 3 所示.

4 结语

输电阻塞本质上是输电容量的不足. 在用电价手段进行间接阻塞管理不能奏效的情况下, 需要进行以削减负荷为手段的直接阻塞管理. 本文提出的综合直接阻塞管理方法, 引入用户支付意愿, 并考虑用户在辅助服务市场中的中标信息, 以负荷节点的灵敏度系数、该节点用户的支付意愿以及该节点用户在 IL 辅助服务市场中的中标信息为准则, 从而决定用户在阻塞管理中

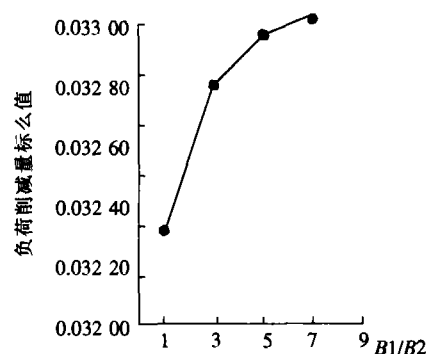


图 3 支付意愿一定负荷削减与 B_1/B_2 的关系

负荷的削减量. 算例结果表明,该方法在灵敏度法的基础上增加的计算量不大. 同时这种用户参与的直接阻塞管理增进了市场效率和公正,在实现为缓解或消除阻塞而削减负荷后,使总的社会福利损失最小方面更为有效. 需要指出的是在不同的系统约束和期望下灵敏度、支付意愿和 IL 中标信息的相对权重应不同. 因此,如何确定上述三项准则对于目标的最优权重,是一个值得研究的问题.

[参考文献] (References)

- [1] ANASTASIOS G BAKIRTZIS. Aumann-shaoley transmission congestion pricing[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(3): 67-69.
- [2] 言茂松. 当量电价体系及相关制度设计: (六) 输电的当量电价理论与方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 1-8.
YAN Maosong. Electricity value equivalent (EVE) pricing system and relevant systems design(part six: transmission electricity value equivalent (EVE) pricing methodology)[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14): 1-8. (in Chinese)
- [3] 言茂松. 当量电价体系及相关制度设计: (七) 阻塞管理的当量电价法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(16): 1-5.
YAN Maosong. Electricity value equivalent (EVE) pricing system and relevant systems design(part seven: transmission congestion management methods based on EVE pricing)[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(16): 1-5. (in Chinese)
- [4] 凌永伟, 辛洁晴, 言茂松. 基于输电当量电价的直接阻塞管理[J]. 电网技术, 2003, 27(7): 19-24.
LING Yongwei, XIN Jieqing, YAN Maosong. A direct congestion management method based on transmission electricity value equivalent pricing [J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 19-24. (in Chinese)
- [5] FANG R S, DAVID A K. Optimal dispatch under transmission contracts [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1999, 14(2): 732-737.
- [6] FANG R S, DAVID A K. Transmission congestion management in an electricity markets [J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1999, 14(3): 877-883.
- [7] 王秀丽, 甘志, 雷兵, 等. 输电阻塞管理的灵敏度分析模型及算法 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 10-13.
WANG Xiuli, GAN Zhi, LEI Bing, et al. Sensitivity analysis approach to transmission congestion management [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 10-13. (in Chinese)
- [8] 王治华, 李博, 李扬. 电力市场下的可中断负荷管理及其方法 [J]. 中国电力, 2003, 36(6): 14-17.
WANG Zhihua, LI Bo, LI Yang. Interruptible load management and its methods in electricity market [J]. Electric Power, 2003, 36(6): 14-17. (in Chinese)
- [9] 孙昕, 童明光, 赵庆波, 等. 二级备用辅助市场中可中断负荷管理模型研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 30-33.
SUN Xin, TONG Mingguang, ZHAO Qingbo, et al. A study on management model of secondary reserve for ancillary services market [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 30-33. (in Chinese)
- [10] 王建学, 王锡凡, 张显, 等. 电力市场和过渡期电力系统可中断负荷管理: (一) 可中断负荷成本效益分析 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5): 15-19
WANG Jianxue, WANG Xifan, ZHANG Xian, et al. Interruptible load management in power market and interim system (part 1: cost-benefit analysis of interruptible load) [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5): 15-19. (in Chinese)
- [11] 王建学, 王锡凡, 张显, 等. 电力市场和过渡期电力系统可中断负荷管理: (二) 可中断负荷运营 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(6): 1-5.
WANG Jianxue, WANG Xifan, ZHANG Xian, et al. Interruptible load management in power market and interim system (part 2: operation of interruptible load) [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(6): 1-5. (in Chinese)
- [12] WANG X, SONG Yonghua, LU Qiang. A coordinated real-time optimal dispatch method for unbundled electricity markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 482-490.
- [13] 王应明, 傅国伟. 层次分析中判断矩阵排序的广义最小偏差方法 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1993, 33(3): 10-17.
WANG Yingming, FU Guowei. A class of generalized least deviations priority methods of comparison matrix in analytic hierarchy process [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition, 1993, 33(3): 10-17. (in Chinese)
- [14] 王连芬, 许树柏. 层次分析法引论 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.
WANG Lianfen, XU Shubai. An Introduction of Analytic Hierarchy Process [M]. Beijing: China Renmin University Press, 1990. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]