

文章编号:1000-582X(2008)05-0475-06

输电阻塞调度的综合评价因子模型

李春燕,张 谦

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400030)

摘 要:基于灵敏度思想进行输电阻塞管理,能以较小的调整量消除阻塞,但很少考虑系统的经济性。而发电侧电力市场要反映低价机组优先上网的原则,因此选择参与调整机组时需要同时考虑灵敏度和报价因素。从直流潮流和交流潮流方程出发推导各节点注入功率对支路潮流的灵敏度,将其与各机组报价相结合构成综合评价因子,作为选择调整机组的依据,建立以消除阻塞费用最小为目标的输电阻塞管理模型,并采用线性规划进行求解。通过 IEEE-RTS24 节点系统验证了该方法的有效性和正确性。

关键词:输电阻塞管理;灵敏度;电厂报价;综合评价因子

中图分类号:TM732

文献标志码:A

Model of integrate evaluation factor in transmission congestion dispatch

LI Chun-yan, ZHANG Qian

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: Transmission congestion management based on the sensitivity can remove congestion quickly with minimal adjustments. However, it is not an ideal solution due to ignoring system economic factors. As is well known, low-bidding generators have priority in electricity markets. Sensitivity and costs therefore must be considered simultaneously as generators are adjusted. Sensitivity was obtained from direct current (DC) and auternating current(AC) flow equations, and the integrated evaluation factor (IEF) was built with sensitivity and the generation bidding. This was the basis for selecting adjusted generators. A congestion management model was established to minimize costs and was easily calculated by linear programming. Tests on the IEEE-RTS24 buses system and other practical systems show that the proposed method is effective.

Key words: transmission congestion management; sensitivity; generation bidding; integrate evaluation factor

受输电线的热容量和系统的稳定性限制,当某条支路输送功率达到或超过输电容量限制时,就会发生输电阻塞。输电阻塞会使系统的安全性和稳定性受到威胁,使电能交易计划无法实现,影响资源的

优化配置和利用,还可能导致市场力的滥用,引起电价的扭曲。随着输电网开放以及跨区域电能交易日益增多,特别是我国大区联网、西电东送等工程的实施,输电阻塞问题将日益严重,阻塞管理也成为研究

收稿日期:2008-01-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50577072);重庆市自然科学基金资助项目(CSTC,2006BB3213)

作者简介:李春燕(1975-),女,重庆大学博士研究生,主要从事电力市场、数字化及优化技术在电力工程管理中的应用研究。

俞集辉(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)yujihui@cqu.edu.cn.

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

热点。

解决输电阻塞常用基于最优潮流的优化类方法^[1-3]。这类方法常以发电费用最小为目标函数,考虑节点电压以及支路潮流等约束条件,采用各种优化算法进行求解。该方法考虑约束条件较全面,但是其计算较复杂,且最优化方法还存在收敛性问题,因此限制了其在实时阻塞管理中的应用。

当系统发生阻塞时,为快速确定参与调整的机组,出现了基于灵敏度的方法^[4-6]。即根据节点注入功率对支路功率的灵敏度来确定参与调整的机组及其出力调整量。文献[4]提出了一种利用灵敏度分析进行实时阻塞管理的数学模型及算法,根据注入功率与支路潮流的灵敏度来削减对阻塞影响最大的发电出力或负荷。文献[5]应用交流传输阻塞分配因子进行区域阻塞管理,将该分配因子分类构成阻塞集群,用于识别对阻塞线路具有相似影响程度的用户群。位于最灵敏阻塞集群的用户最有利于消除阻塞。这类方法根据灵敏度排序确定机组再调度或削减负荷,从而为市场操作员选择调整对象提供依据,但是在选择调整对象时很少考虑机组再调度或负荷削减成本。文献[7-10]从需求侧管理的角度出发,将负荷的需求弹性以及可中断负荷引入输电阻塞管理中,通过市场供需关系确定电价可显著缓解阻塞。文献[11-12]分别考虑按统一边际价格结算和按机组报价结算情况下,以消除阻塞费用最小为目标进行阻塞管理。

我国目前尚处于发电侧电力市场,为适应电力市场运营体制的需要,鼓励低价上网,充分体现市场竞争的公平性,价格低的机组优先上调出力,价格高的机组先下调出力。如果只根据灵敏度排序确定调整机组,可能出现某机组灵敏度最大,但其报价很低,从而阻塞管理费用很高。如果只根据报价排序确定调整机组,则可能出现报价高的机组其灵敏度很小,从而调整量很大。为兼顾安全性和经济性目标,在基于灵敏度进行阻塞管理中计及电厂报价,综合考虑灵敏度和电厂报价因素,根据这两者构成的综合评价因子排序确定参与调整的机组,建立以消除阻塞费用最小为目标的输电阻塞管理模型,通过线性规划求解各机组出力的调整量。

1 基于灵敏度的输电阻塞管理

支路有功功率变化量与节点注入功率变化量之间存在如下关系^[4]:

$$\Delta P_{ij} = D_m^{ij} \Delta P_m, \quad (1)$$

其中: D_m^{ij} 为节点 m 的注入功率变化量对支路

ij (位于节点 i, j 之间)功率变化量的灵敏度,反映节点注入功率的变化引起支路功率的变化情况; ΔP_m 为节点 m 注入有功功率的变化量; ΔP_{ij} 为支路 ij 的有功功率变化量。

当支路潮流越限时,按灵敏度大小顺序排列,根据式(1)确定各节点出力的变化量,通过调整机组出力消除阻塞。其中灵敏度的计算是关键,文中分别通过直流潮流和交流潮流方程推导得到。

1.1 直流潮流灵敏度

直流潮流支路有功功率为

$$P_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} = [0, \dots, \frac{1}{x_{ij}}, \dots, -\frac{1}{x_{ij}}, \dots, 0] \times [\theta_1, \dots, \theta_i, \dots, \theta_j, \dots, \theta_n]^T = M^{(i,j)} \theta, \quad (2)$$

式中, x_{ij} 为支路电抗; $M^{(i,j)}$ 中第 i, j 列元素分别为 $1/x_{ij}$ 和 $-1/x_{ij}$,其余元素均为0; θ 为节点电压相角向量。

$$P = B \theta, \quad (3)$$

式中, P 为节点注入功率向量, B 为节点导纳矩阵。

$$\text{由式(3),有} \quad \theta = B^{-1} P, \quad (4)$$

将式(4)代入式(2),有

$$P_{ij} = M^{(i,j)} B^{-1} P, \quad (5)$$

从而各节点对支路 ij 的灵敏度向量为

$$D_m^{ij} = M^{(i,j)} B^{-1}. \quad (6)$$

1.2 交流潮流灵敏度

交流潮流支路有功功率方程可写为

$$P_{ij} = u_i u_j Y_{ij} \cos(\delta_{ij} + \theta_j - \theta_i) - u_i^2 Y_{ij} \cos \delta_{ij}, \quad (7)$$

式中 u_i, u_j 和 θ_i, θ_j 为节点 i 与 j 的电压幅值和相角; Y_{ij} 和 δ_{ij} 为节点导纳矩阵对应元素 (i, j) 的模和幅角。

应用泰勒级数理论将式(7)展开,忽略高阶项,有

$$\Delta P_{ij} = \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \frac{\partial P_{ij}}{\partial u_i} \Delta u_i + \frac{\partial P_{ij}}{\partial u_j} \Delta u_j, \quad (8)$$

式(8)可改写为

$$\Delta P_{ij} = a_{ij} \Delta \theta_i + b_{ij} \Delta \theta_j + c_{ij} \Delta u_i + d_{ij} \Delta u_j, \quad (9)$$

根据PQ解耦法,并忽略有功功率与电压幅值的关系,式(9)可简化为

$$\Delta P_{ij} = a_{ij} \Delta \theta_i + b_{ij} \Delta \theta_j, \quad (10)$$

其中

$$a_{ij} = u_i u_j Y_{ij} \sin(\delta_{ij} + \theta_j - \theta_i), b_{ij} = -a_{ij},$$

由交流潮流方程有

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{p\theta} & J_{pu} \\ J_{q\theta} & J_{qu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta u \end{bmatrix}, \quad (11)$$

由式(11)有

$$\Delta\theta = [J_{\rho\theta}^{-1}] \Delta P, \quad (12)$$

$$\text{从而 } \Delta\theta_i = \sum_{m=1}^n f_{im} \Delta P_m, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

式中 f_{im} 为矩阵 $[J_{\rho\theta}^{-1}]$ 中第 i 行第 m 列的元素。

将式(13)代入式(10)有

$$\begin{aligned} \Delta P_{ij} &= a_{ij} \sum_{m=1}^n f_{im} \Delta P_m + b_{ij} \sum_{m=1}^n f_{jm} \Delta P_m \\ &= (a_{ij} \sum_{m=1}^n f_{im} + b_{ij} \sum_{m=1}^n f_{jm}) \Delta P_m, \end{aligned} \quad (14)$$

因此,节点 m 对支路 ij 的灵敏度为

$$D_m^{ij} = a_{ij} \sum_{m=1}^n f_{im} + b_{ij} \sum_{m=1}^n f_{jm}. \quad (15)$$

2 计及发电报价的输电阻塞管理策略

2.1 综合评价因子

根据灵敏度大小排序确定参与调整的机组进行阻塞管理,能够以较小的调整量消除阻塞。但由于没有考虑发电成本因素,因此调整费用将很高。并且不是任何机组都可以参与调整,有的机组由于经济或技术原因并不参与阻塞管理。从而,在进行阻塞管理时,需要综合考虑灵敏度和发电报价,构成综合评价因子,以此确定参与阻塞管理的机组,达到以最小的费用消除阻塞的目的。

由于灵敏度与发电报价是两个不同量,无法比较。分别将灵敏度和发电报价标准化,构成如下综合评价因子

$$\left. \begin{aligned} D^+ &= \frac{D_m^{ij}}{\max(D_m^{ij})} + \frac{c_m}{\max(c_m)}, (D_m^{ij} > 0) \\ D^- &= \frac{D_m^{ij}}{\max(|D_m^{ij}|)} + \frac{c_m}{\max(c_m)}, (D_m^{ij} < 0) \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

式中: D^+ , D^- 为综合评价因子; D_m^{ij} 表示节点 m 对支路 ij 的灵敏度; $c_m = 2a_m P_m + b_m$ 表示机组 m 的报价, a_m, b_m 分别为机组 m 的报价参数。

正灵敏度机组按照综合评价因子 D^+ 由大到小的顺序排列,排在最前的机组优先下调出力;同时,负灵敏度机组按照综合评价因子 D^- 由小到大的顺序排列,排在最前的机组优先增加出力;如无机组可调,则零灵敏度机组增加或下调出力。为避免选择报价很低或灵敏度很小的机组,按照如下原则选择机组:

$$\left. \begin{aligned} D'_+ &= \alpha \max(D^+), 0 < \alpha < 1 \\ D'_- &= \beta \min(D^-), 0 < \beta < 1 \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

即综合评价因子位于 $(D'_+, \max(D^+))$ 范围内的机组将下调出力,而位于 $(\min(D^-), D'_-)$ 范围内的机组将增加出力。

2.2 阻塞管理模型

确定参与调整的机组后,可建立如下以消除阻塞费用最小为目标函数的阻塞管理模型:

$$\min \Delta f = \sum_{m=1}^{NG} c_m \Delta P_{Gm}, \quad (18)$$

$$\text{s. t } \sum_{m=1}^{NG} D_m^{ij} \Delta P_{Gm} = -\Delta P_{ij}, \quad (19)$$

$$\sum_{m=1}^{NG} \Delta P_{Gm} = 0, \quad (20)$$

$$\Delta P_{Gm \min} \leq \Delta P_{Gm} \leq \Delta P_{Gm \max}, \quad (21)$$

其中, Δf 表示为消除阻塞而产生的费用; NG 表示参与阻塞管理的机组数; ΔP_{Gm} , $\Delta P_{Gm \min}$ 和 $\Delta P_{Gm \max}$ 分别表示机组 m 的出力调整量、最小和最大调整量。式(19)确保所有越限支路消除阻塞;式(20)表示各机组调整出力后仍保持功率平衡;式(21)为机组出力调整范围约束。输电阻塞管理步骤如图 1 所示。

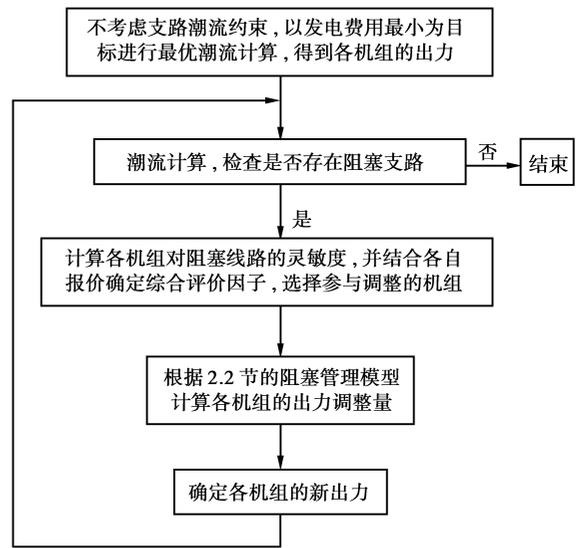


图 1 输电阻塞管理流程

3 算例

为证实模型的正确性和有效性,对 IEEE-RTS24 节点系统进行阻塞管理分析。其网络接线图、电气参数等见文献[13]。各机组的报价参数以及在不考虑线路潮流约束时以发电费用最小为目标进行最优潮流计算各机组原始出力如表 1 所示,各机组出力变化对线路潮流变化的灵敏度(分别基于直流潮流和交流潮流)如表 2 所示。

表 1 机组报价参数及出力

机组编号	G ₁	G ₂	G ₇	G ₁₃	G ₁₅	G ₁₆	G ₁₈	G ₂₁	G ₂₂	G ₂₃
a	0.12	0.16	0.15	0.13	0.18	0.15	0.12	0.14	0.16	0.19
b	0.8	0.7	0.4	0.9	0.2	0.8	0.2	0.8	0.8	0.8
P(p.u.)	1.92	1.92	3	4.3182	1.55	4	3.952	3	3.12	

表 2 机组对线路的灵敏度

机组编号	机组对线路 14-16 的灵敏度		机组对线路 17-16 的灵敏度	
	直流潮流	交流潮流	直流潮流	交流潮流
G ₁	0.020 9	0.017 1	0.028 9	0.029 6
G ₂	0.017 2	0.013 5	0.027 6	0.028 3
G ₇	-0.016 2	-0.018 7	0.015 9	0.015 4
G ₁₃	0	0	0	0
G ₁₅	0.379 8	0.372 3	0.154 8	0.161 6
G ₁₈	0.404 5	0.397 5	-0.026	-0.025 4
G ₂₀	0.391 7	0.375 5	0.549 7	0.549 2
G ₂₁	0.388 0	0.370 8	0.426 0	0.427 2
G ₂₂	0.391 1	0.364 1	0.528 4	0.512 8
G ₂₃	0.193 3	0.189 8	-0.010 7	-0.010 4

可见,基于直流潮流的灵敏度与基于交流潮流的灵敏度很接近,因此,不管是按照直流潮流灵敏度还是按照交流潮流灵敏度排序,其先后顺序是一样的。直流潮流灵敏度的计算相对比较简单,但是由于直流潮流忽略了网损,其计算结果比较近似;而交流潮流计算比较复杂但结果比较准确,如果要根据该灵敏度计算各机组出力的调整量,采用交流潮流灵敏度将更准确。

以表 1 中各机组出力进行 Newton-Raphson 潮流计算,各线路有功功率及其限额如表 3 所示(鉴于篇幅,表中只列出发生阻塞的线路)。

表 3 线路有功功率及越限量

	有功功率	有功功率限额	有功功率越限量
线路 14-16	3.065 2	3.0	0.065 2
线路 17-16	3.299 7	3.0	0.299 7

为较全面地验证阻塞管理方法的有效性,对如下 3 种情况进行阻塞管理:

- 1) 线路 14-16 阻塞;
- 2) 线路 17-16 阻塞;
- 3) 线路 14-16, 线路 17-16 同时阻塞。

各机组对线路的灵敏度以及综合评价因子如图 2 和图 3 所示。由图 2 可以看出,对于线路 14-16 而言,各机组对该线路的灵敏度有正有负,其中只有节点 7 上的机组其对应的灵敏度为负,该机组应参与阻塞管理并且应该增加出力;节点 13 为平衡节点,其对应的灵敏度为 0;正灵敏度最大的机组是节点 16 上的机组,但是其报价并不是最高;除平衡节点外,报价最高的机组是位于节点 23 的机组,但该机组的灵敏度也不是最大。综合考虑灵敏度和报价得到的综合评价因子最大的位于节点 21 的机组,其灵敏度较大并且报价也较高。该机组应首先选择进行阻塞管理并且下调出力。为避免选择灵敏度小且报价低的机组,位于节点 1 和 2 的机组将不参与阻塞管理。

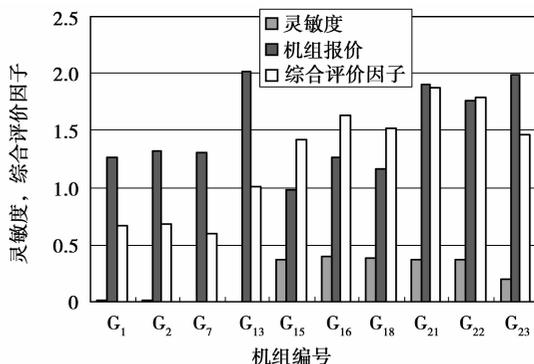


图 2 各机组对线路 14-16 的灵敏度以及综合评价因子

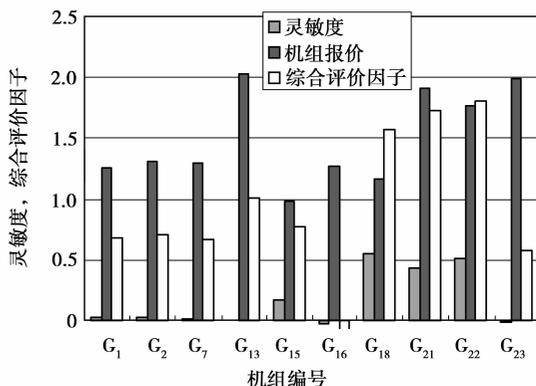


图 3 各机组对线路 17-16 的灵敏度以及综合评价因子

同理,对于线路 17-16 而言,位于节点 16 和 23 的机组对该线路的灵敏度为负,选择报价低的机组优先增加出力,但节点 23 的机组其灵敏度绝对值不是最大,且其报价较高,因此该机组将不参与阻塞管理。位于节点 22 的机组其正灵敏度较大并且其报价较高,从而综合评价因子最大,应优先选择参与阻塞管理并下调出力。而位于节点 1、2、7 和 15 的机组由于综合评价因子低将不被选择参与阻塞管理。

根据综合评价因子确定参与阻塞管理的机组后,对如上 3 种情况分别采用文中方法与基于灵敏度进行阻塞管理后各机组出力调整情况以及调整费用比较分析如表 4 所示。表中调整量为负表示机组下调出力,为正表示机组增加出力。由上表并结合图 2、3 可知,当线路 14-16 阻塞时,根据灵敏度进行

阻塞管理方法的思想,位于节点 16 的机组其正灵敏度最大,应该先下调出力;位于节点 7 的机组为负灵敏度,应该增加出力,但由于该机组已经达到其最大出力,机组出力不能再增加,而由平衡节点机组增加出力。综合考虑灵敏度和报价因素后,位于节点 21 的机组下调出力并且平衡节点机组增加出力。当两条或多条线路阻塞时,基于灵敏度进行阻塞管理的方法采用逐条支路消除法,即首先选择阻塞最严重的支路,消除其阻塞后再对其他阻塞线路进行管理。而采用同时消除法,即同时考虑所有阻塞线路,通过线性规划法进行计算求解。由于综合考虑灵敏度和电厂报价因素,其总调整量比只考虑灵敏度进行阻塞管理的方法的总调整量稍大,但是其总的调整费用却远小于只考虑灵敏度进行阻塞管理的方法。

表 4 文中方法与基于灵敏度的阻塞管理方法的对比分析(p. u.)

机组编号	线路 14-16 阻塞				线路 17-16 阻塞				线路 14-16,线路 17-16 同时阻塞			
	文中方法		基于灵敏度的阻塞管理方法		文中方法		基于灵敏度的阻塞管理方法		文中方法		基于灵敏度的阻塞管理方法	
	新出力	调整量	新出力	调整量	新出力	调整量	新出力	调整量	新出力	调整量	新出力	调整量
G ₁	1.92	0	1.92	0	1.92	0	1.92	0	1.92	0	1.92	0
G ₂	1.92	0	1.92	0	1.92	0	1.92	0	1.92	0	1.92	0
G ₇	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0	3	0
G ₁₃	4.507 7	0.190 2	4.485	0.167 5	4.940 1	0.622 6	4.862 2	0.544 7	4.059 2	-0.258 3	4.862 2	0.544 7
G ₁₅	2.15	0	2.15	0	2.15	0	2.15	0	2.15	0	2.15	0
G ₁₆	1.55	0	1.378	-0.172	1.55	0	1.55	0	1.55	0	1.55	0
G ₁₈	4	0	4	0	4	0	3.428	-0.572	4	0	3.428	-0.572
G ₂₁	3.806 7	-0.145 5	3.952 2	0	3.494 3	-0.457 9	3.952 2	0	3.658	-0.294 2	3.952 2	0
G ₂₂	3	0	3	0	2.797	-0.203	3	0	2.677 9	-0.322 1	3	0
G ₂₃	3.066 4	-0.053 5	3.119 9	0	3.119 9	0	3.119 9	0	3.969 1	0.849 2	3.119 9	0
调整总量	0.389 2		0.357 7		1.283 5		1.116 7		1.723 8		1.116 7	
调整费用	0.009 3		0.129 3		0.115 3		0.516 0		0.210 3		0.516 0	

4 结 论

在基于灵敏度进行阻塞管理中计及电厂报价因素以反映发电侧电力市场低价机组优先上网的原则。分别从直流潮流和交流潮流方程出发推导了各节点注入功率对支路潮流的灵敏度,将其与各机组报价相结合构成综合评价因子,以此作为选择调整机组的依据。从而建立以消除阻塞费用最小为目标

的输电阻塞管理模型,并采用线性规划进行求解。该方法既考虑灵敏度,又计及了电厂报价,结果表明其机组调整量绝对值总和稍大于只考虑灵敏度的阻塞管理方法,但从经济性角度来看,其所需调整费用小于只考虑灵敏度的阻塞管理方法。从而实现安全性和经济性双重目标。通过在 IEEE-RTS24 节点系统的应用验证了该方法的有效性和正确性。

参考文献:

- [1] FANG R S, DAVID A K. Transmission Congestion Management in an Electricity market [J]. IEEE Transactions on power systems, 1999, 14(3):877-883.
- [2] ASHWANI KUMAR, S. C. SRIVASTAVA, S. N. SINGH. Congestion management in competitive power market; A bibliographical survey [J]. Electric power system research, 2005, 76:153-164.
- [3] SHU TAO, GEORGE GROSS. A congestion-management allocation mechanism for multiple transaction networks [J]. IEEE transactions on power systems, 2002, 17(3):826-833.
- [4] 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(2):10-13.
WANG XIU-LI, GAN ZHI, LEI BING, et al. Sensitivity analysis approach to transmission congestion management [J]. Automation of electric power systems, 2002(2):10-13.
- [5] ASGWANI KUMAR, S. C. SRIVASTAVA, S. N. SINGH. A zonal congestion management approach using ac transmission congestion distribution factors [J]. Electric power systems research, 2004, 72: 85-93.
- [6] B. K. TALUKDAR, A. K. SINHA, S. MUKHOPADHYAY. A computationally simple method for cost-efficient generation rescheduling and load shedding for congestion management [J]. Electrical power and energy systems, 2005, 27:379-388.
- [7] TAK NIIMURA, SATOSHI NIIOKA, RYUICHI YOKOYAMA. Transmission loading relief solutions for congestion management [J]. Electric power systems research, 2003, 67:73-78.
- [8] LE ANH TUAN, KANKAR BHATTACHARYA. Transmission congestion management in bilateral markets: an interruptible load action solution [J]. Electric power systems research, 2005, 74:379-389.
- [9] 李海英, 李渝曾, 张少华. 可中断负荷参与输电阻塞管理的模型与算法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 17-21.
LI HAI-YING, LI YU-ZENG, ZHANG SHAO-HUA. Model and algorithm of transmission management based on interruptible load [J]. Automation of electric power systems, 2006, 30(10): 17-21.
- [10] 蒋正威, 陈枫, 孙维真, 等. 发电市场输电阻塞管理算法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5):33-36.
JIANG ZHENG-WEI, CHEN FENG, SUN WEI-ZHEN. Algorithm for transmission congestion management in electricity market [J]. Automation of electric power systems, 2006, 30(5):33-36.
- [11] 李林川, 茅波, 郝建军. 基于实际报价结算的电力市场下考虑消除阻塞费用最小的竞价算法 [J]. 电网技术, 2004, 28(12):57-61.
LI LIN-CHUAN, MAO BO, HAO JIAN-JUN. A practical quoted settlement based bidding algorithm with minimum cost of eliminating congestion in electricity market [J]. Power system technology, 2004, 28(12):57-61.
- [12] 李林川, 茅波, 刘侠. 基于统一边际电价结算的电力市场下考虑消除阻塞费用最小的竞价算法 [J]. 电网技术, 2004, 28(7):40-44.
LI LIN-CHUAN, MAO BO, LIU XIA. A unified marginal price settlement based bidding algorithm with minimum cost of eliminating congestion in electricity market [J]. Power system technology, 2004, 28(7): 40-44.
- [13] ROY BILLINTON, WENYUAN LI. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo methods [M]. New york and London: plenum pres, 1994.

(编辑 陈移峰)