

基于潮流越限量的阻塞费用分摊方案研究

余 平, 李晓明, 林海源

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 提出一种基于潮流跟踪原理, 在双边交易模式下按阻塞线路上各交易导致线路阻塞的潮流越限量占线路潮流总越限量的比例分摊阻塞费用。由于线路潮流在达到线路容量上限之前, 不存在阻塞, 各交易成交量的变化不对阻塞承担责任。在达到线路容量上限后, 交易量的增加使得线路发生阻塞, 则这部分潮流增量就应承担阻塞的全部责任。采用该方法分摊阻塞成本, 能准确地反映引起阻塞的责任, 并公平地对待各市场参与者, 消除阻塞对市场的不利影响。4 节点系统算例表明该算法可行。

关键词: 潮流跟踪; 阻塞; 费用分摊; 潮流增量

中图分类号: TM 73; F 123.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-6047(2005)01-0089-04

0 引言

电力市场下的网络潮流分布, 主要是基于电力交易的分布, 由于电力交易以利益最大化为目标, 故不可避免地会出现某些输电价格较低的线路或其电能价格较低的发电厂周围往往承载较重的负荷, 从而导致阻塞^[1-7]。

本文针对双边交易模式下的短期阻塞管理, 应用潮流跟踪原理, 按线路边际增量阻塞成本将阻塞费用分摊到各线路, 并对引起阻塞的用户或交易, 按其在导致线路阻塞的越限功率中所占的比例分配阻塞费用, 充分体现市场成员对阻塞的影响, 并在最大限度满足用户需求的同时, 避免出现不公平对待用户的现象。

1 阻塞成本分摊方案

1.1 阻塞调度数学模型

在阻塞管理中, 由于对各方利益考虑的侧重点不同, 选取的目标函数也不同, 导致消除阻塞所需的成本也就不同。本文仅考虑在忽略网损成本基础上的最小阻塞成本管理, 将发电机调整出力的成本作为阻塞成本。以最小阻塞成本为目标函数的最优潮流计算的数学模型为

$$\min C_T = C^+ \Delta P^+ - C^- \Delta P^- \tag{1}$$

$$\text{s.t. } H' \Delta P + z \leq z^{\max} \tag{2}$$

$$\Delta P = \Delta P^+ - \Delta P^- \tag{3}$$

$$\Delta P^+, \Delta P^- \geq 0 \tag{4}$$

式中 C^+ 和 C^- 为发电机的微增成本和微减成本投标; H' 为节点支路灵敏度矩阵; $z, z^{\max}$ 分别为初

收稿日期: 2004-07-01; 修回日期: 2004-10-16

始潮流和潮流限值; ΔP^+ 和 ΔP^- 为发电机发电功率调整量; C_T 为阻塞成本。

最优潮流结果为 (P^c, C^c, C_T) ,其中 P^c 为计及支路容量约束的发电机有功出力向量, C^c 为发电机增减投标报价向量; C_T 为阻塞成本。

1.2 潮流跟踪

在开放电力市场下,将阻塞费用在用户或交易中分摊,必须明确该用户/交易对阻塞线路的影响程度。应用潮流跟踪,快速而准确地确定各发电机与负荷之间的功率分配关系,确定发电机和负荷对输电线路的实际使用程度以及用户/交易对线路阻塞的“贡献”,并据此将阻塞费用在用户/交易中分摊,做到公平、合理地对待用户。

潮流跟踪的基本原理在于其正比例分配原则,即节点的任一支路注入功率在流出支路中的分配与流出支路的实际功率成正比。正比分配原则指出了潮流在支路中的分配方式。应用比例分配原则,经过计算即可得到输电线路的功率组成和发电机与负荷间实际功率的输送关系。

根据潮流跟踪的原理^[6],有以下关系:

$$P_{(n,m)(j)} = P_{ng} \frac{P_{nm(j,(n,1))}}{TP_{nm(n)}} \prod_{g=1}^{T_j-1} \frac{P_{nm(j,(g,g+1))}}{TP_{nm(j,g)}} \times \frac{P_{nm(j,(T_j,m))}}{TP_{nm(j,T_j)}} \frac{P_{mL}}{TP_{nm(m)}} \quad (5)$$

式中 $P_{(n,m)(j)}$ 为发电机节点 v_n 通过有向通路 j 到负荷节点 v_m 的功率分配; P_{ng} 为发电机节点 v_n 的有功出力; $P_{nm(j,(n,1))}, P_{nm(j,(1,2))}, \dots, P_{nm(j,(T_j,m))}$ 为从 v_n 到 v_m 的第 j 条有向通路上每条线路传输的功率; $TP_{nm(n)}, TP_{nm(j,1)}, \dots, TP_{nm(j,T_j)}, TP_{nm(m)}$ 为有向通路上每个节点的注入总功率。

式中第一项表示发电机的出力,其后 T_j+1 项表示每段线路上输送的功率的比重,最后一项表示从有向通路 j 输送到节点 v_m 时,该负荷功率占该节点总输出功率(其值等于注入功率)的比重。

由于从发电机节点 v_n 到负荷节点 v_m 共有 K 条有向通路,故发电机节点 v_n 对负荷节点 v_m 分配的总功率为

$$P(n,m) = \sum_{j=1}^K P_{(n,m)(j)} \quad (6)$$

已知线路潮流,通过式(5)和式(6)可以得出各交易在线路潮流中分摊的份额,以及各交易总的交易量,从而追踪到引起输电阻塞的用户或交易。本文分别对线路 l 传输功率达到容量约束值 $P_{\max}$ 和阻塞时刻的潮流进行跟踪,求出这两个时刻的各个交易在阻塞线路中的潮流分配份额。

1.3 阻塞成本分摊

考虑到阻塞线路对网络的边际影响,将线路的边际阻塞成本和增量阻塞成本的平均值作为线路的最终阻塞成本^[5,7],即

$$C_l = (C_l^m + C_l^i) / 2 \quad (7)$$

$$C_l^i = C_T - C_l^{l-1} \quad (8)$$

式中 C_l^m 为只考虑线路 l 的约束时, l 的边际成本; C_l^i 为线路 l 的增量阻塞成本; C_l^{l-1} 为计及除 l 之外的 $L-1$ 条线路的约束时的网络阻塞成本。

而在非线性输电网络中,各条线路所分摊的边际增量阻塞成本之和与全网阻塞成本不相等,存在不平衡项。本文将不平衡项根据线路边际增量阻塞成本分摊,每条阻塞线路所分摊的不平衡项与其边际增量阻塞成本成正比。这样,各条阻塞线路最终分摊的阻塞成本为

$$\hat{C}_l = \left(C_T - \sum_l C_l \right) \frac{C_l}{\sum_l C_l} + C_l \quad (9)$$

式中 $\hat{C}_l$ 为线路 l 最终分摊的阻塞成本。

假设在双边交易模式下,系统中存在 T 个双边交易,由于传输网络的容量约束, L 条线路发生阻塞。设阻塞线路潮流达到容量约束值和出现阻塞后交易 $t(t \in T)$ 在阻塞线路 $l(l \in L)$ 中的潮流变化量为 $\Delta P_{l,t}$,则交易在阻塞线路 l 中分摊的阻塞成本为

$$C_{l,t} = \hat{C}_l \Delta P_{l,t} / \sum_l \Delta P_{l,t} \quad (10)$$

式中 $\hat{C}_l$ 为线路 l 的阻塞成本。

由于线路潮流在达到容量约束值之前,各交易即使有变化,但并没有引起阻塞,相应也不应该在出现阻塞后,将这一部分潮流增量作为承担阻塞责任的一部分。在线路 l 出现阻塞前,潮流不断增大,在潮流达到线路容量约束值时,该线路上的某交易若继续增大其传输功率,则导致该线路阻塞,即在线路潮流达到其容量约束值后,各交易的潮流变化量,能准确反映是谁导致了阻塞。为体现各交易对阻塞的“贡献”,本文以线路潮流达到最大传输容量的时刻为起点,到线路阻塞时的各交易在潮流变化量中所占比例为阻塞分配原则,即在式(10)中

$$\Delta P_{l,t} = P_{l,t}^c - P_{l,t} \quad (11)$$

式中 $P_{l,t}^c$ 为阻塞时,交易 t 在线路 l 上的潮流份额; $P_{l,t}$ 为阻塞前,线路 l 上潮流达到最大容量约束值时,交易 t 在线路 l 上的潮流。

由式(10)可知,交易在支路中潮流变化量与支路潮流变化量相等时,该交易承担支路的全部阻塞成本;当交易在支路中潮流变化量为零时,交易不承担该支路的阻塞成本;当多个双边交易共同引起阻塞时,每个双边交易应承担的阻塞成本与其在支路中的潮流变化量成正比。由于潮流的变化量能体现对阻塞的责任,其值越大,表明对阻塞的责任越大,降低该交易在阻塞支路中的潮流对消除阻塞也越为有利。

在阻塞费用分摊到各个交易后,按照发电方和负荷方事先商定好的各自应承担的阻塞费用比例,

将已归算到交易 t 的阻塞费用分摊到发电机方和负荷方。设发电侧承担的阻塞费用占总阻塞费用比例为 ρ ,则负荷侧承担的阻塞费用占总阻塞费用比例为 $(1-\rho)$ 。即该交易中发电方承担的阻塞费用为

$$C_{l,t}^g = \rho C_{l,t}$$

负荷方承担的费用为

$$C_{l,t}^c = (1-\rho) C_{l,t}$$

假设发电方 i 在所有的阻塞线路中,有 T^g 个交易,则其应承担的总的阻塞费用为

$$C_i^g = \sum_t C_{l,t}^g$$

式中 $t \in T^g$ 。

假设用户 j 在所有的阻塞线路中,有 T^c 个交易,则应承担的总的阻塞费用为

$$C_j^c = \sum_t C_{l,t}^c$$

式中 $t \in T^c$ 。

2 算例分析

本文以4 节点的简单系统为例,进行计算分析,验证本算法的有效性,如图 1 所示(忽略线路有功损耗)。各发电机增减投标报价为 $C_{G11}^+ = 40, C_{G11}^- = 50, C_{G12}^+ = 20, C_{G12}^- = 30, C_{G21}^+ = 50, C_{G21}^- = 20, C_{G22}^+ = 70, C_{G22}^- = 40$, 报价单位为元/MW·h。

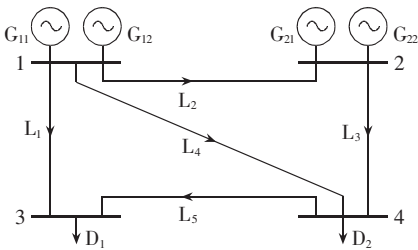


图 1 4 节点系统
Fig.1 A 4-bus power system

某时段系统正常运行,在时刻 t 网络潮流急剧增长,线路 L_1 和 L_3 达到最大容量约束,此时网络中存在 4 个双边交易 T_1, T_2, T_3 和 T_4 ,其中 T_1 为发电商 G_{11} 与用户 D_1 之间的交易, T_2 为 G_{12} 与 D_2 之间的交易, T_3 为 G_{21} 与 D_2 之间的交易, T_4 为 G_{22} 与 D_1 之间的交易(本文算例主要为突出费用分摊,故交易的流通过程采用了简化的方式,不考虑逆流问题)。

以下各表中潮流为空表示该交易不经过此线路)。此时的网络潮流跟踪结果及各交易总的交易量如表 1 所示。

各发电机发电功率及各负荷用电量分别为 $P_{G_{11}}^t = 271.5 \text{ MW}, P_{G_{12}}^t = 123.0 \text{ MW}, P_{G_{21}}^t = 80 \text{ MW}, P_{G_{22}}^t = 32.5 \text{ MW}, P_{D_1} = 304 \text{ MW}, P_{D_2} = 203 \text{ MW}$

若负荷继续增加,导致网络潮流继续增长,直至出现阻塞,则此时增加的交易量是导致阻塞的主要

表 1 t 时刻网络潮流					
Tab.1 Network power flow at t					MW
双边交易	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
T_1	221.5	17.2	17.2	32.8	50.0
T_2		42.3	42.3	80.7	
T_3			80.0		
T_4			32.5		32.5
T_{Σ}	221.5	59.5	172	113.5	82.5

原因。由此产生的阻塞费用也相应由这些交易承担。潮流跟踪结果如表 2 所示。

表 2 阻塞时网络潮流					
Tab.2 Network power flow during congestion					MW
双边交易	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
T_1	239.1	22.5	22.5	42.9	65.4
T_2		42.3	42.3	80.7	
T_3			80.0		
T_4			42.5		42.5
T_{Σ}	239.1	64.8	187.3	123.6	107.9

此时发电机发电量及负荷用电量分别为

$P_{G_{11}}^C = 304.5 \text{ MW}, P_{G_{12}}^C = 123.0 \text{ MW}, P_{G_{21}}^C = 80 \text{ MW}, P_{G_{22}}^C = 42.5 \text{ MW}, P_{D_1} = 347 \text{ MW}, P_{D_2} = 203 \text{ MW}$
各线路上的交易变化情况如表 3 所示。

表 3 线路交易变化情况					
Tab.3 Transaction changes of lines					MW
双边交易	ΔL_1	ΔL_2	ΔL_3	ΔL_4	ΔL_5
T_1	17.6	5.3	5.3	10.1	15.4
T_2		0.0	0.0	0.0	
T_3			0.0		
T_4			10.0		10.0

由表3 可看出, 线路 L_1 和 L_3 发生阻塞是由于交易 T_1 和 T_4 增大交易量导致的,则相应的阻塞费用也就应由交易 T_1 和 T_4 按比例承担。为消除阻塞,以最小阻塞成本为目标函数,计及网络约束,进行最优潮流计算,得到各发电机出力调整量为

$\Delta P_{G_{11}}^C = 17.6 \text{ MW}, \Delta P_{G_{12}}^C = -32.4 \text{ MW}$
 $\Delta P_{G_{21}}^C = -10.6 \text{ MW}, \Delta P_{G_{22}}^C = 15.3 \text{ MW}$

相应的阻塞成本为 528 元/h。分别计算线路 L_1 和 L_3 的边际增量成本如表 4 所示。 L_1, L_3 边际增量成本之和为 516 元/h,存在不平衡分量 12 元/h。将不平衡分量按线路的边际增量成本比例分到阻塞线路中, L_1, L_3 最终分摊阻塞成本为 211.8 元/h, 316.2 元/h。

表 4 线路阻塞成本				
Tab.4 Congestion cost of lines				元/h
线路	边际成本	微增成本	边际增量成本	最终阻塞成本
L_1	308	106	207	211.8
L_3	422	196	309	316.2

按本文的方法分摊到各交易的阻塞成本如表 5 所示。

假设交易双方对阻塞费用分摊比例 ρ 为 1/2,

表 5 阻塞成本在交易间的分摊结果
Tab.5 Congestion cost allocated to transactions 元/h

双边交易	L ₁	L ₃	合 计
T ₁	211.8	109.5	321.3
T ₄	0.0	206.7	206.7

则阻塞成本在交易双方间的分摊结果为

$C_{G_{11}}=160.65 \text{ 元/h}, C_{G_{12}}=103.35 \text{ 元/h}$
 $C_{D_1}=264 \text{ 元/h}$

考察表 3 和表 5 可知,支路 L₁ 上的阻塞是由交易 T₁ 引起的,相应的阻塞费用分摊到 L₁ 上后,也就由 T₁ 全部承担。支路 L₃ 的阻塞是由交易 T₁ 和 T₄ 共同引起的,而交易 T₂ 和 T₃ 不承担任何责任,故 L₃ 上的阻塞费用由 T₁ 和 T₄ 按潮流增量的比例分配,与其承担的阻塞责任相一致。从最终分摊到市场参与者的结果也可看出,发电方 G₁₁ 和 G₁₂,以及用户 D₁ 由于交易量的增长而引起线路阻塞,并承担相应费用,而其他市场参与者则不用承担阻塞费用。

3 结论

本文基于潮流跟踪的原理,对双边交易模式下的电力市场阻塞费用的分摊提出了一种新的费用分配方案,即按各交易导致线路阻塞的潮流增量占线路潮流增量的比例分摊阻塞费用。由于线路潮流在达到线路容量上限之前,不存在阻塞,各交易成交量的变化不对阻塞承担责任。在达到线路容量上限后,交易量的增加使得线路发生阻塞,则这部分潮流增量就应承担阻塞的全部责任。在由潮流跟踪得到各交易在这部分潮流增量中的比例后,相应的费用也按比例分摊到各交易。采用该方法分摊阻塞成本,能准确地反映引起阻塞的责任,并公平地对待各市场参与者,消除阻塞对市场的不利影响。

参考文献:

[1] 柯 进, 管 霖. 电力市场下的输电阻塞管理技术[J]. 电力系统自动化,2002,26(14):20-25,39.
KE Jin, GUAN Lin. Transmission congestion management

in power market[J]. **Automation of Electric Power Systems**,2002,26(14):20-25,39.
[2] 张永平, 焦连伟, 陈寿孙, 等. 电力市场阻塞管理综述[J]. 电网技术,2003,27(8):1-9.
ZHANG Yong-ping, JIAO Lian-wei, CHEN Shou-sun, et al. A survey of transmission congestion management in electricity markets [J]. **Power System Technology**, 2003,27(8):1-9.
[3] RAU N S. Transmission loss and congestion cost allocation—An approach based on responsibility[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,2000,15(4):579-585.
[4] SINGH H,HAO S,PAPALEXOPOULOS A D. Transmission congestion management in competitive electricity markets [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,1998,13(2):672-680.
[5] BARAN M E,BANUNARRYANAN V,GARREN K E. E-quitable allocation of congestion relief cost to transactions [J]. **IEEE Trans. on Power Systems**,2000,15(2):579-585.
[6] 谢开贵, 周家启. 基于有向通路的潮流跟踪新方法[J]. 中国电机工程学报,2001,21(11):87-91.
XIE Kai-gui,ZHOU Jia-qi. A new power flow tracing method based on directed path [J]. **Proceedings of the CSEE**,2001,21(11):87-91.
[7] 肖宏飞, 李卫东, 魏立明. 基于阻塞支路潮流变化量的阻塞成本分摊[J]. 中国电机工程学报,2004,24(2):83-87.
XIAO Hong-fei,LI Wei-dong,WEI Li-ming. Congestion cost allocation based on the power flow change in the congestion interface [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2004,24(2):83-87.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

余 平(1979-),男,湖北十堰人,硕士研究生,从事电力系统运行与控制方面的研究(E-mail:xyzman@126.com);
李晓明(1955-),男,湖北应城人,教授,从事电力系统及其自动化专业的科研与教学工作;
林海源(1981-),男,福建莆田人,硕士研究生,从事电力系统运行与控制方面的研究。

Research on congestion cost allocation based on exceeding power flow

YU Ping,LI Xiao-ming,LIN Hai-yuan

(School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China)

Abstract: The congestion cost allocated to the bilateral transaction is proportional to the contribution to congestion of each transaction on a flow-tracing basis. Before the power flow reaches line maximum transmission capability, there is no congestion and congestion cost. The exceeding power flow, which results in congestion, should take on whole responsibility. The proposed method reflects exactly the congestion responsibility and treats the market participants fairly to eliminate the impact of congestion on the market. A 4-bus system is presented to show its validity and efficiency.

Key words: power flow tracing; congestion; cost allocation; power flow increment