

多区域互联电力系统输送服务边际电价的实现和分析

余志伟, 高大伟, 谢志棠, 钟志勇, 汪 震
(香港理工大学, 香港)

摘要: 在电力工业中,按参与转运的电力公司和其他电力公司(电力交易方)在地域上的关系可以划分为不同的转运类型:区域内部,母线到母线;区域间,区域到区域;区域间,区域到母线;区域间,母线到区域;区域间,母线到母线。在一个多区域互联电力系统中,一个区域的有功无功的边际转运成本是系统中电力交易买卖双方的功率变换变化一个单位时引起的该区域内运行成本的变化。每一个转运区域的边际转运成本是用多区域最优潮流模型基于最优发电调度计算得到的。应用每个区域的发电成本对母线功率需求变化和功率交换水平变化的信息,可以计算不同类型的电力交易的边际转运成本。文中通过一个有 16条母线和 4个互联区域的系统来分析和运用所提方法,并讨论了负荷水平和交换功率水平变化对边际转运价格的影响。

关键词: 输电服务; 价格; 互联系统; 转运; 边际成本

中图分类号: TM 73; F 123.9

0 引言

竞争条件下常常出现大功率电力输送方案,这种方案的最大好处是降低电价。这种转运的开放不仅能消除不同地区之间的差价,促进地区间的成本一致;更大的开放还可以减少发电厂和电网投资,增进效益,提高互联区域的可靠性。输电系统的作用就是将发电厂的电力送给用户。尽管许多国家实行了电力市场或者私有化,主要输电网络仍然还是电力输送的公共通道。这些输电系统使电厂和用户组成了一个有效的电力联合体,在促进竞争、减少成本和增进可靠性方面很关键,它们的接线方式和运行直接影响了电力生产、输送、使用的最优时空组合。

一个输电交易就是指电力公司输电服务的一种,如售电、购电或转运,即通过第3方来输送电力。这种情况下需要一个多边协议。

转运的复杂性涉及到技术、法规、政治和经济方面的一些考虑^[1,2]。转运的关键争论是如何确定转运费用来补偿转运带来的第3方电力公司运行成本的提高。合理地确定转运价格是促进现有设备的最优利用和未来扩大投资的重要前提工作。目前实际工作中有多种针对特定情况的转运价格处理方法。这些方法主要分2类:一类是基于成本的,另一类是基于市场的。事实上基于边际成本理论的转运价格是日前输电市场开发和定价时最令人关注的^[3-5]。

本文的目的是说明基于文献[6]所发展的理论,怎样在促进竞争的环境下处理输电服务的价格问

题。论述了多区域互联系统中不同种类的转运交易的转运边际成本的计算方法,及过去在实际电力交易中没有受到关心的无功电力交易问题。最后用算例说明了负荷水平和交换功率变化对边际转运成本的影响。

1 边际转运成本的计算

在一个多区域互联电力系统中,一个区域的有功无功边际转运成本是系统中电力交易买卖双方的功率变换变化一个单位时引起的该区域内运行成本的变化(由于内部网损变化,或者线路潮流和电压幅值约束的改变)。每一个转运区域的边际转运成本是用多区域最优潮流模型基于最优发电调度计算得到的。应用每个区域的发电成本对母线功率需求变化和功率交换水平变化的信息,可以计算文献[6]第2节中提到的各类电力交易的边际转运成本。交换功率定义成流入区域为正,流出区域为负。各种类型的电力交易说明如下:

第1类交易:区域内部,母线到母线交易。供电母线生产接受附加的电能并输送给受电母线。

第2类交易:区域间,区域到区域交易。供电区域生产附加的电能并输送给受电区域;供电区域功率交换水平减少,受电区域功率交换水平增加。

第3类交易:区域间,区域到母线交易。供电区域生产附加的电能并输送给受电母线;供电区域功率交换水平减少,受电母线所在区域功率交换水平增加。

第4类交易:区域间,母线到区域交易。供电母

线生产 接受附加的电能并输送给受电区域;供电母线所在区域功率交换水平减少,受电区域功率交换水平增加

第 5类交易: 区域间, 母线到母线交易。 供电母线生产 接受附加的电能并输送给受电母线; 供电母线所在区域功率交换水平减少, 受电母线所在区域功率交换水平增加。

现在如有 1个单位的电力(有功或无功)加入上述供电区域/母线到受电区域/母线的交易之中, 母线需求和功率交换水平的相应变化如表 1所示。

表 1 交换和母线功率变化
Table 1 Interchange and bus power changes

交易种类	A	B	C	D
1			- 1	1
2	- 1	1		
3	- 1	1		
4	- 1	1	- 1	
5	- 1	1	- 1	1

注: A为供电区域或供电母线所在区域的功率交换水平; B为受电区域或受电母线所在区域的功率交换水平; C为供电母线的电力需求; D为受电母线的电力需求

一个区域的边际转运成本是由于在电力交易中相关的母线需求变化和区域功率需求变化而引起该区域发电成本变化的总和, 母线需求变化和区域功率需求变化如下所述: 对第 1类交易, 供电母线电力需求减少 1个单位, 受电母线电力需求增加 1个单位; 对第 2类交易, 供电区域功率交换水平减少 1个单位, 受电区域功率交换水平增加 1个单位; 对第 3类交易, 供电区域功率交换水平减少 1个单位, 受电母线所在区域功率交换水平增加 1个单位, 受电母线电力需求增加 1个单位; 对第 4类交易, 供电母线电力需求减少 1个单位, 供电母线所在区域功率交换水平减少 1个单位, 受电区域的功率交换水平增加 1个单位; 对第 5类交易, 供电母线电力需求减少 1个单位, 供电母线所在区域功率交换水平减少 1个单位, 受电母线所在区域功率交换水平增加 1个单位, 受电母线电力需求增加 1个单位。

上述分析是针对多区域网络转运的, 单区域网络母线到母线的情况比较简单, 这类情况就和第 1类情况相似。 由于只有 1个区域, 母线 1个单位功率变化引起的发电成本变化就等于相应母线功率平衡方程相关的拉格朗日乘子。 这个乘子可从最优潮流解中得到

2 算例

算例系统接线图见图 1 系统参数见表 2~ 表

4 算例系统区域发电成本随有功/无功功率交换水

平变化和母线功率需求变化的灵敏度见表 5 由于无功潮流能影响有功损耗和电压幅值, 因而要引起运行总成本的增减; 所以必须考虑无功成本和无功潮流的影响 这里强调了全交流多区域最优潮流较简单直流最优调度方法的优越性 注意到区域 1被选为参照功率交换区域(例如若一个区域的功率交换增加 1 MW或 1 Mvar, 区域 1的功率交换就要相应减少 1 MW或 1 Mvar)。

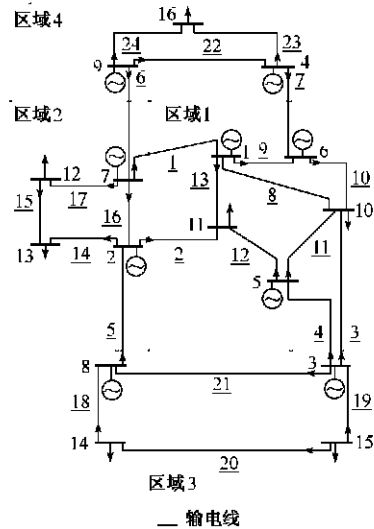


图 1 系统接线图
Fig. 1 System diagram

表 2 发电机参数
Table 2 Generation information

发电 机标 号	成本函数的系数			所在 区域
	二次 / (美元· MW ⁻²)	线性 / (美元· MW ⁻¹)	常数 美元	
1	0.010 0	14.0	800.0	1
2	0.016 0	14.0	1 000.0	2
3	0.015 0	19.0	750.0	3
4	0.013 0	21.0	2 400.0	4
5	0.015 0	18.0	500.0	1
6	0.018 0	18.0	700.0	1
7	0.015 0	16.0	1 600.0	2
8	0.016 0	17.0	1 300.0	3
9	0.015 0	16.0	900.0	4

表 3 母线负荷参数
Table 3 Loading data

母线 标号	母线功率需求		所在 区域
	有功 /MW	无功 /Mvar	
10	1 000.0	800.0	1
11	800.0	640.0	1
12	500.0	480.0	2
13	700.0	560.0	2
14	600.0	480.0	3
15	900.0	560.0	3
16	400.0	320.0	4

表 4 输电线参数

Table 4 Transmission line data

输电线 标号	供电母线 标号	受电母线 标号	电阻	电抗	电容
1	7	1	0.004	0.010	0.02
2	2	11	0.002	0.009	0.02
3	3	10	0.002	0.004	0.02
4	3	5	0.002	0.009	0.02
5	8	2	0.004	0.008	0.02
6	9	7	0.004	0.030	0.02
7	4	6	0.004	0.039	0.02
8	1	10	0.004	0.006	0.02
9	1	6	0.005	0.013	0.02
10	6	10	0.005	0.028	0.02
11	10	5	0.005	0.025	0.02
12	5	11	0.004	0.016	0.04
13	1	11	0.008	0.028	0.02
14	2	13	0.004	0.012	0.02
15	12	13	0.002	0.050	0.02
16	2	7	0.002	0.010	0.02
17	7	12	0.002	0.010	0.02
18	8	14	0.002	0.010	0.02
19	3	15	0.002	0.010	0.02
20	3	8	0.002	0.010	0.02
21	15	14	0.002	0.010	0.02
22	4	9	0.002	0.010	0.02
23	4	16	0.004	0.009	0.02
24	9	16	0.004	0.010	0.02

表 5 发电成本灵敏度

Table 5 Generation cost sensitivity

变化	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4
区域 2 P_1	32.474	-32.679	-0.102	-0.007
区域 3 P_1	33.442	0.584	-34.770	-0.003
区域 4 P_1	32.290	-0.340	-0.019	-31.818
区域 2 Q_1	-1.086	1.138	-0.149	-0.017
区域 3 Q_1	-0.133	0.100	0.016	-0.002
区域 4 Q_1	0.426	-0.575	0.129	-0.002
母线 1 P_d	32.203	0.142	-0.018	0.000
母线 2 P_d	0.591	33.142	0.078	0.005
母线 3 P_d	0.221	-0.177	34.709	0.001
母线 4 P_d	0.123	-0.153	0.030	31.791
母线 5 P_d	33.142	0.583	-0.107	-0.004
母线 6 P_d	32.728	-0.663	0.103	0.001
母线 7 P_d	-0.298	33.477	-0.025	-0.001
母线 8 P_d	-0.289	0.239	34.717	-0.002
母线 9 P_d	-0.145	0.181	-0.035	31.831
母线 10 P_d	33.891	0.085	-0.031	0.001
母线 11 P_d	33.531	0.472	-0.052	-0.002
母线 12 P_d	-0.257	34.409	-0.025	-0.001
母线 13 P_d	0.422	34.837	0.059	0.004
母线 14 P_d	-0.181	0.169	35.731	-0.002
母线 15 P_d	0.012	0.010	35.904	-0.001
母线 16 P_d	0.038	-0.044	0.008	32.258
母线 1 Q_d	0.000	0.000	0.000	0.000
母线 2 Q_d	0.000	0.000	0.000	0.000
母线 3 Q_d	0.000	0.000	0.000	0.000
母线 4 Q_d	0.000	0.000	0.000	0.000
母线 5 Q_d	0.000	0.000	0.000	0.000
母线 6 Q_d	0.000	0.000	0.000	0.000
母线 7 Q_d	0.000	0.000	0.000	0.000
母线 8 Q_d	0.000	0.000	0.000	0.000
母线 9 Q_d	0.000	0.000	0.000	0.000
母线 10 Q_d	0.637	-0.129	0.007	0.002
母线 11 Q_d	-0.109	0.640	-0.093	-0.009
母线 12 Q_d	-1.006	1.902	-0.195	-0.015
母线 13 Q_d	0.487	0.964	0.111	0.007
母线 14 Q_d	-0.287	0.325	0.871	-0.005
母线 15 Q_d	-0.166	0.204	1.034	-0.003
母线 16 Q_d	0.163	-0.188	0.033	0.360

注: P_1 为有功功率交换水平; Q_1 为无功功率交换水平; P_d 为有功功率需求; Q_d 为无功功率需求; 区域发电成本随 P_1 或 P_d 变化的灵敏度单位为美元 / (MW $^{\circ}$ h), 随 Q_1 或 Q_d 变化的灵敏度单位为美元 / (Mvar $^{\circ}$ h)

值分别为 -1.67 美元和 -0.72 美元, 有趣的是有些电力交易将使转运价格为负, 这本质上意味着这次交易降低了输电线的潮流。同时也注意到无功转运价格和有功转运价格的值是可以比拟的, 因而其不应该在输电成本计算中被忽略。直流最优潮流忽略无功潮流的影响, 因而不能合理地确定输电服务成本, 所以必须应用全交流最优潮流。

表 5 的第 1 行表明了如果区域 2 的交换功率水平增加 1 MW (区域 1 的交换功率水平将减少 1 MW), 区域 1 的发电成本要增加 32.474 美元, 区域 2, 3, 4 的发电成本要分别减少 32.679 美元, 0.102 美元和 0.007 美元。这些结果也可以通过运行 2 次最优潮流得到, 一次是初始运行情况, 另一次是有 1 MW 的功率交换水平变换。比较结果表明了灵敏度分析可以提供精确解。这里的单步计算所有灵敏度方法比对每个母线和区域多步求解最优潮流要优越得多。当无功发电极限没有达到之前, 所有发电母线的无功需求的成本灵敏度都为零。由表 5 可得到各种交易的边际成本。作为一个例子, 表 6 示出当其他区域间或者不同母线和区域其他区域电力交易变化时, 区域 1 的有功或无功功率边际成本。这里只列举了区域到区域 (第 2 类) 和母线到区域 (第 4 类) 交易的情况。以第 1 行为例, 如果区域 2 到区域 3 的交易增加 1 MW, 区域 1 将产生的边际转运成本为 0.97 美元 ($-32.474 + 33.442 = 0.968 \approx 0.97$)。表 6 最后一行说明, 如果母线 16 到区域 2 或者区域 3 多转运 1 MW 功率, 区域 1 的边际转运成本分别增加 0.15 美元 ($-32.29 + 32.474 - 0.038 = 0.146 \approx 0.15$) 和 1.11 美元。1 Mvar $^{\circ}$ h 电能引起的相应

表 6 其他区域间或者母线和和其他区域交易变化引起的区域 1 的边际转运成本

Table 6 Marginal wheeling costs incurred in area 1 for changes in transactions between other areas or between busbars and other areas

起点	终点		
	区域 2	区域 3	区域 4
区域 2		0.97(0.95)	- 0.18(1.51)
区域 3	- 0.97(- 0.95)		- 1.15(0.56)
区域 4	0.18(- 1.51)	1.15(- 0.56)	
母线 1	0.27(- 1.09)	1.24(- 0.13)	0.09(0.43)
母线 2		0.38(0.95)	- 0.78(1.51)
母线 3	- 1.19(- 0.95)		- 1.37(0.56)
母线 4	0.06(- 1.51)	1.03(- 0.56)	
母线 5	- 0.67(- 1.09)	0.30(- 0.13)	- 0.85(0.43)
母线 6	- 0.25(- 1.09)	0.71(- 0.13)	- 0.44(0.43)
母线 7		1.27(0.95)	0.11(1.51)
母线 8	- 0.68(- 0.95)		- 0.86(0.56)
母线 9	0.33(- 1.51)	1.30(- 0.56)	
母线 10	- 1.42(- 1.72)	- 0.45(- 0.77)	- 1.60(- 0.21)
母线 11	- 1.06(- 0.98)	- 0.09(- 0.02)	- 1.24(0.54)
母线 12		1.22(1.96)	0.07(2.52)
母线 13		0.55(0.47)	- 0.61(1.02)
母线 14	- 0.79(- 0.66)		- 0.97(0.85)
母线 15	- 0.98(- 0.79)		- 1.16(0.73)
母线 16	0.15(- 1.67)	1.11(- 0.72)	

注:表中括号前表示有功转运成本,单位为美元/(MW·h);括号内表示无功转运成本,单位为美元/(Mvar·h)

表 7 各种负荷水平的转运价格

Table 7 Wheeling rate sensitivity to pu load levels

标么负荷	区域 2到区域 3	母线 7到区域 3	区域 2到母线 6	母线 16到母线 10
0.6	0.47(0.20)	0.67(0.02)	- 0.03(0.41)	1.00(0.03)
0.7	0.57(0.25)	0.78(0.04)	- 0.07(0.45)	1.13(0.17)
0.8	0.61(0.28)	0.81(- 0.07)	- 0.15(0.46)	1.20(0.07)
0.9	0.74(0.46)	0.88(- 0.18)	- 0.02(0.67)	1.38(0.07)
1.0	0.97(0.93)	1.06(- 0.07)	0.47(1.26)	1.57(0.16)
1.1	1.27(1.78)	1.04(- 0.41)	1.29(2.31)	1.71(0.16)

注:表中括号前表示有功交易,单位为美元/(MW·h);括号内表示无功交易,单位为美元/(Mvar·h)

表 8 不同功率交换水平的转运价格

Table 8 Wheeling rate sensitivity to pu interchange levels

标么交换功率	区域 2到区域 3	母线 7到区域 3	区域 2到母线 6	母线 16到母线 10
0.2	0.57(2.70)	0.49(- 0.83)	1.01(3.24)	0.71(- 0.01)
0.3	0.62(2.20)	0.46(- 0.60)	0.86(2.70)	0.68(- 0.20)
0.5	0.77(1.83)	0.70(- 0.34)	0.86(2.28)	1.08(0.05)
0.7	0.87(1.43)	0.87(- 0.14)	0.63(1.69)	1.36(0.12)
0.9	0.93(1.05)	0.99(- 0.12)	0.49(1.31)	1.47(0.06)
1.1	0.95(0.76)	1.00(- 0.30)	0.28(1.00)	1.60(0.07)

注:表中括号前表示有功交易,单位为美元/(MW·h);括号内表示无功交易,单位为美元/(Mvar·h)

3 边际转运价格灵敏度

下面检验负荷水平和功率交换水平变化对边际转运价格的影响

3.1 负荷水平变化的影响

当功率交换水平保持在计划值,负荷水平从额定值的 60% 变到 110% 时,与不同负荷水平相应的有功和无功转运价格示于表 7 从表 7 可以看出随着母线负荷的增大,边际转运价格总体呈上升趋势。由于电力系统的非线性性质,这种上升趋势在高负荷水平时趋于陡峭。当系统重负荷时无功潮流将使母线电压趋于限制值,相反时可使它们离开限制值。系统约束作用的结果不仅限于无功转运价格,还严重影响有功转运价格。另外还要注意无功转运价格是重要的,在一些情况下比有功转运价格还大。

3.2 功率交换水平的影响

当负荷水平保持恒定,转运类型和上一小节中一样,功率交换水平从计划值的 20% 变为 110% 时,不同功率交换水平对转运价格的作用示于表 8 从表 8 可以看出随着功率交换水平的上升,边际转运价格整体上呈下降趋势。这个例子中功率交换水平计划值定在最优功率交换水平附近。最优功率交换水平是对功率交换大小不加限制时最优潮流的计算结果,这时整个电力联合体的发电成本最小。在低功

率交换水平时,边际转运价格比较高,当功率交换水平接近这个计划值时,边际转运成本下降。

4 结论

本文用每个区域发电成本对母线需求和功率交换水平的灵敏度计算不同种类有功和无功交易的转运价格。研究表明基于多区域互联系统最优潮流模型的成本灵敏度方法是计算短期边际转运价格的有效手段。不同种类转运交易的边际成本提供了邻近电力公司、大用户和独立发电厂商之间有功、无功电力交易的市场机制。可以看到虽然发电机无功功率的成本假定为零,但无功边际转运价格和有功边际转运价格是可以比拟的。本文的研究成果为核定电力收费和确定电网投资收益提供了有力的工具。

参考文献

- 1 Weiss L, Spiewak S. The Wheeling and Transmission Manual. The Fairmont Press, 1991
- 2 Yu C W, David A K. Access, Costing and Pricing of Transmission Services. Pacific and Asian Journal of Energy, 1995, 5(2): 211-221
- 3 Schweppe F C, Caramanis M S, Tabors R D, et al. Spot Pricing of Electricity. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1989
- 4 Li Y Z, David A K. Wheeling Rates of Reactive Flow Under Marginal Cost Pricing. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1263-1269

(下转第 19 页 continued on page 19)

- (Industrial Economics).北京:清华大学出版社(Beijing Tsinghua University Press), 1991
- 3 Anderson P M, Fouad A A. Power System Control & Stability. Iowa Iowa University Press, 1975
- 4 王主丁,冯忻善(Wang Zhuding, Feng Xinshan).电力系统无功规划优化实用方法的研究(Studies on the Practical Approaches to Reactive Power Planning of Power Systems).电力系统及其自动化学报(Proceedings

of the CSU-EPSA), 1994, 6(4)

韩敬东,男,工程师,主要从事电机分析与控制的教学和研究工作。

董峰,男,硕士,工程师,主要研究电力系统无功优化

鞠平,男,博士,副校长,教授,主要研究电力系统模拟与控制。

AN EVOLUTIONARY STRATEGY METHOD FOR REACTIVE POWER PLANNING OF POWER SYSTEMS

Han Jingdong, Dong Feng, Ju Ping (Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract Reactive power planning is a complicated mixed optimization problem. Therefore, it is rather difficult to find out the global optimal solution with traditional methods. An evolutionary strategy (ES) method is proposed in the paper in which the integer and continuous variables are treated with different mutation approaches. Then the method is applied to the optimization of reactive power planning. The method does not necessitate the optimization problem be derivable nor the initial point be of any special value. Also it has high possibility of obtaining the global optimal solution. Testing results of applying this method to an IEEE-9 bus system show that the method has good convergence, strong adaptation and feasibility to the optimal solution.

This project is supported by Foundation for Excellent Young Teachers, Ministry of Education, China.

Keywords power systems; reactive power planning; evolutionary strategy

(上接第 7 页 continued from page 7)

- 5 Yu C W, David A K. Pricing Transmission Services in the Context of Industry Deregulation. IEEE Trans on PWRS, 1997, 12(1): 503~ 510
- 6 余志伟,高大伟,谢志棠,等(Yu C W, David A K, Tse C T, et al).多区域互联电力系统输电服务边际电价理论(Theory of Transmission Services Marginal Pricing in a Multi-Area Interconnected Power System).电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(16)

余志伟,男,博士,曾在香港中华和电力公司任保护工程师,现为香港理工大学助教授,研究方向为电力市场、电价、经济和保护。

高大伟,男,教授,香港理工大学电气工程系主任,研究方向为电价、控制、HV DG 暂态稳定、保护和可靠性。

谢志棠,男,博士,曾在香港中华和电力公司任计划工程师,现为香港理工大学助教授,研究方向为电力系统控制、暂态稳定。

IMPLEMENTATION AND ANALYSIS OF TRANSMISSION SERVICES MARGINAL PRICING IN A MULTI-AREA INTERCONNECTED POWER SYSTEM

C. W. Yu, A. K. David, C. T. Tse, C. Y. Chung, Wang Zhen

(The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract In the electric supply industry there are different types of wheeling depending on the relationship between the wheeling utility and the other parties. Wheeling can occur between individual buses or between areas and they can be categorized as follows (1) Inter-area, area to area; (2) Inter-area, area to bus; (3) Inter-area, bus to area; (4) Inter-area, bus to bus; (5) Intra-area, bus to bus. Marginal wheeling cost is defined as the change in an area's cost due to a unit change in the real/reactive power exchange between two other entities in the power system. The marginal wheeling costs are evaluated for each wheeling area on the basis of the optimum generation dispatch using the full AC multi-area optimum power flow model. Using the sensitivities of the generation cost of each area with respect to the bus power demand and interchange power derived from the sensitivity analysis, the marginal wheeling costs for different types of power transactions can be computed. The implementation and analysis are demonstrated using a case study of a system with 16-bus and four interconnected areas. The effects of changes in load levels and the levels of interchange power on the marginal wheeling rates are also illustrated.

Keywords transmission services; pricing; interconnected power system; wheeling; marginal cost