

基于功率从属性追踪的购电节点成本分析

王小君, 鲍海

(华北电力大学电气工程学院, 北京 102206)

摘要: 为准确分析电网实际运行中每个购电节点的成本盈亏情况, 提出了一种基于功率从属性追踪的购电节点成本分析方法。该方法在分析电网功率从属性分布的基础上, 构建了电网络功率从属性追踪模型, 确定了负荷功率中各电源提供功率的份额; 其次采用了一种公平合理的经济准则作为描述能量传输过程中能量损耗引起的经济利益变化的依据, 即节点费用守恒原则。该方法可以直接得出购电节点购电成本与负荷节点售电电力成本的解析表达式。最后, 通过 IEEE9 节点算例, 验证了该方法对电力市场条件下的购电节点成本分析具有实际应用意义。

关键词: 电力市场; 购电成本分析; 节点费用守恒; 功率从属性追踪

Cost analysis of electric power purchase node based on power dependency trace

WANG Xiao-jun, BAO Hai

(School of Electric Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To analyze the cost of electric power purchase node, this paper presents an analysis method of electric power purchase node cost based on power dependency trace. This method establishes the power dependency trace model and gets each power source's share in loads based on the power dependency analysis. And this method adopts the flow conservation principle as economic variation criterion because of the transmission losses. The direct relationship between cost of purchase node and load node price involving power loss is clearly showed. At last, the computational result on power system of IEEE 3 generators and 9 nodes proves that the method presented in this paper is available in the practical applications.

Key words: power market; power purchase cost; node cost conservation; power dependency trace

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)09-0035-04

0 引言

购电成本分析是电网企业的重要决策手段, 对电力运营企业来说, 根据电网中的售电情况, 分析掌握各个购电节点的成本情况, 有利于提高管理水平, 适应市场经济的发展。目前对市场环境下的输电节点成本分析已经有多种^[1-8], 而对于购电成本分析, 主要集中在对电网整体的分析^[9,10], 没有涉及对每个购电节点成本盈亏的分析。本文的分析方法以与潮流分析结果一致的功率分布理论为基础, 以实用的潮流追踪模型得出负荷功率与电源发电功率的准确从属关系, 即, 负荷功率的电源从属性; 同时, 采用了各电源的费用守恒原则作为成本核算原则。最后, 本文根据潮流计算结果参数, 构建了电网节点购电成本的分析的实用模型, 通过算例证明该方法对实际电力系统具有应用价值。

1 电网络的功率从属性分布

1.1 电网络中功率的分解^[11]

设一电网络具有 n 个节点; q 个电流源, 电源节点编号从 1 开始, 依次到 q , 记为 I_{ks} ($k=1, \dots, q$); 其后的节点编号次序任意。

由节点电压法, 电网的节点电压导纳矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1q} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2q} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{q1} & y_{q2} & \cdots & y_{qq} & \cdots & y_{qn} \\ y_{(q+1)1} & y_{(q+1)2} & \cdots & y_{(q+1)q} & \cdots & y_{(q+1)n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nq} & \cdots & y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_q \\ U_{q+1} \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{1s} \\ I_{2s} \\ \vdots \\ I_{qs} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

简化为:

$$Y \cdot U = I_s \quad (1)$$

可以得出:

$$U_i = \sum_{m=1}^q z_{mi} I_{ms} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其中: z_{mi} 阻抗矩阵 $\mathbf{Z} = \mathbf{Y}^{-1}$ 中的元素。

根据公式(2)可以得出, 网络中第 $k(k < q)$ 个电源发出的功率为:

$$S_{ks} = U_k I_{ks}^* = \sum_{m=1}^q z_{mi} I_{ms} I_{ks}^* \quad (3)$$

定义含有 $I_{is} I_{ks}^*$ ($i, k < q$) 形式的功率成分为功率分量。

联络支路 $i-j$ 功率为:

$$S_{ij} = (U_i - U_j) I_{ij}^* = y_{ij}^* (U_i - U_j) (U_i - U_j)^* = y_{ij}^* \sum_{m=1}^q \sum_{l=1}^q (z_{mi} - z_{mj}) (z_{li} - z_{lj})^* I_{ms} I_{ls}^* \quad (4)$$

($i, j = 1, 2, \dots, n$)

节点 i 对地支路功率为:

$$S_i = U_i \cdot I_i^* = U_i \cdot (U_i / z_i)^* = y_i^* \sum_{m=1}^q \sum_{l=1}^q z_{mi} z_{li}^* I_{ms} I_{ls}^* \quad (5)$$

($i = 1, 2, \dots, n$)

其中: y_i 为节点 i 对地支路的等效对地导纳。

通过式 (3)、(4)和(5), 可以看出每个电源发出 q 个功率分量, 含有 q 个电源的网络包含 q^2 种功率分量。同时, 不难证明, 网络中的每个功率分量都满足功率守恒原理, 即, 对任意功率分量而言, 其在网络中的输入等于输出。

1.2 功率分量从属分析

由于恒流源的出口功率必然为该电源独立提供, 根据公式(3), 可以得出在联络支路功率和对地支路功率的 q^2 种分量中, 含有形如 $I_{is} I_{ks}^*$ ($i, k < q$) 为电源 k 发出的功率, 从而可以确定电网中支路功率的电源归属关系, 即: 在联络线支路 $i-j$ 中

$y_{ij}^* \sum_{m=1}^q (z_{mi} - z_{mj}) (z_{li} - z_{lj})^* I_{ms} I_{ls}^*$ 为电源 l 的贡献功

率, 对地支路 i 中 $y_i^* \sum_{m=1}^q z_{mi} z_{li}^* I_{ms} I_{ls}^*$ 为电源 l 的贡献功率。

2 节点购电成本的分析模型

2.1 功率从属性追踪模型

进一步分析上述功率归属的表达式, 联络线支路 $i-j$ 功率由电源 l 贡献的功率为:

$$S_{ij-l} = y_{ij}^* \sum_{m=1}^q (z_{mi} - z_{mj}) (z_{li} - z_{lj})^* I_{ms} I_{ls}^* = (U_i - U_j) (y_{ij} (z_{li} - z_{lj}) I_{ls})^* = (U_i - U_j) I_{ij-l}^* \quad (6)$$

其中: $I_{ij-l} = y_{ij} (z_{li} - z_{lj}) I_{ls}$, 分析其表达式, 不难得出, I_{ij-l} 为等效电流源 l 的电流 I_{ls} 在支路 $i-j$ 上的分布电流。

节点 i 对地支路功率由电源 l 贡献的功率为:

$$S_{Li-l} = y_i^* \sum_{m=1}^q z_{mi} z_{li}^* I_{ms} I_{ls}^* = U_i (y_i z_{li} I_{ls})^* = U_i I_{Li-l}^* \quad (7)$$

其中: $I_{Li-l} = y_i z_{li} I_{ls}$, 分析其表达式, 不难得出, I_{Li-l} 为等效电流源 l 的电流 I_{ls} 在节点 i 的对地支路中的分布电流。

综合公式(6)与公式(7)可知, 可以通过电流追踪的方法追踪负荷中的各电源的功率贡献, 即, 负荷功率中各电源的贡献功率按各电源在该负荷上的共轭电流分量的比例分摊。

由于电网的对地支路并非全部都是负荷支路, 同时还包含变压器支路和线路对地导纳支路等等。因此, 需要对负荷功率追踪模型进行进一步分析。

设网络中共有 p 条负荷支路, 则负荷支路电压可以表示为:

$$U_L = C_{p \times n} \cdot U_N \quad (8)$$

其中: U_N 为由公式(1)得出的节点电压, $C_{q \times p}$ 为关联矩阵中负荷支路所构成部分。

根据欧姆定律可得:

$$U_{Li} = z_{Li} \cdot I_{Li} \quad (9)$$

其中: U_{Li} 为负荷支路 i 两端的电压, z_{Li} 为断面潮流下负荷的等效阻抗, I_{Li} 为负荷支路 i 的电流。即可以表示为:

$$I_L = Y_{L \times p} \cdot U_L \quad (10)$$

其中: $Y_{Lij} = \begin{cases} 1/z_{Li} & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$

同时, 由于 \mathbf{Y} 为非奇异矩阵, 根据公式(1), 可以得到:

$$U_N = Y_{n \times n}^{-1} \cdot I_S \quad (11)$$

根据公式(8)、(10)和(11)可以得出:

$$I_L = Y_{L,p \times p} \cdot C_{p \times n} \cdot Y_{n \times n}^{-1} \cdot I_S$$

定义矩阵 $H_{p \times n} = Y_{L,p \times p} \cdot C_{p \times n} \cdot Y_{n \times n}^{-1}$, 有

$$I_L = H_{p \times n} \cdot I_S \quad (12)$$

显然, H 是电源电流与负荷电流的分配系数矩阵。

依据上述结论: 负荷功率各电源的贡献功率按各电源在该符合上的共轭电流分量的比例分摊, 可以得出在负荷支路 i 中电源 l 提供的功率为:

$$S_{Li_l} = U_{Li} \cdot H_{il}^* \cdot I_{ls}^* \quad (13)$$

其中: H_{il} 为 $H_{p \times n}$ 的元素, I_{ls} 为 I_S 中的元素。

2.2 基于费用流守恒的节点成本分析方法模型

费用流守恒原则:

1) 注入输电网任一节点的费用流总和等于流出该节点的费用流总和。该假设体现了收支平衡的原则。

2) 任一输电元件上的费用流值保持恒定。因此, 输电元件的送端功率传输到受端时, 由于功率在输电元件中传输时有耗, 输电元件受端的单位电力成本将有所提高, 体现了对网损的计价。

3) 同一节点的供电成本相等。这符合市场公平的原则。

根据上述 3 条, 从单个电源的角度来考虑就是: 电力运营企业对该电源的购电成本等于该电源在电网各负荷中贡献的功率的售电成本总和。

设各负荷节点的售电价格为 ρ_i ($i=1,2,\dots,p$), 则对电源 l 根据费用流守恒原则有:

$$C_l \cdot S_{ls} = \sum_{m=1}^p \rho_m \cdot (U_{Lm} \cdot H_{ml}^* \cdot I_{ls}^*)$$

其中: C_l 为电源 l 的购电成本, 从而可得:

$$C_l = (\sum_{m=1}^p \rho_m \cdot (U_{Lm} \cdot H_{ml}^* \cdot I_{ls}^*)) / S_{ls} \quad (14)$$

整体电网购电节点成本为

$$C_{q \times 1} = N_{q \times p} \cdot \rho_{p \times 1} \quad (15)$$

其中: $N_{q \times p}$ 中的元素 $N_{ij} = (U_{Lj} \cdot H_{ji}^* \cdot I_{is}^*) / S_{ls}$ 。

3 算例分析

本文以 IEEE 3 机 9 节点系统为算例, 如图 1 所示。断面潮流计算结果得出的节点 i 到节点 j 注入功率 S_{Lij} ($i < j$ 为正方向) 同时标记于图上。同时, 设负荷节点 5、6 和 8 的售电电价分别为 ρ_1 、 ρ_2 和

ρ_3 。

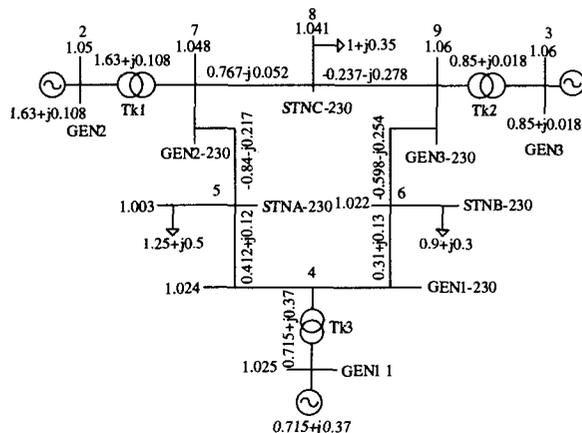


图 1 IEEE3 机 9 节点系统

Fig. 1 Three-generator and nine-bus system

根据电网络有关知识, 可以得到关联矩阵 C :

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

同时, 将该断面下的负荷等效成阻抗可得:

$$Y_L = \begin{bmatrix} 1.2425 - j0.4970 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8617 - j0.2872 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9228 - j0.3230 \end{bmatrix}$$

则, 根据 $H = Y_{L,p \times p} \cdot C_{p \times q} \cdot Y_{n \times n}^{-1}$ 可得:

$$H = \begin{bmatrix} 0.399 - j0.187 & 0.386 - j0.208 & 0.378 - j0.230 \\ 0.284 - j0.107 & 0.268 - j0.140 & 0.283 - j0.119 \\ 0.283 - j0.156 & 0.320 - j0.111 & 0.321 - j0.117 \end{bmatrix}$$

根据公式(13), 可以得到各电源功率在负荷上的功率分量分布如表 1:

表 1 各个负荷上的功率分量分布

Tab.1 Power decomposition of load

负荷节点	GEN1	GEN2	GEN3	SUM
5	0.282+j0.125	0.644+j0.228j	0.324+j0.147	1.250+j0.500
6	0.204+j0.073	0.455+j0.156	0.242+ j0.070	0.900+j0.300
8	0.199 +j0.125	0.530+ j0.140	0.272+j0.086	1.000+j0.350

根据公式(15), 可以得出 GEN1、GEN2 和 GEN3 的购电成本为:

$$\begin{bmatrix} C_{GEN1} \\ C_{GEN2} \\ C_{GEN3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.394 & 0.285 & 0.278 \\ 0.395 & 0.279 & 0.325 \\ 0.381 & 0.285 & 0.320 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \end{bmatrix}$$

4 结论

1) 将发电机等效成电流源, 分析了电源出口功

率、线路功率和负荷功率中功率分量的组成成分,同时结合功率的表达式,得出了负荷功率的电源从属性。

2) 在分析电网功率从属性分布的基础上,构建了电网络功率从属性追踪模型,以费用流守恒为原则,直接得出了购电节点购电成本与负荷节点售电电力成本的解析表达式。

3) 通过算例分析,证明了该方法在电力市场下的购电节点成本分析中具有实际应用意义。

参考文献

- [1] 刘洪波, 穆钢, 刘明, 等. 电力市场下基于会计学原理的输电费计算方法比较[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(11): 11-14.
LIU Hong-bo, MU Gang, LIU Ming, et al. Comparison of Accounting Theory-based Methods for Transmission Payment Calculation in Electric Power Market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(11): 11-14.
- [2] 段刚, 王心丰, 白玮, 等. 输电服务定价的资金流——资金路径法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 48-53.
DUAN Gang, WANG Xin-feng, BAI Wei, et al. Monetary Flows—Monetary Paths Method for Electricity Transmission Pricing[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 48-53.
- [3] 谢开, 刘广一, 于尔铿, 等. 电力市场中的输电服务(四)—输电费用分配方法[J]. 电网技术, 1997, 21(7): 66-68.
XIE Kai, LIU Guang-yi, YU Er-keng, et al. Transmission Services in Electricity Market(4)—Allocation of Transmission Charges[J]. Power System Technology, 1997, 21(7):66-68.
- [4] 彭建春, 刘卫华, 陈景怀, 等. 面向全电网用户的输电费用分配模式与仿真研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(22): 13-15.
PENG Jian-chun, LIU Wei-hua, CHEN Jing-huai, et al. Modes and Simulations of User-oriented Transmission Cost Allocation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(22): 13-15.
- [5] 言茂松, 辛洁晴. 在电力市场环境网嵌入的边际成本输电定价新方法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(2):111-116.
YAN Mao-song, XIN Jie-qing. Grid Embedded Marginal-cost Transmission Pricing(GEMP) in Power Market[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(2):111-116.
- [6] Mutale J, Strbac G, Curcic S, et al. Allocation of Losses in Distribution Systems with Embedded Generation[J]. IEE Proc-Gener, Transm & Distrib, 2000, 147(1): 7-14.
- [7] Galiana F D, Conejo J A, Kockar I. Incremental Transmission Loss Allocation Under Pool Dispatch[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(1):26-33.
- [8] 穆钢, 王华伟, 韩学山. 基于费用流法的输电网节点电力成本分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 36-40.
MU Gang, WANG Hua-wei, HAN Xue-shan. Determining Bus Electric Cost of Transmission System by the Cost Flow Method[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 36-40.
- [9] 蔡文琴, 张思蓉. 电网企业购电成本模型研究[J]. 华中电力, 2007, 20:37-41.
CAI Wen-qin, ZHANG Si-rong. The Model Research of Electric Power Purchase Cost in Power Grid Enterprises[J]. Central China Electric Power, 2007, 20:37-41.
- [10] 张思蓉, 蔡文琴. 电网企业优化购电成本方法研究与实证分析[J]. 电力技术经济, 2006, 18(5):21-27.
ZHANG Si-rong, CAI Wen-qin. Study on Power Purchase Cost Optimization for Power Utilities and Illustration[J]. Electric Power Technologic Economics, 2006, 18(5):21-27.
- [11] 鲍海, 马千. 电网线损的物理分布机理[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 82-86.
BAO Hai, MA Qian. Physical Distribution Mechanism of Network Loss for Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 82-86.

收稿日期: 2007-11-07

作者简介:

王小君(1978-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail:ericwxj@myia.sina.com

鲍海(1968-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制。

(上接第 28 页 continued from page 28)

收稿日期: 2007-09-17; 修回日期: 2007-11-16

作者简介:

党克(1960-), 男, 研究员, 从事计算机技术在电

力系统中的应用、电气设备状态监测研究工作;

王丹华(1982-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统无功优化。E-mail:w-danhua@126.com