

# 基于潮流跟踪的电力市场电价研究

侯云鹤, 熊信良, 吴耀武

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 我国现在正处在电力市场开放的前夕, 厂网分开, 竞价上网。如何公正、合理地确定电价是电力市场的一个核心问题。文中使用矩阵法进行系统潮流跟踪, 确定用户对系统网络资源、发电资源的占用, 以及应分摊的网损, 依此为基础提出一种电力市场定价方式, 真正体现根据资源占用比例计算费用的原则, 同时还讨论了无功电价的计算方法。一个 22 节点的算例计算显示, 该方法是可行的。

**关键词:** 电力市场; 潮流跟踪; 有功电价; 无功电价

**中图分类号:** TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)09-0020-03

## 1 概述

随着电力市场化运营机制的建立, 产生了电能交易和电网公司之间的电能转运, 为了给各级用户和电能转运用户制定合理的过网费用, 需要更加详细地根据各用户不同的电压等级、不同的位置来更加公平、合理地分摊过网费。特别地, 在现今的技术条件下, 潮流控制设备还相对昂贵, 不可能在大范围内实现用户和发电商对传输路径的自由选择, 因此, 用潮流跟踪的方法跟踪物理潮流, 确定用户对网络资源的占用, 跟踪负荷功率在发电机中的分配状况, 确定用户对发电资源的占用, 依此为依据来确定过网费和发电费就显得更有现实意义。

传统的灵敏度分析方法只可反映发电或负荷的波动对线路潮流的影响, 不能达到潮流跟踪的要求。为了解决这一问题, 各国学者展开了大量研究, 提出了直观方法, 网络矩阵法<sup>[1,2]</sup>, 加权信号流图法<sup>[3]</sup>、线性叠加法<sup>[4]</sup>、基于图论的方法<sup>[5]</sup>。这些方法, 在一定程度上都能满足潮流跟踪的要求。

本文采用网络矩阵法跟踪从发电机节点到负荷节点的潮流和网损, 并依此提出一种电力市场定价方式, 真正体现根据资源占用比例计算费用的原则, 同时还讨论了无功电价的计算方法。通过对一个包括 22 条母线, 27 条线路, 5 个发电节点, 9 个负荷节点系统的计算表明, 该算法是可行的。

## 2 潮流跟踪的基本原理

要实现潮流跟踪, 首先建立以下两个概念<sup>[6]</sup>——传送及传送分布系数。

**传送:** 节点  $i$  到节点  $j$  的一项传送  $D_{ij}$ , 是节点  $i$  的注入功率中经电网送至节点  $j$  的那一部分电力, 或者等价于节点  $j$  的输入功率中来自节点  $i$  的那一

部分功率。

传送不同于注入和潮流, 它指明了节点注入和输出功率的去向和来源。

**传送分布系数:** 传送  $D_{ij}$  在线路  $b$  上的分布系数  $T_{ijb}$ , 是保持其它节点的功率不变而在节点  $i$  上多注入单位功率、同时在节点  $j$  多输出单位功率的情况下, 线路  $b$  上传输容量的变化量。

在满足叠加性的假设下,  $T_{ijb}$  可按节点  $i, j$  上发电转移分布系数之差计算, 它取决于电网的拓扑结构。

在以上定义假设下, 进一步假设网络节点都是理想输入潮流的“源”或“汇”, 因而能够判定特定的流入电力由哪条输出线流出, 将该原则扩展到网络中的所有节点, 我们得到以下原则:

**正比分配原则:** 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。

正比分配原则指出潮流在支路中的分配方式, 是进行潮流跟踪的理论基础。

## 3 跟踪有功负荷在发电机中的分配

根据正比分配原则, 我们得到以下有功潮流跟踪矩阵方法。

设系统由  $n$  个节点和  $m$  条支路组成,  $p_i$  为节点  $i$  的输入潮流总和, 仅考虑节点  $i$  的输入潮流, 该节点的输入潮流平衡等式可写为:

$$P_i = \sum_j |P_{ij}| + P_{ci} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中,  $i$  为所有与节点  $i$  相连, 并向其输入潮流的节点集;  $P_{ij}$  为线路  $j-i$  上输入  $i$  节点的潮流;  $P_{ci}$  为节点  $i$  的注入功率。

考虑到网损大大小于线路潮流, 可以假设:

$$|P_{ij}| = |P_{ji}| \quad (2)$$

则(1)式可写为:

$$P_i = \sum_j [ (|P_{ji}| / P_j) \times P_j ] + P_{ci} \quad (3)$$

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

整理后,可得:

$$P_i - \sum_j [ (|P_{ji}| / P_j) \times P_j ] = P_{ci} \quad (4)$$

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

写成矩阵形式为:

$$AP = P_{ci} \quad (5)$$

A 为  $(n \times n)$  矩阵, P 为各节点输入潮流向量,

$A(i, j)$  定义为:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j; \\ - |P_{ji}| / P_j, & j \neq i \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

当 A 可逆时:

$$P = A^{-1} P_{ci} \quad (7)$$

展开第  $i$  行,有:

$$P_i = \sum_{k=1}^n [ A^{-1} ]_{ik} P_{ck} \quad (8)$$

(8)式表明:节点的输入潮流可用发电节点的注入功率表示。由于节点的输入潮流与输出潮流相等,根据正比分配原则,设节点  $i$  的负荷为  $P_{Li}$ ,有:

$$P_{Li} = \frac{P_{Li}}{P_i} P_i = \frac{P_{Li}}{P_i} \sum_{k=1}^n [ A^{-1} ]_{ik} P_{ck} \quad (9)$$

通过(9)式可以得出各台发电机发出的有功在各负荷中所占的比例。

#### 4 线路潮流及网损的分摊

与上一节方法类似,可得到以下公式:

$$P_i = \sum_j |P_{ij}| + P_{Li} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中,  $i$  是与节点  $i$  相连并接受输出潮流的节点集合;  $P_{Li}$  为节点  $i$  的负荷;  $P_i$  为节点  $i$  输出潮流。

移项可得:

$$P = A^{-1} P_L$$

其中 A 定义为:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j; \\ - |P_{ji}| / P_j, & j \neq i \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (12)$$

展开第  $i$  行,有:

$$P_i = \sum_{k=1}^n [ A^{-1} ]_{ik} P_{Lk} \quad (13)$$

(13)式表明:节点输出的潮流可用负荷节点的有功负荷表示。由于节点的输入潮流与输出潮流相等,根据正比分配原则,设支路  $i-j$  的潮流为  $P_{ij}$ ,有:

$$P_{ij} = \frac{P_{ij}}{P_i} P_i = \frac{P_{ij}}{P_i} \sum_{k=1}^n [ A^{-1} ]_{ik} P_{Lk} \quad (14)$$

通过(14)式可以得出各负荷在支路潮流中分摊的份额。

由于假设系统满足叠加定理,故网损按相同比例分摊。

$$FLOSS_{ijLk} = FLOSS_{ij} \cdot P_{ijLk} / P_{ij} \quad (15)$$

式中,  $FLOSS_{ijLk}$  为  $K$  负荷应分摊线路  $i-j$  上的网损份额;  $FLOSS_{ij}$  为线路  $i-j$  的网损;  $P_{ijLk}$  为负荷  $K$  在支路  $i-j$  潮流中分摊的份额;  $P_{ij}$  为支路  $i-j$  上的潮流。

这样,就实现了线路潮流、网损的分摊。

#### 5 基于潮流跟踪的电价确定方式

基于以上潮流跟踪结果,按照用户对系统资源的占用,并考虑电网及电厂适当利润的前提下,确定电价。

##### 5.1 有功电价

###### 5.1.1 发电公司部分

设系统中有  $n$  个电厂,第  $i$  电厂在时间段  $t$  内,出力为  $P_i$ ,发电运行费为  $C_i$ ,投资等额值为  $A_i$ ,第  $j$  用户分摊  $i$  电厂电力为  $P_{ij}$ ,则用户  $j$  缴纳电费中电厂  $i$  应得  $F_{ij}$  为:

$$F_{ij} = C_i P_{ij} t + A_i P_{ij} / P_i \quad (16)$$

用户  $j$  总共应缴纳电厂费用  $F_j$  为

$$F_j = \sum_{i=1}^n ( C_i P_{ij} t + A_i P_{ij} / P_i ) \quad (17)$$

###### 5.1.2 过网费部分

设系统中有  $m$  条线路,时间段  $t$  内,用户  $j$  在第  $i$  条线路上传输容量为  $PL_{ij}$ ,投资等额值为  $AL_i$ ,线路  $i$  运行维护费用为  $CL_i$ (包括系统检修、维护、以及维持电能质量所加附加设备等的费用),总通过容量为  $CAP_i$ ,则用户  $j$  应交纳给电网公司的费用为  $FL_j$ :

$$FL_j = \sum_{i=1}^m ( CL_i PL_{ij} t + AL_i PL_{ij} / CAP_i ) \quad (18)$$

###### 5.1.3 网损部分

网损是由发电厂发出的电能在电网公司运输中损失掉的部分,由于网损部分是由网络不合理引起的,部分因为是系统安全必不可少的,因此不能简单按照常规运输公司赔偿运输损失的方法执行,应将用户缴纳的费用中网损部分按一定比例分配给网络公司和发电公司。这样,一方面督促网络公司减小不必要的网损,另一方面可以给网络公司维持系统安全的努力给予适当补偿。这个比例按系统实际状况确定。同时,网络公司还应考虑维持系统安全各种备用容量的经济补偿问题,将这部分费用计入

(18)式中,向用户收取,并返还一定比例给电厂。

## 5.2 无功电价

电力市场条件下无功管理和定价对电网的运行、管理及安全都具有重要的意义。无功服务具有以下特点<sup>[7]</sup>:(1)供应的地域性;(2)控制的分散性;(3)手段的多样性:与有功只能由发电机提供不同,无功除发电机外,还可由调相机、静止无功补偿器、电力电容甚至是输电线路提供;(4)分析的复杂性:无功运行费用很小但投资较大。

由于无功服务具有上述特点,并考虑到我国电力市场初期,各项管理上欠规范,定价宜采用相对简单,切实可行的措施。

可按以下方针对所有供应者和消费者明确其无功责任。当无功发电、负荷在允许范围内,无需对无功生产和消费付费,但违反标准时,应有相应的惩罚。考虑到系统运行人员关注的重点是电压,而电压与无功直接相关,可采用考察电压水平的方法。即用下式计算无功电价:

$$F_{Qi} = K_1 U[V - V_{sup}] + K_2 U[-(V - V_{sub})] \quad (19)$$

式中: $F_{Qi}$ 是第*i*电厂或用户应交纳的无功费用; $k_1, k_2$ 是电压越上、下限罚系数; $V$ 是节点电压; $V_{sup}, V_{sub}$ 是电压上、下限; $U[x]$ 定义为:

$$U[x] = \begin{cases} x & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (20)$$

## 6 算例

根据本文2、3、4节讨论的方法,对一个包括22条母线,27条线路,5个发电节点,9个负荷节点系统进行了潮流跟踪,原始参数见文献<sup>[8]</sup>。其中6,8,9,16,18,19,20,21,22为负荷节点,1,2,3,4,5为发电机节点。计算表明这种算法使线路潮流、网损及发电机发电量实现了按使用分摊的原则。如:5号发电机发出的电力都供给18号负荷,表1应证了这一直观结果,同时线路16-18潮流从16号注入,18号流出,只带有18号一个负荷,因此线路上的潮流及网损都由18号负荷承担,支路潮流及有功网损追踪显示了这个结果。由于篇幅有限,支路潮流及有功网损追踪结果略去。

在潮流跟踪基础上进行电价计算只是一个按(16)~(20)式进行简单代数计算的问题,本文将不再讨论。

表1 负荷节点潮流追踪结果

	1	2	3	4	5
6	0.002926	0.007074	0.000000	0.000000	0.000000
8	2.717937	0.152063	0.000000	0.000000	0.000000
9	1.100231	2.659770	0.000000	0.000000	0.000000
16	1.198129	2.536098	0.652290	0.613484	0.000000
18	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	4.300000
19	0.029743	0.071904	0.000000	0.762353	0.000000
20	0.146599	0.085332	0.487069	0.000000	0.000000
21	0.103339	0.074836	0.316756	0.205069	0.000000
22	0.461817	0.268813	1.534370	0.000000	0.000000

## 7 结论

本文将矩阵法用于潮流跟踪,同时建立了基于潮流跟踪的电力市场有功电价、无功电价的计算方法,考虑我国当前的具体情况,这种方法简便易行、可操作性强,算例表明:本文提出的方法是可行的。

## 参考文献:

- [1] 周永兴,等. 输电网固定成本的分摊原理. 中国电力, 1999,32(8).
- [2] 瞿昭,等. 发电成本及网损分摊的潮流追踪方法. 上海大学学报(自然科学版),1999,5(12).
- [3] 孙洪波,等. 网损分摊决策研究. 电力系统自动化, 1999,23(1).
- [4] 乔振宇,等. 功率分解潮流计算方法. 99年全国高校电力系统自动化专业学术年会论文集.
- [5] 魏萍,等. 基于图论的输电线路功率组成和发电机与负荷间功率输送关系的快速分解. 中国电机工程学报, 2000,20,(6).
- [6] 辛洁晴,等. 电力市场环境下合理回报输电容量投资的方法. 电网技术,2000,24(2).
- [7] 于尔铿,等. 电力市场. 北京:中国电力出版社,1999.
- [8] 陈亚民. 电力系统计算程序及实现. 北京:中国电力出版社,1998.

收稿日期: 2001-03-12

作者简介: 侯云鹤(1975-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统规划,电力市场; 熊信良(1945-),男,教授,从事电力系统自动化研究和教学工作,研究方向为电力系统运行分析,电力系统规划及电力系统谐波分析; 吴耀武(1963-),男,副教授,从事电力系统自动化研究和教学工作,研究方向为电力系统运行分析,电力系统规划及电力系统谐波分析。

(下转第29页)

$$y = Q(P) - (1 - u_G^2) / X_d$$

做适当修正,以保证正确限制进相而不失步。

图3所示为P/Q限制功能框图,Q<sub>REL</sub>为无功功率实测值,P<sub>REL</sub>为有功功率实测值,根据有功实测值决定的无功参考值经电压平移后与无功值进行综合后做为限制器的输出OUT<sub>Q\_LIM</sub>。正常时限器输出值为负不起作用,当进相至限制值时,限制器输出值经过最大值比较器替代AVR工作,以使无功动态地维持在限制值闭环运行。

## 5 其它保护功能

除了上述限制及保护功能外,励磁系统还应设有软起励、PT断线、误强励、误强减等监视与保护功能,以保证发电机的可靠运行。

软起励功能主要是限制起励时的超调量,可以通过闭锁积分的办法来实现,也可以通过在起励过程中,动态地改变给定值的办法来完成。

PT断线保护功能一般通过比较仪用PT与励磁PT的测量值的办法来实现,当其差值超过一定值时,判为PT断线,当励磁PT断线时,AVR运行方式自动变为励磁电流闭环调节方式,当仪用PT断线时,发出报警信号。

误强励、误强减监视保护功能通过监视励磁电

流与机端电压的变化关系来实现,当励磁电流已大于上限设定值(如120% $I_{en}$ )时,如机端电压仍增长一个值时,则判断为误强励。反之,当励磁电流已小于下限设定值(如20% $I_{en}$ )时,如机端电压仍下降一个值时,则判断为误强减。当发生误强励、误强减时,自动切换励磁运行通道,并发出故障报警信号。

## 6 结论

按照上述设计原理并利用C语言编制的功能模块已成功应用于DWLZ系列微机励磁系统中,经长期的实践证明,本设计是稳定可靠的。

### 参考文献:

- [1] Yang Yanjie etc. A Digital Excitation Control System for Synchronous Machines. CICEM '99, Xian.
- [2] 张文玲. 新型双通道同步发电机微机励磁装置的研究[学位论文]. 天津:河北工业大学,2000.
- [3] 樊俊,陈忠,涂光瑜. 同步发电机半导体励磁原理及应用(第二版). 北京:水利电力出版社,1991.

收稿日期: 2001-02-21

作者简介: 杨彦杰(1966-),男,博士生,高级工程师,主要研究方向为智能电器与机电一体化。

## Design and realize of protection function for generator excitation in power system

YANG Yan-jie, LU Jian-guo, YANG Xu-dong, AN Dong

(Electrical Equipment Factory, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

**Abstract:** In this paper, a discussion of the protection and limit functions necessary for excitation system is given, and the methods to realize them in digital excitation equipment are described.

**Keywords:** generator; excitation; protection

(上接第22页)

## A pricing mechanism of the electricity market based on power flow tracing

HOU Yur-he, XIONG Xir-gen, WU Yao-wu

(Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The power industry of China is going to establish a market based operational mechanism which makes a feature of separation of generation and transmission management, competition before supplying and open access. In electricity market the pricing mechanism is an important issue. Based on the power flow tracing, a pricing mechanism of reactive and active power is presented in this paper, which concerns the interest of all sides. Satisfactory results are obtained using a 22-bus system.

**Keywords:** electricity market; power flow tracing; active power price; reactive power price