

计及无功成本的实时电价模型^①

A Spot Price Model with Var Cost

常宝波

Chang Baobo

孙洪波

Sun Hongbo

(重庆大学电气工程系, 重庆, 400044, 第一作者 25岁, 男, 硕士生)

摘要 将无功成本应用到实时电价理论中, 应用增广拉格朗日乘法推导实时有功和无功电价的精确模型, 并就其乘子的物理意义进行了解释。文中通过算例验证了所提模型的有效性。

关键词 电力系统运行 / 无功成本; 无功边际成本; 实时电价; 电力市场

中国图书资料分类法分类号 TM73; F045.32

ABSTRACT This paper has applied the var cost to the theory of spot price. An augmented Lagrange method is employed to develop the exact model of spot price of active power and reactive power, and the physical means of Lagrange multipliers are explained. The numerical examples are given to demonstrate the validity of the proposed model.

KEYWORDS electric power system operation / var cost; var marginal cost; spot price; electrical power market

0 引 言

随着电力市场的日臻完善与发展, 电力价格研究越来越受到人们的关注。特别是实时电价 (spot price) 日益成为各国电力工作者研究电价问题的基础与焦点, 许多国家已经或正在考虑实行实时电价。实时电价是以电力市场的瞬时供需平衡为依据, 满足电力系统的安全运行, 应用短期边际成本而提出的一种价格理论。Schweppe 等人对实时有功电价的理论及基于电力市场下的实时有功电价的实现问题进行了广泛而深入的研究^[1]。但对实时无功电价问题关注甚少, 而无功与有功对电力系统的安全经济运行的影响具有同等重要地位。在开放的电力系统中, 为了更有效的对负荷进行管理必须制定包括无功补偿成本、网损成本、满足线路安全约束成本等所有成本的价格体系。因此, 对实时无功电价和建立无功市场机制的研究是一个亟待解决的重大问题。目前, 无功电价问题已开始引起人们的关注^[2~4]。Baughman、Siddiqi^[2]用修正目标的最优潮流来求解各节点实时有功和无功电价, 但无功电价的模型较粗糙, 其目标函数只计及了有功成本, 且表达式缺乏网损的影响, 因此不可能达到总体社会成本最小。文献[3]引用文献[2]无功电价的表达式求得各无功补偿点的实时无功电价的变化部分, 再考虑无功补偿装置的投资从而求得各无功补偿点的总的实时电价。在文献[4]中, 作

* 收文日期 1996-10-22

者第一次提出了发电无功成本的概念,并将其作为安全约束最优潮流的目标函数,分析各区域的注入无功电价,无功边际成本和无功补偿情况。

要想建立合理的无功电价必须准确地分析无功成本。由于无功的特殊性,无功成本应包括单个发电机、调相机、无功补偿装置、输电线路等发出的无功以及转送无功成本。本文把无功成本引进实时电价的原始模型中,推出各注入节点和负荷节点的实时有功和无功电价模型。为了利用本文的模型计算实时电价,对无功成本用线性函数或二次函数来表示。文中通过了 6 节点系统算例,说明了所提模型的可行性和有效性。

1 实时电价的基本理论简介^[1]

实时电价是以边际成本为理论基础,以整体社会成本最小为目标函数,且兼顾个体经济利益的优化行为,应用增广 Lagrange 法,求得各个用户的优化实时小时电价。其数学描述为:

$$\rho_K(t) = \lambda(t) + \gamma_{QS}(t) + \gamma_R(t) + \eta_{L,K}(t) + \eta_{QS,K}(t) + \eta_{M,K}(t) + \eta_{R,K}(t) \quad (1)$$

且不考虑收支调节部分的实时电价为:

$$\tilde{\rho}_K(t) = \lambda(t) + \gamma_{QS}(t) + \eta_{L,K}(t) + \eta_{QS,K}(t) + \eta_{M,K}(t) \quad (2)$$

式中, $\rho_K(t)$ 为第 K 个用户的实时电价; $\lambda(t)$ 为系统微增率; $\gamma_{QS}(t)$ 为发电供电质量费用; $\gamma_R(t)$ 为发电收支调节费用; $\eta_{L,K}(t)$ 为网络边际损耗费用; $\eta_{QS,K}(t)$ 为网络供电质量费用; $\eta_{M,K}(t)$ 为网络收支调节费用; $\eta_{R,K}(t)$ 为网络维护费用。

又有

$$\lambda(t) = \frac{\partial G_{FM,S}[g_S(t)]}{\partial g_S(t)}$$

$$\gamma_{QS}(t) = \frac{\partial G_{QS}[g(t)]}{\partial g(t)} + \mu_{QS,r}(t)$$

$$\eta_{L,K}(t) = [\lambda(t) + \gamma_{QS}(t)] \frac{\partial L[z(t)]}{\partial d_K(t)} = [\lambda(t) + \gamma_{QS}(t)] \sum_i \frac{\partial L_i[z_i(t)]}{\partial z_i(t)} \frac{\partial z_i(t)}{\partial d_K(t)}$$

$$\eta_{M,K}(t) = \frac{\partial N_M[z(t)]}{\partial d_K(t)} = \sum_i \frac{\partial N_{M,i}[z_i(t)]}{\partial z_i(t)} \frac{\partial z_i(t)}{\partial d_K(t)}$$

$$\eta_{QS,K}(t) = \frac{\partial}{\partial d_K(t)} [N_{QS}[z(t)] \sum_i \mu_{QS,r,i}(t) z_i(t)] = \sum_i \left[\frac{\partial N_{QS,i}[z_i(t)]}{\partial z_i(t)} + \mu_{QS,r,i}(t) \right] \frac{\partial z_i(t)}{\partial d_K(t)}$$

式中 $G_{FM,S}[g_S(t)]$ 为平衡机总的燃料和维护成本;
 $g(t) = \sum_j g_j(t)$ 为在小时 t 内总的发电机实际出力;
 $g_j(t)$ 为在小时 t 内第 j 个发电机的实际出力;
 $G_{QS}[g(t)]$ 为发电供电质量成本;
 $L[z(t)]$ 为系统有功网损;
 $N_{M,i}[z_i(t)]$ 为第 i 条支路的维护成本;
 $N_{QS,i}[z_i(t)]$ 为第 i 条支路的供电质量成本;
 $\mu_{QS,r}(t)$ 为满足总的出力约束的乘子;
 $z(t)$ 为支路潮流向量;

$d_k(t)$ 为第 K 个用户在小时 t 内的负荷需求;

$z_i(t)$ 为第 i 条支路潮流;

$\mu_{qs,v,i}(t)$ 为第 i 条支路安全约束乘子。

在上述实时电价的基本理论中,仅考虑了有功潮流及有功实时电价,没有计及无功成本及无功影响,为了达到对无功负荷进行管理的目的,本文把无功成本及无功潮流列到了实时电价的基本模型中,推出各节点的实时有功及无功电价模型,且各运行变量为向量形式。本文所述内容均不考虑实时电价的收支调节部分。

2 计及无功成本的实时电价模型

实时电价模型的增广目标函数为

$$\Omega(t) = G[g(t)] + N[z(t)] - B[d(t)] - \mu_s(t)H(t) \quad (3)$$

式中 $G[g(t)]$ 为与发电机有关的运行成本和出力约束;

$N[z(t)]$ 为与网络有关的成本和系统的安全约束;

$B[d(t)]$ 为所有用户总的与用电有关的净收入且 $B[d(t)] = \sum_k B_k[d_k(t)]$;

$H(t)$ 为功率平衡方程向量;

$\mu_s(t)$ 为等式约束乘子向量;

$g(t)$ 为发电机注入功率向量;

$d(t)$ 为负荷功率向量。

式(3)最优解的必要条件为:

$$\frac{\partial \Omega(t)}{\partial g_j(t)} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Omega(t)}{\partial d_k(t)} = 0 \quad (5)$$

由(4),(5)两式可得

$$\frac{\partial G[g(t)]}{\partial g_j(t)} + \frac{\partial N[z(t)]}{\partial g_j(t)} - \left[\mu_s(t) \frac{\partial H(t)}{\partial g_j(t)} \right]^T = 0 \quad (6)$$

$$- \frac{\partial B[d(t)]}{\partial d_k(t)} + \frac{\partial N[z(t)]}{\partial d_k(t)} - \left[\mu_s(t) \frac{\partial H(t)}{\partial d_k(t)} \right]^T = 0 \quad (7)$$

根据实时电价定义和(6),(7)两式可得

$$\rho_j(t) = \frac{\partial G[g(t)]}{\partial g_j(t)} = \left[\mu_s(t) \frac{\partial H(t)}{\partial g_j(t)} \right]^T - \frac{\partial N[z(t)]}{\partial g_j(t)} \quad (8)$$

$$\rho_k(t) = \frac{\partial B[d(t)]}{\partial d_k(t)} = - \left[\mu_s(t) \frac{\partial H(t)}{\partial d_k(t)} \right]^T + \frac{\partial N[z(t)]}{\partial d_k(t)} \quad (9)$$

式中 $\rho_k(t) = [\rho_{pk}(t) \quad \rho_{qk}(t)]^T$, $\rho_{pk}(t)$, $\rho_{qk}(t)$ 分别为负荷节点的实时有功电价和无功电价;

$\rho_j(t) = [\rho_{pj}(t) \quad \rho_{qj}(t)]^T$, $\rho_{pj}(t)$, $\rho_{qj}(t)$ 分别为发电机节点的实时有功电价和无功电价;

$g_i(t) = [Pg_i(t) \quad Qg_i(t)]^T$, $Pg_i(t)$, $Qg_i(t)$ 为有功, 无功注入功率;
 $d_k(t) = [Pd_k(t) \quad Qd_k(t)]^T$, $Pd_k(t)$, $Qd_k(t)$ 为负荷有功, 无功功率;
 $H(t) = [Pg(t) - Pd(t) - P_{\text{loss}}(t) \quad Qg(t) - Qd(t) - Q_{\text{loss}}(t)]^T$, $P_{\text{loss}}(t)$, $Q_{\text{loss}}(t)$ 为有功, 无功网损。

$\mu_s(t) = [\mu_{rs}(t) \quad \mu_{qs}(t)]$, $\mu_{rs}(t)$, $\mu_{qs}(t)$ 为有功、无功功率平衡方程的乘子。

将(8)、(9)两式展开, 可得有功、无功电价模型

$$\rho_{r_i}(t) = \mu_{rs}(t) \left[1 - \frac{\partial P_{\text{loss}}(t)}{\partial Pg_i(t)} \right] - \mu_{qs}(t) \frac{\partial Q_{\text{loss}}(t)}{\partial Pg_i(t)} - \frac{\partial N[z(t)]}{\partial Pg_i(t)} \quad (10)$$

$$\rho_{q_i}(t) = \mu_{qs}(t) \left[1 - \frac{\partial Q_{\text{loss}}(t)}{\partial Qg_i(t)} \right] - \mu_{rs}(t) \frac{\partial P_{\text{loss}}(t)}{\partial Qg_i(t)} - \frac{\partial N[z(t)]}{\partial Qg_i(t)} \quad (11)$$

$$\rho_{r_k}(t) = \mu_{rs}(t) \left[1 - \frac{\partial P_{\text{loss}}(t)}{\partial Pd_k(t)} \right] - \mu_{qs}(t) \frac{\partial Q_{\text{loss}}(t)}{\partial Pd_k(t)} - \frac{\partial N[z(t)]}{\partial Pd_k(t)} \quad (12)$$

$$\rho_{q_k}(t) = \mu_{qs}(t) \left[1 - \frac{\partial Q_{\text{loss}}(t)}{\partial Qd_k(t)} \right] - \mu_{rs}(t) \frac{\partial P_{\text{loss}}(t)}{\partial Qd_k(t)} - \frac{\partial N[z(t)]}{\partial Qd_k(t)} \quad (13)$$

从推导结果可看出由于计及无功成本, 实时有功电价增加了无功影响部分, 实时有功电价和无功电价具有完全对偶的关系。

3 实时电价模型乘子的物理意义

现对 $\mu_s(t)$ 乘子的物理意义作以下讨论:

设平衡节点为 S , 由平衡节点的性质可知:

$$\frac{\partial [z(t)]}{\partial g_s(t)} = 0, \quad \frac{\partial N[z(t)]}{\partial g_s(t)} = 0, \quad \frac{\partial P_{\text{loss}}(t)}{\partial g_s(t)} = 0, \quad \frac{\partial Q_{\text{loss}}(t)}{\partial g_s(t)} = 0$$

所以由平衡节点的性质和(8)式可得

$$\mu_s(t) = \left[\frac{\partial G[g_s(t)]}{\partial g_s(t)} \right]^T = \left[\frac{\partial G_s[g_s(t)]}{\partial g_s(t)} \right]^T \quad (14)$$

$$\text{设 } G_s[g_s(t)] = G_{rs}[Pg_s(t)] + G_{qs}[Qg_s(t)] \quad (15)$$

式中 $g_s = [Pg_s(t) \quad Qg_s(t)]^T$, $Pg_s(t)$, $Qg_s(t)$ 为平衡机有功, 无功注入功率;

$G_s[g_s(t)]$ 为平衡节点的发电成本;

$G_{rs}[Pg_s(t)]$ 为平衡节点的有功发电成本;

$G_{qs}[Qg_s(t)]$ 为平衡节点的无功发电成本。

由(14)、(15)两式可得

$$\mu_{rs}(t) = \frac{\partial G_{rs}[Pg_s(t)]}{\partial Pg_s(t)} = \lambda_p(t) + \gamma_{qs,r}(t) \quad (16)$$

$$\mu_{qs}(t) = \frac{\partial G_{qs}[Qg_s(t)]}{\partial Qg_s(t)} = \lambda_q(t) + \gamma_{rs,q}(t) \quad (17)$$

$$\text{式中 } \lambda_p(t) = \frac{\partial G_{rs}[Pg_s(t)]}{\partial Pg_s(t)};$$

$$\lambda_{qs,r}(t) = \frac{\partial G_{rs}[Pg_s(t)]}{\partial Pg_s(t)} + \mu_{rs,r}(t);$$

$$\lambda_q(t) = \frac{\partial G_{FM,qs}[Q_{gs}(t)]}{\partial P_{gs}(t)};$$

$$\lambda_{qs,q}(t) = \frac{\partial G_{qs,qs}[Q_{gs}(t)]}{\partial Q_{gs}(t)} + \mu_{qs,rq}(t);$$

$G_{FM,rs}[P_{gs}(t)]$ 为平衡机有功出力的燃料和维护成本;

$G_{FM,qs}[Q_{gs}(t)]$ 为发电无功成本;

$G_{qs,rs}[P_{gs}(t)]$ 为平衡机有功供电质量成本;

$G_{qs,qs}[Q_{gs}(t)]$ 为平衡机无功供电质量成本;

$\gamma_{qs,r}(t)$ 为系统有功发电供电质量费用;

$\gamma_{qs,q}(t)$ 为系统无功发电供电质量费用;

$\mu_{qs,rs}(t)$ 为有功出力约束乘子;

$\mu_{qs,rq}(t)$ 为无功出力约束乘子。

通过以上分析可得出 $\mu_{rs}(t)$ 为平衡机有功边际值即系统有功微增率和有功发电供电质量费用之和, $\mu_{qs}(t)$ 为平衡机无功边际值即系统无功微增率和无功发电供电质量费用之和。

综上所述且由(12),(13),(16),(17)可得实时有功,无功电价模型为下面两式:

$$\begin{aligned} \rho_{pk}(t) = & [\lambda_p(t) + \gamma_{qs,r}(t)] \left[1 + \frac{\partial P_{\text{loss}}(t)}{\partial P_{d_k}(t)} \right] \\ & + [\lambda_q(t) + \gamma_{qs,q}(t)] \frac{\partial Q_{\text{loss}}(t)}{\partial P_{d_k}(t)} + \frac{\partial N[\mathbf{z}(t)]}{\partial P_{d_k}(t)} \end{aligned} \quad (18)$$

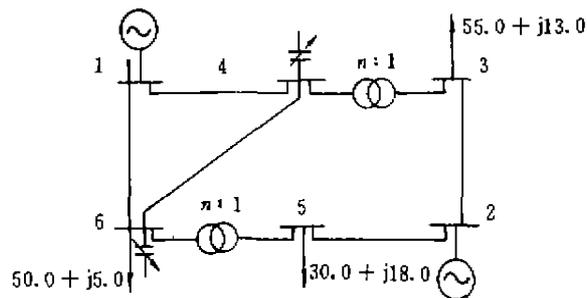
$$\begin{aligned} \rho_{qk}(t) = & [\lambda_q(t) + \gamma_{qs,q}(t)] \left[1 + \frac{\partial Q_{\text{loss}}(t)}{\partial Q_{d_k}(t)} \right] \\ & + [\lambda_p(t) + \gamma_{qs,r}(t)] \frac{\partial P_{\text{loss}}(t)}{\partial Q_{d_k}(t)} + \frac{\partial N[\mathbf{z}(t)]}{\partial Q_{d_k}(t)} \end{aligned} \quad (19)$$

4 算例及结果分析

利用本文所提方法对如图所示的6节点系统进行了计算研究。该系统节点费用及支路参数数据分别如表1和表2所示,如无特殊说明均为标么值,系统的负荷水平如图所示。

表3中给出了利用有功/无功经济调度模型所求出的该系统运行状态情况,为说明该模型的有效性,表中同时列出了本文调度模型与文献[5]结果的比较。

由表3可见,本文模型所得的系统运行状态完全满足系统的安全约束,而且发电费用仅为546.576 \$/h,低于系统的初始运行点及文献[5]的运行费用。



附图 6节点系统

表 1 系统成本数据

电 源 节点号	成 本 系 数					
	a_i	b_i	c_i	a'_i	b'_i	c'_i
1	0.0	1.0	0.05	0.0	0.01	0.02
2	0.0	1.00	0.01	0.0	0.01	0.02
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.02
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01	0.02

$$* \text{Cost} = \sum_i a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + \sum_j a'_j + b'_j Q_j + c'_j Q_j^2$$

表 2 支路数据

线路		线路阻抗		有载变压器 分接头
		R	X	
1	6	0.123	0.518	—
1	4	0.080	0.370	—
4	6	0.097	0.407	—
6	5	0.000	0.300	0.956
5	2	0.282	0.640	—
2	3	0.723	1.05	—
4	3	0.000	0.133	0.981

表 3 6 节点系统运行状态

系统变量	极 限		初始运行点	文献[5]结果	本文结果
	下限	上限			
P_1/MW	10	100	95.828	91.553	85.400
P_2/MW	10	100	50.000	51.633	60.235
Q_1/Mvar	-20	100	36.541	33.122	47.647
Q_2/Mvar	-20	100	34.100	33.855	15.568
Q_{s4}/Mvar	0.0	5.0	0.000	0.752	3.226
Q_{s6}/Mvar	0.0	5.5	0.000	0.573	3.01
n_4	0.9	1.1	1.025	1.027	0.956
n_7	0.9	1.1	1.100	1.088	0.981
V1	1.0	1.1	1.10	1.08	1.092
V2	1.0	1.15	1.05	1.13	1.12
V3	0.9	1.00	0.86	0.90	0.976
V4	0.9	1.00	0.96	0.99	0.981
V5	0.9	1.00	0.90	0.94	0.964
V6	0.9	1.00	0.94	0.97	0.962
系统总的运行成本	(\$/h)		629.981	588.946	546.576

表 4 中列出了三种不同的电价计算结果。其中,情形 1 为忽略无功影响所求出的电价,情形 2 为考虑无功影响所求出的电价,情形 3 为考虑无功影响但节点 4 及 6 没有无功补偿时所求出的电价。对于情形 1 和情形 2,由于网络约束为非有效约束(参见表 3),网络约束费

用为0,所以各负荷节点实时电价的差异主要是由网损边际费用不同造成的,而发电机节点实时电价差异则主要是发电机运行费用不同所致。表中由于无功成本很低,实时无功电价远低于实时有功电价,但通过实时无功电价的制定可增强系统对无功负荷的管理,增加网络部分的收。情形1由于忽略无功的影响使得各节点的实时有功电价要高于情形2,这主要是由于系统当前运行状态的无功网损边际费用为负值而千万的。对于情形3,由于去除了系统顽固无功补偿装置,在系统的优化计算中发现节点4的电压仅为下限值0.9,使得各节点的实时有功、无功电价增加了网络约束费用。

表4 各节点的实时电价

情形	电 价	节点1	节点2	节点3	节点4	节点5	节点6
1	有功电价(\$/MW·h)	8.993	7.643	9.744	9.664	9.531	9.706
2	有功电价(\$/MW·h)	8.720	7.382	9.322	9.282	9.116	9.298
	无功电价(\$/Mvar·h)	0.326	0.319	0.686	0.702	0.891	0.813
3	有功电价(\$/MW·h)	9.641	8.693	10.224	10.194	9.952	10.190
	无功电价(\$/Mvar·h)	1.558	0.913	1.751	2.848	2.140	1.947

以上分析可知,实时电价能为系统的安全经济运行和无功补偿装置的确定及无功补偿点的选择提供正确的经济信号。因此,在系统中实行实时电价制度能提高系统的安全稳定运行水平,有利于提高整个系统的经济效益。

顺便指出,上述电价计算均没有考虑网络的收支调节部分,因此网络部分的收入较低,网络部分的投资费用难于回收。因此单靠边际成本的收回不利于网络的良性发展,有必要对各用户实时电价增加系统的投资费用部分,限于篇幅,此处不再赘述。

5 结 论

本文在考虑无功成本的前提下,推导出实时有功、无功电价的精确模型。为在电力市场中,考虑无功电价和建立无功市场机制提供了理论依据。文中通过一简单算例验证了所提模型的有效性。

参 考 文 献

- 1 Schwepee F C, Caramanis M C, Tabors R D, et al. Spot Pricing of Electricity. Boston, Kluwer Academic publishers, 1988. 129~176
- 2 Baughman M L, Siddiqi S N. Real-time Pricing of Reactive Power; Theory and Case Study Results. IEEE T-PWRS, 1991, 6(1); 23~29
- 3 Chattopadhyay D, Bhattacharya K, Tyot, et al. Optimal Reactive Power Planning and its Spot Pricing; An Integrated Approach. IEEE T-PWRS, 1995, 10(4); 2 014~2 020
- 4 Dandachi N H, Rawlins M J, Alsac O, et al. OPF for Reactive Pricing Studies on the NGC System. IEEE T-PWRS, 1996, 11(1); 226~232
- 5 Lee K Y, Park Y M, Ortiz J L. A united approach to optimal real and reactive power dispatch. IEEE-PAS, 1985, 104(5); 1 147~1 153