

[供电方案]

电力市场下的无功成本分析及定价研究

文/云南农业大学机电工程学院 阮琼琼 陈雅雪 李 裕 张雪萍
华北油田水电厂 李江涛

在分析无功的生产成本和介绍多种无功定价方法的基础上，提出依据区域进行无功定价的观点，引入区域经济因子这一概念，详细论述了考虑无功区域贡献的等值定价机理，并以IEEE30节点为算例，验证了此无功定价方法对反映无功的地域贡献的有效性。最后为我国建立合理的无功服务市场提出了几点建议。

电力市场化改革已在我国逐步展开，无功电能辅助服务作为一项重要的辅助服务，由无偿提供到有偿服务已成为电力市场发展的必然趋势。但是截止目前，各国电力市场主要是针对有功电能进行交易，对无功电能的交易一般在辅助服务中加以考虑，并且只占很小的份额。在一些电力市场中，无功、电压控制由ISO通过与发电商和电网签订长期合同进行交易，没有竞争机制，因此不能很好地体现市场特性；另一方面，在电力系统私有化之后，发电公司和电网公司为了使无功电能能在系统电压控制方面的价值能够体现出来，并且尽快收回投资，迫切需要无功电能能在一个竞争的环境中进行交易，这就是所谓的无功市场。为了促进电力市场的良性发展，必须对无功功率进行成本分析和定价，并确立一个科学合理的价格形成机制。无功功率服务作为辅助服务的一种，对于有功功率的传输有着非常重要的支持作用；特别是当利用输电系统交易数量增多和电压水平成为限制额外功率传输的“瓶颈”时，无功功率的支持作用对电网的安全更为重要。无功和有功对电力系统的安全经济运行的影响具有同等重要的地位。因此，对无功成本、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。

无功生产的成本分析

1. 发电机无功生产成本分析

发电机的有功生产成本可用燃料费来表示，但其无功生产成本很小，一般认为是其机会成本，即由于增发无功而减少的有功收入。发电机的典型出力特性如图1所示，其容量限制对于计算机会成本有着重要的意义。发电机运行的容量限制主要有：电枢（定子）电流限制，场（转子）电流限制和欠励限制。

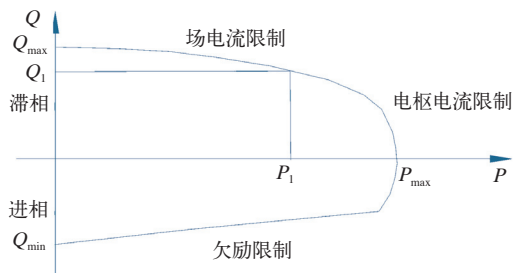


图1 发电机出力特性图

假设发电机的容量只用来发出有功 P 和无功 Q ，且市场中有功和无功的交易总是变化的。由于发电机运行时要受到发电容量的限制，当发电机在发出无功功率时，其有功出力的极限比没有无功出力情况下的极限值要小，从而造成了发电机隐性的经济损失，此时即使该有功功率无需发出，也会影响这部分有功功率作为旋转备用的相

应利润。由机会成本的定义可知,无功功率的机会成本就是发电机由于其无功出力而损失的有功发电能力所对应的最大利润,可用下式来表示。

$$C_q(Q) = \max[0, \pi_p(P)] \quad (1)$$

式中, $C_q(Q)$ 为无功功率 Q 的机会成本; $\pi_p(P)$ 为对应于有功功率 P 的利润。

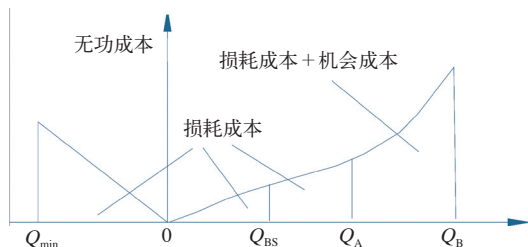


图2 发电机无功生产运行成本

图2是发电机无功生产运行成本曲线,文献提出发电机分段报价结构,建立了经典的无功生产成本函数。

(1) $[0, Q_{BS}]$ 中发电机所发无功将被其辅助设备消耗,为损耗成本。

(2) $[Q_{BS}, Q_A]$ 中无论发出多少无功,都会导致机组部件的发热损耗,该区间无功成本仍为发热损耗成本。

(3) $[Q_A, Q_B]$ 中发电机由于增发无功而少发有功,同时存在损耗成本,为损耗成本+机会成本的和。

(4) $[0, Q_{min}]$ 中发电机要降低电压水平作进相运行,机组温度升高,加速老化,静稳裕度减少,总成本增加,曲线上斜较大;损耗成本比前三个区域大,应进行单独报价。

如图2所示,损耗成本与无功出力有近线性的关系,而机会成本与无功出力有近二次函数的关系。

无功的机会成本又可以近似表示为

$$C_{qgi}(Q_{Gi}) = k[C_{qgi}(S_{Gi,max}) - C_{pgi}(\sqrt{S_{Gi,max}^2 - Q_{Gi}})] \quad (2)$$

式中, $C_{qgi}(Q_{Gi})$ 为发电机组 i 的无功机会成本, $C_{qgi}(S_{Gi,max})$ 为发电机的有功成本函数, Q_{Gi} 为发电机无功出力; $S_{Gi,max}$ 为发电机 i 允许的最大出力; k 为发电厂有功生产的利润率。

2. 其他无功补偿装置的无功生产成本

(1) 显性成本

同发电机一样,提供无功服务的输电设备的运行成本很小,甚至可以忽略。无功补偿设备的显性成本主要是指无功设备的资本成本。输电网络的无功补偿设备,如电容器组,多是一些可投切设备。由于机械投切的损伤,设备的投切次数总

有一定的限制,因此无功补偿装置有一定的使用寿命。在设备的寿命期(按15年计算)内,可以近似用无功补偿装置的投资总额的折旧率来计算其单位容量的显性成本,即

$$EC_c(Q) = \frac{I_c}{15 \times 365 \times 24 \times \gamma} \quad (3)$$

式中, $EC_c(Q)$ 为无功补偿装置单位容量的显性成本; I_c 为无功补偿装置的单位容量的投资成本; γ 为无功补偿装置的平均使用率。同步调相机是一种特殊的发电机,不生产有功,投资成本应算入无功生产成本中。将调相机的无功生产成本近似认为是电容器无功生产成本的 m 倍。一般调相机的无功投资成本近似认为是电容器无功投资成本的 5~10 倍。

(2) 机会成本

对于已经配置在系统中的无功补偿装置,它们要么投入运行,要么退出运行,没有可供选择的利用方案,因而此时其机会成本为零。

无功价格机理分析

在现有的无功定价研究中,按照价格机理的不同,可归纳为基于边际成本理论的无功实时定价法、依据区域的无功定价法、依据运行的无功定价法、两部制无功定价法和等值无功定价法。由于无功不适合远距离传输,应就地平衡,使无功具有了区域性,因此本文重点研究考虑无功区域价值的定价,把无功的区域价值用经济的形式表现出来。

1. 依据区域的无功定价

无功的区域定价核心思想为:由于远距离传输无功的不经济性,应该鼓励建立区域无功市场。根据发电厂的无功容量为其付费和用户的无功需求对其收费。无功需求可用调整因子算出

$$R_{q,i} = \Delta Q_i + \alpha \frac{\partial Q_{LOSS}}{\partial Q_i} \varepsilon_i \Delta Q_i + \beta \frac{\partial Q_{LOSS}}{\partial P_i} \sigma_i \Delta P_i \quad (4)$$

式中, $R_{q,i}$ 为无功调整因子; ΔP_i , ΔQ_i 代表有、无功变化量; α , β 用以修正用微增网损计算系统总无功网损造成的偏差; ε_i , σ_i 用以调整 ΔQ_i , ΔP_i , 使之满足指定的功率因数。 $R_{q,i}$ 可被视为无功的当地价值。区域无功电价的典型特性是容易产生区域垄断性,因此可用长期容量电价作为无功定价的依据,但这将导致无功价格对短期无功变化不敏感。从长远看,无功实时电价和区域电价相结合,应该是无功定价发展的趋势。但无论是实时

电价还是区域无功电价都无法解决无功的区域垄断性问题,因而有人提出了严格依据成本和使用效用的两部制无功定价法。

2. 两部制无功定价

两部制无功定价主要针对无功供给的成本特性制订价格措施。两部制无功电价强调无功的投资回收,因而将无功的容量效用和使用效用分开定价,其价格机理为

$$P_{qi} = C_{fi} + C_{vi} \quad (5)$$

$$C_{vi} = -\lambda \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \quad (6)$$

式中, P_{qi} 为无功电价; C_{fi} 为无功的单位固定成本; C_{vi} 为单位变动成本; 以上单位都为元/Mvar·h。 λ 为有功电价, 单位为元/MW·h。

3. 等值无功电价

无功成本可分为运行成本和投资成本。现有电价体制将整个发电机投资成本纳入有功电价补偿,而在电力市场下,则应单独核算发电机无功的投资成本并合理补偿无功的运行成本。在此,提出无功等值电价法。等值电价法提出用电量成本参与竞争,而结算时自动补足容量投资回报,并把电量电价和容量电价综合成为等值电价。根据我国电力市场初期的实际情况,无功等值电价法强调管制与竞争的结合。所谓“等值”主要指无功电价应与无功成本“等价”,并需准确描述出无功的成本特性,达到合理补偿的目的。发电机 i 无功的等值电价可用以下两式诠释。

$$P_{REi} = a_i + b_i = a_i + \frac{\lambda_i}{T_i} \quad (7)$$

其中

$$\lambda_i = \bar{\lambda} \times \frac{\sum_{i=1}^N a_i / N}{a_i} \quad (8)$$

式中, P_{REi} 为发电机 i 的无功等值电价, 元/Mvar·h; a_i 为发电机 i 的无功电量电价, 元/Mvar·h; b_i 为发电机 i 的无功容量电价, 元/Mvar·h; λ_i 为发电机 i 评估后的日容量成本, 元/Mvar·d; T_i 为发电机 i 无功的有效日利用小时数; $\bar{\lambda}$ 为由政府(或电监委)给出的参考容量成本(一般经一组典型机组的投资容量成本评估出来), 元/Mvar·d; N 为上网的发电机数。

式(7)的含义可解释为,无功的结算电价等于无功的电量电价与评估出的无功容量电价之和。无功等值电价具有市场公平性、容量回报充分、激励无功投资和抑制市场投机行为等良好的市场特性。

4. 计及无功区域贡献的等值定价机理

电力市场下,电网从市场竞争的角度讲,希望打破无功的地域垄断性,但从经济及系统安全性的角度讲,不同地域无功源的特殊价值应该得到认可。从理论上讲,一方面,不同地域的无功源对系统网损的影响不同,因而其有不同的经济效率;另一方面,不同地域的无功源表现在对系统节点电压的支持上具有不同的作用,本文将这种作用的不同体现在经济回报上,提出了无功的区域经济因子以衡量无功的区域贡献。即在无功等值电价法的基础上,考虑无功的区域贡献,得出计及区域贡献的无功等值定价法。

无功的等值电价法见式(7)。在无功的等值电价法中加入对无功区域价值的衡量即构成计及区域贡献的无功等值电价,其数学描述如下

$$P_{REi} = E_i a_i + b_i = E_i a_i + \frac{\lambda_i}{T_i} \quad (9)$$

式中 E_i 为区域经济因子,无功的经济因子包含了无功对有功经济的影响及对系统电压特性的贡献。衡量无功使用效用的电量电价涵盖的有效信息应包括各种运行成本信息及地域经济价值(即经济因子)。而容量电价则反映无功的投资成本信息。

在计及区域经济因子的无功等值电价法中,区域经济因子正是对不同地域的无功源的价值的主观评估。可如下计算

$$E_i = \alpha P_{SPi} + \beta P_{SMi} \quad (10)$$

式中 P_{SPi} , P_{SMi} 分别为对有功网损的灵敏度和对电压的灵敏度的索引 α 、 β 为参与权重,二者之和为1,可由电网根据不同的运行方式灵活调整。容易看出,计及经济因子的无功等值电价法具有以下两大典型特性。

1) 由于区域经济因子参与无功源的使用价值评估,解决了不同地域的等量无功源使用效用不同的问题,无功的质的不同获得的回报亦不同,体现了价格机理的市场公平、公正性。

2) 由于在无功结算电价中自动补足了无功的容量回报部分,因而无功的等值电价法具有资金成本回报充分的特性。在电力市场初期,具有激励无功投资的作用。

算例

为验证该方法确定的无功定价对反映无功的区域贡献的有效性,用Matlab编程,对IEEE30节点系统进行了仿真计算。IEEE30节点系统包括6台

发电机组（分布于节点1, 2, 5, 8, 11, 13）和2个并联电容器站（分布于节点10, 24）。中的无功优化方案解算的无功出力为基础，计算无功的等值电价和计及经济因子的无功等值电价。

取参与因子 α 、 β 分别为0.5。在常规潮流节点计算出各无功源的经济因子 E ，然后带入式（9）得出计及区域贡献的无功等值电价。

表1 无功等值电价及计及经济因子的无功等值电价

无功源序号	节点号	无功经济因子	无功等值电价 (元/Mvar·h)	计及经济因子的无功等值 电价 (元/Mvar·h)
G1	1	0.34	51.05	30.67
G2	2	0.87	48.37	44.58
G3	5	0.66	48.62	38.94
G4	8	1.62	45.39	61.11
G5	11	0.09	35.35	21.40
G6	13	0.82	37.59	34.48
C1	10	2.19	25.00	36.93
C2	24	1.40	25.00	29.01

1) 由表1可看出，不同地域的无功源具有不同的价值，表现在其对系统有功网损的影响和对节点电压的支撑上具有不同的作用。因而，无功的经济因子具有客观反映无功源对系统经济及安全贡献大小的作用。表1中的G4, C1和C2具有较大的经济因子，说明其对系统的贡献较大。

2) 对比无功等值电价和计及区域贡献的无功等值电价。计及区域贡献的无功等值电价是在等值电价的基础上考虑了无功经济因子，对无功等值电价做出了调整，经济因子大的无功节点，其计及区域贡献的无功等值电价比无功等值电价要

高，反之则低。很显然，如果说无功等值电价客观反映了无功的成本特性的话，那么，计及区域贡献的无功等值电价不仅反映了无功的成本特性，而且恰当地描述了无功的地域贡献，强调了无功的安全价值，并把这种安全价值合理体现到了经济回报当中。因而，计及区域贡献的无功等值电价更能反映无功经济及技术两方面的综合效用。

结束语

本文在对无功的生产成本分析及多种无功定价方法介绍的基础上，考虑了无功的区域贡献，提出了依据区域进行无功定价的观点，引入了区域经济因子这一概念，详细论述了考虑无功区域贡献的等值定价机理，并结合算例说明了本文提出方法的合理性和有效性。最后结合我国自身特点，得出制订合理的无功服务市场的几点建议。

1) 由于我国电力市场改革还处于初级阶段，市场机制还有待于进一步完善，逐步有序的建立一个适当管制和公平竞争相结合的无功市场是需要考虑的问题。

2) 首先建立区域性发电无功市场，为发电厂提供的无功服务进行有偿和无偿范围的界定，最终建立科学合理兼顾多方利益的无功服务定价机制。

3) 随着电力市场的逐步完善，对于其它的无功设备如有载调压变压器、SVC 和应用越来越广泛的FACTS等装置的成本分析及补偿，也是今后需要研究的问题。EA

(收稿日期: 2015.07.31)

(编辑: 白文亭)

全面融入本土生态链系统构建全生命数据中心

——伊顿在京举办数据中心技术日活动

近日，伊顿在北京成功举办主题为“伊带e路 绘智全球”的数据中心技术日，发布了多款适用于数据中心的创新产品及解决方案，并与200余位与会客户、合作伙伴，及行业专家共同分享和探讨了中国数据中心发展的经验及面临的挑战。

伊顿中国区总裁周涛出席了本次活动并致开幕辞，他表示：“随着‘互联网+’以及‘中国制造2025’战略的提出与实施，信息技术迎来了前所未有的发展机遇。数据中心作为信息化的基础设施，也正不断经受运行稳定性、能耗、风险和成本控制等诸多考验。伊顿通过在全球数据中心领域积累的丰富经验，结合中国数据中心行业的特点和需求，致力于帮助本土客户提供更可靠、高效的电力产品及保护，确保客户业务连续性并降低运营成本及碳排放，在大数据时代抢占先机。”

本次活动上，伊顿电气电能质量业务中国区总经理曲颖女士向与会人员全面阐释了“伊带e路”的理念，表示伊顿将全面打造合作伙伴生态链，进一步融入中国本土生态系统，以引领基础设施建设与产业互联网的融合，进而构建具有全球化视野的全生命数据中心。同时也着重诠释了伊顿“在中国，为中国”的本土化策略，坚持本土团队的建设，不断提升研发能力，通过与本土客户及合作伙伴的交流与探讨来了解客户和市场的需求，从而推出更适合中国市场的产品及解决方案。