

基于潮流分解的输电成本分摊的改进方法

吴国丙¹, 任震², 黄雯莹²

(1. 广东省电力调度中心, 广东 广州 510600; 2. 华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘要: 输电服务的成本分摊及其定价是输电网开放所面临的主要问题。经济学上的纯粹的边际成本定价方法尽管可以提供有用的经济学信息, 但是输电网的规模经济效益却使得依赖边际成本定价的输电收入远远不能满足输电投资成本的收支平衡。从工程角度出发, 结合经济学概念, 对基于潮流分解的输电成本分摊方法进行介绍, 并对其进行改进, 提出了改进的输电成本分摊方法以用于定价问题的研究计算, 并对算例的计算结果进行分析比较。

关键词: 成本分摊; 输电定价; 潮流分解

中图分类号: TM73; F123.9

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2004)09-0007-05

0 引言

随着电力工业的进一步改革以及引入竞争机制的程度不断加深, 输电网的开放已经日益迫切, 越来越要求输电网对第三方无歧视地开放, 实现电能自由传输, 以及制定公平的市场规则, 以保证输电网络的安全可靠运行。所谓输电网开放 (Transmission Open Access, TOA), 就是指允许除输电网所有者之外的其它类型的公司, 如电力零售公司、大用户、独立发电厂以及电力市场的参与者, 使用输电网的设备和输电能力进行批发交易^[1]。

输电服务的成本分摊及其定价是输电网开放的过程中所面临的主要问题。纯粹的经济学上的边际成本定价方法尽管可以提供有用的经济学信息^[2-3], 但是输电网的规模经济效益却使得依赖边际成本定价的输电收入远远不能满足输电投资成本的年收支平衡。一个有效的定价机制应该遵循以下几个基本的原则^[4]:

- 输电定价必须满足传统的收支平衡要求;
- 输电定价要反映协调兼容性;
- 输电定价应该促进经济效率;
- 输电定价应促进公平竞争;
- 输电定价应简单实用。

本文从工程角度出发, 结合经济学概念, 对基于潮流分解的输电成本分摊方法进行介绍, 并对其改进, 提出了改进的输电成本分摊方法以用于定价问题的研究, 并对改进前后的成本分摊方法进行了比较。

1 潮流分解的基本原理

潮流分解 (Power Flow Decomposition, PFD) 是一种对每一个交易进行输电服务分摊的网络解决方法。该方法是基于所有交易对系统影响的叠加, 把交易对系统的潮流影响分解为一个与单独交易有关的主要分量和一个与所有交易有关的相互分量 (反映了潮流模型的非线性)^[5-7]。主要分量与单独的输电交易有关, 是输电交易对系统影响的主要因素; 相互分量与所有输电交易相关, 考虑了潮流模型的非线性, 只占输电交易对系统影响的一小部分 (约 5%)。对于每一个输电交易, 此方法可以确定其对输电网络的利用份额 (包括有功和无功分量)、网络净功率的不平衡量和参与补偿有功损失的发电机的贡献大小。

为了利用潮流分解方法, 首先要将输电交易对输电网络的影响分解为主要分量和相互分量。下面将主要介绍分解过程的一些技术问题和处理方法, 为了简化计算, 本文只讨论单一松弛母线的情况, 而实际的系统通常是存在几个分散的松弛母线, 情况比较复杂, 见文献^[6]介绍。

1.1 主要分量的计算

鉴于在输电交易中主要分量远远大于相互分量对输电网络的影响, 对所有的交易 t ($t = T$) 一起进行时的运行状况进行负荷潮流计算, 可得所有母线对应的 S_i 、 E_i 和 I_i 。在单独交易中, 假设交易双方的注入点和流出点的 S_i^j 和 I_i^j 保持不变 (和所有交易一起进行时该交易在注入点和流出点的功率和电流相比几乎没有变化), 利用下列公式可以计算出对应于单独交易 t 时的复值电压向量和线路的复值功率

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (000397)

矩阵分别为:

$$E_n^t = ZI^t + E_n = ZI^t + 1 \cdot E_n \quad (1)$$

$$SM^t = \text{diag}((E^t)^*) IM^t \quad (2)$$

式(1)和(2)中, $E^t = [E_n^t \ E_n^t]$ 为增广电压向量; SM^t 为输电线路 $n \times n$ 维的复值功率矩阵; IM^t 为输电线路 $n \times n$ 维的复值电流矩阵, 其元素组成如下:

$$IM_{ii}^t = 0 \quad (b_i = 0) \quad (3)$$

$$IM_{ij}^t = (E_i^t - E_j^t) \cdot Y_{ij} \quad (i \neq j) \quad (4)$$

1.2 相互分量的计算

由上述计算主要分量过程中的计算数据, 可利用公式计算出相互分量的大小。对于交易 t_i 和 t_j , 根据相互分量的定义, 详见文献[6], 有

$$SM^{ij, \text{total}} = \text{diag}((ZI^i)^*) IM^i + \text{diag}((ZI^j)^*) IM^j \quad (5)$$

式中: $SM^{ij, \text{total}}$ 为交易 i 和 j 的相互作用对输电线路功率影响的总和。

值得注意的是, 由于实际的输电网络存在着损耗, 因此在松弛母线上产生了功率不平衡项, 以补偿网络的功率损失。这部分功率的分摊对于输电网络的运行同样比较重要, 如何在参与再发电的发电机之间对这部分功率进行分摊以及分摊多少就成为关键的问题。实际的系统通常是由多个发电机来提供功率平衡, 即不只有一条松弛母线(作为平衡节点), 文献[6]中介绍了一个参与因子概念来解决不平衡项的分摊问题。在此, 基于前面的假设, 即只对于单一松弛母线的系统, 不平衡项是由松弛母线上的发电机来调节的, 因此对其分析就比较简单一些。

2 基于潮流分解的输电成本分摊

2.1 与每个交易有关的输电成本的计算

这一部分输电成本包括每个交易对输电容量的实际利用份额所对应的输电固定成本(占输电固定成本分摊的主要部分)和与该交易有关的运行成本部分(主要是网络损失和功率不平衡引起的输电成本, 可以看作辅助服务部分)。对任一输电交易 t , 这两部分成本的分摊和计算可以按下述公式进行:

$$FC_l^t = C_l \frac{|SM_l^t|}{SM_l^{\text{total}}} \quad (6)$$

$$OC^t = (IB^t)^T \cdot C_G \quad (7)$$

$$SM_l^{\text{total}} = |SM_l^t| + |SM_l^{\text{km}, \text{total}}| \quad (8)$$

上述式中: FC_l^t 为输电线路 l (从节点 i 到 j) 的固定成本分摊到输电交易 t 的部分; C_l 为输电线路 l 在给定时段的容量成本的分摊值; SM_l^t 为输电交易 t

对输电线路 l 影响的主要分量; SM_l^{total} 为所有输电交易对输电线路 l 影响的主要分量和相互分量的总和; OC^t 为与输电交易 t 有关的运行成本, 主要是相应发电机进行二次调节以补偿网损和不平衡项的成本; $(IB^t)^T$ 为对应于输电交易 t 的功率不平衡列向量的转置; C_G 为参与二次调节的发电机的平均成本或边际成本的向量。

此时, 对应于每一个输电交易 t 的输电成本 TC_M^t 的计算为:

$$TC_M^t = FC^t + OC^t = \sum_l FC_l^t + OC^t \quad (9)$$

2.2 与所有交易有关的输电成本的计算

此项成本对应于所有输电交易, 即相互影响分量和其它相关服务(为了保证所有输电交易的安全可靠进行的一些服务), 也可以称为输电通道费。可以分为与所有输电交易相互影响有关的输电固定成本(输电固定成本的一小部分)和运行维护成本, 这些成本不只和单独的一个交易有关, 而是对于这个输电系统的所有交易都有关系, 有时很难确切地进行区分分摊, 在此参照邮票法的一些原则进行平均分摊。

首先计算与相互影响有关的总的输电固定成本, 即

$$IFC = \sum_l \frac{|SM_l^{\text{km}, \text{total}}|}{SM_l^{\text{total}}} C_l \quad (10)$$

考虑到输电网络的总的运行和维护成本, 即 O&M 成本, 可得与所有输电交易有关的总输电成本和该成本分摊到每个输电交易的大小分别为:

$$TC_{\text{int}} = IFC + OM \quad (11)$$

$$TC_{\text{int}}^t = TC_{\text{int}} \frac{MW^t}{MW^t} \quad (12)$$

上述式中: TC_{int}^t 为与所有输电交易有关的总的输电成本; MW^t 为输电交易 t 的交易量的大小; TC_{int} 为分摊到输电交易 t 的部分。

3 输电成本分摊的改进方法

3.1 改进措施

如果按照前面的方法进行输电成本分摊, 输电交易的主要分量对整个输电成本有决定性的影响, 相互分量的影响非常小; 从而可能致使输电线路的过度利用, 用户只注意单独交易的情况, 而忽略整个输电系统的情况, 特别是不同输电交易的相互影响对整个输电系统的影响。

由于输电容量不仅是为了给输电交易提供一个

功率输送的通道,而且还对保证输电交易安全可靠进行提供了一定程度的备用。在此,从输电线路投资建设的目标出发,将输电线路的固定投资成本分为容量利用部分($C_{U,l}$)和可靠性效益部分($C_{R,l}$);容量利用部分的成本的回收按不同输电交易对线路利用的主要分量进行分摊,可靠性效益部分的成本按照输电交易的大小成比例分摊。进行改进后,上述计算输电固定成本的公式(6)和(10)分别改变如下:

$$FC_l^t = C_{U,l} \frac{|SM_l^t|}{|SM_l^t|} \quad (13)$$

$$IFC = \sum_l C_{R,l} \quad (14)$$

3.2 改进方法的计算步骤

基于潮流分解的输电成本分摊的改进方法的计算步骤如下:

1) 对于每一个输电交易 t ,基于相应的潮流计算方法及上述潮流分解原理,计算出其对输电网络潮流影响的主要分量;

2) 根据给定的成本数据,包括 C_l 和 C_G ,以及经济调度所得到的系统不平衡量 IB^t ,首先按给定的比例将 C_l 分为容量利用部分 $C_{U,l} = (1 - q) C_l$ 和可靠性效益部分 $C_{R,l} = q C_l$,其中 q 为可靠性备用系数(一般为 0.2 左右),然后利用上述公式计算出与每一个交易有关的输电成本 TC_M^t ;

3) 在步骤 2 的基础上,计算出与所有交易有关的输电成本 TC_{int} ,并按照输电交易的大小对其进行分摊得到 TC_{int} ;

4) 由上述计算结果可以得到对应于输电交易 t 的总的输电成本为:

$$TC^t = TC_M^t + TC_{int}^t$$

4 算例分析

4.1 输电系统描述

为了验证前述输电成本分摊的计算方法,本章利用一个简化的输电系统进行计算说明,该输电网络拓扑结构图如图 1 所示。

其输电线路参数见表 1。其中,线路电阻、电抗为标么值;基准为: $S_b = 100 \text{ MVA}$, $U_b = 500 \text{ kV}$ 。假设某时段,输电系统上的输电交易有 t_1 、 t_2 和 t_3 ,如表 2 所示。在本节计算中,不平衡功率向量为 $IB-t1 = [0, 0, 0, 0, 0, 0, \text{real}(S^{\text{Tk}}(7))]$,发电机的平均成本或边际成本(单位:元/MW)向量为 $C_G = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 150]$,输电线路的运行及维护成本为 $OM = 30$ 元。

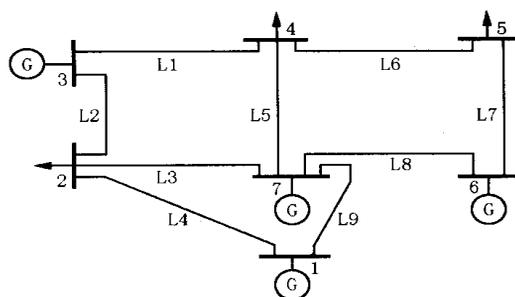


图 1 输电网络拓扑结构图

Fig. 1 Topology of transmission network

表 1 输电线路参数

Tab. 1 Parameters of transmission lines

线路	首-末端	线路电阻/p.u.	线路电抗/p.u.	容量成本/元
1	3-4	0.0015	0.0150	1000
2	2-3	0.0050	0.0500	3000
3	2-7	0.0030	0.0300	2000
4	1-2	0.0030	0.0300	2000
5	7-4	0.0015	0.0150	1000
6	4-5	0.0050	0.0500	3000
7	6-5	0.0025	0.0250	1500
8	6-7	0.0050	0.0500	3000
9	7-1	0.0005	0.0050	500

表 2 某时刻的输电交易情况

Tab. 2 Cases of transmission trade

交易数	注入-流出节点	交易量(标么值)
t_1	1-2	1.50 + 0.50i
t_2	3-4	1.50
t_3	6-5	1.50 + 0.50i

4.2 计算结果分析

利用基于潮流分解的输电成本分摊方法进行计算的结果见图 2、3 和 4。其中, $MFC-t_i$ 为与交易 t_i ($i = 1, 2, 3$) 对应的固定成本的主要分量, $IFC-t_i$ 为与交易 t_i 对应的固定成本的相互分量; $FC-t_i$ 为与交易 t_i 对应的固定成本; $TMFC$ 为每一个交易所分摊的总的固定成本的主要分量, $TIFC$ 为每一个交易所分摊的总的固定成本的相互分量。

由图 2, 线路 1 的固定成本主要由 t_2 分摊, 线路 3、4 和 9 的固定成本主要是由 t_1 分摊, 线路 6、7 和 8 的固定成本主要是由 t_3 分摊。线路固定成本的主要分量占很大的比重, 而相互分量的比重非常小, 几乎可以忽略不计。

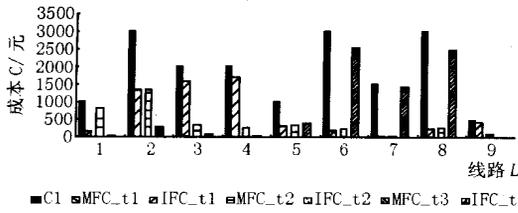


图2 基于潮流分解方法的线路的固定成本分摊情况
Fig. 2 Fixed cost allocation of lines based on PFD method

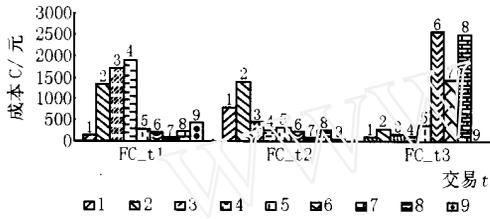


图3 基于潮流分解方法的每个交易的固定成本组成
Fig. 3 Fixed cost consist of different trade based on PFD method

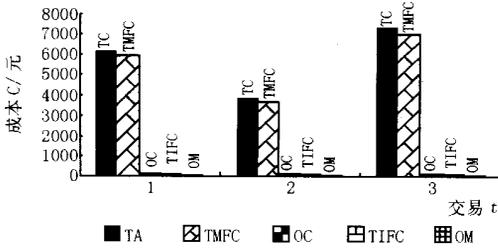


图4 基于潮流分解方法的每个交易的总成本组成
Fig. 4 Total cost consist of different trade based on PFD method

图3是每一个交易所分摊的固定成本的组成。 t_1 的固定成本主要是由于分摊了线路2、3、4和9的固定成本； t_2 的固定成本主要是由于分摊了线路1和2的固定成本； t_3 的固定成本主要是由于分摊了线路6、7和8的固定成本。

图4是基于潮流分解的输电成本分摊方法计算所得出的每一个交易的总成本组成,可见,进行潮流分解后的输电交易的主要分量所分摊的固定成本的主要分量占很大的比重(约占总成本的95%左右),而与每一个交易有关的运行成本(即OC)和与所有交易有关的输电成本(包括固定成本的相互分量和输电系统的运行维护成本)只占非常小的比重(约占总成本的5%左右)。

利用本文提出的改进方法进行计算的结果见图5、6和7。其中, $MFC-timod$ 为与交易 t_i 对应的固定成本的主要分量, $IFC-timod$ 为与交易 t_i 对应的固定

成本的相互分量; $FC-timod$ 为与交易 t_i 对应的固定成本; $TMFC-mod$ 为每一个交易所分摊的总的固定成本的主要分量, $TIFC-mod$ 为每一个交易所分摊的总的固定成本的相互分量。

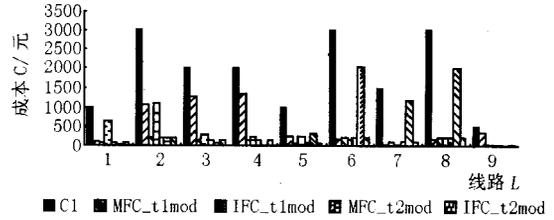


图5 基于改进方法的线路成本分摊情况
Fig. 5 Cost allocation of lines based on the improved method



图6 基于改进方法的每个交易的固定成本组成
Fig. 6 Fixed cost allocation of different trade based on the improved method

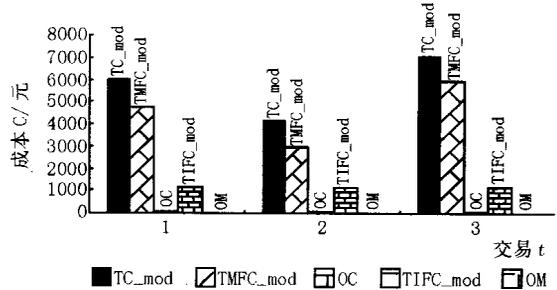


图7 基于改进方法的每个交易的总成本组成
Fig. 7 Total cost consist of different trade based on the improved method

图5与图2比较可见,由于考虑了线路固定成本的容量利用部分和可靠性效益部分的划分,特别是可靠性效益部分对所有交易进行分摊,使得与单独交易有关的固定成本的主要分量减少,与所有交易有关的固定成本的相互分量增加。

图6与图3比较可见,由于将线路的固定成本分为容量利用部分和可靠性效益部分,使得线路固定成本中作为可靠性效益部分的成本在各交易间平均分摊,从而使线路固定成本的分摊趋于平和。

图7与图4比较可见,由于考虑了输电线路投资的可靠性效益,即对输电容量备用情况进行了考

虑,使得改进后总成本中与所有交易有关的固定成本的相互分量所占的比重增加。

由上述计算结果可以看出,改进前的输电成本分摊方法中相互分量的影响很小,对成本分摊的影响也是微乎其微的。改进后的输电成本分摊方法,将输电线路的固定投资成本分为容量利用部分和可靠性效益部分来进行计算,不但可以满足输电线路投资建设的目标并合理地回收投资成本;而且相应地提高了输电成本中相互分量的比例,并按照利用份额对这部分成本进行科学合理的分摊,它对于输电成本的合理回收、促进输电系统的投资和指导用户合理地使用输电资源有着重要的意义。

5 结论

本文运用所提出的输电成本分摊的改进方法对一个简化的输电系统进行了计算,通过本文的研究工作和计算结果可以得出以下结论。

1) 输电系统的经济技术特性使得输电定价问题显得更加复杂困难,根据不同的市场模式和定价目的选择合适的输电定价方法成为输电系统开放面临的主要问题。

2) 由成本分摊情况可见,对于区分用户使用成本不同的输电设备问题、不同用户对输电设备的利用程度问题和输电系统环流问题等,潮流分解方法及其改进方法有了较好的解决和处理,比邮票法和合同路径法等更接近于实际系统的物理特性。

3) 利用潮流分解方法进行计算的优点在于其利用 AC 潮流模型,对系统潮流的计算更为准确,能够考虑各个交易的相互分量的影响。尽管相互分量的影响比较小,但是相互分量的计及却是非常重要的,它对于确定一个科学合理的定价机制,对于输电成本的合理回收、促进输电系统的投资和指导用户合理地使用输电资源有着重要的意义。

4) 利用算例结果对改进后的输电成本分摊方法进行解释说明,即将线路的固定成本分为容量利用部分和可靠性效益部分的意义进行说明,考虑了线路投资的目的及功能,并且据此对输电成本进行分类分摊。

5) 本文提出的输电成本分摊的改进方法很容

易运用于大规模的输电系统,与原有的软硬件具有很好的连接性和可移植性,其计算方法比较简单,易于操作,计算速度比较快,在理论和规则上很易理解,并且便于根据定价的目的进行修改运用。

参考文献:

- [1] 姚建刚,秦红三(YAO Jiann-gang, QIN Hong-san, et al). 电力市场中输电与配电分离的方略初探(A Preliminary Study on Approach of Separating Power Transmission and Distribution in Electricity Market) [J]. 电网技术(Power System Technology), 2001, 25(3): 70-73.
- [2] 言茂松,辛洁晴(YAN Mao-song, XIN Jie-qing). 在电力市场环境网嵌入的边际成本输电定价新方法(Grid Embedded Marginal-cost Transmission Pricing(GEMP) in Power Market) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1998, 18(2): 111-116.
- [3] 任震,吴国丙(REN Zhen, WU Guo-bing, et al). 计及电量效益的发电上网电价定价方法(The Pricing Method of Pool Purchase Price Considering the Utility of Energy) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(5): 15-19.
- [4]
- [5] Marija D I, Yong T Y, et al. Toward Regional Transmission Provision and Its Pricing in New England[J]. Utilities Policy, 1997, 6(3): 245-256.
- [6] Zobian A, Ilic MD. Unbundling of Transmission and Ancillary Services, Part : Technical Issues[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 539-548.
- [7] Zobian A, Ilic MD. Unbundling of Transmission and Ancillary Services, Part : Cost-based Pricing Framework [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 549-558.

收稿日期: 2003-08-20; 修回日期: 2003-11-11

作者简介:

吴国丙(1977 -),男,硕士,主要从事电力市场和电力系统运行方式方面的研究工作;

任震(1938 -),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力市场、电力系统规划与可靠性、高压直流输电、小波分析及其在电力系统中的应用;

黄雯莹(1939 -),女,教授,从事可靠性数学、小波分析等领域的科研和教学工作。

The improved method of transmission cost allocation based on power flow decomposition

WU Guo-bing¹, REN Zhen², HUANG Wen-ying²

(下转第 30 页 continued on page 30)

补偿电流基本上抵消了负荷电流中的主要谐波。图7中基波分量补偿后增大,是因为在指令电流中加入了有功成分以补偿 APF 的运行损耗,维持直流侧电压恒定不变。

另外,由于采用降压变压器连接并使用 SVPWM 控制,该方法的直流电压只需 280 V,而传统方法的直流电压需 800 V,因此,使用新方法后 APF 的综合性能有明显提高。

5 结论

基于空间矢量方法的 PWM 技术,使 APF 在任意时刻要跟踪的矢量均可由两个基本矢量和零矢量合成,控制精度较高;在一个控制周期通过开关 2 次动作即可将参考矢量输出,因而 APF 的损耗较少,效率高;其矢量作用时间由相电压直接计算,计算简单;该方法直流电压利用率高,其最大输出电压较 SPWM 高约 15.47%。本文中的三相三线制 APF 非常适用于中高压配电网,而且随着电压等级的提高,直流电压降低得越多,系统的绝缘水平要求也随之降低,可大大提高系统的经济性和可靠性。SVPWM 控制能满足有源滤波器的实时要求,滤波特性非常理想。以微控制器为核心的数字化控制系统是发展趋势,所以 SVPWM 应是优先的选择。

Application of SVPWM strategy in active power filter

JIANG Junfeng, LIU Hui-jin

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on analyzing the basic principle of voltage space vector pulse width modulation (SVPWM), the realization of SVPWM is discussed and a simplified method to calculate the operating time of each vector is offered. Compared with conventional SPWM, this one can improve the precision of the active power filter, reduce the switching losses and improve the utilization of DC voltage. The configuration and basic operation principle of active power filter (APF) are introduced, and the SVPWM control strategy is introduced into APF. Considering the fast processing ability of digital signal process (DSP), the DSP is used as main control unit. At last, some experimental results are obtained, and the results show that the control strategy can meet real-time requirement of APF and the compensation properties of APF are excellent.

Key words: active power filter (APF); SVPWM; switching losses

(上接第 11 页 continued from page 11)

(1. Guangdong Power Dispatch Center, Guangzhou 510600, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Cost allocation and pricing of transmission service are important issues in the transmission open access. Though pure marginal cost pricing method in economics can offer the useful economic information, the scale economic benefits of transmission network can't make the transmission income based on marginal cost pricing satisfy the revenue reconciliation of transmission investment by far. In the perspective of the project, combining with the economic concepts, this paper introduces the transmission cost allocation method which based on power flow decomposition, and presents the improved transmission cost allocation method for the study and calculation of pricing problem after taking the improved measures. It also analyses and compares the results of the calculation cases.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 000397).

Key words: cost allocation; transmission pricing; power flow decomposition

参考文献:

- [1] 熊健,康勇,张凯,等 (XIONG Jian, KANG Yong, ZHANG Kai, et al). 电压空间矢量调制与常规 SPWM 的比较研究 (Comparison Study of Voltage Vector PWM and Conventional SPWM) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics Technology), 1999, 33(1): 25-28.
- [2] 陈坚 (CHEN Jian). 电力电子学 (Power Electronics) [M]. 北京:高等教育出版社 (Beijing: Higher Education Press), 2002.
- [3] 张纯江,刘彦民,邬伟扬,等 (ZHANG Chun-jiang, LIU Yamin, WU Wei-yang, et al). 软开关 AC/DC 变流器中 SVPWM 波形的优化选择 (Optimal Choice of SVPWM Waves for Soft-switched AC/DC Rectifier) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2000, 20(6): 35-38.
- [4] Trzynadlowski A M, Kirlin R L, Legowski S F. Space Vector PWM Technique with Minimum Switching Losses and Variable Pulse Rate [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1997, 44(2): 173-181.

收稿日期: 2003-07-25; 修回日期: 2003-11-24

作者简介:

姜俊峰 (1979 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为灵活电力系统;

刘会金 (1952 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电能质量分析与控制方面的研究及补偿装置的研制与开发。