

提高交流远距离输电 稳定方法的研究

Н. А. 卡察諾娃 B. E. 克魯契柯娃

科学出版社

提高交流远距离输电稳定方法的研究

H. A. 卡察諾娃 著
B. E. 克魯契柯娃
黃 煥 焜 譯

科 学 出 版 社

1958

Н. А. КАЧАНОВА и В. Е. КРУТИКОВА
ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ
УСТОЙЧИВОСТИ ДАЛЬНИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
ИЗДАТЕЛЬСТВО АН УССР

Киев 1955

內 容 介 紹

本書論述了接有中間同步补偿机的远距离輸电系統穩定性,以及有关原动机調速环节各参数对远距离輸电穩定性的影响的研究結果。

在本書第一部分中討論了同步补偿机的电抗补偿、它的慣性常数的增加、补偿机的人工阻尼、突增的强迫激磁、無失灵区的激磁自动調节的作用。

第二部分中討論了包括裝有調速系統的渦輪机,裝有激磁系統的發电机和远距离輸电綫路的电力系統穩定性的分析研究的方法。

本書可供从事于处理电力系統穩定問題的工程师、研究工作者以及大学教师和高年級学生参考之用。

提高交流远距离輸电穩定方法的研究

Н. А. 卡察諾娃 В. Е. 克魯契柯娃著

黃 煥 焜 譯

*

科学出版社出版 (北京朝陽門大街117号)

北京市書刊出版業營業許可證出字第061号

科学出版社上海印刷厂印刷 新华書店总經售

*

1958年4月第一版

1958年4月第一次印刷

(滬) 0001-1,364

書号: 1113 印張: 3

開本: 850×1168 1/32

字數: 71,000

定价: (10) 0.60 元

序 言

蘇聯動力發展的計劃規定要在伏爾加、德聶泊、頓河以及其他河流上建築世界上最大的水電站，並使它們投入運行，同時還要建造很長的輸電綫路。這些輸電綫路是蘇聯歐洲聯合高壓電力網的最重要部分，而這電力網在最近幾年中就要普遍到蘇聯歐洲大部分地區了。

蘇維埃政府關於建築世界上最大的水電站的历史性決議，向科學和技術工作者提出了一系列有趣的和艱巨的任務，這些任務是應當在短時期之內予以解決的。

經 1000 公里或更遠的距離輸送近 1200 兆瓦左右的功率，在蘇聯動力工作者面前就提出了這樣一個任務：提高電力系統並聯運行的穩定。

雖然提高穩定的任務解決了已有幾十年，但是當系統功率數值和輸電綫路長度有了重大的改變時，如何增加系統穩定性的問題却仍要重新發生。

增加電力系統的穩定，在目前實際運行中有着各種不同的方法，但是其中並沒有全部得到很好的研究。

借助中間同步補償機以及借助調速器的作用來降低渦輪機的功率等方法以提高遠距離輸電的穩定性，就是屬於很少被注意的一些方法。

從事於電力系統並聯運行穩定問題的專家們都有過這樣的意見：不論是中間同步補償機，或者是原動機調速器，對於遠距離輸電穩定都是影響很小的。

由於長距離綫路建造的發展，本書作者提出了這個問題作為自己研究的任務。

本書記載这些很少被注意的提高远距离输电稳定問題的研究結果,而这些研究是 1951—1952 年在烏克蘭苏維埃社会主义共和国科学院电工研究所电站和电力系统实验室里进行的。

本書的理論叙述都是經過計算和实验来証实的,因而使得所叙述的提高远距离输电稳定的方法不仅可以从質方面,而且也可以从量方面来評判它的效果。

專論的第一編是技术科学副博士 Н. А. 卡察諾娃 (Качанова) 写的,第二編是技术科学副博士 В. Е. 克魯契柯娃 (Крутикова) 写的。

在提高同步补偿机效果的各种不同方法下远距离输电稳定性的研究,是在斯大林獎金获得者、技术科学副博士 Л. В. 楚喀尔尼克 (Щуверник) 指导下进行的。

原动机調速回路参数对于远距离输电稳定性的影响的研究,是在技术科学博士 В. Л. 依諾索夫 (Иносов) 指导下进行的。

目 录

序言

第 一 編

在提高中間同步补偿机效果的各种不同方法下远距离輸电的稳定性

緒論	1
第一章 帶中間同步补偿机輸电系統的穩态情况和靜态穩定	5
§1. 穩态情况	5
§2. 靜态穩定	7
§3. 中間同步补偿机对輸电靜态穩定影响的試驗校核	13
第二章 帶中間同步补偿机輸电系統的动态穩定	16
§4. 中間同步补偿机机械慣性的影响	16
§5. 中間同步补偿机回路电抗的影响	19
§6. 中間同步补偿机强行励磁的影响	25
§7. 中間同步补偿机的阻尼作用	26
第三章 試驗室的試驗裝置	28
結論	30

第 二 編

原动机調速回路的参数对于远距离輸电穩定影响的研究

緒論	33
第四章 研究的方法	35
第五章 渦輪机的轉矩方程式和調速器調差系数及伺服机时間常数对于系統穩定性的影响	43
第六章 調速器的失灵区对靜态穩定的影响	47
第七章 調整汽輪机功率时容汽体积和調整水輪机功率时引水管道对于系統穩定性的影响	52

§8. 考虑容汽体积时的汽轮机转矩方程式和容汽体积对系统稳定性的影响.....	54
§9. 水轮机功率振荡对于水轮机导向机构位移的延滞时间的考虑.....	54
§10. 按照水轮机工作叶轮的通用特性决定耗水量和水头之间的关系指数	62
§11. 引水管道对远距离输电稳定性影响的考虑	63
第八章 用调速器按线路电流和其导数的比例调节以提高远距离输电的静态稳定	65
第九章 用调速器在线路电流突然变化下的计划调节以提高远距离输电的动态稳定	70
第十章 在调速器由线路电流的计划控制下系统动态稳定的工业性试验	77
結論	85
表示符号	87
参考文献	88

第 一 編

在提高中間同步补偿机效果的各种不同 方法下远距离輸电的稳定性

緒 論

还是在 1936—1941 年間,苏联动力系統的發展已經在动力工作者面前,提出了掌握在 1000 公里或更長的距离上輸送强大电力的任务。

由于要解决交流远距离輸电方面的一系列問題,苏联的学者們对于一个基本問題——提高含有远距离輸电綫路动力系統穩定——的各种方法的探討,予以很大的注意。

帶中間同步补偿机的輸电系統在苏联已經有了很完整的研究,特別是 П. С. 日丹諾夫 (Жданов) 在这方面的工作^[1-4]。他研究了靜态穩定,又帶头研究了帶中間同步补偿机(集中在一个或分布在兩三个变电所中)的輸电系統动态穩定問題。

根据这些研究,已作出了下列的結論:

(1) 如果同步补偿机裝置容量比綫路輸送容量大到 3—4 倍,輸电系統靜态穩定很大的增長是可能的。同时,靜态穩定可以在补偿机同步电抗后的电势恒定的情况下来校驗^[1-2]。

(2) 在同步补偿机裝置容量为輸送容量的 50—100% 的場合,远距离輸电系統不論在靜态穩定方面或动态穩定方面,提高都是不显著的^[2]。

(3) 只有在采用了頂点电压高的(約 4—5 倍左右)和电压

昇高速度快的“强行励磁”的补偿机，动态稳定才会得到很大的提高^[1-3]。

这些结论并没有按照带中间同步补偿机的接线方式来进行实验上的检查。

应当指出，在1921年曾有过美国工程师Φ.巴姆的一篇通报，通报以广告的文体写道：有他的专利的接线方式的动力系统，可以不怕短路、电压波动等等，因为同步补偿机可跟电陀螺相比，是能够立即对电压下降和上升起调整作用的。

Φ.巴姆的文章仅仅是以局部条件对线路的稳态情况和极限容量进行一些基本的、极不准确的推算。在他的文章中既没有理论的分析，更没有工程上的发展观念和它实际可能性的研究。

因而便形成了这样的说法，认为带中间同步补偿机的输电方式“可以令人满意地解决调压问题，而对系统稳定性并不能作出令人满意的结果”^[4]。所以为了提高远距离输电的稳定性，动力工作者就开始探求另外的途径去进行研究。

带中间同步补偿机的远距离输电方式，在以前实际上并没有得到具体的应用。

可以指出的仅仅是康诺维水电站系统于1928年在距离比较短的220千伏线路上所装设的一个中间同步补偿机装置^[6]，而它的运行经验由于上述的关系并没有能够促进对这措施合理性的认识。

由于苏联学者对动力系统人工稳定方面的研究，给问题的解决开辟了广阔的可能性。

人工稳定的理论使得有可能按另一种方式来提出关于中间同步补偿机的问题。在同步补偿机上采用无失灵区的励磁调整器无异于降低它的电抗；因而可以增加容量比较小的中间同步补偿机的效果，这种结论是С. А. 列别杰夫(Лебедев)在他的1940年著作

中指出的^[7]，在这著作中已进行了裝有电子型电压調整器的中間同步补偿机系統的靜态稳定的分析。

在1949—1950年，烏克蘭蘇維埃社会主义共和国科学院电工研究所考虑到同步补偿机使用定子电流的复式励磁的可能性，进行了补充列別杰夫結論的研究工作。

在提出和解决关于中間同步补偿机采用無失灵区的励磁調整器的問題上，必須注意到苏联在这方面的卓越地位^[11]。

在外国近几年来发表的著作中，都抹煞了苏联科学在探討人工稳定和同步电机励磁自动調整問題^[12]，和苏联按中間同步补偿机的輸电方式所取得的研究成果等方面的卓越地位。

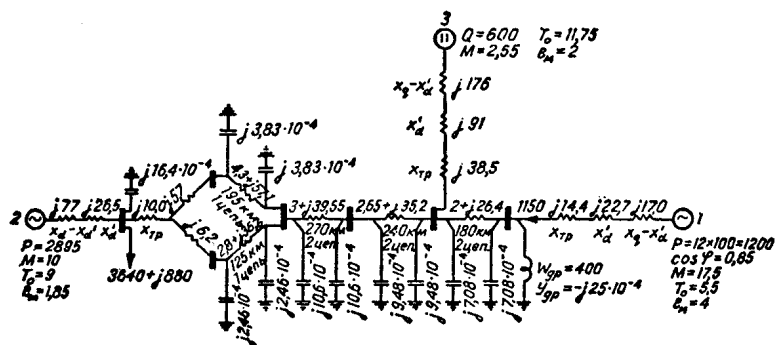
本編的研究課題是探討各种提高中間同步补偿机效果的不同方法对远距离輸电稳定性的关系，同时还考虑了这些不同方法的相互联系。

在本書第一編中，我們要討論下列几个問題：

- (1) 中間同步补偿机机械慣性的增加；
- (2) 中間同步补偿机回路电抗的减小（补偿机和变压器本身电抗的减小，回路电抗用靜电容电器的縱补偿）；
- (3) 中間同步补偿机依照轉子絕对的或相对的轉速的人工阻尼；
- (4) 中間同步补偿机励磁的自动調整（在这里和在以后所指的都是無失灵区的自动調整）；
- (5) 中間同步补偿机的强行励磁。

帶中間同步补偿机輸电系統稳定性的計算和試驗，都是适合于古比雪夫——莫斯科400仟伏双回路輸电方案中的某一种結綫方式来做的，但不考虑綫路电抗的縱向补偿。用来作靜态稳定和动态稳定計算的輸电系統等值电路和同步补偿机的参数，如圖1所示。

上述輸电系統动态稳定的計算是以綫路正常情况，即輸送功



1—送端發電站； 2—受端系統的等值發電站； 3—同步補償機。

电阻以欧姆表示,电导以姆欧表示,并且都是折算到 400 仟伏
級的;功率以兆瓦和兆伏安表示;慣性常数和時間以秒表示。

率等于 1150 兆瓦为根据的。在计算时受端系统由一个等值发电站来替代。

以發電站母綫附近 400 仟伏綫路的三相短路規定为动态破坏的情况,除按短路切除所允許的極限時間的比較計算外,短路切除時間是取作 0.12 秒。

短路的消除是假定由接近送端發电站的一段綫路(單回路,綫段長为 180 公里)的切斷來實現的。

理論上的結論已在远距离輸电的實驗室电机模型上进行了實驗上的檢查(远距离輸电的實驗室模型和动态过程的說明,參閱第三章)。

本書不准备討論帶中間同步补偿机的輸电系統某种方案在設計上的選擇和論證的問題。因此，在这里不拟作詳細的經济技术上的比較，而只考虑了有关投資費用、运行費用的比較數值和运行可靠性等一般情况，来研究上述措施的技术效果。

对于在两个变电所上设置中间同步补偿机的方案,本书也不加以研究,因为这种设置原则上的合理性已经有了分析^[2],而在实

实际設計时也只需要从經济技术观点上的方案比較。

第一章

帶中間同步补偿机輸电系統的 穩态情况和靜态穩定

§ 1. 穩态情况

从許多文献資料中^[1,5],可以知道帶中間同步补偿机的輸电系統穩态計算的各种圖解法和分析法。所有这些方法都是非常复杂的。

計算帶有中間同步补偿机輸电系統的穩态情况,本書則將采取比較簡便的圖解分析法。

圖 2 所示的是 400 仟伏輸电系統穩态情况的功率特性曲綫,这些曲綫是在正常运行情况的結綫方式下,考虑了綫路分布系数而制作出来的。对不同事故后的运行情况也可以作出类似的曲綫。

从圖 2 中可以看到,例如在綫路始端輸送功率 $P=1.0$,而送端發電站 400 仟伏母綫、补偿机和受端系統母綫的电压等于正常数值 ($U_1=U_2=U_K=1$) 时,輸电綫路始端和終端电压矢量的相角差为 52° 。同时,同步补偿机所需的功率 $Q_{c.K} \approx 0$ 。

在綫路空載运行而电压等于正常数值 ($U_1=U_2=U_K=1$) 时,同步补偿机所需的感性功率是綫路正常輸送功率的 0.4 倍。

如果要在給定的輸电系統具体运行情况下来进行設計計算,利用上述輸电系統穩态情况的功率特性曲綫,就可以很容易决定出同步补偿机所需的感性功率和容性功率。

当决定了同步补偿机功率綫路始端和終端电压矢量以及补偿

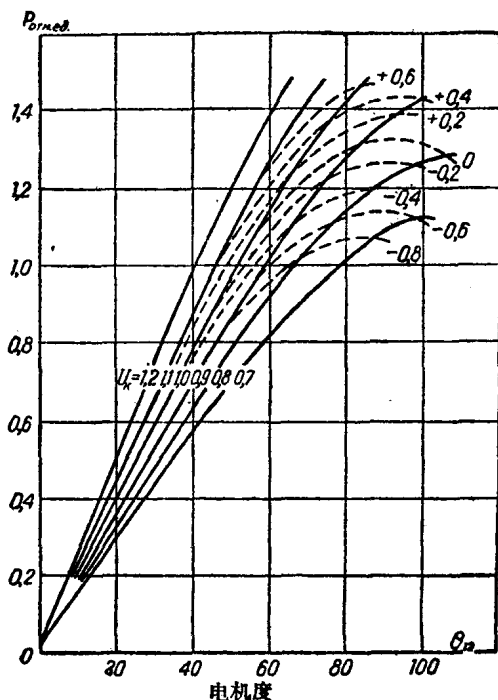


圖 2. 在輸電系統穩態情況下決定中間同步補償機功率的特性曲綫—— $P=f(\theta_{12})$, $U_k=\text{常数}$.

$\cos \phi_k = \text{常数}$; $+Q$ 表示容性功率; $-Q$ 表示感性功率; U_1 和 U_2 是輸電綫路始端和終端的电压, $U_1=U_2=1.0$; U_k 是同步補償機接入点的电压; $P_{\text{基準}}=1180$ 兆瓦; $Q_{\text{基準}}=1150$ 兆瓦.

机接入点的电压矢量之后,計算輸電穩態情况的其他参数也就不困难了.

从許多已作出的特性曲綫可以看到,以古比雪夫—莫斯科輸電型式來說,按照綫路的調压条件在穩態情况下不論是滿載运行或空載运行,近于正常輸送功率 0.6 倍的中間同步補償機裝置功率对于輸電的所有接綫方式(双回路,一回路的綫段被切除)都是足够的.

同时,在空載情況下就無需于中間变电站里裝設電抗綫圈以降低綫路中点的电压了。例如,以上述的輸电方案來說,如果沒有中間同步补偿机,中間变电站里就要裝設容量为 300 兆伏安的电抗綫圈。

按照主要跟綫路突然切除時有關的情況來看,電抗綫圈只有裝在送端發電站母綫上才是适当的。

§ 2. 靜態穩定

在一般簡化前提(原动机轉矩不变,負載动态特性不考虑)下分析靜態穩定時,动力系統可以当作一个复杂的振盪系統來看待,其中包括着:

(1)跟同步轉矩有着彈性般联系的电机轉子的“机械”振盪系統;

(2)同步电机励磁自动調節的“电气”振盪系統。

這兩個系統是相互联系着的,因为發電机电压和电流是跟着电机轉子的相角差而变的,而同步轉矩又跟發電机励磁等有关。

这样的复杂振盪系統靜態穩定的破坏,既可以是非周期性的,也可以是振盪性的(自振盪)。

烏克蘭蘇維埃社会主义共和国科学院电工研究所在分析發電机励磁自动調節对远距离輸电穩定的影响的研究工作中指出:自振盪所引起的穩定破坏是在这样的条件下發生的,就是所研究的动力系統在运行情况变化的过程中,“机械”系統的自由振盪頻率非常接近于“电气”系統的振盪頻率^[30]。

因为“机械”系統自由振盪頻率是由一定的条件來決定的,而这些条件只可以在不大的程度上使其受到影响的(例如,設計远距离輸电綫路時),所以就可以得到这样的結論:引致大型动力系統自振盪的主要原因之一,就是励磁調整器特性選擇得不恰当。

因此,对于通过远距离輸电綫路而運轉的發電站的發電机來

說,“机械”和“电气”系統的自由振盪頻率相互之間必須有显著的差別。

理論和实验都指出:在綫路輸送功率比允許的極限功率小得很多的場合,違反上述的条件便会發生自振盪。

这种对發电机励磁調整器所提出的一般要求,也应当可推广到帶中間同步补偿机的輸电系統。

帶中間补偿机远距离輸电的“机械”振盪系統可以由三个發电站来代表(远方發电站——中間补偿机站——受端電力網)。

如果把受端電力網看作为無限大功率的母綫,那末我們所感兴趣的“机械”振盪系統就具有兩極的自由度。

由兩個相对“摆角”来标志的兩個主要的自由振盪的运动系統是可以分开的。這兩個主要系統的振盪頻率可以相应地来决定,其中一个是跟發电机参数有关,而另一个跟补偿机参数有关。

从質方面来分析,發生自振盪可能是由于励磁自动調整裝置的“电气”系統自由振盪頻率和“机械”系統中某一主要頻率相符合之故。从这个观点可以作出如下的結論:要使自振盪的可能性减小,必須尽力使兩個“机械”系統的主要振盪頻率彼此差得很大,或者相反地差得很小。

我們不拟在这个問題上作深入的討論,因为励磁自动調整系統的具体探討应当是屬於專門研究的課題。我們只在中間同步补偿机按电流和电压偏差比例調整励磁的情况下,来一般地分析远距离輸电靜态稳定提高的可能性。

在采用無慣性自动調整器来进行励磁的比例調整,同时又考虑到發电机和同步补偿机中的电磁暫态过程时,三个發电站系統所得到的运动微分方程式的阶就会高到这样的程度,以致这个方程式不可能以一般的方式来分析。

我們現在来作出几个簡化的假定。假定受端系統由無限大功率母綫来代表。其次,只拿补偿机轉子中的暫态过程来考虑,而略

去了發電机以及同步补偿机励磁机中的电磁暂态过程,从本編的任务来看,补偿机轉子中的暂态过程是主要的。

考虑了上述的情况,对簡單的如圖 3 所示的系統來說,我們可假定:有中間同步补偿机存在,而补偿机是通过帶輔助电压校正器的励磁机由补偿机定子电流来复激的,發電机沒有自动調节励磁并且是运行于無限大功率系統,励磁机的延滯時間將不考慮;阻尼作用也只考虑补偿机的。

像这种在分析靜态穩定时所采用的假定,我們也將用来研究电机的自由振蕩。同时,如果拿离开初始情况的小偏差来討論,同步电机的运动微分方程式的非綫性是可以略去不計的,从而使問題綫性化。

变动量將以其对初始情况的偏差来代替。

略去了發電机中的暂态过程,便可以写出下列的关系:

發電机和补偿机的轉子运动微分程式是

$$M_r p^2 \Delta \delta_r = -\Delta P_r; \quad (I, 1)$$

$$M_k p^2 \Delta \delta_k + D_k p \Delta \delta_k + D_{k,r} p (\Delta \delta_k - \Delta \delta_r) = -\Delta P_k; \quad (I, 2)$$

补偿机励磁繞組中暂态过程的微分方程式是

$$T_{o.k} p \Delta E'_{dk} = \Delta E_{de.k} - \Delta E_{dk}; \quad (I, 3)$$

而励磁調整方程式是

$$\Delta E_{de.k} = k \Delta I_k - b \Delta U_k; \quad (I, 4)$$

这里, $\Delta \delta$ 是轉子的角偏差; ΔI_k 是补偿机定子电流的变化; ΔU_k 是补偿机电压的变化。

解方程式(I,1) — (I,4), 便可以得到运动微分方程式:

$$p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5 = 0. \quad (I, 5)$$

方程式各項的系数可求得如下:

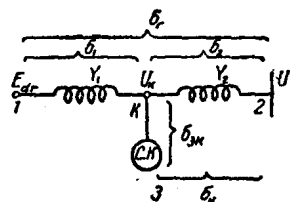


圖 3. 分析靜态穩定用的輸電系統簡圖。

$$\begin{aligned}
a_1 &= \frac{D_K + D_{K,r}}{M_K} + \frac{h}{T'_{dK}}; \\
a_2 &= \frac{P_{\delta K}(P_{\delta_1} + P_{\delta_2})}{M_K \sum P_{\delta}} + \frac{P_{\delta_1}(P_{\delta_2} + P_{\delta K})}{M_r \sum P_{\delta}} - \frac{P^2}{U_K^2 M_r \sum Y'} + \\
&\quad + \frac{(D_K + D_{K,r})h}{M_K T'_{dK}}; \\
a_3 &= \frac{1}{T'_{dK}} \left\{ \left[\frac{P_{\delta K}(P_{\delta_1} + P_{\delta_2})}{M_K \sum P_{\delta}} + \frac{P_{\delta_1}(P_{\delta_2} + P_{\delta K})}{M_r \sum P_{\delta}} \right] h - \right. \\
&\quad \left. - \frac{P^2(1 - k' \sum Y')}{U_K^2 M_r \sum Y'} \right\} + \\
&\quad + \frac{1}{M_r M_K} \left\{ \frac{P_{\delta_1}[P_{\delta K}(D_K + D_{K,r}) + P_{\delta_1} D_K]}{\sum P_{\delta}} - \frac{P^2(D_K + D_{K,r})}{U_K^2 \sum Y'} \right\}; \\
a_4 &= \frac{1}{M_r M_K \sum P_{\delta}} \left[P_{\delta_1} P_{\delta_2} P_{\delta K} - \frac{P^2(P_{\delta_1} + P_{\delta_2}) P_{\delta K}}{U_K^2 \sum Y'} \right] + \\
&\quad + \frac{1}{M_r M_K T'_{dK}} \left\{ \frac{P_{\delta_1}[P_{\delta K}(D_K + D_{K,r}) + P_{\delta_1} D_K] h}{\sum P_{\delta}} - \right. \\
&\quad \left. - \frac{P^2(D_K + D_{K,r})(1 - k' \sum Y')}{U_K^2 \sum Y'} \right\}; \\
a_5 &= \frac{1}{M_r M_K \sum P_{\delta} T'_{dK}} \left\{ P_{\delta_1} P_{\delta_2} P_{\delta K} h - \frac{P^2 P_{\delta K}(P_{\delta_1} + P_{\delta_2})(1 - k' \sum Y')}{U_K^2 \sum Y'} \right\}.
\end{aligned} \tag{I,6}$$

式中的符号：

$$\sum Y = Y_1 + Y_2 + Y_{dK} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_{dK}}; \tag{I,7}$$

$$\sum Y' = Y_1 + Y_2 + Y'_{dK} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X'_{dK}}; \tag{I,8}$$

$$\sum P_{\delta} = P_{\delta_1} + P_{\delta_2} + P_{\delta K} = \frac{\partial P}{\partial \delta_1} + \frac{\partial P}{\partial \delta_2} + \frac{\partial P}{\partial \delta_{dK}}; \tag{I,9}$$

$$k' = k \frac{Y_{dK}}{\sum Y'}; \tag{I,10}$$

$$b' = b \frac{Y_{dK}}{\sum Y'}; \tag{I,11}$$