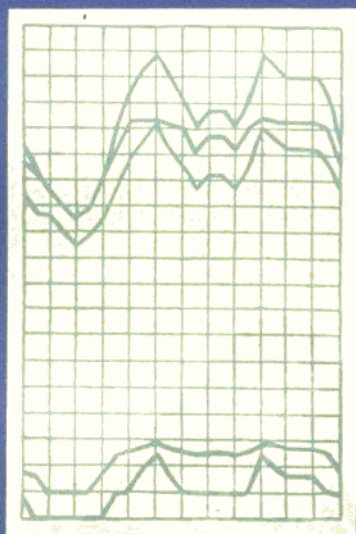


併列运行的發電廠間 最經濟的負荷分配

苏联B. M. 葛倫施切因著



電力工業出版社

原 序

本書討論在併列運行的發電廠間確定最有利的負荷分配的方法和實際步驟。

書中詳細討論了鍋爐(第二章)及汽輪機(第三章)試驗結果的整理步驟，以便獲得用以解決上面所提問題的原始資料，同時也詳細討論了編繪發電廠全廠特性曲線的方法(第四章)。

此外，在尋求發電廠間最有利的負荷分配時，也說明了計算電力網中的綫路損失(第九章)和發電廠內的廠用电量(第六章)的步驟。

在第七、第八兩章中，特別討論了確定整個系統最有利的發電廠(泥煤發電廠、水力發電廠)負荷曲線外形的方法，而這些發電廠在動力資源的消耗方面都是指定的。

有關確定發電廠機組起動、停用的次序及經濟性問題，也很注重討論(第五章)。

為使本書能夠切合實用和便於使用，書中附有汽輪機的典型特性曲線和鍋爐的平均特性曲線。在許多地方都附有例子(特別是在第四、第五、第八及第九等章中)。

所有計算方法及計算步驟都是這樣選擇的，即準備原始資料雖然花了很多時間，但把所獲得的資料應用到變動的運行情況下並不需要花費很多的勞動力。

本書中所敘述的方法大多數都不是很明顯的。其中有許多甚至和運行工作人員中已有的見解恰恰相反。

因此，關於所採用方法的證明和根據佔去了很多的篇幅。

為了使豐富的證明不至於妨礙將本書當作參考資料應用，作

者安排資料時極力使讀者能夠不讀證明，就可利用其實際步驟。

在書中所述的許多方法，都是由作者首創的，例如在第九章中所述的電力網中綫路損失的計算方法（已在1938年“發電站”雜誌上發表過），以及關於確定在指定燃料消耗量的條件下工作的發電廠及水力發電廠的日負荷曲綫最有利的外形問題等。

本書首先討論在不連續特性曲綫的情況中分配負荷的方法，這對以後計算發電廠的廠用電和在水力發電廠、火力發電廠間分配負荷具有很大的作用。

本書中所採用的基本原理和方法，已於1946年5月、8月在蘇聯電站部技術協會會議上經過了廣泛的討論。

在討論過程中所提出的批評意見，在準備手稿付印時已加以採用。

作者對所有參加討論者表示深切的謝意，特別是技術科學博士П.С.日丹諾夫及И.М.馬可維奇，技術科學碩士А.К.戴爾門切夫及К.А.斯密爾諾夫和工程師М.М.別洛烏索夫等，他們曾經提出許多寶貴的指示。

目 錄

原 序

導 言	7
-----------	---

第一章 微增耗率法的基本观念及其理論	14
--------------------------	----

第1節 負荷、耗能量及損失的單位	14
------------------------	----

第2節 機組、發電廠的各種經濟特性曲綫及其間的關係	16
---------------------------------	----

第3節 當運行機組數目固定時，發電廠間及各機組間負荷分配的基本原則	20
---	----

第4節 在連續的微增耗率特性曲綫的情況下微增耗率法的推求	24
------------------------------------	----

第5節 微增耗率特性曲綫的連續性有間斷點時微增耗率法的应用	28
-------------------------------------	----

第6節 耗煤量特性曲綫連續性間斷點的計算	34
----------------------------	----

第二章 鍋爐及鍋爐分場的的特性曲綫，各鍋爐間的	
-------------------------	--

負荷分配	36
------------	----

第1節 鍋爐標準的、最高的、經濟的及最低的負荷	36
-------------------------------	----

第2節 根據試驗資料繪制鍋爐的微增耗煤率及耗煤量特性曲綫	38
------------------------------------	----

第3節 鍋爐的平均特性曲綫	41
---------------------	----

第4節 如遇試驗資料缺乏或不完善時，以及虽有試驗資料但要簡化計算時，平均損失特性曲綫在近似地繪制微增耗煤率特性曲綫上的应用	49
---	----

第5節 各鍋爐間的負荷分配及編制鍋爐分場的微增耗煤率表	53
-----------------------------------	----

第6節 在運行的鍋爐機組數目各不相同時繪制鍋爐分場的微增耗煤率特性曲綫	54
---	----

第7節 燃料品質及鍋爐情況變化對其特性曲綫的影響	57
--------------------------------	----

第8節 確定鍋爐特性曲線的準確度和進行修正及簡化的步驟	61
第三章 汽輪發電機及汽輪機設備的特性曲線，各汽輪發電機間負荷的分配	66
第1節 汽輪機特性曲線的形狀和繪制凝汽式汽輪機特性曲線 的實際步驟	66
第2節 把汽輪發電機的特性曲線化到指定的冷卻條件	75
第3節 真空降低的及背壓式的汽輪機	81
第4節 抽汽式汽輪機的特性曲線	83
第5節 汽輪發電機間電力負荷的分配及發電廠汽機分場的特性曲線的繪制法	95
第6節 設有前置式汽輪機的热力設備的特性曲線	100
第7節 汽輪機間供熱負荷分配的基本原則	109
第8節 在編制汽輪發電機及汽輪機設備的特性曲線時對運行 情況的考慮	115
第四章 發電廠的特性曲線及發電廠間負荷的分配	117
第1節 整個發電廠的特性曲線	117
第2節 發電廠間的負荷分配	119
第3節 發電廠特性曲線的編制及系統各發電廠間負荷分配的 實例	120
第五章 發電廠機組起動及停用的經濟性的確定	157
第1節 總論	157
第2節 機組起動和停用的特殊條件	160
第3節 在發電廠範圍內鍋爐昇爐及停爐的經濟性的確定	161
第4節 在發電廠範圍內，汽輪機起動及停用的經濟性的確定	167
第5節 從整個動力系統的观点出發，對根據本章第3節第4 節進行計算所得的結果的適宜與否的評價	170
第6節 在不大的動力系統中對整個系統機組停用的經濟性的 計算	172
第7節 對巨大動力系統的機組起動及停用經濟性的計算方法	172
第8節 確定在本章第三節中所討論的系統內機組起動及停用	

經濟性的例題	174
第六章 發電廠廠用電量的計算	189
第1節 廠用电量對負荷分配的影響	189
第2節 發電廠廠用電的分類	191
第3節 發電廠特性曲綫經過第一類廠用機組用电量修正的步驟	195
第4節 第二類機組用电量的計算	205
第5節 在確定機組起動或停用的經濟性時廠用電的計算	207
第6節 在考慮廠用电量時所能容許的簡化方法	208
第七章 在動力系統的特殊運行條件下發電廠間的負荷分配	210
第1節 在發電廠中有一個發電廠燃料不足時的負荷分配	210
第2節 當發電廠中之一的燃料消耗量為指定數值時發電廠間的負荷分配	211
第八章 和火力發電廠併列運行的水力發電廠日負荷曲綫的形狀的確定	224
第1節 一般觀念	224
第2節 水輪機的特性曲綫	227
第3節 在各種壓力頭下水力發電廠的特性曲綫	229
第4節 在指定的上游水位下，水力發電廠的耗水量特性曲綫及其微增耗水率特性曲綫	231
第5節 上游水位變化的計算	239
第6節 水力發電廠和火力發電廠間負荷分配的特殊情況	242
第九章 在發電廠間分配負荷時電力網中綫路損失的計算	243
第1節 發電廠微增耗煤率進行損失修正的方法的結論	243
第2節 輸電電力網中沒有環形回路時，兩發電廠間互饋綫路中的微增損耗率	248
第3節 兩發電廠以任一複雜電力網互相聯系的情況	250
第4節 當環形回路的綫路係數為一復數的情況	256
第5節 任意數目的發電廠以具有同一結點的星形電力網互相	

联系的情况	260
第6節 具有若干結点的电力網的情况	261
第7節 具有环形回路的复雜电力網的一般情况	263
第8節 在电力網中选择一点以决定微增綫損率	264
第9節 抽取負荷变动的的影响	266
第10節 在計算微增綫損率时所能容許的各种簡化	268
第11節 当发电厂有功負荷改变时无功負荷隨着改变的情况	270
第12節 計算微增綫損率及修正发电厂微增耗煤率的实例	275

導 言

蘇維埃動力工作者主要任務之一，便是要使動力系統運行達到最大的經濟性。

除與各發電廠人員工作有關的各項因素（維持設備在良好的狀態，及時的檢修，工作表面的清洗，各機組運行方式的正確掌握等）外，對系統及各機組的運行經濟性有重大的影響的還有發電廠間與發電廠內各機組間的負荷分配。

1939年，聯共（布）第十八次代表大會通過了決定進一步發展蘇維埃動力事業的決議。

為了達到交通運輸業不載運低質燃料（莫斯科近郊煤、頁岩、泥煤等）的目的，地方燃料基地的加速發展容許在這些燃料的產區內大力建造發電廠。這些發電廠往往和用電中心區遠隔200—300公里，因而要以高壓電力網把這些發電廠和用電中心區聯繫起來。

這就加速了並增強了各發電廠聯成為巨大動力系統的併合過程。

根據聯共（布）第十八次代表大會的決議採用，建築巨大的水力發電廠以及最新的動力技術——高壓、高溫蒸汽，最新式的供熱式汽輪機，也會造成和上述相似的結果。

戰後幾年中，根據恢復和發展蘇聯國民經濟的五年計劃，蘇聯電力系統的容量增大、伸展愈廣和複雜性增加的過程又獲得了更加巨大的規模。

系統間出現了互連綫路，這促使最巨大的統一的系統——中央動力系統、南方動力系統、烏拉爾動力系統形成。

动力工作者的主要任务之一——在运行上达到最大的經濟性——在巨大而複雜的动力系統的条件下具有新的特性。

如果發電厂运行的經濟性主要決定於已經安裝的設備的特性与適當的維護，那末，在複雜的系統中，和这些因素同样起巨大作用的便是發電厂間的正确負荷分配。

系統愈大愈複雜，系統中使用各种燃料的發電厂的种类及型式(凝汽式、供热式、水力發電厂)愈完全，則發電厂間的負荷分配对运行經濟性的影响便愈大，有关發電厂間負荷正确分配問題的解决便愈複雜。

本書討論在各發電厂間确定負荷分配的各种方法，使在整个系統运行上獲得最大的經濟性。

在系統上的各發電厂間分配負荷时，还須考慮到为了必須保証运行可靠性所提出的要求：如在系統上適当地分佈备用容量，保証特別重要用戶的安全供电，保証發電厂併列运行的穩定度等。所有这些問題应对各个系統个别解决。

本書僅討論动力系統运行的經濟性問題。

評定动力系統运行經濟性所根据的主要指标如下：

- 1) 發電厂發電的标准煤消耗量；
- 2) 發電厂的厂用电量；
- 3) 電力網中的电能損失(綫路損失)。

所有这些指标都決定於發電厂間的負荷分配。

例如，使远离用电中心的最經濟的發電厂增加負荷，固然可以减少發電用的标准煤耗率，但却增加了電力網中的綫路損失。

最有利的負荷分配，是使供給用戶的每度可用电量消耗最少的标准煤量。

供給每度可用电所用的标准煤量，顯然是整个系統运行經濟性的真正准繩，它可以代替上述所有的「片面」指标。

可是有許多情况，特別是供給用戶的可用电难以准确确定，

妨碍我們採用这个指标作为动力系統运行的主要指标。

無論如何，在評定旨在提高系統运行經濟性的各种措施的採用是否合理时，应当以所提的措施对这个指标的影响作为依据。

發電和配电过程中的最大損失，是發生在發電厂的热力設備中。

例如，近代凝汽式發電厂的效率約为25—28%，即燃燒燃料所產生热量的70%以上是在發電时在热力設備(鍋爐、汽輪机)上損失了。

火力發電厂的厂用电是損失中的一种，其值在發電量的4%至12%的範圍內变动。

電力網中的綫路損失一般为5到15%。

因之，系統运行的經濟性首先決定於發電厂設備的經濟性，而在很小程度上決定於電力網中的綫路損失和厂用电量。

發電厂間負荷的最有利分配，也首先決定於發電厂設備的特性。計及厂用电量和電力網中的綫路損失和不計这些指标所求得の負荷分配，普通只有很小的变化。

因此，以后要特別注意热力設備(鍋爐及汽輪机)的特性，这些特性是發電厂間負荷分配的主要根据。

要計及这些因素，只須对不計厂用电量及綫路損失而編制的發電厂特性曲綫進行修正即可。

發電厂运行的經濟性是以标准煤耗率的數值來表示。

各別机組的經濟性也是以其單位耗热量(單位燃料消耗量)或效率來表示。

單位耗热量及效率的數值不但在机組及發電厂运行的評價上，並且还在許多运行計算上被廣泛採用。

使用这些數值的習慣，也使人想应用他們來解决有关發電厂間最有利的負荷分配問題。

其結果是使这种錯誤方法得到更普遍的採用，以致造成了燃

料的浪費。

例如，如能使單位耗量最低(效率最高)的機組(發電廠)首先載荷，往往是有利的，並且可以節約燃料；這已是很普遍的一個錯誤觀念。

在一個最簡單的例子中，就可很容易地証實這個觀念是不正確的。

在圖 0-1 中表示兩台容量各為 10 千瓩的汽輪發電機每小時的標準蒸汽總耗量及標準蒸汽單位消耗量與其負荷的關係曲綫。

單位耗汽量以公斤/度或(同樣地)噸/千度表示。

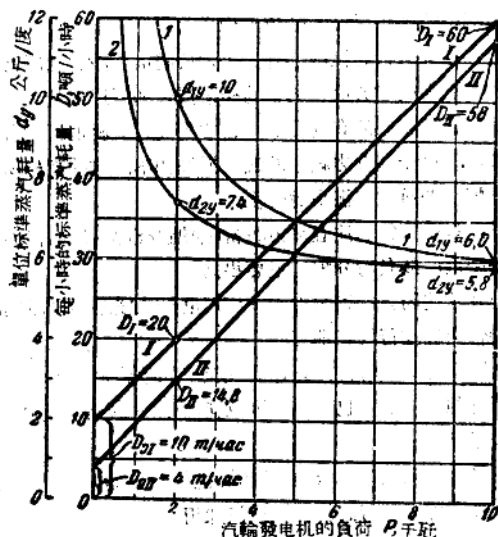


圖 0-1 兩台汽輪發電機(т.г.)的特性曲綫

1-1—т.г.1的單位耗汽量；2-2—т.г.2的單位耗汽量；

I-I—т.г.1 每小時的耗汽量；II-II—т.г.2 每小時的耗汽量。

从圖 0-1 可以看到，在所有的負荷下，1 号汽輪發电机每小时的总耗汽量及單位耗汽量(曲綫 I-I 及 1-1)都比 2 号汽輪發电机的(曲綫 II-II 及 2-2)高。

因此，如需在这兩汽机間分配負荷(例如 12 千瓦)，根据流行的观点，就得使比較經濟的 2 号汽輪發电机載全負荷(10 千瓦)，而使 1 号汽輪發电机承当其余的 2 千瓦。

这时，标准蒸汽的消耗量为：

对 1 号汽輪發电机	$2 \times 10.0 = 20.0$ 噸/小时
对 2 号汽輪發电机	$10 \times 5.8 = 58.0$ 噸/小时
总計	78.0 噸/小时

然而，在本例中，最經濟的情况恰好是使最不經濟的 1 号汽輪發电机載全負荷(10 千瓦)，而使 2 号汽輪發电机承当其余的 2 千瓦負荷。

这时的标准蒸汽耗量为：

对 1 号汽輪發电机	$10 \times 6.0 = 60$ 噸/小时
对 2 号汽輪發电机	$2 \times 7.4 = 14.8$ 噸/小时
总計	74.8 噸/小时

換言之，在本例中，首先使最經濟的 2 号机組載全負荷，將比最經濟的負荷分配多耗 3.2 噸/小时或 4.1% 的蒸汽。

如果再回來看看圖 0-1 中所繪的总耗汽量和負荷的关系特性曲綫(耗汽量特性曲綫)，这个結果是很容易解釋的。

从圖 0-1 上可見，它們都是一条直綫，並且可以用下式表示：

$$D_I = 10 + 5.0P_1 \text{ 噸/小时 (1 号汽輪机)}$$

$$D_{II} = 4 + 5.4P_2 \text{ 噸/小时 (2 号汽輪机)}$$

$$\text{总計} \quad 14 + 5.0P_1 + 5.4P_2 \text{ 噸/小时}$$

換言之，如果兩台汽輪机同时运行(当負荷大於 10 千瓦，其

中任一臺都不能停用時)，則使（無負荷耗汽量除外的）微增耗汽率總共為 5.0 噸蒸汽/千度，亦即耗汽量特性曲綫較平的 1 號汽輪機載荷，以代替微增耗汽率為 5.4 噸/千度的 2 號汽輪機，就可獲得最小的總耗汽量。

可以舉一系列類似的例子來說明其他廣泛使用的，根據單位耗量或效率對比來分配負荷的方法是錯誤的。

例如，認為維持最經濟機組的負荷在相當其最高效率（最低的單位耗量）的水平上，而由效率最低的機組承當剩下的負荷是有利的觀點也是錯誤的。

又如，如能降低所有機組（或所有發電廠）的單位耗煤量總是有利的，可以節約燃料的，這個觀念也完全和實際情況不相符合。

從以後的說明可以看到，在解決有關各發電廠間及各機組間負荷分配的問題時，能起主要作用的是所謂「微增耗率」，亦即在變動負荷下的微增耗量，或者更準確地說，即耗量對負荷的導數^①。因此，這個尋求負荷最有利分配的方法，稱為「微增耗率法」。

在系統的各發電廠間及在發電廠內的各機組間求得最有利的負荷分配的方法，是遵照同一的理論根據的。但是在發電廠內，所有問題的解決却都要簡單得多。

此外，在發電廠內分配負荷時可以計及許多細節，而這些在系統內分配負荷時，實際上是無法考慮的，而且也不需要考慮。因為系統內具有眾多的機組，這些機組又裝在若干發電廠內。

因此，在系統內以及在發電廠內尋求最有利負荷分配的實際方法在許多情況中是各不相同的。

本書討論在動力系統中各發電廠間負荷分配的方法。

發電廠內負荷分配的問題僅在這種情況下才提到，即負荷分

① 這個數量的物理觀念是當負荷增加每 1 單位容量時所增加的燃料（熱）耗量（導數）。

配問題在了解整個動力系統所採用的方法時是需要的話。

發電廠間負荷的分配是由調度組或運行方式組的工作人員，一般是由電工人員負責的。因此，本書對熱工人員所需要的基本熱力學上的問題也作了解釋（熱量單位間的比值等）。

在說明中所採用的主要是電工上所用的數量符號。

第一章 微增耗率法的基本觀念及其理論

第 1 節 負荷、耗能量及損失的單位

在火力發電廠內，電能生產的過程是把燃料的熱能變換成為電能（而在中心熱電廠內，還有一部分的热能，以蒸汽或熱水的形式供給用戶）。

發電廠在燃燒燃料時所獲得的热量，系按燃料的低位發热量 Q_n^p （即將燃料中所含的以及燃料在燃燒過程中所形成的水分蒸發而消耗的热量扣去后的發热量）來估計的。

在所有計算中，原燃料的消耗量 B_{nam} 都可按下式換算為標準煤的消耗量 B_{ycl} （標準煤的發热量為 7000 大卡/公斤或 7.0 百萬大卡/噸）：

$$B_{ycl} = B_{nam} \frac{Q_n^p}{7000} \quad (I-1)$$

這樣，一噸標準煤實質上即為耗熱量的單位。

其他各種耗熱量單位中最常用的是百萬大卡（мгннал）。

蒸汽汽輪機的耗熱量和鍋爐的熱力負荷常常按其所消耗的（對汽輪機而言）或所產生的（對鍋爐而言）蒸汽來近似地估計。這樣按儀表（蒸汽流量計）讀數估計對發電廠的人員是很方便的，但對準確計算是不適用的，因為蒸汽的規範（溫度及壓力）在運行過程中是變動的，因而其含熱量也是變動的。

另一方面，大多數機組的負荷或耗熱量，決定於隨蒸汽輸出的（或取得的）熱量和返回熱量的差值。

例如，鍋爐分場的熱力負荷決定於送與汽機分場的蒸汽熱量和自汽機分場給水取回的熱量的差值。

同时，給水温度决定於汽輪机的負荷，因而其含热量也是如此。

因此，在准确計算时，就应利用耗热量的單位來代替蒸汽消耗量的單位。

普通採用百万大卡或者有时採用每噸“标准蒸汽”或含热量为 640 大卡/公斤的“标准”蒸汽作为耗热量的單位。

640 大卡/公斤是在 1 絕對大气压下的饱和蒸汽的含热量。随着运行中所采用的压力、温度的增加，蒸汽的实际含热量已和 640 大卡/公斤相差越多，而标准蒸汽已变为越来越陈旧的一个观念(和“标准煤”一样是陈旧的观念)。但是，由於給水回热加热的發展，在大多数的近代設備中，由設備取得的或輸出的每公斤蒸汽的热量已和 640 大卡相差很少。

例如，目前最普遍採用的中压新蒸汽的含热量为 760—780 大卡/公斤，而給水温度为 120°C — 150°C ，兩者差值即为 610—660 大卡/公斤。

由於这样，在以后的說明中蒸汽机組的負荷和耗汽量將以“噸标准蒸汽”表之，这使工作人員所运用的数字接近於(准确度在 5% 以上)仪表測出的数字，並易於參考。

为了節約篇幅起見，我們將採用“蒸汽”代替“标准蒸汽”。在需要“原蒸汽”时將另加說明。

用电量、标准煤消耗量及耗热量等常用單位的比值，列在表 I-1 中。

从表 I-1 中，我們求得 P 換为 Q 的乘数 $K=0.860$ ，即汽輪机的負荷为 $20 \times 0.860 = 17.2$ 百万大卡/小时。

如果負荷(鍋爐)或耗汽量(汽輪机)以原蒸汽量來表示，則当蒸汽含热量已知时，可按式換算为标准蒸汽：

$$D_{cm} = D_{nam} \frac{i}{640} \quad (1-2)$$

表 I-1

从一种单位换算为其他单位的乘数

顺序	名 称	符号	单位	换 算 用 的 乘 数			
				P	Q	B_y	D_{cm}
1	电力	P	千瓦	1.000	0.860	0.123	1.342
2	热负荷	Q	百万大卡/小时	1.161	1.000	0.143	1.561
3	每小时标准煤消耗量	B_y	吨/小时	8.14	7.000	1.000	10.920
4	每小时标准蒸汽消耗量	D_{cm}	吨/小时	0.744	0.640	1.0915	1.000

例：汽轮机的负荷 $P=20$ 千瓦；试将其换算为热量单位(百万大卡/小时)。

式中 i ——按 Is 图或表(任何热工手册中都可查到)中确定出来的 1 公斤蒸汽的含热量。

当有返回的热量时，公式(I-2)变为下式：

$$D_{cm} = D_{kam} \frac{i - i_a}{640} \quad (I-3)$$

式中 i_a ——从被消耗的 1 公斤蒸汽中返回的热量。

对锅炉而言， i_a 在数字上就等于给水的温度。

对于汽轮机，特别是供热式汽轮机， i_a 的算式可能稍为复杂一些(决定于返回凝结水的百分率及其他的情况)。

第 2 节 机组、发电厂的各种经济特性曲线及其间的关系

为了在各机组间分配负荷，下列的特性曲线具有最大的功用(图 I-1)：

- 1) 耗量特性曲线——每小时的总耗能量与其负荷间的关系；
- 2) 损失特性曲线——能量损失的绝对值(千瓦、百万大卡、吨标准煤)与其负荷间的关系；
- 3) 微增耗率特性曲线——微增耗率(即耗量对负荷的导数)与其负荷间的关系。