

動力系統中的 頻率自動調整

蘇聯 阿·葛·莫斯卡列夫著

重慶工業出版社

12

序

頻率的自動調整是比較年輕的自動技術部門，總共不過二十多年。但蘇聯動力系統的蓬勃發展，尤其是在戰後的期間，就把有關頻率自動調整的廣泛運用問題提到了日程上。由於偉大的斯大林共產主義建設（古比雪夫水電廠、斯大林格勒水電廠和齊姆良水電廠）的投入運行，在蘇聯的歐洲部分建立了強大的聯合動力系統，其中就需要研究頻率調整的新的複雜的問題。

書中論述技術文獻中很少討論的問題，所用的原理有許多是還沒有經過運行經驗證明的未確定的觀點。書中反映出蘇聯科學研究機構、生產機構以及個別科學工作者的成就。

本書主要是以從事運行方面的工作人員為對象，因此著者力圖使理論材料和實際應用相聯系。本書也可使動力和電工院系的師生發生興趣。

著者對大力校閱原稿的姆·姆·別洛烏索夫表示衷心的感謝。

著者懇請把所有的批評和建議寄送下列地址：莫斯科水閘河岸街 10 號國立動力出版社電工書籍編輯部。

著者

目 錄

序	
緒 論	6
第一章 頻率變動對於系統運行經濟性的影響	8
1-1. 問題的提出	8
1-2. 頻率變動對於發電廠運行的影響	8
1-3. 頻率變動對於電能用戶生產率的影響	11
1-4. 頻率對於動力系統中有功和無功電能耗用量的影響	12
1-5. 頻率變動對於電力網損耗的影響	13
1-6. 頻率變動對於系統中基底負載機組(發電廠)負載的影響	14
1-7. 頻率變動對於電度表讀數的影響	15
第二章 選擇動力系統中調頻機組和發電廠類型的經濟指標	15
2-1. 選擇動力系統中調頻機組和發電廠的基本原理	15
2-2. 調頻發電廠中鍋爐類型的經濟選擇	17
2-3. 負載變動時的汽輪機經濟選擇	18
2-4. 頻率發電廠的經濟選擇	20
第三章 選擇動力系統中調頻機組和發電廠的技術指標	25
3-1. 選擇頻率發電廠中鍋爐類型的技術論據	25
3-2. 選擇調頻汽輪機類型的技術論據	27
3-3. 選擇調頻發電廠的技術論據	28
第四章 動力系統中的調頻法	29
4-1. 基本情況	29
4-2. 靜滯特性曲線法	31
4-3. 靜滯度等於零的特性曲線法	32
4-4. 主導發電機法	33
4-5. 理想靜滯性法	35
4-6. 理想靜滯度等於零的特性曲線法	37
4-7. 同步時間法	40

4-8.	調頻和同步時間的聯合法	42
4-9.	同時根據靜滯的和靜滯度等於零的特性曲線的調整法	43
4-10.	功率靜鎖調整法	44
4-11.	頻率系統法	46
4-12.	內部靜滯性法	47
第五章	自動調整動力學理論的基本概念	50
5-1.	調整系統的概念	50
5-2.	動態過程穩定性的概念	51
5-3.	自動調整系統中的環節	51
5-4.	古爾雅茨的穩定性準則	62
5-5.	阿·夫·米哈依洛夫的穩定性準則	65
5-6.	那依克維斯特 米哈依洛夫的穩定性頻率準則	68
5-7.	保證調整過程穩定性的方法	68
第六章	渦輪機的調速器	71
6-1.	基本情況	71
6-2.	汽輪機的調整器	71
6-3.	水輪機的調整器	77
第七章	調頻的任務和參數	82
7-1.	問題的提出	82
7-2.	調整的參數和範圍	82
7-3.	調準準確度和靜滯誤差	85
7-4.	根據規定方法進行調整的能力	85
7-5.	許可的改變負載速度	86
7-6.	調整過程穩定性的保證	87
7-7.	構造簡單和運行可靠	87
7-8.	調頻器的結構原理	88
第八章	調頻器的測量機件	90
8-1.	對於測量機件的要求	90
8-2.	具有 rL 迴路的測量機件	90
8-3.	具有 rC 迴路的測量機件	92
8-4.	用 rC 和 rL 並聯迴路的測量機件	93
8-5.	用 CrL 和 r 並聯迴路的測量機件	94

8-6.	中間導線上接入 CrL 迴路的差動式相位感應線路圖	98
8-7.	用頻率電橋的測量機件	102
8-8.	用頻率濾波器*的測量機件	106
第九章	放大機件	112
9-1.	繼電器式放大器	112
9-2.	電子式放大器	113
9-3.	離子式放大器	114
9-4.	電機式放大器	115
9-5.	磁式放大器	117
第十章	普·普·奧斯特磊的調頻器	119
10-1.	動作和結構原理	119
10-2.	用各種調整法時的調整器運行分析	121
10-3.	調整器的特性曲線	123
10-4.	調整器的調準	125
第十一章	電業技術改進局-莫斯科動力學院所擬製的 調頻器	127
11-1.	動作和結構原理	127
11-2.	用各種調整法時的調整器運行分析	131
11-3.	調整器的特性曲線	131
11-4.	調整器的調準	133
第十二章	磁濾波器式調頻器	134
12-1.	動作原理	134
12-2.	磁放大器式調整器的穩態特性曲線	138
12-3.	用各種調整法時的 $MФЧ$ 型調整器運行分析	142
12-4.	靜滯變壓器和分配有功負載的裝置	144
12-5.	負反饋聯系	146
12-6.	調整器的調準	147
第十三章	動力系統中調頻的穩定性	149
13-1.	動力系統中調頻系統的結構圖	149
13-2.	調頻系統中環節的特性方程	151
13-3.	根據米哈依洛夫和那依克維斯特-米哈依洛夫的 準則的分析法	157

13-4. МФРЧ-201 型調頻器調整過程的穩定性分析	159
13-5. 渦輪機和調速器的類型對調頻過程的影響	161
13-6. 調載器對於調頻穩定性的影響	162
第十四章 決定調頻系統中某些環節的特性曲線的方法	163
附 錄	167

緒 論

生產過程的自動化就是能在社會主義社會中創造使勞動生產率空前增長，因而使國內富裕的先決條件的技術部門。最大程度的自動化促使腦力勞動和體力勞動界限的消滅。因此，在從社會主義過渡到共產主義的期間，生產過程的自動化具有非常重大的意義。

在動力系統中，每一時刻所產生的電能在數量上必須滿足當時的需要（因為電能不能儲藏的），同時電能也必須有很好的質量，因此自動裝置的作用就大大地提高。

和電壓一樣，頻率是電能質量的主要指標之一。隨着國民經濟電氣化的增長，對於電能質量的要求，尤其是在頻率方面，大大地提高了。

頻率對額定值的偏差，破壞了發電廠的運行方式，照例使燃料消耗過量。系統中頻率的下降，使工廠中機械的生產率降低，並使發電廠主要機組的效率降低。頻率的上升也使發電廠機組的效率降低，使電力網絡中的損耗增加。

現時頻率自動調整的問題包括經濟和技術方面問題的廣大範圍。頻率的調整成為電動機及機器過程的調整。調整的需要是和機器本身同時出現的。

自動調整器在工業上的應用是由著名的俄國發明家伊·伊·波耳祖諾夫開始的。他在1765年把浮標式水位調整器應用到自己的「火力作用機」中。在機器中應用了調整器，就出現了閉合的動力體系，但這個系統停留了一百餘年而未被研究。在這個時期學者們祇根據不與被調整物品聯系的調整器的性質來推求建立穩定調整系統的規律，他們的企圖皆無結果。傑出的俄國學者伊·阿·維施聶格拉德斯基首先研究閉合動力系統（機器和調整器一起），他理應被認為是自動調整理論的創始人。

在自動調整理論基礎的發展方面，俄國和蘇聯的學者處於領導地位。除前面已經提過的伊·伊·波耳祖諾夫和伊·阿·維施諾格拉德斯基以外，阿·姆·里雅普諾夫和恩·葉·茹柯夫斯基是創造自動調整和運動穩定性理論的最傑出的人材。在蘇聯學者恩·恩·沃茲諾先斯基，阿·恩·安德羅諾夫，夫·夫·索洛陀夫尼柯夫，姆·阿·阿依捷爾曼等的工作中，這個理論獲得了進一步的發展。

當一個完全確定的頻率值適應於每個負載時，如果根據靜滯特性曲線來進行調整，則常常不能滿足保持頻率的高度要求。因此，隨着動力系統的發展就開始使用特殊的調頻器。

蘇聯的第一個調頻器是由工程師普·普·奧斯特磊擬製並在1937年9月裝置在斯維爾斯基水電廠中。蘇聯中央電業科學研究所和電業技術改進局以後就擬製了更為完善的調頻器。

動力系統的擴展起初需用一個發電廠的幾個機組來調頻，而以後就需用幾個發電廠。為此，就提出了能保證動力系統穩定運行和高度頻率質量的許多方法。

現在在蘇聯的許多動力系統中實行了頻率的自動調整，並且這些系統的數目不斷地增加。

第一章 頻率變動對於系統運行經濟性的影響

1-1. 問題的提出

轉動機組總是設計得使其最高效率發生在一個完全確定的轉速的時候，就是在額定轉速的時候。現時絕大多數的轉動機組是和電機聯着的。

電能的生產和消耗主要是在交流方面，因此絕大多數的轉動機組是和交流的頻率有關係。實際上發電機發出的交流的頻率是和渦輪機轉速有關係，交流電動機轉動的機械的轉速又和頻率有關係。

交流頻率對額定值的偏差在各方面對於和動力系統運行經濟性有關係的各式機組以及各式儀表和電器都發生影響。

1-2. 頻率變動對於發電廠運行的影響

汽輪機及其葉片設計得使其在額定轉速(頻率)和進汽沒有衝擊時能保證在軸上發生最大可能的功率。減低轉動頻率就產生蒸汽打擊葉片的損耗，同時增加了轉矩；提高轉動頻率就減低轉矩並增加對葉片背面的打擊。渦輪機在額定頻率時的運行最為經濟。

此外，頻率降低時的運行使渦輪機葉片和其他零件的磨損加快。

頻率的變動對於發電廠廠用機械的運行發生影響。

在任何運行情況下，發電廠廠用機械必需可靠地運行。現在討論下列主要廠用機械在頻率對額定值發生偏差時的性能：給水泵、循環水泵、抽風機、打風機。

把水頭只消耗在克服系統中動阻力壓頭的水泵的輸水量是和轉速成正比

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1-1)$$

有了靜阻力壓頭這個方程就不能用。在這種情況下，水泵的輸水量對角頻率的關係由下式表示。

$$Q = \sqrt{\frac{k_1 \omega^2 - H_{cm}}{\Sigma R}}, \quad (1-2)$$

其中 ω ——角頻率；

H_{cm} ——被克服的靜壓頭；

ΣR ——輸水管的阻力；

k_1 ——和機組結構及大小有關係的恆定係數。

有了靜壓頭，在不等於零的某一頻率時，水泵就停止給水。這個頻率叫做臨界頻率。根據這個定義，臨界頻率可用下面公式表示：

$$\omega_{kp} = \sqrt{\frac{H_{cm}}{k_1}}. \quad (1-3)$$

從(1-3)式中可以看出，水泵的臨界頻率是和靜壓頭及水泵的結構參數有關係，而和輸水管及給水系統中所包括的其他元件的阻力完全無關係。

必需克服鍋爐中高壓力的電動給水泵是處在繁重情況之下，在高汽壓的發電廠中，繁重情況就特別加深起來。

在圖1-1中表示臨界頻率等於45.8赫的給水泵的實驗和計算的特性曲線。

從以上所述可知，電動給水泵的輸水量和交流電網的頻率的關係很大。即使在頻率降低量相當小時，水泵可能完全停止鍋爐的給水，於是鍋爐運行的安全和發電廠以及整個系統的運行可靠性就受到威脅。

為了保證發電廠的安全和可靠的運行，給水泵一般地選擇得使其在額定頻率時所發出的壓力等於需要值的1.5—2.5倍。後面數字使廠用電能的消耗超額。

電網頻率對額定值的提高使水泵發出的壓力超過所需壓力的倍數更高，因此使廠用電能的消耗更大。於是剩餘的壓力就被用節流方法消耗在壓力調整器的閥上，或在進水調整器上，就是

說，無用地消耗了。

電動循環水泵的運行情況要比給水泵順利些。從水面升高度不大的河中取水的水泵的情況尤其簡便。在有冷卻塔或噴水池的發電廠中，水面提升很高，臨界頻率很大，因此水泵的輸水量就和頻率有很大的關係。

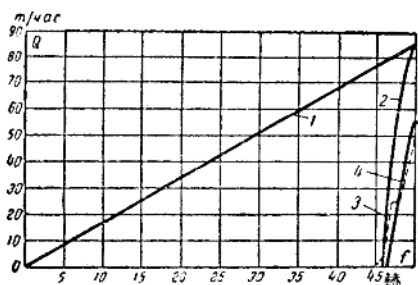


圖 1-1 電動給水泵的頻率特性曲線

- 1—電動給水泵在沒有反壓力時的特性曲線；
2—根據方程(1-2)的原理而製造的電動給水泵的特性曲線；3—給水泵第一試驗的特性曲線；
4—給水泵第二試驗的特性曲線。

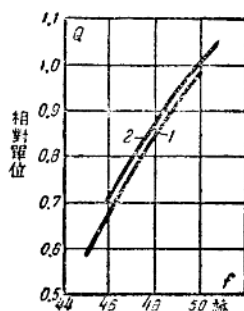


圖 1-2 由試驗求出的循環水泵頻率特性曲線

- 1—一號試驗；
2—二號試驗。

圖 1-2 表示必須克服 14 公尺靜壓頭的電動給水泵的試驗特性曲線。

頻率對額定值的降低減少汽輪機凝汽器的耗水量，這就減低凝汽器中的真空，因此降低汽輪機的效率，也就是增加耗汽量。頻率對額定值的增高增加汽輪機凝汽器的耗水量和電能的消耗。該時凝汽器中絕對壓力^①降到計算值以下，也有時使凝結體過度冷卻。此外過渡減低絕對壓力就會增加汽輪機因排汽速度而發生的損耗（因為降低絕對壓力會增加蒸汽體積，但通過的截面並未改變）。因此循環電動水泵中頻率的降低會減低汽輪機的效率（增加耗汽量），而頻率的增高就增加因供給冷卻水而消耗的電能，同時增加了耗汽量。

① 按照原文應譯成真空，但譯成絕對壓力在意義上比較適當些。——譯者

除水泵以外，在發電廠中有大量具有打風機式力矩的機械（一次風打風機、二次風打風機、抽風機），其在沒有靜壓頭時的輸氣量是和頻率成正比。但動力系統中所進行的試驗指出，在頻率減低時，打風機和抽風機的輸氣量降低得比頻率快得多。在頻率增加時，打風機和抽風機所產生的壓力大為增加。和輸氣量（壓力）降低時一樣，這種情況破壞鍋爐的運行情況。

鍋爐組的經濟性決定於爐的排氣中的一氧化碳和二氧化碳的含量及燃燒室內的過剩空氣的含量。一氧化碳和二氧化碳的含量和所供給的空氣量以及排出的氣量有關係。因此，鍋爐運行經濟性首先依靠抽風打風裝置運行的情況。

在頻率降低時，打風機的輸氣量減低，這就是說進入爐中的空氣量要少些。這樣就增加化學不完全的燃燒損失，並且減低排氣的損失。在頻率增加時，打風機的輸氣量提高，因此減低化學不完全的燃燒損失，並且增加排氣的損失。鍋爐組中的最低損失一般發生在一定的過量空氣（二氧化碳的含量）的時候。這樣，系統頻率的變動就破壞鍋爐組的運行情況。

在頻率增加時，鍋爐進水所消耗的電能（電動給水泵的電能消耗）也增大，這就增加鍋爐設備的總損失。

1-3. 頻率變動對於電能用戶生產率的影響

電能用戶的機械和機組根據其與頻率關係大小的程度而分成五組：

第一組，頻率變動對於其發出的功率沒有直接影響的用戶。屬於這種用戶的有：照明負載，電弧爐，阻抗電爐，整流器和被其供電的負載。

第二組，功率的變動和頻率成正比的機械。屬於這種機構的有：金屬切削機床，球磨機，壓縮機。

第三組，功率和頻率平方成比例的機械。這種機械的抵抗力矩是和頻率成正比。真正具有這樣抵抗力矩的機械是沒有，但許多特殊機械的抵抗力矩是和這種很接近。

第四組，具有打風機式力矩，並且功率和頻率立方成比例的機械。靜阻力壓頭很小或等於零的打風機和水泵屬於這種機械。

第五組，功率和頻率的更高次方成比例的機械。靜阻力壓頭很大的水泵(例如發電廠的給水泵)就屬於這種機械。

後面四組用戶的生產率在頻率降低時就減少，在頻率提高時就增加。初看起來，提高頻率似乎對用戶的運行有利，但這遠非事實。

在電動機額定轉速時，就是說，在額定頻率時，工作的機械一般是處在有利情況中。

此外，感應電動機的轉矩隨着頻率的增加而減少，如果電動機的容量沒有富裕，就能使機組卡住和停轉。

1-4. 頻率對於動力系統中有功和無功電能耗用量的影響

中央電業科學研究所進行的試驗，以及負載特性曲線的分析指出，在接入的用戶的負載額定功率不變時，頻率和應有功功率的數值之間具有可用下列方程近似

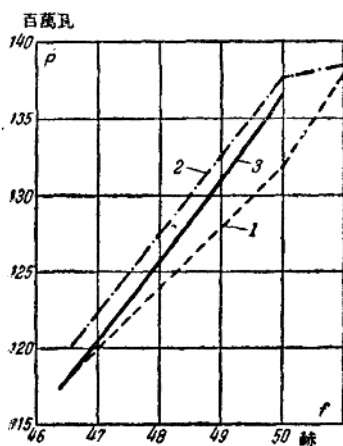


圖 1-3 動力系統有功負載的頻率靜態特性曲線

1—頻率降低時；2—頻率提高時；

3—理想曲線 $\frac{P_1}{P_2} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2}$ 。

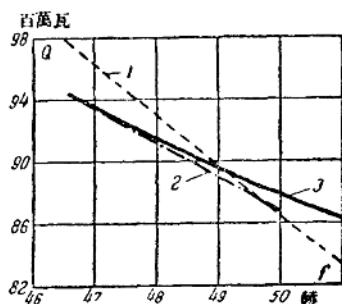


圖 1-4 動力系統無功負載的頻率靜態特性曲線

1—頻率降低時；2—頻率提高時；

3—理想曲線 $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$ 。

表示的關係：

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\omega_1^n}{\omega_2^n}, \quad (1-4)$$

其中 n 是在 1 與 2 間變動的數目。

在許多動力系統中這個關係很和平方接近(圖 1-3)。

在頻率降低時，可把大功率的用戶接入；但該時所有機械要在功率降低情況下運行。在發電出力不足時，要對所有用戶用電限制而又不願用戶停電，就常利用動力系統的這種特性。

在頻率降低時，系統中的無功電能增加。無功負載消耗量對頻率的關係可表示成下列方程的一般形式

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1^n}{\omega_2^n}, \quad (1-5)$$

其中 n 通常是在 1 與 2 間變動(圖 1-4)。

在負載相對增加時， n 的值也增加。

1-5. 頻率變動對於電力網損耗的影響

根據前面得出的關係可以求出電力網損耗對頻率的關係。

衆所週知，銅耗約佔電力網中損耗的 85%，變壓器中的銅心損耗祇佔其 15%。後者是和頻率的 1.2—1.3 方成正比。假設無功負載和頻率成反比與有功負載和頻率的平方成正比，又為簡化起見假設電力網中的損耗由銅耗來決定，就得出

$$I_a = \frac{P_n}{U} \cdot \frac{\omega^2}{\omega_n^2},$$

$$I_p = \frac{Q_n}{U} \cdot \frac{\omega_n}{\omega},$$

其中 P_n ——額定頻率時的系統有功負載；

Q_n ——額定頻率時的系統無功負載；

ω_n ——額定頻率。

假設電力網的等效電阻等於 R ，可根據楞次和焦耳的定律把電力網的損耗用下列方程表示：

$$\Delta W = I^2 R = \frac{R}{U} \sqrt{P_n^2 \frac{\omega^4}{\omega_n^4} + Q_n^2 \frac{\omega_n^2}{\omega^2}}. \quad (1-6)$$

在系統的 $\cos \varphi$ 等於 0.8—0.85 時，電力網損耗的變動大約是和頻率平方成比例。

1-6. 頻率變動對於系統中基底負載機組（發電廠）

負載的影響

系統中各機組間負載的調度分配根據相對增量的方法來進行。用了這個方法就可達到經濟上最有利的發電廠間和機組間的負載分配。根據這個方法得出的負載量是在各機組中的一定頻率值時訂定的（例如在頻率 f_n 時的負載 P_0 ）。

因為根據波耳祖諾夫的原理，汽輪機調速器具有下降的靜態特性曲線，那末在系統中頻率從 f_n 降到 f_1 時，該汽輪機的負載就從 P_0 增加到 P_1 （圖 1-5）。和該汽輪機負載變動的同時，系統中的其他汽輪機的負載也變動。因為系統中全部汽輪機以及其供汽的鍋爐裝置的相對增長特性曲線並不相同，系統就不是處在最有利的運行情況。

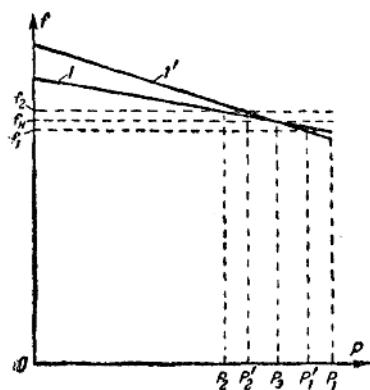


圖 1-5 能在系統頻率變動時決定汽輪機組負載變動的特性曲線

同樣地，在系統頻率從 f_n 增加到 f_2 時，該汽輪機的負載從 P_0 減低到 P_2 。由於許多原因，在一個動力系統中運行的各汽輪機中，其調速器特性曲線具有不同的斜度（圖 1-5 中的曲線 1 和 1'），因此在頻率變動時，各汽輪機的負載變動就不相同。例如在頻率從 f_n 降低到 f_1 時，第一個汽輪機的負載從 P_0 增加到 P_1 ，而第二個汽輪機的負載則從 P_0 增加到 P_1' 。

這樣一來，且以及發電廠的規定負載發生變動，因而破壞系統的經濟運行情況。

1-7. 頻率變動對於電度表讀數的影響

在現時的交流電力網中幾乎都使用感應電度表。

圖 1-6 表示感應電度表的誤差對負載的關係。曲線 1 表示在額定頻率時的關係，曲線 2 表示在 52.5 赫時的關係，曲線 3 表示 47.5 赫時的關係。

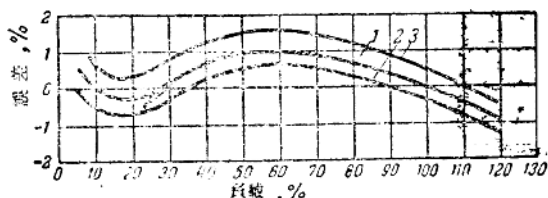


圖 1-6

頻率的降低使電度表的讀數比在額定頻率時的讀數高些，而頻率的增加則使讀數低些。感應電度表的讀數因頻率變動而產生的誤差，在頻率變動 1% 時一般是在 0.1% 左右。

第二章 選擇動力系統中調頻機組和發電廠類型的經濟指標

2-1. 選擇動力系統中調頻機組和發電廠的基本原理

保證發電廠和動力系統的經濟運行是動力系統中自動調頻的主要目的。不保持頻率在額定值，以及不在動力系統中併聯運行的機組間和發電廠間進行負載的最有利的分配，就不能達到動力系統運行的經濟性。

爲了在幾個併聯運行的機組(發電廠)間進行負載的最有利的分配，必須具有該機組的特性曲線——標準煤(汽)耗對負載的關

係。這些特性曲線的一般形式可用下列方程表示：

$$G_1 = G_{01} + b_1 P_1^{n_1},$$

$$G_2 = G_{02} + b_2 P_2^{n_2},$$

$$G_3 = G_{03} + b_3 P_3^{n_3},$$

其中 G_1, G_2, G_3 ——標準煤(汽)耗；

G_{01}, G_{02}, G_{03} ——標準煤耗中與負載無關係的部分；

b_1, b_2, b_3 ——單位有效功率耗用量。

在負載增加時，燃料消耗也增加。現已證明，如果負載增加時的相對增量是增長的，則在下列的燃料消耗的相對增量相等時，就可達到負載的最有利分配

$$\frac{dG_1}{dP_1} = \frac{dG_2}{dP_2} = \frac{dG_3}{dP_3} \quad (2-1)$$

如果負載增加時的相對增量是減少的，那末方程(2-1)就對應於負載的最壞分配(燃料消耗最大)。

系統的總負載按照全日負載曲線圖時刻地變動，因此爲了在機組間和發電廠間實現上述的負載分配原則，就必需不斷地改變系統中全部機組的情況。在自動調整設備不完備或不具有時，上述情況就要過量消耗燃料，因爲過渡情況中的鍋爐效率要比穩態時的低些，因此過渡中的相對增量就和穩態時的不同。根據以上所述，最好把機組間的負載分配得使絕大多數的機組和發電廠在系統負載小量變動(在5—10%以下)時的運行情況不變。在負載特性改變時，最好的情況就是使機組(發電廠)的主要部分担负對應於相對增量相等的條件的負載，並用機組很小部分的負載變動來抵銷負載的小量斷續波動。

在分配併聯運行機組間的負載時，必需力圖使全部機組在效率最高的範圍內運行。這樣就可保證最低的燃料消耗。

担负抵銷全部計劃外的負載變動的任務的機組，就是担负調整系統頻率的任務的機組，必需滿足下列要求：

a) 具有高的效率；

6) 具有緩傾斜的效率對負載的關係曲線，就是說，在很大的