

頻率和有功功率的 自动调节

(脉冲式調整器)

苏联П.П.奥斯特雷著

電力工業出版社

序

最近的10—15年以來，作者所設計的頻率和有功功率調整器在蘇聯的許多動力系統中得到了廣泛的應用^①。

本書的目的是要把蘇聯動力系統中應用這種調整器的經驗介紹給讀者。

書中闡明下列問題：

a) 頻率和功率的調節原理；

б) 調整裝置的設計；

в) 調整裝置的整定和運行。

本書是以作者在蘇聯的動力系統中研究、試驗和使用調整器的經驗作為基礎的。

由於本書的篇幅所限，作者不能夠充分地闡述關於頻率和功率調節的所有問題。特別是書中關於調節理論的問題遠比實際問題所佔的篇幅為小。因此，在書中列出了參考文獻的索引，從這些文獻中讀者可以較詳細地了解調節的理論。

В. Н. 列文，評閱者 В. Н. 多曼斯基教授和 В. А. 羅曼諾夫教授以及編輯 А. А. 沃羅諾夫和 А. С. 烏謝爾審查了原稿並給予了寶貴的指示，作者表示感謝。

關於本書內容的所有意見與希望，請寄到列寧格勒，聶伏斯基 28，Л. О. 國立動力出版社。

作者

^① 見 П. П. 奧斯特雷發明權證書 55293 號——“交流發電機的自動頻率調整裝置”，1939。

目 录

概論	4
第一章 利用透平机調速器实现的动力系統的頻率調节	8
1-1. 透平机的調速器	8
1-2. 調速器的特性	10
1-3. 机組間負荷冲动的分配	16
1-4. 調节特性曲綫的移动范围	20
1-5. 頻率变化的特性	22
1-6. 結論	23
第二章 动力系統的靜态与动态特性	26
2-1. 总論	26
2-2. 动力系統全部机組的有效調节有差度	26
2-3. 負荷調节效应	29
2-4. 动力系統的靜态特性	30
2-5. 动力系統的动态特性	35
2-6. 結論	46
第三章 动力系統靜态与动态特性的試驗決定法	49
3-1. 总論	49
3-2. 动力系統中全部机組的有效調节有差度(K_1)之決定	52
3-3. 动力系統靜态負荷特性(K_2)之決定	54
3-4. 主导机組功率的变化速度与数值 T_2 之決定	56
3-5. 动力系統頻率的变化速度与数值 T_1 之決定	57
3-6. 机組变速机构电动机的轉速之決定	58
3-7. 为使机組功率改变 1 兆瓦所必需的电动机轉数(N) 之決定	59
3-8. 根据試驗所得的数据来决定 K_1 、 K_2 、 T_1 及 T_2 之值	60
3-9. 結論	63
第四章 动力系統中頻率和有功功率的自动調节	63

4-1. 自动调节的方法	64
4-2. 主导电厂間負荷分配的准确度	76
4-3. 頻率調整器不灵敏区(ϵ^*)的選擇	77
4-4. 結論	82
第五章 “电力盤”工厂生产的自动頻率調整器和自动有功功率調整器	86
5-1. 調整器構造上的特点	86
5-2. 自动頻率調整器	90
5-3. 自动功率調整器	94
5-4. PO-1 型調整器的技术数据	96
5-5. PO-2 型調整器的技术数据	97
5-6. 結論	97
第六章 頻率和有功功率自动調整裝置的安裝設計	98
6-1. 总論	98
6-2. 动力系統中主导电厂(按頻率)的選擇	99
6-3. 自动調整裝置的選擇	101
6-4. 調整裝置的結綫圖	104
第七章 脉冲式頻率調整器和功率調整器的整定和投入运行	110
7-1. 准备工作	110
7-2. 調整器的整定	111
7-3. 頻率調节过程的整定	114
7-4. 單一机組功率調节过程的整定	127
第八章 PO-1 型和 PO-2 型頻率和功率調整器的运行	128
8-1. 总論	128
8-2. PO-1 型自动頻率調整器与 PO-2 型自动功率調整器的 維持說明書	130
8-3. PO-1 型自动頻率調整器的运行說明書	131
8-4. PO-2 型自动功率調整器的运行說明書	132
附录 关于确定水力机組負荷变化的時間常数(T_{21})和透 平机組負荷变化的時間常数(T_{21})的一些試驗結果	134
参考文献	138

概 論

随着苏联国民經济电气化事業的發展，生产电能以及將它輸送到用戶处的过程的自动化获得日益广泛的应用。

过去用手將电压、频率和有功功率保持在一定水平上的方法满足了运行的条件，现在这种方法已經不能滿足了。

自动电压調整器，自动重合閘裝置，动力系統事故自动減負荷裝置及其他裝置等的广泛应用可以视为采用自动裝置的光輝范例。

随着电厂和电網的自动化，动力系統中频率和有功功率的自动調节具有愈益重大的意义。几乎所有的电能用戶都提出了將所發交流电流的频率保持在 50 ± 0.5 赫芝範圍內的要求，这个範圍是技术运行規程（見 § 1087^①）所允許的。从动力系統本身来看，对于保持频率不变的要求还要更加严格，并且随着动力系統的扩大，这些要求更加提高了。

大家都知道[参考文献 13, 14, 18]，机組频率和有功功率的自动調节保証着：

- a) 火力發电厂及水力發电厂电能生产的經濟性的提高；
- б) 电能質量的提高；
- в) 發电厂各机組之間以及当發电厂和系統并列运行时，發电厂和系統之間負荷的正确与經濟分配；
- г) 發电厂和系統并列运行时穩定条件的改善；
- д) 值班人員劳动强度的減輕。

在一般的負荷变化情況下，用手調节频率可以維持频率

① 參閱我国电力工業技术管理暫行法規 § 1077。——譯者

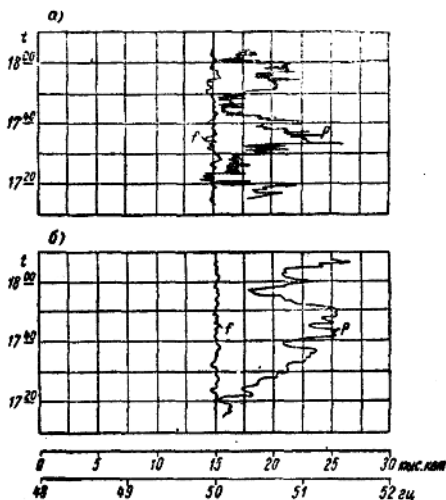


圖 1 手动(a)与自动(b)頻率調節的曲綫圖
 f —頻率; P —機組負荷。

在 50 ± 0.2 赫芝的水平上。这个准确度是靠值班人員用令人疲乏的劳动来达成的，他要用特別仔細的态度来調節。

頻率調節过程的自动化可以保證很高的調節准确度，其值能达到 50 ± 0.01 赫芝左右^①，并且也解除了值班人員疲憊的劳动。

为了对調節方法进行比较与评价，在圖 1 中列出了手动与自动頻率調節的曲綫，其中还表示了主导機組的負荷变化。

手动頻率調節是依靠在透平机附近直接对其調速器施以作用，或借助于移动調速器特性曲綫的电力驅動機構在远处

^① 必須指出，实际上这样高的准确度是不必要的，而在某些情況下（例如，当調整頻率的機組台数不多时）甚至是有害的。

对透平机调速器施以作用来实现的。

主导电厂的值班人员观察着频率表的读数，当频率变化时，改变机组的负荷，从而对频率进行调节。

自动频率调节是利用对调速器发生作用（其作用与手动调节相似）的调整装置来实现的。

调整装置包括着频率调整器、功率调整器、中间继电器和其他的辅助设备（控制键、按钮、信号器具、等等）。

频率和功率调整器具有测量频率和功率对于给定值的偏差的测量元件和作用于移动机组调速器特性曲线的电力驱动机构的执行元件[参考文献4]。当被测量（频率、功率）对给定值发生偏差时，调整器即改变机组的负荷。

在自动调节的实践中，主要应用着下述几种调节方法：

- 1) 利用透平机调速器，按其有差特性曲线来调节频率；
- 2) 利用调整装置按照系统的积分角来调节频率，其指标是电钟对天文钟的偏差值。
- 3) 按照频率的瞬间偏差来调节频率（在给定的水平上调节或按照频率调整器的有差特性曲线来调节）；
- 4) 按照三个读数（频率、功率和时间）来综合地调节频率；
- 5) 按照两个读数（线路的负荷和频率）来调节具有系统间交换功率的监察装置的联合动力系统的频率；
- 6) 按经济指标来调节系统的频率和各机组的负荷。

上述的自动调节方法是用透平机的调速器来实现的或将其与自动频率调整器组合在一起来实现[参考文献1—3]。

调整器的调节作用是由测量出来并经过转换以后的频率，负荷与时间的数值所产生的。

调整器可能作成连续作用的，也可能作成断续作用的[参考文献4, 13, 18]。

連續作用的頻率調整器[參考文獻 19]，只是在最近才開始採用，目前還只安裝在某些少數動力系統中，而在大多數發電廠和系統中運用的則是業已長時期運用的斷續作用的（脈沖式的）頻率調整器。

脈沖式調整器于 1937 年第一次裝設在斯維爾斯基水電站。由於此後在系統中成功地運用了這種調整器，故引起了在工廠的條件下進行製造的必要性。

以下將研究應用由“電力盤”工廠出品的 PO-1 及 PO-2 型調整器來調節發電機的頻率和有功功率的問題。然而所闡述的材料中絕大部分也可以在採用其他型式的調整器時應用。

第一章 利用透平机調速器實現的 动力系統的頻率調節

1-1 透平机的調速器

在現時，有差离心式調速器是在实际中应用的唯一类型的原动机調速器。动力系統中几乎全部透平机沒有例外地都用这种类型的調速器。

沒有調速器，則蒸汽透平和水輪机的工作是不可能的，因为当通过透平机的蒸汽或水的消耗量固定而用戶的負荷变化时，頻率將在極大的範圍內变化[参考文献 6]。用戶和电力系統在保持頻率不变方面所提出的要求只能靠移动調速器特性曲綫的方法以改变透平机的蒸汽或水的入口的大小来满足。

下面將簡略地研究最簡單的透平机調速器的作用原理和工作情况。

近代透平机所应用的調整裝置，由下列諸元件組成：

- a) 測量元件(摆)，
- б) 执行机构(閘)，
- в) 調整机构(节流閘或导水翼)，
- г) 裝有手动或远距傳动(电傳动)裝置的改变轉速的机构。

圖 2 表示出調整机組轉速的簡化原理圖。

調整器按以下方式进行工作：当透平机轉子的轉速升高时，接合器 M 在旋轉重球 T 的离心力作用下，向上举起，而与滑閘 B 的桿相連的槓桿上的点 a 也一起上升。滑閘开启

孔 a_1 及 a_2 。此时处在压力下的油通过导管 e 及孔 a_1 进入伺服机构的圆筒 B 内，并迫使活塞 Π 向下移动。活塞下面的油通过孔 a_2 被压出。活塞移动 K 点以缩小蒸汽(或水)进入透平机的入口，同时移动点 b ，使滑阀恢复到中间的位置。这样，在稳定状态下， M 点和 K 点的新位置将与机组升高

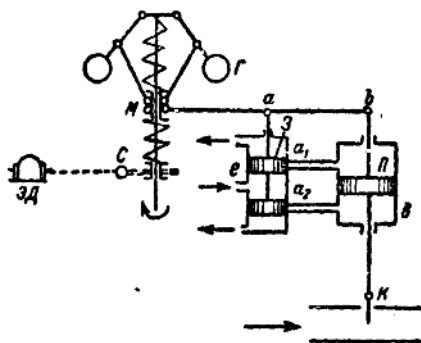


圖 2 調整機組轉速的原理圖

了的轉速和減小了的負荷相適應。機組轉速(或頻率)與負荷的關係曲線即為有差調節特性曲線，此曲線繪示於圖 3。圖中虛線表示特性曲線的移動(利用改變機組轉速的機械 C 來進行移動，見圖 2)。

特性曲線的移動可用手進行(作用於點 C)或在遠方進行(通過電動機 $\mathcal{E}\mathcal{D}$)。在只有一台工作機組時，可用向上或向下移動特性曲線的方法來改變交流頻率。在

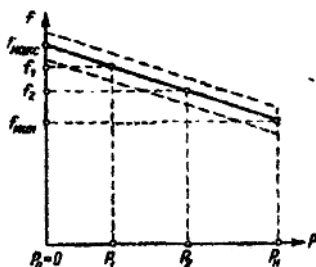


圖 3 調速系統的有差特性曲線

数台机组并列运行时，移动机组的特性曲线，便会引起各机组的负荷发生变化，由于负荷变化的结果，便发生频率的变化。

在发电机同期时，也要利用机构 C 。因此，在实际运用中，常常把它叫做同期装置（同期检定器），而电动机 D 则叫做同期用的电动机。

1-2 调速器的特性

整个调节系统的有差特性是调速器的主要特性。

决定调速器工作情况的指标是：

- a) 调节的不均衡系数或不均衡度（通常用 δ 代表）；
- b) 调节系统的不灵敏度 ϵ ；
- b) 有差特性曲线的移动范围。

图 3 所绘示的调节特性曲线 $f = F(P)$ 的斜度决定了机组调节的有差度。令 K 代表机组的调节有差度，它等于机组频率（或转速）降低量的标么值 Δf^* 与功率增加量的标么值 ΔP_1^* 之比：

$$K = \frac{\Delta f^*}{\Delta P_1^*}, \text{ 或 } K = \frac{\Delta f^*}{\Delta P_1^*} = 100\%, \quad (1)$$

$$\text{式中 } \Delta f^* = \frac{f_1 - f_2}{f_n}, \text{ 而 } \Delta P_1^* = \frac{P_2 - P_1}{P_n};$$

f_n 及 P_n ——频率与功率的额定绝对值^①。

若机组的调节特性曲线是直线，如图 3 所示的那样，则调节特性曲线上的任一点的调节有差度保持不变。

① 此处及以下的各种量的标么值都用角注 * 表示（例如 f^* 、 P^* 等）。

② 大家都知道，在自动调节的理论中，当调整对象具有下降的特性曲线时〔在本例中，是 $f = F(P)$ 〕，通常把有差度的量当作正的。

在特殊情況下，即當功率由空載至額定功率的變化為 $\Delta P_1^* = 1$ 時， K 在數值上將等於所調機組的調節不均衡係數或不均衡度^①

$$\delta = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_n} \quad (2)$$

直線式的調速器有差特性曲線大多是出現在水力機組當中。

透平機組的調速器通常具有非線性的特性曲線，其形狀如圖 4 所示。因為這個緣故，調速器對於不同的負荷範圍具有不同的 K 值。

曲線的 $a-b$ 及 $c-d$ 段較之中間的 $b-c$ 段具有更大的斜度。

在將發電機接入電網時，為了保證平穩地同期，便必須使第一段($a-b$)的斜度增大。

此外，增大這段特性曲線的斜度，在負荷低於技術最低值時（也就是約小於 P_n 的 20 %），機組的功率便不致發生太大的變化。

第二段($b-c$)具有較小的斜度，故當分出機組以保持頻率時，能夠更精確地保持頻率。

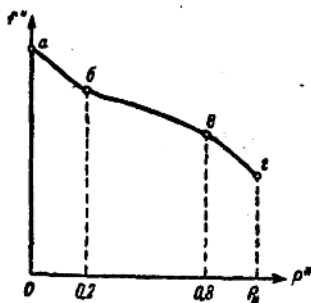


圖 4 透平機組調節系統的特性曲線

① δ 的這種定義較之某些作者 [參考文獻 8 和 13 等] 所提出的定義 $\delta = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{cp}}$ (式中 $f_{cp} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2}$) 要方便些，因為當調整器的特性曲線移動時， f_{cp} 並非保持不變。

特性曲綫最后一段(θ—2)的斜度較大，这样可使机組在其功率約大于 $80\%P_H$ 的不經濟運轉的范圍內，能比較不灵敏地反应于頻率的变化。

由此可見，根据运行上的考虑，对透平机組而言，弯曲的有差調节特性曲綫是必要的。

調节特性曲綫的斜度是根据以下各点来选择的〔参考文献 8〕：

- a) 提高机組的調节穩定度；
- 6) 維持机組負荷与頻率的准确度；
- б) 在并列運轉的机組之間，按比例分配系統中的負荷冲動。

在研究調节的有差度时，假定調速器是理想地工作着，并且在同期机構的給定位置时，每一轉速或頻率的数值都有一个确定的机組負荷值与之相对应。实际上，实用調速器对于頻率的变化具有一定的不灵敏度，它用調速器的不灵敏区 δ_1^* 来表示。

利用均匀地（沒有跳动地）改变頻率的方法使机組所帶負荷由空載負荷($P=0$)加到負荷 $P=P_H$ ，同样，再均匀地減至 $P=0$ ，則記錄頻率表的讀数与功率的数值，便可得到在計及不灵敏区

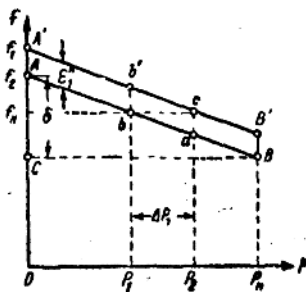


圖 5 考虑到不灵敏区 δ_1^* 时，机組的調节特性曲綫

时，机組的全部轉速調节系統的有差特性曲綫。此特性曲綫示于圖 5；其中 AB 綫和 $A'B'$ 綫为調节的不灵敏区的边界。

如用 f_1 与 f_2 代表調整器开始动作时頻率的絕對值，

則調節的不灵敏度为:

$$\varepsilon_1^* = \frac{f_1 - f_2}{f_n} = \frac{\varepsilon_1}{f_n}, \text{ 或 } \varepsilon_1^* = \frac{f_1 - f_2}{f_n} 100\%. \quad (3)$$

正如下面所要指出的: 机組保持負荷的精确度, 頻率調節的精确度以及机組間負荷分配的精确度三者, 正如决定于 δ 的数值一样, 也决定于 ε_1^* 的数值。

机組的負荷在原动机运行方式变化时, 可能發生不定期的偶然的波动。由于存在有調節的不灵敏度, 这种負荷波动并不能由調速器来控制。

这种負荷变化的范围, 或者保持机組負荷不变的精确度, 决定于 [参考文献 8] 关系式:

$$\Delta P_1 = \frac{\varepsilon_1^*}{\delta} P_n, \quad (4)$$

式中 ΔP_1 ——当頻率变化, 逐渐恢复到起初的数值时, 机組負荷可能發生的变化, 而 P_n ——机組的額定功率。

公式(4)是根据圖 5 中三角形 ABC 与 abc 相似的关系而得出的。

比值 $\frac{\varepsilon_1^*}{\delta}$ 决定了当頻率显著变化时, 保持机組負荷不变的精确度。茲举一例来说明:

假定在某种运行条件下, 机組的不灵敏度与調節的不均衡度的数值为 $\varepsilon_1^* = 1\%$ 及 $\delta = 4\%$, 此时, 根据方程式(4), 保持功率不变的精确度將等于:

$$\Delta P_1 = \frac{1}{4} P_n, \text{ 或 } 25\% P_n.$$

这就是說, 当調節特性曲綫的位置如圖 5 所示及頻率降低了 ε_1^* (由点 b 到点 a) 时, 机組的功率便从 P_1 变化到 P_2 , 其变化量为 ΔP_1 。随后頻率升高到額定值时 (由 a 到 c), 將

不使机組負荷再恢复到起初数值 P_1 。只有頻率进一步升高到点 b' ，即升高到数值 $1 + \varepsilon_1^*$ 时，方能使机組功率降低 ΔP_1 ，即恢复到原数值而等于 P_1 。因之，当 f 在 $\pm \varepsilon_1^*$ 的範圍内变化时，机組的功率將在 P_1 到 P_2 的範圍内变化。显然，为了將机組負荷保持在一定的水平，必須对机組的調节加以外部作用。

因之，机組負荷的調节質量与机組調节系統的不灵敏度 ε_1^* 有着極大的关系。从此得出結論：用一次調速器調节頻率时，其精确度与系統所有机組的 ε_1^* 值有关。

用准确的記錄仪表所記錄下来的系統内各机組的頻率和負荷的变化，可以作为这一結論的显然的証明。如果記錄下来的頻率是鋸齒曲綫，就表示机組的調节存在有很大的不灵敏区。將各机組的功率表与頻率表的讀数加以比較，就可以得出这些机組的 ε_1^* 值。

各机組的 ε_1^* 值可以用試驗的方法来决定。在系統工作于頻率不变的状态时，先將調节系統的滑閥移动至降低机組負荷的方面，然后移至升高机組負荷的方面，而不移动調速器的特性曲綫。

由第一次用力压下滑閥并平穩地放松它的結果，便定出在稳定方式下的 P_1 值，而当第二次移动滑閥时，相应地便得到 P_2 的值。如果 δ 的大小已經知道，則利用方程式 (4) 可以求出：

$$\varepsilon_1^* = \frac{P_2 - P_1}{P_n} \delta. \quad (5)$$

如上指出，比值 $\frac{\varepsilon_1^*}{\delta}$ 表示着保持机組負荷不变的精确度。

当調整調速器时，应尽可能求得最小的 ε_1^* 值，使得在这样

的 ε_1^* 值之下，機組調節系統不存在振盪現象。全部調節系統的 ε_1^* 值总是很少达到小于 0.4% 的数值 [参考文献 2, 8, 16]。在現代化的比較灵敏的調速器中， ε_1^* 值达到了 0.1% [参考文献 1, 13]。

当选择各个機組調節的不均衡度 δ 时，必須力求得到保持功率不变的較大的精确度。在任何情況下， ΔP_1 值不应超过 $0.1P_n$ 。因而，在上述的 ε_1^* 及 ΔP_1 的数值之下，按方程式 (4) 求得的 δ 的最小值將是：

$$\delta = \frac{\varepsilon_1^*}{\Delta P_1} P_n = \frac{0.4}{0.1P_n} P_n = 4\% \quad (6)$$

在这种情况下，减小 δ 的值，將使調節的質量变坏，也就是使 ΔP_1 的值增大，从經濟的观点来看，这并不是人們所希望的事情。

在实际調整調速器时，对于特性曲綫 $f = F(P)$ 的工作段所采取的 δ 值不超出以下范围：

$$\delta = 4 \sim 6\% \quad (7)$$

这个范围是有限的。正如已經指出的， δ 的下部界限受限于获取很小 ΔP_1 的不可能性。由于其他原因 [参考文献 8]， δ 的上限也不可能再予提高。特别是对于透平機組，不推荐使 δ 值增大到超过 5%，因为在機組負荷全部卸去时，透平机的轉速將产生动态升高，并且轉速的相对值將大于調節的不均衡度 δ 而約为其 1.5—2 倍。在这种情况下，整定在超过額定轉速 10—12% 的轉速值上的透平机安全自动裝置便可能發生作用。

从調節頻率以及將它保持在接近于額定值的水平上的观点来看， δ 值的增加也是不好的。

为了使負荷冲动均匀地分佈在并列运行的機組之間，必

須使各機組的 δ 值彼此相等，而其不靈敏度應為最小，並且也彼此相等。

實際上，在動力系統中，各透平機調速器的整定是不一樣的，這就使機組的經濟運行方式受到破壞，並使頻率發生相當大的擺動。

如果有個別機組的 ε_1^* 及 δ 值小於其他機組，則這些個別機組將對頻率的調節起更大的作用。這種狀況並非永遠都符合動力系統經濟運行的要求。因此，在動力系統中，常將個別的機組與電廠作為主導機組而劃分出來。

讓我們從頻率調節的精確度的觀點上來討論選擇主導電廠的一個例子。

假定主導電廠具有用來調節頻率的功率 ΔP_1^* ，此功率等於其本身容量的一半，且足夠用來調節頻率。這個電廠的機組調節有差度在調節特性曲線的工作段上為 $K=2\%$ 。根據公式(1)，得出在這種個別情況下頻率的最高偏移等於：

$$\Delta f^* = K \Delta P_1^* = 2 \times 0.5 = 1\%.$$

如果系統負荷的變化不超過 ΔP_1^* 的數值，則當充分利用了上述的備用功率 ΔP_1^* 時，頻率離開 f_n 之偏差值將不超過 ± 0.25 赫芝。這一頻率水平可用調速器本身來保持而不需移動調節特性曲線，為了更精確的保持頻率不變，可利用手動或自動的方法來移動特性曲線。

1-3 機組間負荷沖動的分配

在不移動調速器的調節特性曲線時，並列工作的機組間負荷沖動 ΔP_1^* 的分配是根據在許多關於自動調節的書籍中所介紹過的眾所周知的規律來進行的[參考文獻 1 和 18 等]。

假定電力網的負荷沖動 ΔP_1^* 分配在兩台機組之間：