

动力系统

频率和有功功率的自动调整

〔苏联〕A·Γ·莫斯卡列夫 著

山东工学院发电厂教研室 合译
山东工学院发电厂专业60班

中国工业出版社



动力系統

頻率和有功功率的自动調整

〔苏联〕A·Γ·莫斯卡列夫 著

山东工学院发电厂教研室 合譯
山东工学院发电厂专业60班

万国珍 張庭貴 徐中立 校訂

中国工业出版社

А.Г. Москалев
**АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ЧАСТОТЕ И
АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
МОСКВА 1960 ЛЕНИНГРАД

* * *
动力系统频率和有功功率的自动调整

山东工学院发电厂教研室 合译
山东工学院发电厂专业60班
万国珍 张庭贵 徐中立 校订

*
水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南营房)
中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)
北京市书刊出版业营业许可证出字第110号
中国工业出版社第一印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*
开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张13·字数267,000
1965年2月北京第一版·1965年2月北京第一次印刷
印数0001—6,720·定价(科六)1.60元

*
统一书号: 15165·3653(水电-482)

本书阐述下列問題：頻率变化对电能用戶及动力系统运行經濟性的影响；系统有功負載在发电厂之間与各机組之間最經濟的分配；頻率和有功功率的调整方法；考虑到各个机組与发电厂的单独调整范围时的调整法；火电厂与水电厂、动力系统、联合动力系统运行方式的自动調整系统；調整器的各个机构与調整系统的特性和結綫图；調整过程的品质与稳定性。

本书可供从事发电厂与动力系统自动調整系统的設計、运行及制造等工程技術人員及研究人員閱讀，也可作为高等院校有关专业的 教 学 参 考 书。

序 言

最近以来，动力系统中频率和有功功率自动调整问题的解决发生了本质的变化。在过去与频率调整相关的仅仅是在于保证电能的质量，这首先是对电能用户有利。目前，动力系统中的调频任务与有功功率分配的任务已经紧紧地联系在一起了。这样一来，两个任务便汇合成一个总的问题——按频率和有功功率调整动力系统的运行方式。上述两个任务的联系，是由于动力系统中频率的恢复是依靠改变各个发电厂所发出的有功功率来达到的。按频率和有功功率调整的目的是，在保证应有的电能质量（频率）条件下，达到动力系统最经济的运行方式。解决这一任务首先是为了动力系统。这种自动调频目的在本质上的改变，使它开始更广泛地被动力系统所采用。

解决频率和有功功率调整问题的新途径，引起了对旧有调整方法的重新估价，并创立了适应目前要求的新方法。

频率和有功功率自动调整的设备也同样发生了变化。首先与解决所研究问题的新途径有关，就出现了一系列新的自动调整设备，并改进了若干旧的设备，使其能按新的要求解决任务。

根据上述情况，对“动力系统中的频率自动调整”[●]一书（这书可以看作是本书的初版）中的内容作了根本性的修改，此外，还增添了一些新的章节。

动力系统中频率与机组负载功率的初步调整是靠原动机的调速器按静态特性来实现的，当负载变化很大时外加手动修正。

苏联第一个频率调整器是由И.И.奥斯特磊工程师研究出来的，并且在1937年9月装设在斯维尔斯克水电厂中。后来中央电工研究所（即现在的全苏电力科学研究所）、区域发电厂组织及合理化研究所、苏联科学院动力研究所都研究出了更完善的调整器。

动力系统的增长，使得频率调整必须由一个电厂中的若干个机组来进行，随后是由若干个电厂来进行，最后，发展为由全部主要的发电厂按频率和有功功率来调整动力系统的运行方式。为了达到这一目的，曾经提出过许多方法。这里应该指出，在苏联及其他国家解决这一问题的方法是不同的。在资本主义国家中，由于参加联合运行的各个发电厂和系统是私人所有，其自动化在过去和现在都是沿着执行合同关系以保证电能质量的道路而发展的；因此，虽然联合在一起，但其运行仍是不经济的。在苏联，动力系统的自动化则是按照保证必需的电能质量，并保证在整个联合系统中生产电能的费用最小来进行的。这些方法已为全苏电力科学研究所（原中央电工研究所）、国营区域发电厂组织及合理化研究所、苏联科学院动力研究所、列宁格勒工学院等单位研究出来。

目前在苏联已有若干个动力系统实现了频率和有功功率的自动调整，而且这种动力系

● 1952年由苏联国立动力出版社出版。中译本于1955年由燃料工业出版社出版，朱物华译。——译注

IV

統的数目正在不断增加。

1958年苏联电站部技术司和运行司决定在全苏統一动力系統的第一发展阶段，实现由全苏电力科学研究所研究出来的、按频率和有功功率自动調整运行方式的非集中調整系統。1959年，苏联国家計劃委员会所屬的电业管理总局，在有关国民經济委员会电管局的共同参加下，研究并批准了設計任务书；即在組成全苏統一动力系統的主要部分：南部、中部及烏拉尔、西伯利亚西部等联合动力系統中，实现全苏电力科学研究所的非集中調整系統。准备首先在各大动力系統实现这种調整，如莫斯科动力系統、頓巴斯动力系統、第聶伯尔动力系統、斯維尔德洛夫动力系統、車里雅賓斯克动力系統及毕尔姆动力系統等，共有84个发电厂参加。具体实现上述調整的工作已經开始。1959年，南部联合动力系統中的六个发电厂，以列宁命名的第聶伯尔水电厂、卡霍夫卡水电厂、米罗諾夫国家地区发电厂、第聶伯尔捷尔任斯基国家地区发电厂、哈尔科夫第二国家地区发电厂与第三热电厂——都已經装上这种調整系統，并进行了初步試驗。在伏尔加列宁水电厂、高尔基水电厂以及其他一些电厂中也正在进行这项工作。

联合动力系統越大，按频率和有功功率自动調整运行方式的效果也愈大。显然，在正形成的全苏統一动力系統中，将取得最大的效果。

按频率和有功功率及按电压和无功功率来进行发电厂运行方式的自动化，同时，并使发电厂昼夜运行指标記錄自动化，便可以使水电厂或火电厂的电气車間改成为无人值班，并且可以大大縮减火电厂汽機車間与鍋炉車間的运行人員。

趁此机会，著者对編写第十四章的B.Л.费多罗夫、編写附录I及在校核原稿工作中付出大量劳动的H.A.曼里尼可夫以及評閱手稿时提出許多宝贵意見的M.Л.庫茨金表示感謝。

著者恳請把所有的意見和建議寄至：莫斯科水閘河岸街10号国立动力出版社。

著 者

統一書號:
15165·3653(水电-482)
定 价: 1.60 元

目 录

序 言

第一章 频率改变对动力系统运行经济性的影响	1
1-1. 问题的提出	1
1-2. 频率改变对发电厂运行的影响	1
1-3. 频率改变对动力系统基本机组(发电厂)负载的影响	3
1-4. 动力系统中频率和负载功率的变化	3
第二章 系统有功负载在各发电厂间及机组间的最经济分配	5
2-1. 各发电厂间及机组间负载最经济分配的原则	5
2-2. 工作在公共蒸汽母管上的锅炉机组间负载的最经济分配	7
2-3. 由公共蒸汽母管供汽的汽轮机机组间负载的最经济分配	8
2-4. 锅炉-汽轮机-发电机-变压器单元机组间负载的最经济分配	10
2-5. 具有迭置式汽轮机的发电厂各机组间负载的最经济分配	10
2-6. 水力发电厂机组间负载的最经济分配	11
2-7. 工作机组组合的选择及发电厂的微增率特性	12
2-8. 动力系统各发电厂间负载的最经济分配	13
2-9. 首批参加动力系统按频率和有功功率自动调整运行方式的发电厂的经济选择	18
第三章 机组和发电厂的技术调整范围及负载的变化速度	22
3-1. 问题的提出	22
3-2. 锅炉机组和锅炉车间的技术调整范围及负载的变化速度	22
3-3. 汽轮机的技术调整范围及负载增加的速度	23
3-4. 火力发电厂的技术调整范围及其参加自动调整的次序	23
3-5. 水力发电厂的技术调整范围及负载增加的速度	24
3-6. 工艺自动装置对调整范围、负载变化速度和发电厂运行可靠性的影响	24
第四章 自动调整理论的基本概念	25
4-1. 调整系统的概念	25
4-2. 自动调整系统稳定性的概念	26
4-3. 自动调整系统的环节	28
4-4. 自动调整系统的稳定性判据	34
4-5. 自动调整系统的结构图和稳态特性	38
4-6. 调整过程稳定性的保证	39
4-7. 失灵区	42
4-8. 幅-相特性曲线的作法	43
4-9. 自动调整系统的品质	44
第五章 按频率和有功功率自动调整动力系统运行方式的方法	48
5-1. 基本情况	48
5-2. 有差特性法	49

V

5-3. 无差特性法	50
5-4. 主导发电机法	50
5-5. 虚有差法	51
5-6. 虚无差特性法	53
5-7. 同步时间法	54
5-8. 频率和同步时间的联合调整法	55
5-9. 内有差法	55
5-10. 均衡电势法	56
第六章 涡轮机的调速器	59
6-1. 基本情况	59
6-2. 汽轮机的调速器	60
6-3. 水轮机的调速器	66
6-4. 调速器的液电式、电磁式和机电式校正器	72
6-5. 按频率和有功功率自动调整运行方式时对调速器的要求	73
第七章 发电厂频率和有功功率运行方式的自动调整系统	74
7-1. 基本情况	74
7-2. 用均衡电势法按频率和有功功率调整火电厂运行方式的调整系统	75
7-3. 用于水电厂按虚有差法的频率和功率调整系统	82
7-4. 按均衡电势法构成的按频率和有功功率调整水电厂运行方式的调整系统	86
7-5. 采用计算机来调整火电厂的运行方式	90
第八章 强联动力系统 and 集中动力系统中运行方式的自动调整	91
8-1. 基本情况	91
8-2. 苏联科学院动力研究所拟定的自动分配负载的集中系统	92
8-3. ОПРЭС拟定的集中式自动调整系统	93
8-4. 全苏电力科学研究所拟定的第一个非集中自动调整系统	96
8-5. 全苏电力科学研究所拟定的第二个非集中自动调整系统	98
第九章 联合动力系统和国家统一动力系统运行方式的自动调整	103
9-1. 基本情况	103
9-2. 苏联科学院动力研究所拟定的集中调整系统	105
9-3. 列宁格勒工学院拟定的集中调整系统	107
9-4. 全苏电力科学研究所拟定的用于联合动力系统和统一动力系统的非集中调整系统	109
9-5. 采用计算技术装置来管理统一动力系统运行方式的展望	118
第十章 频率测量机构	118
10-1. 对频率测量机构的要求	118
10-2. 具有 r 和 L 回路的测量机构	119
10-3. 具有 r 和 C 回路的测量机构	120
10-4. 具有由 r 、 C 和 r 、 L 并联分支组成回路的测量机构	120
10-5. 具有由 r 和 r 、 C 、 L 并联分支组成回路的测量机构	121
10-6. 在中間导线中接有 C 、 r 、 L 回路的按差接相敏电路组成的机构	124
10-7. 带频率电桥的测量机构	126

10-8. 具有频率滤波器的测量机构	129
10-9. 带音叉的测量机构	133
第十一章 功率测量机构	134
11-1. 对功率测量机构的要求	134
11-2. 有功电流测量机构	135
11-3. 电磁式有功功率测量机构	136
11-4. 用半导体构成的有功功率测量机构	137
11-5. 根据霍尔效应原理构成的测量机构	138
第十二章 磁性滤波式频率和有功功率调整器	140
12-1. 动作原理	140
12-2. 测量元件	141
12-3. 负载曲线给定装置	146
12-4. 负载分配装置 (УРАВ)	147
12-5. 有功功率测量仪 (ИМ)	150
12-6. 执行元件 (ИБ)	151
12-7. 最低功率限制器 (ОММ)	155
第十三章 音叉式频率调整器	155
13-1. 动作原理	155
13-2. 频率测量元件	156
13-3. 调差元件	158
13-4. 负载分配元件	158
13-5. 输出放大元件	159
第十四章 水电厂的自动操作器	160
14-1. 自动操作器的主要任务	160
14-2. 水电设计院自动技术科学处拟定的改进型自动操作器	160
14-3. 全苏电力科学研究所拟定的自动操作器	164
第十五章 微增率发送器和测量仪	171
15-1. 电价 (燃料消耗) 微增率发送器	171
15-2. 损耗微增率测量仪 (ИПП)	172
15-3. 电网微增率测量仪 (НОПС)	174
第十六章 频率和有功功率自动调整的稳定性与品质	175
16-1. 问题的提出	175
16-2. 静态传递系数	176
16-3. 动力系统频率和有功功率自动调整系统的结构图	178
16-4. 自动调整系统中各环节的特征方程式	182
16-5. 自动调整系统稳定性与品质的分析	188
附录 1	190
附录 2	196
参考文献	197

第一章 频率改变对动力系统运行经济性的影响

1-1. 问题的提出

所有转动机组的最高效率都是使其发生在某一完全确定的转速，也就是在额定转速时。目前絕大多數的转动机组都与电机联接。

电能的生产和消耗主要是用交流电来实现的，因此，絕大多數的转动机组与交流电的频率有关系。事实上，交流发电机发出的交流电频率随涡轮机的转速而变，同时由交流电动机拖动的机械的转速亦随频率而变。

交流电频率对其额定值的偏差，对于决定动力系统运行经济性的各种机组，以及各种仪器和电器的影响各不相同。

1-2. 频率改变对发电厂运行的影响

汽轮机及其叶片是按照额定转速（频率）和进汽没有冲击时保证能有最大可能的轴功率来设计的。因而减低旋转频率会引起蒸汽冲击叶片的损耗，同时增加了转矩；而增加旋转频率则会导致减小转矩，使叶片背面的冲击增加。汽轮机运行在额定频率下最为经济。

此外，降低频率运行会使汽轮机工作叶片和其他零件加速磨损。

频率的改变将对发电厂厂用机械的运行发生影响。

发电厂厂用机械在任何运行条件下都应该可靠地工作。现在讨论一些主要厂用机械，例如：给水泵、循环水泵、引风机、送风机等，在频率偏离额定值时的运行性能。

压头只消耗在克服输水系统动态阻力压头的水泵，其出力与转速的一次方成正比：

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

有静阻力压头时，这个方程式就不适用。在这种情况下，水泵出力与角频率的关系可由下式来确定〔文献26〕：

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

式中 ω ——角频率；

H_{cr} ——被克服的静压头；

ΣR ——输水管阻力；

k_1 ——由机组结构及尺寸所确定的系数。

有了静压头，水泵将在频率不到零的某一频率时便停止给水，这个频率叫做临界频率。根据这个定义，临界频率为

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

由(1-3)式可見,水泵的临界頻率与靜压头和水泵的结构参数有关,而与輸水管和輸水系統中其他元件的阻力完全无关。

电动給水泵必須克服鍋炉中相当大的压力,其运行条件非常繁重,特别是高压发电厂中更为困难。

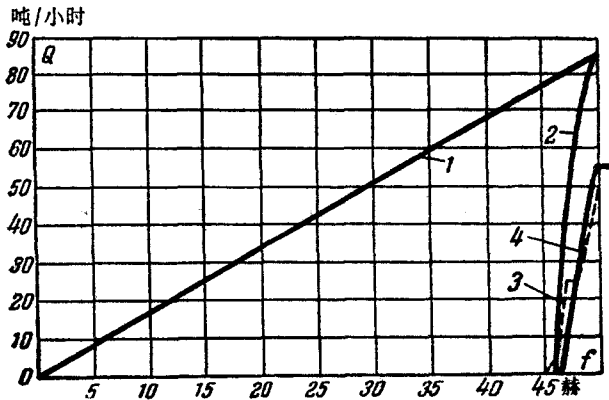


图 1-1 电动給水泵的頻率特性曲线

1—电动給水泵沒有反压力时的特性曲线; 2—按公式(1-2)繪出的电动給水泵的特性曲线; 3—电动給水泵的試驗特性曲线, 实验1; 4—电动給水泵的試驗特性曲线, 实验2

图1-1示出临界頻率為 45.8 赫的电动給水泵試驗的和計算的特性曲线。

从上述可知, 电动給水泵的出力与交流电网的頻率有很大关系。即使頻率下降相当小, 水泵也会大大的降低出力, 于是破坏发电厂正常的工作, 或者完全停止向鍋炉給水, 而使鍋炉的安全运行和发电厂以及整个系統的运行可靠性受到威胁。

頻率超过额定值时, 給水泵发出的压头超过所必需的压头,

因而使厂用电能的消耗增大。这时剩余压头将节流消耗于压力調节器或进水調节器的閥門上。也就是被白白的浪费掉了。

所有上述情况也适用于循环水泵, 只是影响的程度較小而已。

頻率低于额定值将使通过汽輪机凝汽器的水量减少, 这就等于使凝汽器的真空度降低, 結果使汽輪机的效率下降, 亦即使汽耗量增大。頻率超过额定值会使通过汽輪机凝汽器的水量增加, 使电能消耗增加。这时凝汽器的真空度下降到計算值以下, 有时这会使凝結水过冷却。此外, 真空度过份降低, 会增加汽輪机的排汽余速损失(因为降低真空会使蒸汽体积增大, 但通过的截面却并未改变)。因此, 降低頻率会使汽輪机的效率降低(增加汽耗量), 而增加頻率会使供給冷却水所消耗的电能增大, 同时亦增大了汽耗量。

除水泵以外, 在发电厂还有大量具有通风力矩的机械(一次风送风机、二次风送风机、引风机), 在沒有靜压头时, 这些机械的出力和頻率的一次方成正比。然而动力系統中所进行的試驗指出, 随着頻率的降低, 送风机和引风机的出力远較頻率下降得快。在提高頻率时, 送风机和引风机所产生的压头就大为增加, 这种情况和出力(压力)降低时一样, 会引起鍋炉运行方式的破坏。

鍋炉机組的經濟性决定于排出烟气中 CO 和 CO₂ 的含量, 以及燃烧室内的过剩空气量。CO 和 CO₂ 的含量与所供給的空气量和排出的烟气量有关。因此, 鍋炉机組运行的經濟性首先取决于送引风裝置的运行状况。

頻率降低时, 送风机的出力降低, 亦即进入燃烧室的空气量較少。此时化学不完全燃烧损失增加, 而同时减低了排烟损失。頻率增加时, 送风机的出力提高, 因此化学不完全燃烧损失减少, 而排烟损失增加。鍋炉机組中的最低损失一般是在一个确定的过剩空气量

(CO_2 的含量)时发生的。因而,系统中频率的改变将导致锅炉机组正常运行方式的破坏。

频率增加时,锅炉给水所消耗的电能(电动给水泵所消耗的电能)也要增加,使得锅炉设备的总损耗增加。

1-3. 频率改变对动力系统基本机组(发电厂)负载的影响

动力系统中各个机组间的负载调度是按微增率方法进行的[文献9, 36]。采用这种方法能使发电厂间和各机组间的负载达到最经济的分配。按照这种方法得出的各机组的负载值在一定频率下就被确定了(例如,频率 f_n 时的负载为 P_n)。

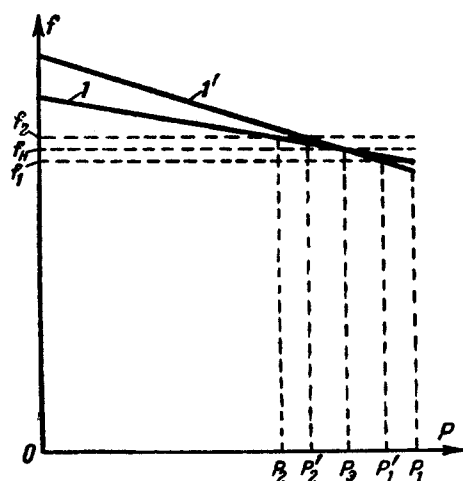


图 1-2 决定汽轮机组负载随动力系统频率而改变的特性曲线

因为按波尔祖诺夫原理,汽轮机的调速器具有下降的有差特性,所以系统频率从 f_n 下降到 f_1 时,各该汽轮机的负载就从 P_n 增加到 P_1 (图1-2),与此同时,系统中其他汽轮机的负载也要改变。由于所有汽轮机和向该汽轮机供汽的锅炉装置的微增率特性都不相同,这时动力系统就不再处于最佳的运行方式。

与此相类似,当系统频率从 f_n 增加到 f_2 时,各该汽轮机的负载从 P_n 降低到 P_2 。由于许多原因,工作在同一动力系统各个汽轮机,它们的调速器的特性曲线通常都具有不相同的斜率(图1-2中的曲线1和1'),因此,当频率改变时各汽轮机负载的变化是不同的。例如,频率从 f_n 降低到 f_1 时,第一台

汽轮机的负载从 P_n 增加到 P_1 ,而第二台汽轮机的负载从 P_n 增加到 P'_1 。

因此,动力系统频率的改变,将使各个机组和发电厂的给定负载发生变化,因而使动力系统的经济运行方式遭到破坏。

1-4. 动力系统中频率和负载功率的变化

动力系统的总负载功率一昼夜内不是保持不变的。个别的动力系统,一昼夜内最大负载和最小负载间的差额,可在最大负载值的25%~50%的范围内波动。它是由这样一些因素决定的,如:一班制、两班制、三班制工业企业的比重;一昼夜中负载不变化的用户的多少;一年各季节的气象条件;动力系统的地理位置等等。图8-5a示出中等容量(约300兆瓦)动力系统的日负载曲线,该系统向两班制工作的机器制造工厂比重很大的城市供电。从图可以看出,一昼夜内负载的最大变化约为最大负载值的43%。图1-3示出中央联合动力系统冬季工作日的昼夜负载曲线。这里负载的最大变化约为25%。尽管在总功率、地理位置和其他许多因素方面的差别很大,这两个系统却都有三个主要的负载“高峰”:早晨的,白天的和晚上的,以及相应的三个“低谷”。在这样不均匀的负载曲线,只有

依靠調整機組（發電廠）所發生的功率才能保持動力系統的額定頻率。

這就產生了動力系統頻率的調整問題。

可以預見，如果發電廠（鍋爐）能有額定功率●的40%~50%的調節範圍，則不必斷開汽輪機和停止鍋爐，而只要改變進入汽輪機的動力元素，就能保證供給用戶以非常接近額定頻率的電能。

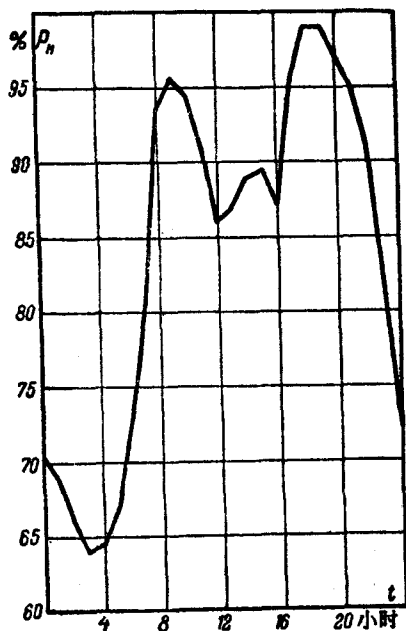


圖 1-3 中央聯合動力系統1958年1月
23日冬季工作日負載曲線

動力系統中經常有電能用戶投入和切除，這取決於生產的工藝過程，運輸的調度圖表和居民個人的需要等。從理論上來說，每一個用戶的投入都會引起用戶總功率的改變，而使系統的穩定運行方式遭受破壞，並且使得頻率偏离原始值。例如：向數瓩容量的農村發電廠投入一個大功率的照明燈泡，就能夠引起明顯的頻率偏差，但是，把同一照明燈泡投入到現代動力系統中，則所引起的頻率偏差就極為微小，用無論怎樣精確和靈敏的儀表也不能覺察出來。

在目前情況下，動力系統容量的增長比各個用戶（電燈、機床、電爐等）功率的增長快得多。因此，隨着動力系統容量的增長，由於投入與切除個別用戶而引起的頻率波動已減低到很小的範圍以內。在現代聯合動力系統中，相應於日負載曲線上負載持續變化所引起的頻率偏差仍是重要的。

作為例子，圖 1-4 示出中央聯合動力系統在 1958 年 1 月 23 日沒有調頻時（非調整的動力系統）頻率波動的記錄曲線和示波圖（與此相應的負載曲線示於圖 1-3）〔文獻 55〕。從這些資料可以看出，在大容量非調整動力系統中頻率的平均值幾乎是單調地改變着，這種改變由總負載變化的綜合特性所決定。在平均頻率變化上帶有二種波動形式：a) 周期為 15~30 秒，振幅等於 0.01~0.05 赫；b) 周期為 200~250 秒，振幅等於 0.02~0.07 赫。

反應瞬時偏差的自動調頻系統，當失靈區為 0.05~0.07 赫時，對上述的頻率波動將沒有反應，以避免無謂的動作〔文獻 15〕。當採用按頻率偏差積分的調整系統時，上述頻率波動對調整過程的作用亦不顯著。事實上，當積分環節的傳遞系數為 120~240 時，第一種形式的波動使其輸出端的輸出偏差為調整範圍的 0.12~0.5%；第二種形式的波動為 2~4%。如果考慮到現代發電廠的頻率和有功功率自動調整系統，在 60~180 秒內實現來自積分環節的作用，那末很明顯，這些數值不大的作用的實現程度是非常小的，因為經過半個周期（100~125 秒）後它們已降低到實際實現值以下了。

● 按照目前對鍋爐設備提出的要求，其調整範圍應該不小於 50%。

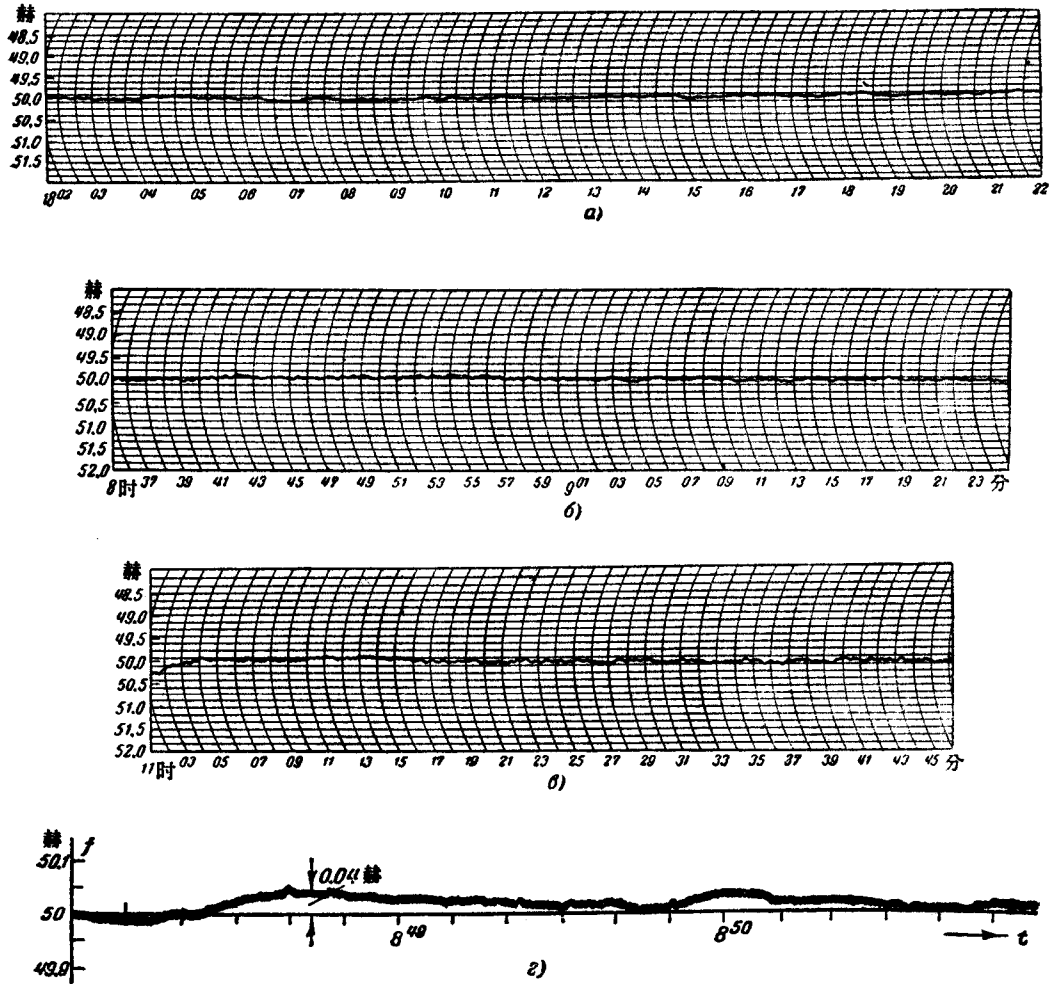


图 1-4 不調頻的中央联合动力系统1958年1月23日的频率波动记录曲线和示波图
a—晚间；b—早晨；c—中午飯前系統負載下降时；d—第一种形式的频率波动示波图

第二章 系統有功負載在各发电厂間 及机組間的最經濟分配

2-1. 各发电厂間及机組間負載最經濟分配的原則

动力系统按频率和有功功率自动調整运行方式的目的是，保証动力系统当频率維持在給定水平时达到最經濟的运行方式。沒有保持額定频率，沒有最經濟的分配各发电厂之間和发电厂內各机組（鍋炉、汽輪机）之間的負載，便不可能达到动力系统运行的經濟性。

为了解决这个問題，必須拥有所有发电厂和所有机組的經濟特性，即标准燃料（蒸汽、水）消耗或費用与負載的关系曲綫。这些特性曲綫可由以下的分析式来表示：

$$\left. \begin{aligned}
 G_1 &= G_{0.1} + a_{1.1} P_1^{m_{1.1}} + a_{1.2} P_1^{m_{1.2}} + \dots + a_{1.N} P_1^{m_{1.N}}, \\
 0 < P_1 &\leq P_{1.1}, P_1 \leq P_1 \leq P_{1.2}, P_{1.N-1} \leq P_1 < \infty, \\
 G_2 &= G_{0.2} + a_{2.1} P_2^{m_{2.1}} + a_{2.2} P_2^{m_{2.2}} + \dots + a_{2.N} P_2^{m_{2.N}}, \\
 0 < P_2 &\leq P_{2.1}, P_{2.1} \leq P_2 \leq P_{2.2}, P_{2.N-1} \leq P_2 < \infty, \\
 &\dots\dots\dots \\
 G_n &= G_{0.n} + a_{n.1} P_n^{m_{n.1}} + a_{n.2} P_n^{m_{n.2}} + \dots + a_{n.N} P_n^{m_{n.N}}, \\
 0 < P_n &\leq P_{n.1}, P_{n.1} \leq P_n \leq P_{n.2}, P_{n.N-1} \leq P_n < \infty,
 \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中 $G_1, G_2, \dots, G_n$ ——标准燃料（蒸汽，水）消耗或费用；

$G_{0.1}, G_{0.2}, \dots, G_{0.n}$ ——标准燃料（蒸汽，水）消耗或费用中与负载无关的部分；

$P_1, P_2, \dots, P_n$ ——负载功率；

a_{ii}, m_{ii} ——由单位有效负载功率的汽耗、水耗或费用决定的系数；

n ——并列运行的机组数；

N ——特性曲线的折点数。

对于动力系统的机组来说，系数 a 和 m 总归是正数。（2-1）式曲线的形状由系数 m 所决定。当 $m > 1$ 时，消耗特性曲线如图 2-1a 所示，当 $m = 1$ 和 $0 < m < 1$ 时，则分别如图 2-1b 和图 2-1c 所示。对于这些特性曲线燃料消耗对功率的一次导数与负载的关系分别示于图 2-2a、b 和 c。必须指出，同一类型的机组，例如锅炉，它们的消耗特性是相同的。

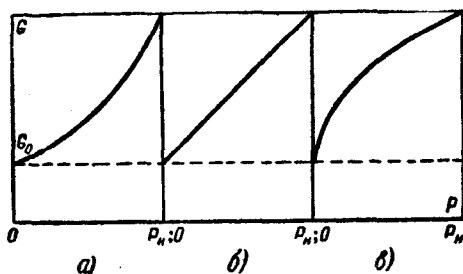


图 2-1 动力系统机组的消耗特性

a—对于按(2-1)式中指数 $m > 1$ 的机组；b—对于按(2-1)式中指数 $m = 1$ 的机组；c—对于按(2-1)式中指数 $0 < m < 1$ 的机组

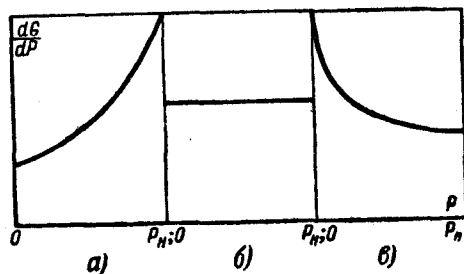


图 2-2 动力系统机组的微增率特性

a—对于按(2-1)式中指数 $m > 1$ 的机组；b—对于按(2-1)式中指数 $m = 1$ 的机组；c—对于按(2-1)式中指数 $0 < m < 1$ 的机组

分析方程式（2-1）指出，当 $m > 1$ 的机组并列运行时，如果在某一负载下，各机组的燃料（蒸汽、水）消耗对负载的一次导数彼此相等，则燃料消耗为最小〔文献 8, 9, 36〕：

$$\frac{dG_1}{dP_1} = \frac{dG_2}{dP_2} = \dots = \frac{dG_n}{dP_n}. \quad (2-2)$$

这里，当机组递次加负载时燃料消耗为最大。

消耗量对负载的一次导数称为消耗微增率（燃料、蒸汽、水、费用），或简称为微增率。它表明了负载增加时燃料（蒸汽、水）消耗量增加（增长）的程度。

同样的分析指出，当 $m = 1$ 的机组并列运行时（图 2-1b 和 2-2b），若首先由微增率较

小的机組帶滿負載，然后由微增率較大的机組帶滿負載，按这样的递次加負載，燃料消耗（蒸汽、水）为最小。当各机組的微增率相同时，滿載的次序不会影响运行的經濟性。

若 $0 < m < 1$ 的机組并列运行（图 2-16 和 2-26），在微增率相等的运行方式下，燃料（蒸汽、水）的消耗为最大；而在各机組按这种次序滿載时燃料消耗为最小，即：在額定負載下由微增率較小的机組首先滿載，然后由微增率較大的机組滿載。

机組并列运行的选择問題在这里不加討論。已投入运行的机組之間的負載应当按上述微增率原則进行分配。

2-2. 工作在公共蒸汽母管上的鍋炉机組間負載的最經濟分配

鍋炉机組的消耗特性曲綫由指数 $m > 1$ 的方程式（2-1）（图 2-1a）所决定。与其相应的微增率特性曲綫的形状如图 2-2a 所示，微增率随鍋炉負載的增加而增加。在所有鍋炉机組的微增率彼此相等的負載情况下的运行方式为最經濟（§ 2-1）。

必須注意，在某一部分鍋炉設備运行人員中存在一种习惯上的錯誤观点，认为一部分主要鍋炉应在最高效率的負載下运行，而一部分次要的鍋炉承担余下的負載，生产規定的蒸汽量，这样是最經濟的运行方式。不难看出，这种观点与保証鍋炉設備最經濟的运行方式毫无共同之处。

一般情况下，鍋炉机組的微增率特性是不相同的，因此，最經濟的运行方式是各鍋炉承担不同負載的情况下出現的。

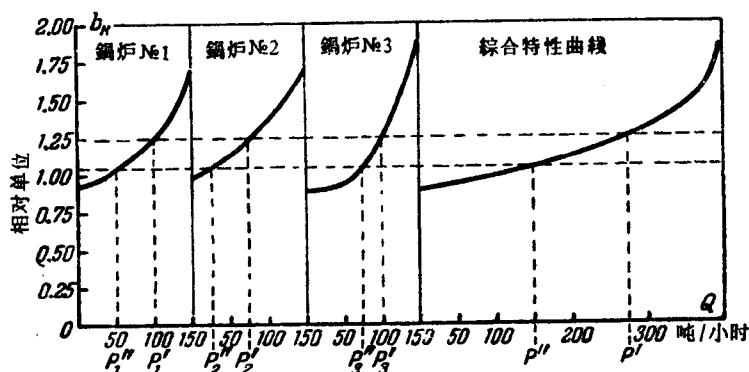


图 2-3 鍋炉机組单独的和綜合的微增率特性曲线

同一型式的鍋炉具有相同的微增率特性，所以当鍋炉間的負載平均分配时出現最經濟的运行方式。鍋炉燃烧固体燃料时，它的微增率特性与加热面的污垢（結溜渣）有关，因此，甚至同一型式的鍋炉，在不同負載下也可得到最經濟的运行方式。

在图 2-3 中給出了三台鍋炉的微增率特性曲綫。假設，在某一初始运行情况下，总的蒸汽負載为 275 吨/小时，它們的分配如图 2-3 所示（ $P_1' = 100$ 吨/小时， $P_2' = 75$ 吨/小时， $P_3' = 100$ 吨/小时）。以后总負載减少到 150 吨/小时。在这种情况下，鍋炉負載按以下的分配： $P_1'' = 50$ 吨/小时， $P_2'' = 25$ 吨/小时， $P_3'' = 75$ 吨/小时，运行方式为最經濟。