

电站并联运行 及其稳定性

项国波 著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是作者在柴油机交流发电机组并联运行及其稳定性这一领域中，在国内外学术会议和刊物上发表的十多篇论文后而作的综合性的总结。书中，讨论了机组均分负荷的最佳结构实现原理，给出了稳定而又完善和稳定但不完善子系统的新概念；应用非线性振动理论中的渐近方法、非线性控制理论中的谐波线性化原理，和非线性控制系统中的对数法等，来研究电站并联运行的结构稳定性和非线性共振，给出了提高并联电网结构稳定和克服非线性共振的技术措施；最后，讨论了七十年代新发现的一种特殊的电磁现象——奇异的中线电流——它的产生及其对并联电网稳定性的影响。

本书可供从事电站研究、设计、制造、运行、维护的技术人员和高等院校教师、研究生、高年级学生参考，也可供从事非线性控制理论和控制工程人员参考。

电 站 并 联 运 行 及 其 稳 定 性

项 国 波 著

*

国防工业出版社出版、发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

北京兴达印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 9 237千字

1988年11月第一版 1988年11月第一次印刷 印数：0,001—1,580册

ISBN 7-118-00058-2/TM1 定价：5.30元

前 言

1970年至1972年间，作者为马尾造船厂建造的“闽海 105 货轮”电站（两台120kW 发电机组并联运行），研究制造了两台按负反馈控制原理设计的可控硅调压器。交付使用，并正常运行了几个月之后，突然出现了一个非常特殊的电磁现象：三相负荷对称，但在三相四线制供电电网的中线中，却出现了以三次谐波为载波、受振荡频率调幅的中线电流，其幅值超过一相额定电流。它的出现，似乎破坏了著名的基尔霍夫电流定律。当然，这是不可能的。但是，为什么会出现这样的中线电流，它对电网并联运行有哪些影响，怎样消除，等等问题，激励作者去探索，去研究。

1972年至1978年间，作者用业余时间写了三篇论文，弄清了两台同容量同型号机组并联，当柴油机调速系统出现故障时，就可能形成上述的特殊的电磁现象。这些结果集中反映在1979年5月出版的《柴油机交流发电机组并联运行及其稳定法》一书中。该书曾获机械工业部1981年科技进步二等奖。

该书出版以来，数年中又取得了许多新的进展：从对称振荡发展到不对称振荡的讨论；从渐近方法发展到应用谐波线性化方法、对数法等来讨论电力系统并联运行稳定性和非线性共振等问题；从定性讨论进展到能够定量计算，等等。这些内容主要反映在几次重要的国际学术会议和《中国科学》上发表的论文中。增加和充实了很多新的内容。不仅适用于移动电站，也适用于一般电站的并联运行及其稳定性分析，所以改名为《电站并联运行及其稳定性》。

新版共六章。

前三章，在原有的框架上，改编和补充了许多新的内容：改写了第一章；第二章改名为均分负荷的最佳结构实现，给出了稳

定而又完善和稳定但不完善子系统的新概念;第三章保留原章名,数学基础,但充实了很多内容,介绍和论述了电网稳定的基本概念,线性化模型的局限性、弱非线性系统及其基本性质,保留了非线性振动理论中的渐近方法,又增加了非线性控制论中的谐波线性化原理和对数法。

原版的第四章现扩展为四、五、六三章。第四章,并联电网的结构稳定。专立一节讨论稳定问题的提法。作者认为处理复杂系统时,方法论十分重要。然后用渐近方法、李雅普诺夫第二方法和谐波线性化原理,来讨论结构对称、不完全对称和不对称并联电网的结构稳定法。给出一个算例。第五章,并联电网的非线性共振。用同样的方法讨论了三种结构并联电网的非线性共振及其稳定性分析。在一个算例中,对自振频台和并联电网结构参数选择进行了讨论。四、五两章的理论基础是几个等价定理的证明。第六章,奇异的中线电流。讨论了它的形成、数学模型及其抑制方法。

本书的再版,得到党中央和各方面的领导、国内外著名专家和学者的关怀和支持。特别是已故的一机部副部长曹维廉同志,中国自动化学会理事长、现任国务委员、国家科委主任宋健同志,福州大学名誉校长、中国科学院院长卢嘉锡同志,已故的国家科协副主席刘述周同志,前福建省科协领导陆维特同志和黄德明同志,以及光明日报社的领导和记者同志们,没有这些领导、学者和同志们的关怀和支持,我难以在这一领域坚持工作下去。谨借此机会向他们以及许多不知名的学者同志们表示敬意!

清华大学自动化系高龙副教授审阅了全稿并提出许多宝贵的修改意见,借此表示感谢!

由于水平所限,错误和不当之处在所难免,诚恳希望批评指正。

作 者

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 并联运行的意义	5
§ 1.3 并联运行需要解决的问题	6
参考文献	10
第二章 均分负荷的最佳结构实现	11
§ 2.1 两机并联均分负荷的最佳结构实现	12
§ 2.2 多机并联均分负荷的最佳结构实现	20
§ 2.3 调压特性和无功功率分配的关系	24
§ 2.4 调压特性的离散度和无功负荷分配不均匀度的关系	30
§ 2.5 同步发电机的励磁方式	33
§ 2.6 按扰动调节原理设计的自励恒压装置的调压特性	36
§ 2.7 按负反馈原理设计的自励恒压装置的调压特性	41
§ 2.8 按复合调节原理设计的自励恒压装置的调压特性	57
§ 2.9 无功负荷的调差原理	58
§ 2.10 确定调差系数和离散度的精确化公式	63
§ 2.11 调频特性及其和有功功率分配的关系	65
§ 2.12 结语	70
参考文献	71
第三章 数学基础	72
§ 3.1 稳定的基本概念	72
§ 3.2 线性系统的稳定条件	76
§ 3.3 线性系统的稳定判据	80
§ 3.4 线性化模型的局限性	85
§ 3.5 非线性系统自振荡的特殊性	87
§ 3.6 非线性系统强迫振荡的特殊性	90
§ 3.7 非线性自振荡的渐近方法	96

§ 3.8 非线性共振理论中的渐近方法	106
§ 3.9 非线性振动理论中的谐波线性化原理	116
§ 3.10 非线性控制系统中的谐波线性化原理	121
参考文献	129
第四章 并联电网的结构稳定	131
§ 4.1 并联电网的振荡现象	131
§ 4.2 稳定性问题的提法	134
§ 4.3 对称并联电网的结构稳定	142
§ 4.4 不完全对称并联电网的结构稳定	152
§ 4.5 不对称并联电网的等价定理	161
§ 4.6 $F(\delta, D\delta)$ 的谐波线性化传递函数	166
§ 4.7 并联电网的稳定判据	175
§ 4.8 不对称并联电网的结构稳定	184
参考文献	191
第五章 并联电网的非线性共振	193
§ 5.1 差转矩	193
§ 5.2 对称并联电网的非线性共振	203
§ 5.3 非线性共振解的稳定性	211
§ 5.4 不完全对称并联电网的非线性共振	220
§ 5.5 不对称并联电网的非线性共振	226
§ 5.6 并联电网结构参数的选择	233
§ 5.7 三机并联运行的非线性共振	239
参考文献	245
第六章 奇异的中线电流	247
§ 6.1 中线电流的数学模型	247
§ 6.2 各种振型下的中线电流	255
§ 6.3 中线电流对并联运行的影响及其抑制方法	257
参考文献	259
附录 M-ω_z-$\cos\varphi$ 坐标系中并联电网自振频台的计算	260

第一章 绪 论

§ 1.1 引 言

现在广泛应用的柴油机交流发电机组组成的移动电站，可以追溯到1892年德国人罗道夫·狄塞尔（Rudolph Diesel）发明的柴油机；1831年，法拉第发现的电磁感应定律；1832年，巴清诺蒂发明的发电机⁽¹⁾。从控制论的角度来看，可以追溯到瓦特第一次完善了离心式调速器⁽²⁾，和本世纪二十年代出现了电压自动调节器。由于有了这些伟大的科技成就，才能促使以柴油机为动力的移动电站进入了实用阶段。

七十多年来，随着战争、交通和野外作业等方面现代化水平的提高，对发电设备的“可移动性”的要求，愈来愈迫切，促进以柴油机（或汽油机）为动力的移动电站这门技术科学的迅速发展；其次，近三十年来，其他各门科学技术的发展，也为发展移动电站提供了丰富的技术条件，特别是半导体材料和半导体器件的出现和不断地完善，极大地推动着移动电站朝着电子化和自动化的方向发展。五十年代那种器（调压器）机（发电机）分别设计的时代基本结束了。正因为有了这些技术做为基础，使移动电站这门技术科学的技术性能、经济指标、可靠性和生命力等都有很大的提高，使它成为国民经济建设、国防建设、野外作业，和城市人民生活必不可少的动力之一。移动电站现在使用的范围正在不断地扩大：现代化的医院，没有应急电站不行；现代化的高楼建筑、地下建筑、冷库，等等，没有用它做为后备电源也不行，更不用说船舶电站、野战部队那些必须应用它的部门了。因此，可以这么说，只要以石油为主要动力能源之一的情况没有根本改变，以柴油机为动力的移动电站，在今后几十年内，仍将是一门迅速

发展的技术科学。现在，以移动电站构成的电网容量正在迅速增长着，目前最大容量已达几万千瓦了，相当于一个中小城镇的用电量。因此，它的运行可靠性和经济性也将更加突出。生产上这种需求，促使移动电站这门技术科学进入了并联大系统的理论领域，学术领域发生了深刻的变化。因此，工程控制论中的一个新分支——大系统理论——的发展，将给移动电站注入新的血液。

大系统理论虽然愈来愈被人们所重视，但是众说纷纭，并没有一种普遍公认的定义，这是一个新理论刚出现时的必然现象。不过，有一点却是可以肯定的，所谓大系统并不是指数目的多少，电站容量的大小，而是指对它的控制多层次性，以及它们内部相互之间的关系的复杂性，而且常常包括人的逻辑判断和决策在内。尽管大系统理论，现在还不太成熟，但是应用它的基本观点来处理复杂的工程问题却是卓有成效的。它告诉人们处理复杂的工程系统，要从大范围的角度来考察各个控制层次之间应该遵从的关系，这种关系叫做“协调”，或者说，从“大”的角度来阐述它所包含的“子”的层次，或子系统所应该达到的性能指标，或者叫做目标函数。换句话说，一个很复杂的系统，如果它所包含的子系统都完成了大系统赋予它们各自的性能指标，那么这个大系统也就协调地工作了，亦即完成了大系统自身所必须完成的性能指标，或者目标函数了。我们把这种设计思想叫做最佳结构实现^[3,4]。因为长期以来，控制系统的科学家和工程师们都在不完善的受控对象，或子系统面前，致力于自己本行——控制器的设计，因此，在控制对象参数和结构不可变，或子系统性能不可改善的前提下，设计它们的大系统，必然把控制系统设计得愈来愈复杂。例如，为实现移动电站并联运行时均分负荷的目的，而设计的调频调载装置就是其中之一。实际上，如果我们用均分负荷的最佳结构实现的概念来设计它们的受控对象和子系统，这种装置就可以不用，从而使控制系统得到简化。

不仅如此，应用这种观点来处理移动电站并联运行中的一些问题，还能使过去比较难搞清楚的问题，现在变得比较明朗，也

相当简单了。例如，在移动电站还处于单机运行阶段，人们关心的是调压精度和稳定性的矛盾；调速精度和稳定性的矛盾。对调节特性的线性度，或者叫做离散度的要求，则根本没有涉及，而且常常要求静态精度愈高愈好。这种仅从单机性能指标出发而设计的机组，常常难于在并联运行中收到好的结果，而且所用的数学工具也非常复杂。但是，如果我们先从并联大系统要实现稳定地均分电网负荷的目的出发，给出调节特性的线性度，即离散度的新概念之后，再用这样的新概念来研究调压和调速两个子系统应该完成的“职责”时，马上可以看到，这两个子系统的调节精度都不能太高，而对离散度的要求却应该相当地小。从数学分析的工具来看，只要用离散度这个静态指标就可以同时解决两个问题：稳定性和调节精度的两个问题。分析的方法也就大大地简化了。而且应用这样的新概念还可以帮助人们理解，为什么 IEC 以及世界各国“船规”对并联电站的调压精度的要求都比单机运行的精度低的道理了。IEC 定为小于或者等于 2.5%，美国定为小于或者等于 $\pm 4.0\%$ ，等等。

应用大系统观点来处理稳定问题也是这样的。要大系统稳定，首先要子系统稳定。当然这里仅仅就我们所研究的移动电站并联运行稳定性而言的，并非一般的大系统理论。因为在一般的大系统理论中，子系统可能是不稳定的，但由它们构成的大系统，倒可能是稳定的。例如，自行车竖直状态的运动，本身是不稳定的。但是，当它由经过训练的人骑上之后而组成的人机大系统时，却是稳定的。当然，这种例子不只一个。现在，回到我们的本题。根据最佳结构实现理论得知，在并联电网中，由于对各个机组的调压子系统和调速子系统的精度要求并不特别高，因此，静态精度和动态稳定性之间的矛盾，也就不那么突出，子系统的稳定性倒是比较容易解决。难的却是动态电压降和小的离散度之间的矛盾，因为，为了克服动态电压降，常常需要增加扰动补偿分量，而后者又是产生调节特性离散度的主要原因。这样就出现了矛盾和困难，常常只能折衷解决。根据上述的分析，研究大系统的稳定性时，

我们就认为它们的所有子系统自身都是稳定的，负荷分配也是均分的，即离散度是符合要求的。这样就没有必要去研究子系统稳定与否对大系统稳定性的影响程度如何了，只要研究大系统中各个子系统之间耦合的稳定性就行了。为此，我们建立了两个新概念：稳定而又完善的子系统构成的大系统，和稳定的但不完善的子系统构成的大系统，应用它们来研究并联大系统的稳定性问题，简化了大系统稳定性的数学模型。本书所研究的电网稳定性问题，就是在这种前提下进行的。研究表明，即使子系统是稳定的，但当它们的调节特性离散度太大时，本书把这样的子系统叫做稳定的但不完善的子系统，把它们并联成大系统后，就可能出现不允许的振荡，我们就说大系统不稳定，而不去区分它们是自由振荡，还是共振。例如，根据复合控制原理设计的调压子系统，尤其要注意扰动调节分量（即复励部分或三次谐波励磁部分）和负反馈调节分量（即电压校正器部分）之间的合理比例，不要使非线性特性强化，以至于离散度太大。也就是说，应该有足够强度的负反馈来抑制复励部分正反馈作用而激发起的非线性效应。文献〔5〕所讨论的稳定性问题，就是属于这一类型的问题。

当并联电网中出现低频大振幅的振荡时，在三相四线制的供电电网中，会出现一种我们称之为奇异的中线电流^{〔6,7〕}。它的振幅受低频振荡频率调幅，而它的载波电流却是三次谐波电流。这是一个没有前人研究过的特殊电磁现象，我们命名它为“奇异的中线电流”。振荡消失之后，这种中线电流也跟着消失。但是，当它出现之后，对振荡来说又是一个正反馈的作用。换句话说，振荡产生了奇异的中线电流，而奇异的中线电流形成之后，又反过来促成更强烈的振荡。在三相四线制电网中，不论是自振，还是共振，也不管三相负荷对称与否，都会产生这样的中线电流。这种现象的发现和理论分析都是电工学发展以来没有前人讨论过的。

为了讨论上述诸问题，我们将直接从研究非线性方程着手。因为线性总是相对的，非线性才是绝对的。许多真实的物理现象，只有通过非线性微分方程才能加以正确地描述。移动电站和市电

电网不同,前者总是在周期性脉动转矩驱动下运行的。因此,非线性振动理论中的渐近方法^[8]和非线性控制理论中的谐波线性化原理^[9],用来研究这些问题是非常恰当的。这些数学方法对电力系统稳定性分析来说也是新的。

§ 1.2 并联运行的意义

容量不大的移动电站为什么会有这么多的技术科学问题,需要人们去研究呢?主要是需要并联运行,很少只用一台发电机组单独供电。这是因为几台发电机组并联运行,可以提高电网供电的经济性、可靠性和稳定性,对国民经济有重大的经济意义和政治意义。

我们知道,移动电站电网负荷的变化很大。采用单机供电,如果以轻载来确定发电机的容量,高峰负荷来临时,供不应求,电压和频率急剧下降,电网的稳定性降低,以至于失步;如果以高峰负荷来选择发电机组的容量,轻载时,效率很低,浪费很大。因为柴油机在轻载运行时,油耗要比额定运行时的油耗大2~3倍;同时,柴油机长期处于轻载运行,寿命大大缩短。多机组并联运行,恰好可以克服这些缺点。

对于自动化的船舶电站以及其它一些重要的移动电站,均要求能连续地不间断地进行供电。另外,电机、电器和柴油机等设备又都需要定期进行检修维护,如果单机供电,检修时,就要停电;正在运行中的机组,有时,也可能偶然遇到故障,单机供电就不可能实现连续地不间断地供电。多机组并联运行,停电的可能性就少得多了。

并联机组多、电网容量大。负荷变化和冲击,对电网电压和频率的干扰,相对地减少了,供电的质量和稳定性也就相对地提高了。

因为并联运行具有这些优点,因而得到极为广泛的应用。

§ 1.3 并联运行需要解决的问题

但是，要想得到并联运行所能发挥的这些好处，就必须研究和掌握柴油机交流发电机组并联运行中出现的若干特殊的运动规律。并且认真地解决这些新出现的问题，才能达到预期的目的。否则，在一定条件下，好的东西也可能引出坏的结果来，向它的反面发展，破坏了电网的可靠运行。

柴油机交流发电机组并联运行有哪些特殊问题呢？概括起来说，有四个主要问题：

1) 要有简单、可靠和方便的并联方法

要把几台同步发电机并联起来运行，事前，要逐条检查并联运行的条件是否得到满足。这些条件叫做“五个相同”。即电压相同，频率相同，相序相同，相位相同，和电压波形相同。因为通常的交流发电机的电压波形都接近于正弦，这一条基本上是自然满足的。所以上述条件又可以说是“四个相同”。这些条件中，任何一条相差太大就进行并联操作，会产生很大的冲击电流，轻者影响供电质量，重者损伤以至于破坏电机、电器设备以及原动机等。因此，研究各种并联操作的原理和装置以保证电网安全可靠地供电，是并联运行中首先必须解决的问题。已有不少教科书讨论这一问题，本书不予讨论。

2) 均分电网负荷

参加并联运行各个机组之间，应能按比例地自动分担电网中的有功功率和无功功率。同时，还应该保证可以在各并联机组间，根据需要顺利地调节，或者转移它们之间所承担的负荷，而不致显著地影响供电的质量。

实际上，根据现在世界各国技术发展水平来看，尚不能实现比较理想地均分电网负荷的要求。当电网总负荷接近于系统装机总容量时，较大的功率分配不均匀，会造成一台机组的原动机、交流发电机，和它的调压器过载，另一台则处于轻载或空载，不能发挥并联运行的优点；在三相四线制供电系统中，还会产生三次

谐波的中线电流。这些现象的发生，轻则缩短设备的使用寿命，重则损坏设备。因此，国际电工委员会和各国规范都对并联运行机组间的功率分配不均匀程度作了规定。尽管各国的规定稍有不同，但是，它们的不均匀程度仍然是相当可观的。因此，不能认为达到规范值，就是理想的了。人们希望的是，预先规定一个足够小的功率分配不均分值，然后从理论上推算参预并联运行的机组的调压器、调速器和机组本身的结构，应该具备什么样的特性和参数，才能实现预先规定的足够小的功率分配不均分值的要求。我们把用这种办法来实现均分负荷的目的的技术措施，叫做最佳结构实现。也就是说，我们将通过正确选择控制对象、子系统的结构参数以及控制策略，来达到实现均分负荷的目的，而不是单纯地使用控制器。尽管这些要求中的某些技术条件，如动态过程均分负荷的结构实现，在现有的技术条件下，还很难做到。但是，有一个经过努力可能达到的目标，总比没有目标来得好。

3) 稳定性

移动电站并联大系统和市电大系统虽然有许多共同点，例如，两者都需要有简单、可靠、方便的并联装置、保护装置，都能实现稳定地均分负荷的目的等。但是，以柴油机或汽油机为动力的移动电站，却有自己的特点，它的原动机输出转矩总是脉动的周期性转矩，它构成了研究这种电站并联大系统稳定性研究的特殊性。

在人们的一般观念中，振荡就意味着系统不稳定。但是，在移动电站中，这样笼统的提法是不确切的。需要区分它是哪一类型的振动，它们的强度如何，因为在周期性转矩的驱动下，整个系统都在微幅振动中，只要振动的振幅足够小，我们就认为该系统的工作是正常的。

整个移动电站，在周期性转矩驱动下，会出现各种各样的振动。振型不同，数学的描述方法也不同，需要解决的问题和措施也不同。例如，柴油机轴系，在周期性扭矩作用下，产生扭振。描述这种扭振状态的数学模型就不同于其它类型的振动的数学模

型。只要扭矩的频率，它通常是“高频”的，不接近于轴系的固有自振频率，即不会发生轴系的机械共振，机组的工作就是正常的。显然这是能够正常出厂的柴油机的基本要求之一。因此，在研究并联大系统稳定时，就不必提出这种扭振对并联电网稳定性影响如何的问题了；其次，在柴油机调速子系统中，它的转速反馈，在周期性脉动扭矩的驱动下，也在周期性地脉动着。显然，凡是能够正常工作的调速子系统也不应该出现共振；再如，整个机组和地基之间，也在周期性扭矩驱动下，设计不当，也可能出现共振，等等。凡此种种，构成了移动电站并联运行异常复杂的、多层次的稳定问题。如果不加分析，不去区分不同类型的振动，按层次地分别加以解决，那就找不到并联大系统本身稳定性问题的实质，也就解决不了实际问题。

移动电站并联电网出现的强烈振荡，常常是这样的：单机运行是稳定的，可是并联之后，有时立即出现强烈的振荡；有时却能正常运行一段时间，随后才出现强烈的振荡。这种情况表明，对并联电网稳定性的研究，实际上是对它们之中所包含的各个子系统之间耦合的稳定性的研究了。这样处理，我们对并联大系统稳定性问题的研究就归结为这样两类问题的研究了：

稳定而又完善的子系统组成的并联电网的稳定性问题；

稳定的但不完善的子系统组成的并联电网的稳定性问题。

什么是稳定而又完善（或不完善）的子系统呢？为此，我们引入：

定义(1) 若组成并联大系统所有的调速子系统，不仅稳定，而且它们的驱动扭矩 M_{ci} ， $i = 1, 2$ ，满足如下关系：

$$\frac{M_{c1}}{M_{c2}} = K_c = \text{const}, \quad \forall t \in (0, \infty), \quad (1-1)$$

则称这两台并联机组的调速子系统不仅是稳定的，而且是完善的，否则，就说这两个调速子系统为稳定的，但是是不完善的子系统。

同理，我们有

定义(2) 若组成并联大系统所有的调压子系统, 不仅稳定, 而且它们的励磁电流 i_{lj} , $j = 1, 2$ (j 为序号), 满足如下关系:

$$\frac{i_{l1}}{i_{l2}} = K_j = \text{const}, \quad \forall t \in (0, \infty), \quad (1-2)$$

则称这两台并联机组的调压子系统, 不仅稳定, 而且是完善的, 否则, 就说这两个调压子系统为稳定的, 但是是不完善的子系统。

对于由稳定而又完善的子系统组成的并联电网稳定性的研究, 问题被简化为对齐次常系数非线性微分方程所描述的系统的稳定性的研究了, 我们称这一类问题为结构性稳定问题; 对于由稳定但不完善子系统组成的并联电网稳定性的研究, 情况就比较复杂了。描述稳定的但不完善的调速子系统组成的并联电网稳定性的数学模型, 演化为非齐次非线性常系数微分方程的解及其稳定性的分析, 它将是分析非线性共振产生条件及其抑制方法的研究; 描述稳定的但不完善的调压子系统组成的并联电网稳定性的数学模型, 将是一个非线性时变系数微分方程, 这就给理论分析带来巨大的困难。可喜的是, 在调压子系统中要实现定义(2)的条件比较容易。因而这个问题的稳定性分析实际上就解决了。

4) 奇异的中线电流

1972年, 在“闽海105货轮”电站中, 两台120kW 柴油机交流发电机组并联运行的电网, 经过一段正常运行之后, 机组之间突然出现了严重的功率振荡。尽管当时的电网三相负荷是对称的, 但是在三相四线制的供电电网的中线中, 却出现了其峰值超过一相额定电流的中线电流, 它的振幅受机组间的振荡频率调幅, 而它的载波电流却是三次谐波。后来, 许多实践证明这一现象带有普遍性。它的出现似乎是破坏了基尔霍夫电流定律, 当然, 这是不可能的。但是, 我们必须回答这样一些问题: 为什么会出现这种现象? 这样的中线电流对并联电网稳定性有什么影响? 怎样消除它?

参 考 文 献

- [1] J. 布罗诺夫斯基主编, 中国科学技术情报研究所译: 《人类改造自然(技术)》, 北京, 科学出版社, 1965年。
- [2] Alistair G. J. MacFarlane, The Development of Frequency-Response Methods in Automatic Control. IEEE Trans. Vol. AC-24, №2, April 1979.
- [3] 项国波, 线性定常反馈控制系统中的ITAE最佳调节, 《中国科学》A辑, 1982, 2, 中国科学院主办。
- [4] 项国波, ITAE最佳控制, 机械工业出版社, 1986.2。
- [5] 吴正中, 谐波励磁发电机静态稳定性的探讨, 《中小型电机技术情报》, 1977, 1, 上海电器科学研究所。
- [6] 项国波, 再论柴油机交流发电机组并联运行稳定性, 《中小型电机技术情报》, 1978, 3, 上海电器科学研究所。
- [7] G. B. Xiang (项国波), H. M. Xie (谢惠民) Nonlinear Resonance of The Diesel-Generator Sets Operation in Parallel, Proc. of The Eighth Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control, Kyoto, Japan, 24-28 August, 1981. P. 1867-72, Vol. 4.
- [8] Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский, Асимптотические Методы В Теории Нелинейных Колебаний, Техтеогиз, 1955.
- [9] 项国波, 非线性自动控制系统中的谐波线性化原理, 《信息与控制》, 1980, 1, 中国科学院沈阳自动化研究所。

第二章 均分负荷的最佳结构实现

人们希望参预并联运行的所有机组都能按比例地均分电网中的负荷。

怎样才能实现这一目的呢？

通常的设计方法，总认为柴油机、发电机的结构参数已经设计好了，不可改变。因此，控制工程师们只能在控制技术上想办法。这么做，常常不得不把控制系统设计得异常复杂，不仅投资增加了，而且系统的可靠性也随着降低了。现在我们改变一种设计思想，先从整个并联系统需要按比例地均分电网总负荷的要求出发，分析一下，柴油机及其调速器，发电机及其调压器，它们之间的结构和参数应该具有什么关系，就可以不用控制装置，而能够实现均分负荷的目的。讨论的结果是这样的简单，只要参预并联运行的所有机组满足如下的条件：

- 1) 参预并联运行的发电机应具有相同的阻抗标么值和结构参数标么值；
- 2) 发电机和它的调压器所构成的调压特性应具有相同的调差系数；
- 3) 柴油机和它的调速器构成的调频特性应具有相同的频率调差系数；
- 4) 参预并联运行的柴油机交流发电机组应具有相同的等值时间常数。

并联机组具有上述条件就能实现均分电网负荷的目的。我们把这种仅从结构上，而不光是通过控制手段来实现均分电网负荷的办法，叫做均分负荷的最佳结构实现。

应该指出，本章所讨论的问题，都是在假定并联电网是稳定的前提下进行的。因为只有稳定的电力系统，才能讨论机组之间