

柴油机交流发电机组 并联运行及其稳定性

国防工业出版社

524

内 容 简 介

本书把柴油机交流发电机组并联运行及其供电电网看成是一个大系统工程。发电机及其调压器、柴油机及其调速器等，则看作并联大系统的子系统。书中，讨论了并联机组均分电网负荷对调压和调速两个子系统提出的要求及其实现的途径；其次，应用非线性振动理论中的渐近方法分析了并联大系统的稳定性问题，分析表明大系统是渐近稳定的，大系统振荡的实质是柴油机低频干扰转矩激起的非线性的随机共振，提出消除这种危害性共振的技术措施。

本书着重于理论分析。可供从事电站研究、设计、制造的技术人员和高等院校教师、研究生、高年级学生参考，也可供电站运行、维护人员以及从事于大系统稳定性研究技术人员参考。

柴油机交流发电机组并联运行及其稳定性

项 国 波 著

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

八九九二〇部队印刷厂印刷

*

850×1168¹/₃₂ 印张5⁹/₁₆ 138千字

1979年5月第一版 1979年5月第一次印刷 印数：00,001-20,500册

统一书号：15034·1796 定价：0.72元

前 言

本书是在为某造船厂建造的一艘货轮电站解决了两台柴油机交流发电机组并联大系统振荡问题，相继发表了两篇理论性论文后而做的系统性的理论总结。除了已发表的文章外，又增加了一些新内容。

现在广为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 年德国人狄赛尔发明的柴油机，1831 年法拉第发现了电磁感应定律，1832 年巴清诺蒂发明了发电机。从自动控制的角度来看，可以追溯到瓦特第一次完善了离心式调速器，和本世纪二十年代发明了自动电压调节器后，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，柴油机、交流发电机和它们的调节器，在它们各自的领域内都有很大的发展。正因为有了这些技术做为基础，使移动电站的使用范围愈来愈广泛，由它们构成的电力系统的容量也愈来愈大了。它促使移动电站这门科学技术，从单参量自动控制进入了多参量相互关连的大系统的理论领域了。本书力图适应这一科学技术发展的趋势，从大系统的角度来阐述移动电站并联大系统中出现的当前急待解决的两个问题：大系统的稳定性和最佳负荷分配。

全书共分四章，第一章叙述并联大系统中当前存在的三个主要问题做为问题的提出。第二章讨论电力系统最佳负荷分配的必要条件及其实现的技术措施。用较大的篇幅从理论上阐述三种调压原理对无功功率分配不均匀度的关系；讨论了为均分电网有功功率而对调频（速）系统和功率匹配系数提出的要求。从现在技术发展水平来看，实现这样理想的技术要求，与其说是技术问题，

倒不如说是技术管理问题更为确切些。第三章介绍大系统稳定性的数学基础。从工程技术科学来看,数学是一种“工具”。我们就是从为了解决工程技术中出现的问题,应如何正确选用适当的数学方法,作为解决工程问题的工具的角度出发,来介绍线性常系数微分方程和非线性振动理论中的渐近方法的基本思路和方法,着重介绍使用这些方法的物理基础。第四章讨论并联大系统的稳定性问题。这个问题非常复杂。关键的问题是关于稳定性问题的提法。我们用一定的篇幅阐述怎样把大系统多状态的稳定性问题,演化为单状态的稳定问题,然后用非线性振动理论中的渐近方法来研究这类大系统的稳定问题。结果表明大系统是渐近稳定的。并联大系统中出现的振荡现象是由柴油机产生的低频干扰转矩激起的非线性共振。提出了克服这种危害性共振的技术措施及其理论根据。

为了验证受共振频率调制的中线调幅电流形成的图象,曾在某造船厂王喜官、陈起华、林耀生和有关船员同志的协助下,做了船舶电站实验,用余辉示波器观测了共振时有关电量的振荡波形。没有他们的支持,参考文献〔4〕及本书第§4-10和§4-11两节内容,就会缺少必要的实验根据。借此,对上述诸同志表示谢意。

本书着重于理论研究,很少牵涉到具体的线路和技术装置。这是因为一方面作者认为,从移动电站技术发展到今天这样的水平来看,它迫切要求从大系统控制论的角度来阐述大系统中所包含的各个子系统所必须完成的职能。另一方面,要使各个子系统称职,即忠实地执行大系统所赋予它们的“职责”,还需要大量的具有相应专业知识的技术人员配合,进行柴油机及其调速系统、交流发电机及其自动调压系统、电力系统的动态过程以及大系统过渡过程的理论研究和工程实践。这不是做不到的事,但是不是一两个人所能完成的工作,而是需要有组织有领导的大集体的智慧。因此,就此而论,本书就不可能不存在一定的局限性和

错误。

恩格斯说过，“如果在细节上形而上学比希腊人要正确些，那么总的说来希腊人比形而上学要正确些”（见恩格斯，自然辩证法，1955年，人民出版社，第26页）。因为“在希腊人那里——正因为他们还没有进步到对自然界的解剖和分析——还是把自然界当作一个整体而从总的方面来观察”（同前，第25页）。在科学技术分工愈来愈细，愈来愈深入的今天，就更需要专业技术人员自觉地从总的方面来观察各个事物之间的相互联系和相互渗透。

现在，以华主席为首的党中央，号召我们继承毛主席、周总理的遗志，为在本世纪内实现我国四个现代化的雄伟目标，“树雄心，立壮志，向科学技术现代化进军。”我们坚信，在英明领袖华主席率领我们开始新的长征中，伟大的社会主义祖国的移动电站的科学技术，不久将来一定会有更大的跃进！

一九七八年二月十四日于福州

目 录

第一章 并联运行的意义和问题	1
§ 1-1 并联运行的意义	1
§ 1-2 并联运行存在的主要问题	2
§ 1-3 解决稳定问题的基本途径	4
第二章 并联系统的功率分配	5
§ 2-1 均分负荷的必要条件	5
§ 2-2 调压特性和无功功率分配的关系	13
§ 2-3 调压特性的离散度和无功负荷分配 不均匀度的关系	19
§ 2-4 同步发电机的励磁方式	22
§ 2-5 按扰动调节原理设计的自励恒压装 置的调压特性	25
§ 2-6 按负反馈原理设计的自励恒压装置 的调压特性	30
§ 2-7 按复合调节原理设计的自励恒压装置 的调压特性	45
§ 2-8 无功负荷的调差原理	45
§ 2-9 确定调差系数和离散度的精确化公式	50
§ 2-10 调频特性及其和有功功率分配的关系	51
§ 2-11 结语	58
第三章 并联大系统稳定性的数学基础	59
§ 3-1 二阶常系数线性系统的稳定条件	59
§ 3-2 线性常系数系统自由振荡的等时性	63
§ 3-3 二阶常系数线性系统的强迫振荡	65
§ 3-4 非线性系统自由振荡的特殊现象	69

§ 3-5	非线性自由振荡理论中的渐近方法	71
§ 3-6	非线性共振的一些特殊现象	81
§ 3-7	非线性共振理论中的渐近方法	84
第四章	并联大系统的稳定性	95
§ 4-1	并联大系统的振荡现象	96
§ 4-2	稳定问题的提法	98
§ 4-3	柴油机谐波转矩的分析	100
§ 4-4	并联大系统的基本方程	105
§ 4-5	匀速驱动下, 均分负荷时的自由振荡过程	115
§ 4-6	匀速驱动下, 不均分负荷时的自由振荡的过程	124
§ 4-7	两台柴油机交流发电机组并联运行时差周期转矩的分析	131
§ 4-8	两机均分负荷时的机电共振	137
§ 4-9	两机不均分负荷时的机电共振	146
§ 4-10	中线调幅电流的形成	153
§ 4-11	调幅的中线电流对共振的影响	161
§ 4-12	各种参数对中线调幅电流的影响	162
§ 4-13	克服共振的措施	164
附录		167
参考文献		169

第一章 并联运行的意义和问题

§ 1-1 并联运行的意义

现在，船舶以及其他各种移动电站，绝大多数是采用柴油机为动力的交流发电机组供电的。而且常常是用几台同步发电机组并联运行，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是很大的。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至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，因而获得极为广泛的应用。

§ 1-2 并联运行存在的主要问题

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,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,有三个主要问题:

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。有关单位对此问题曾组织了技术交流会,并出版了专辑^[1]。

2) 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所承担的功率,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的负荷的要求。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功率分配不均分程度作了规定,见附录——各国有关规范对并联运行的规定摘要对照表。该表指出,尽管各国的规定稍有不同,但是,它们不均分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。尽管这些要求,在现在的技术条件下,有的还可能实现不了,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。下面准备用一定篇幅,从这个角度上探讨一下功率分配不均匀度和调压特性、调频特性以及机组结构参数间的关系。

3) 稳定性问题。

参预并联运行的发电机组,有时不但不能均分电网的负荷,而且在机组之间还可能产生功率振荡。这种振荡不同于单机振荡,它具有它自己的特点:

振荡发生时,电网电压波动不大,但机组间功率振荡却是激烈的;

振荡的频率是低频的,通常只有零点几赫至几赫之间,而且振荡的频率不是定常的,而是带有随机性质的;

同一机群,振荡的出现也是随机的。在某一时期,空载运行时,系统中可能出现严重的功率振荡;可是当它处在重载运行时,振荡的现象可能反而消失了。这说明振荡的出现和系统的负载性质及其大小有关。同样的负荷,在某一时期,系统的运行是正常的;可是在另一时期,系统中反而出现严重的振荡现象。这说明振荡的出现又和组成机群的各个关键设备的状态的变化程度有关;

在三相四线制并联运行的电网中,中线中还会出现被共振频率激烈调幅的大电流。这种电流的最大值,有时甚至超过一台电机

的额定值。切断中线,系统中的振荡现象显著减轻,甚至于消失。

显然,不把振荡的原因搞清楚,也就无法解决稳定问题。因此实现并联大系统的稳定性,将是实现并联运行最起码的条件。

在这三个问题中,第一个问题基本上属于工艺性质的,本书将不予讨论。后两个问题是工程实践中急待解决的问题,本书着重予以讨论。

§ 1-3 解决稳定问题的基本途径

柴油机交流发电机组并联运行属于大系统的范畴,它包括柴油机和交流发电机组组成的局部系统,每个局部系统又都包含调频和调压两个子系统。因此,虽然稳定性问题只是系统能够正常运行的最起码条件,但却是最复杂的问题。为了正确地处理大系统的稳定性问题,必须根据它们的物理本质对大系统进行分解,只有把复杂的大系统问题,分解为简单的物理过程,理论的分析才有可能。

我们知道,尽管组成并联大系统的各个子系统,本身就是一个很复杂的自动调整系统,而且可能还是非线性系统,例如柴油机及其调速器;发电机及其调压器等等。但是它们在柴油机交流发电机组组成的这样一个相当庞大的并联大系统中,却成为一个部件了。我们把它们看成是组成并联大系统的部件,用大系统的概念来说,叫做“子系统”。我们暂且不去深究子系统内部的细节,而从总的方面来考察它们之间的相互联系,建立大系统的运动方程,然后研究描述这个大系统的微分方程,找出各个子系统应该满足的要求,最后以此为据,设计各个子系统的结构和参数。这就是我们解决稳定问题的基本途径。

参考文献〔3〕〔4〕就是从大系统的概念出发,把柴油机、交流发电机和电网看成一个大型系统工程不可分割的整体。用非线性振动理论中的渐近方法〔6〕研究不稳定的实质同时提出克服这种振荡的技术措施。本书第四章着重介绍这些内容。

第二章 并联系统的功率分配

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？

它和柴油机及其调速器、发电机及其调压器的结构和参数有些什么关系呢？

这一章，我们将从静态的观点出发，讨论一下这个长期受人们关切的问题。

分析的结果是这样的，欲使参预并联运行的所有机组能够均分电网的负荷，必须要：

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。

这里，我们首先假定并联大系统是稳定的。因为只有稳定的电力系统，才能讨论机组之间的合理的功率分配问题。至于并联大系统的稳定性问题，将在第四章中详细讨论。

§ 2-1 均分负荷的必要条件

图 2-1 给出两台柴油机交流发电机组并联运行时的结构图。图中，环节 4 至 7 组成了具有无功电流调差环节的按负反馈原理

建造的调压器，它和发电机 2 组成了自动调压的子系统。环节 8 至 9 构成了柴油机的调速器，它和柴油机 3 形成了自动调速的子系统。这两个子系统构成了局部系统——柴油机交流发电机组，两个局部系统和电网中的负荷 1 形成了并联大系统。

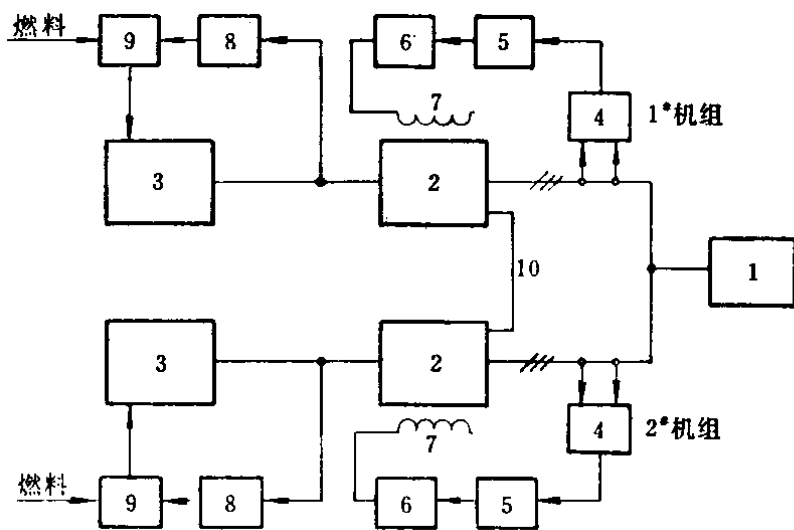


图2-1 并联大系统的结构图

1—负载；2—发电机；3—柴油机；4—调压器的测量环节；5—调压器脉冲形成环节；6—调压器的可控硅整流电路；7—励磁绕组；8—机械离心式调速器；9—喷油嘴；10—中线。

人们希望参预并联运行的所有机组，都能够按它们功率的大小，均匀地分担电网中的负荷。因为严重的负荷分配不均匀，不仅不能充分发挥机组的供电能力，而且运行的经济指标会显著下降。

能不能做到理想地均分电网的负荷？

怎样才能实现这一最佳的负荷分配？

这一节，我们将从理论上分析一下实现这一最佳负荷分配的必要条件。

我们知道，任何一个复杂的电力系统，都可以用它们的等值电路来表示，然后应用电路理论的基本定律，导出各个机组的功率函数的显式。有了功率函数的显式，就可以从中找出均分电网负荷的最佳条件。因为这里讨论的仅是静态关系，所以称它们为必要条件。

两台柴油机交流发电机组并联运行时的等值电路可以简化为如图 2-2 所示^①。两机的电势 E 和电网电压 U 间的矢量关系示于

① 复阻抗本书用 Z 表示，其模用 Z 表示。

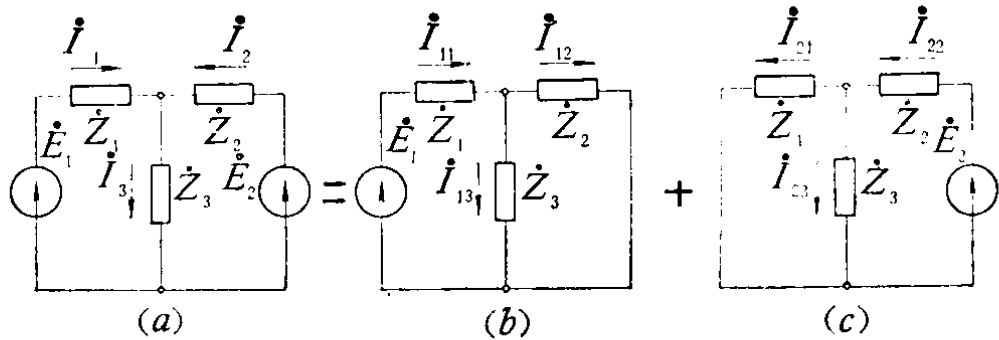


图2-2 两台机组并联运行时的等值电路

$\dot{E}_1, \dot{E}_2$ —两台发电机的激磁电势； $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2$ —两台发电机的阻抗； $\dot{Z}_3$ —电网负载阻抗。

图 2-3。

应用叠加原理，图 2-2 (a) 所示的两台发电机并联运行时的等值电路又可以分解为由图 2-2 (b) 和 (c) 两个等值电路组成。根据这些等值电路就可以导出每台发电机产生的电磁功率的大小。

的确，按照图 2-2 (b) 所示的等值电路，电势 $\dot{E}_1$ 产生的电流 $\dot{i}_{11}$ 和 $\dot{i}_{12}$ 分别为：

$$\dot{i}_{11} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_{11}}, \quad (2-1)$$

式中 $\dot{Z}_{11}$ ——1[#] 机组的输入阻抗。

它可以表示为：

$$\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}_2 \dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3}; \quad (2-2)$$

而

$$\dot{i}_{12} = \dot{i}_{11} - \dot{i}_{13} = \dot{i}_{11} - \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_3} \dot{i}_{12}, \quad (2-3)$$

移项后，同时考虑方程(2-1)的关系，则方程(2-3)取：

$$\dot{i}_{12} = \frac{\dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_{11}} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_{12}}, \quad (2-4)$$

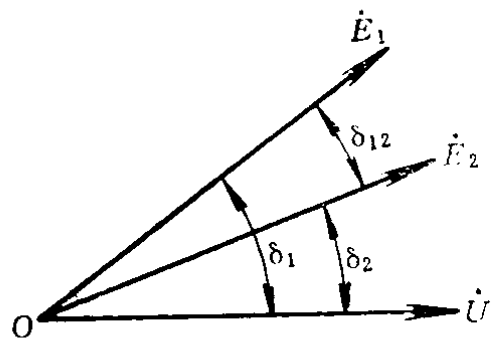


图2-3 两台机组并联运行

时，电势和电压的矢量图

$\dot{E}_1, \dot{E}_2$ —两台发电机的激磁电势； $\dot{U}$ —负载 $\dot{Z}_3$ 上的电压； δ_1, δ_2 —两台发电机的功率角； δ_{12} —电势 $\dot{E}_1, \dot{E}_2$ 的功率角差。

式中,

$$\dot{Z}_{12} = \frac{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3}{\dot{Z}_3} \cdot \dot{Z}_{11} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_3} \circ \quad (2-5)$$

我们称 $\dot{Z}_{12}$ 为 1* 发电机至 2* 发电机的转移阻抗。

同理, 根据图 2-2(c), 可以求得 2* 发电机电势 $\dot{E}_2$ 产生的电流 $\dot{I}_{22}$ 和 $\dot{I}_{21}$ 分别为:

$$\dot{I}_{22} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_{22}}; \quad (2-6)$$

$$\dot{I}_{21} = \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_{21}} \circ \quad (2-7)$$

式中 $\dot{Z}_{22}$ —— 2* 发电机的输入阻抗;

$\dot{Z}_{21}$ —— 2* 发电机至 1* 发电机的转移阻抗。

$\dot{Z}_{22}$ 和 $\dot{Z}_{21}$ 分别取:

$$\dot{Z}_{22} = \dot{Z}_2 + \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_3}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_3}; \quad (2-8)$$

$$\dot{Z}_{21} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \frac{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2}{\dot{Z}_3} \circ \quad (2-9)$$

现在, 回到图 2-2(a) 的等值电路, 则知两机并联运行时, 1* 发电机产生的实际电流 $\dot{I}_1$ 为:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{21} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{Z}_{11}} - \frac{\dot{E}_2}{\dot{Z}_{21}} \circ \quad (2-10)$$

按照图 2-3 所示的矢量关系, 1* 发电机产生的视在功率 $\dot{W}_1$ 为:

$$\begin{aligned} \dot{W}_1 &= \dot{E}_1 \hat{I}_1 = \frac{\dot{E}_1 \hat{E}_1}{\hat{Z}_{11}} - \frac{\dot{E}_1 \hat{E}_2}{\hat{Z}_{12}} \\ &= \frac{E_1 / \delta_1 E_1 / -\delta_1}{Z_{11} / -\psi_{11}} - \frac{E_1 / \delta_1 E_2 / -\delta_2}{Z_{12} / -\psi_{12}} \\ &= \frac{E_1^2}{Z_{11}} / \psi_{11} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} / (\delta_1 - \delta_2 + \psi_{12}) \\ &= \frac{E_1^2}{Z_{11}} (\cos \psi_{11} + j \sin \psi_{11}) - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} [\cos(\delta_{12} + \psi_{12}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + j \sin(\delta_{12} + \psi_{12})) \\
& = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \cos \psi_{11} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cos(\delta_{12} + \psi_{12}) \\
& + j \left[\frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \psi_{11} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} + \psi_{12}) \right], \quad (2-11)
\end{aligned}$$

式中,

$$\psi_{11} = \arg \dot{Z}_{11};$$

$$\psi_{12} = \arg \dot{Z}_{12};$$

$$\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2.$$

由于视在功率 $\dot{W}_1$ 又可以表示为:

$$\dot{W}_1 = P_1 + jQ_1, \quad (2-12)$$

式中 P_1 ——1*机组的有功分量;

Q_1 ——1*机组的无功分量。

故, 令方程(2-11)和(2-12)右端的实部、虚部对应相等, 则 1* 发电机产生的有功功率 P_1 和无功功率 Q_1 分别为:

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \cos \psi_{11} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cos(\delta_{12} + \psi_{12}); \quad (2-13)$$

$$Q_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \psi_{11} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} + \psi_{12}), \quad (2-14)$$

引入

$$\alpha_{11} = 90^\circ - \psi_{11};$$

$$\alpha_{12} = 90^\circ - \psi_{12}.$$

考虑到

$$\cos \psi_{11} = \cos(90^\circ - \alpha_{11}) = \sin \alpha_{11};$$

$$\cos(\delta_{12} + \psi_{12}) = \cos(\delta_{12} + 90^\circ - \alpha_{12}) = -\sin(\delta_{12} - \alpha_{12});$$

$$\sin \psi_{11} = \sin(90^\circ - \alpha_{11}) = \cos \alpha_{11};$$

$$\sin(\delta_{12} + \psi_{12}) = \sin[90^\circ + (\delta_{12} - \alpha_{12})] = \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}).$$

则

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}); \quad (2-15)$$

$$Q_1 = \frac{E_1^2}{Z_{11}} \cos \alpha_{11} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cos(\delta_{12} - \alpha_{12}). \quad (2-16)$$

同理，2*发电机提供的有功功率 P_2 和无功功率 Q_2 分别为：

$$P_2 = \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}); \quad (2-17)$$

$$Q_2 = \frac{E_2^2}{Z_{22}} \cos \alpha_{22} - \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \cos(\delta_{12} + \alpha_{12}). \quad (2-18)$$

式中，

$$\alpha_{22} = 90^\circ - \arg \dot{Z}_{22}.$$

现在需要研究的是，在什么条件下，可以实现理想地均分电网负荷。亦即需要确定最佳均分电网负荷的条件。

为此，令

$$P_1 = P_2;$$

$$Q_1 = Q_2.$$

现在先讨论均分有功功率的条件。由于两机励磁电势可以表示为：

$$E_1 = k_1 \omega_1 i_{l1}; \quad (2-19)$$

$$E_2 = k_2 \omega_2 i_{l2}. \quad (2-20)$$

式中 k_1, k_2 ——分别表示1*、2*电机结构系数；

ω_1, ω_2 ——分别表示1*、2*电机转子角速度；

i_{l1}, i_{l2} ——分别表示1*、2*电机的励磁电流。

计及方程(2-19)和(2-20)的关系，两机的有功功率分别为：

$$P_1 = \frac{(k_1 i_{l1} \omega_1)^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{k_1 k_2 i_{l1} i_{l2} \omega_1 \omega_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}); \quad (2-21)$$

$$P_2 = \frac{(k_2 i_{l2} \omega_2)^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} - \frac{k_1 k_2 i_{l1} i_{l2} \omega_1 \omega_2}{Z_{12}} \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}). \quad (2-22)$$

根据图 2-3 所示的矢量关系，两台机组均分电网负荷时，存在如下关系：

$$\delta_1 = \delta_2, \quad (2-23)$$

即

$$\delta_{12} = 0. \quad (2-24)$$