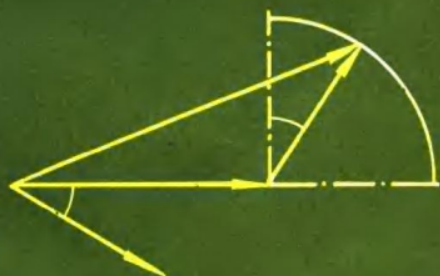


# 柴油发电机组并联运行 及调整

段远才 金松令 编著



1.22

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书通过机和电两个系统的综合分析,阐述了柴油发电机组并联运行中的负载分配不均和振荡的基本概念、理论基础和影响并联运行的有关因素以及在实际运行中的调整改善方法,并介绍了柴油发电机组并联运行的自动控制问题。

本书可供从事柴油机电站工作的科研、设计人员、运行管理人员以及大专院校师生参阅。

## 柴油发电机组并联运行及调整

段远才 金松令 编著

\*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

\*

787×1092  $1/32$  印张 6 $3/4$  145千字

1988年9月第一版 1988年9月第一次印刷 印数: 0,001—1,580册

---

ISBN 7-118-00222-4/U25 定价: 3.35元

## 前 言

本书是根据目前柴油发电机组并联运行经常出现的功率分配不均和振荡等问题编写而成的。由于解决这些问题需要从机和电两个系统进行综合分析着手,因此,在编写中作者注重从机电两个方面对柴油发电机组并联运行中的问题进行综合性的统一阐述;同时吸收了有关方面的意见,并尽可能将这些宝贵的意见和实践经验融贯于书中。内容力求简明实用,物理概念清楚,深入浅出,着重解决实际问题,以期从事柴油机技术的读者能了解有关电气方面的内容,而从事电气技术的读者也能了解柴油机方面的论述,并使一般工程技术人员能了解书中的主要内容的概念和解决问题的方法,同时也使较高级的技术人员能有所裨益。

本书共分五章。第一章从并联运行的柴油发电机电气联系着手,着重介绍了发电机并联运行的特点以及发电机电气参数和柴油机的相互关系,并从电角度介绍了并联运行中出现的各种问题的物理实质,为以后深入讨论这些问题建立初步的基础。

第二章阐述了柴油发电机组并联运行时有功负载分配不均的原因和调整方法,简明地介绍了调速特性的力学原理,引入了一个不仅包括调速器,而且包括柴油机有关因素的调速不均匀度的一般表达式,并在这基础上全面分析了这些因素的影响及其实际的调整方法。

第三章讨论了影响无功负载分配的各种因素和消除的方

---

法。重点介绍了不可控自励发电机的无功负载分配问题。采用了一种简明易懂的分析计算相复励装置的方法，有助于解决无功负载分配以及相复励系统的整定调试。本章也对相复励系统各种均压联结方式及其使用条件进行了阐述，这也是在设计和运行中经常会碰到的问题。

第四章说明了并联运行柴油发电机功率振荡的原因及其消除方法。这里引用了并联运行柴油发电机组机械弹性当量模型的概念，以及在此基础上建立起来的振荡的矢量分析方法。这种分析振荡的方法物理概念清楚，简单明了，对整个机电系统的振荡环节，如调速器、柴油机、发电机等的相互关系和影响因素一目了然。读者将能比较具体地理解和建立对振荡进行全面分析的观点，从而避免一出现振荡就片面地认为是调速器的问题。在上述理论分析的基础上，也介绍了引起振荡的原因及其排除的方法。

第五章介绍了柴油发电机组并联运行的自动控制。自动控制是提高并联运行质量的方向，我国已有一些柴油发电机装有自动控制装置，但是应用还不普遍。本书着重介绍了作者参与研制的船舶柴油电站控制装置的有关问题，供从事这方面工作的同志参考。

目前，把柴油机行业和电工行业所使用的一些符号统一起来还是比较困难的，因此，本书根据阐述问题的角度不同，仍使用各行业习惯的名词符号，而只在每一章中保证符号的一致性，这样对阅读本书不会带来不便。

本书第一章、第三章、第五章由金松令同志编写。第二章、第四章由段远才同志编写。全书由张盖凡教授和刘长义副教授审稿，张汝均、徐至新同志对本书也提出不少宝贵意见，夏冬明同志为本书图稿做了不少工作，特在此表示

谢意。

由于编者水平有限，书中一定还存在不少缺点和不当之处，殷切期望读者批评指教。

编 者

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第一章 柴油发电机组并联运行的一般概念 .....         | 1  |
| 一 发电机组并联运行的特点 .....               | 1  |
| 二 并联运行发电机的有功功率和无功功率 .....         | 10 |
| 三 发电机组并联运行的主要问题 .....             | 12 |
| 1 发电机组间负载功率的均匀分配 .....            | 12 |
| 2 柴油发电机组并联运行的稳定性 .....            | 14 |
| 3 并联运行柴油发电机组的功率振荡 .....           | 20 |
| 第二章 并联运行柴油发电机组的有功功率分配 .....       | 24 |
| 一 调速器的结构及作用原理 .....               | 26 |
| 1 直接作用式调速器 .....                  | 26 |
| 2 间接作用式调速器 .....                  | 28 |
| 二 柴油发电机组的调速特性和不均匀度 .....          | 35 |
| 1 调速器的静力学分析 .....                 | 35 |
| 2 调速特性 .....                      | 38 |
| 3 调速器的不均匀度 .....                  | 39 |
| 4 调速器不均匀度与转速的关系及其要求 .....         | 43 |
| 5 调速特性形状对并联运行的柴油发电机组负载分配的影响 ..... | 44 |
| 6 调速器的不灵敏度对有功负载分配的影响 .....        | 44 |
| 三 柴油机对调速特性和不均匀度的影响因素 .....        | 47 |
| 1 柴油机调速不均匀度的一般表达式 .....           | 47 |
| 2 影响柴油机调速特性不均匀度的因素及其调整 .....      | 53 |
| 四 并联运行的柴油发电机组有功功率分配及其差度的计算 .....  | 56 |
| 1 当量机组的静特性计算 .....                | 57 |
| 2 并联机组有功负载分配差度的计算 .....           | 62 |
| 第三章 并联运行发电机组的无功负载均衡分配 .....       | 68 |
| 一 无功负载分配不均衡度的测量 .....             | 68 |

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 二 无功负载分配和发电机电压调整特性的关系 .....                                              | 71  |
| 1 发电机的电压调整特性 .....                                                       | 71  |
| 2 电压调整特性和无功负载分配的关系 .....                                                 | 74  |
| 3 调压特性的失灵区和非线性对负载分配的影响 .....                                             | 79  |
| 三 无功电流的自动分配 .....                                                        | 86  |
| 1 无功电流调整装置 .....                                                         | 88  |
| 2 无功电流的自动分配装置 .....                                                      | 90  |
| 3 利用差动电流互感器的无功功率均衡装置 .....                                               | 94  |
| 四 不可控自励恒压发电机的无功负载分配 .....                                                | 95  |
| 1 相复励自励恒压装置的工作原理 .....                                                   | 95  |
| 2 相复励自励恒压系统主要参数的计算 .....                                                 | 98  |
| 3 相复励系统的整定和调整 .....                                                      | 104 |
| 4 不可控相复励发电机组的并联运行 .....                                                  | 107 |
| 第四章 柴油发电机组并联运行的振荡及其改善 .....                                              | 123 |
| 一 柴油发电机组并联运行振荡的物理概念 .....                                                | 123 |
| 1 柴油发电机组并联运行的机械当量模型 .....                                                | 123 |
| 2 电系统与机械当量系统的某些参数的换算 .....                                               | 126 |
| 3 两台相同的柴油发电机组并联运行的当量系统 .....                                             | 127 |
| 二 并联运行的柴油发电机组稳定性的矢量分析方法 .....                                            | 128 |
| 1 弹性振荡系统的矢量图 .....                                                       | 128 |
| 2 并联运行的柴油发电机组的振荡矢量图 .....                                                | 132 |
| 3 调节滞后角 $\varepsilon_R$ 、 $\varepsilon_M$ 和动态不均匀度 $\delta_R$ 的频率特性 ..... | 138 |
| 4 柴油机的扭矩滞后相位角 $\varepsilon_M$ 和扭矩增大因子 $A$ 对<br>并联运行的柴油发电机组稳定性的影响 .....   | 140 |
| 三 调速器对并联运行的柴油发电<br>机组稳定性的影响及其调整 .....                                    | 141 |
| 1 调速器的运动方程式 .....                                                        | 142 |
| 2 调速器的动态不均匀度 $\delta_R$ .....                                            | 144 |
| 3 调速器与柴油机匹配运行时的振荡和阻尼 .....                                               | 146 |
| 四 柴油机对于并联运行的柴油发电机组<br>稳定性的影响及其调整 .....                                   | 150 |
| 1 扭矩滞后相位角 $\varepsilon_M$ .....                                          | 151 |
| 2 柴油机的强制振荡力矩 $M_r$ 和扭矩增大因子 $A$ .....                                     | 153 |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 五 发电机的阻尼和调压系统对功率振荡的影响 .....              | 165 |
| 1 发电机的阻尼对功率振荡的影响 .....                   | 165 |
| 2 发电机的调压系统对功率振荡的影响 .....                 | 169 |
| 六 并联运行柴油发电机组不稳定<br>的综合检查分析方法和调整的步骤 ..... | 170 |
| 1 振荡原因检查 .....                           | 170 |
| 2 并联运行柴油发电机组不稳定性的改善措施 .....              | 172 |
| 第五章 柴油发电机组并联运行的自动控制 .....                | 176 |
| 一 概述 .....                               | 176 |
| 1 柴油发电机组的并车原理 .....                      | 176 |
| 2 发电机组的自动频载调节原理 .....                    | 178 |
| 二 柴油发电机准同步自动并车装置 .....                   | 180 |
| 1 线路原理 .....                             | 180 |
| 2 主要电路环节 .....                           | 184 |
| 三 CZD-HG <sub>1</sub> 型自动频载调节装置 .....    | 193 |
| 1 频率偏差和功率偏差测量环节 .....                    | 193 |
| 2 功率及频率偏差信号的综和变换 .....                   | 198 |
| 3 其他辅助电路 .....                           | 204 |
| 参考书目 .....                               | 206 |

# 第一章 柴油发电机组并联运行的一般概念

## 一 发电机组并联运行的特点

在以柴油机为原动机的交流电站中，当发电机并联工作的时候，往往会出现负载电流不能维持均衡分配，或者出现电流和功率周期性振荡的现象，以致引起转速、电压和频率的不稳定，于是我们说这些发电机组不能稳定并联工作。对于这类问题，电工人员往往认为是由于柴油机的机械原因引起的，而机务人员则又认为是由于电气设备的原因造成的，而且双方都可证明每台机组的有关部分在性能上是正常的。这样，由于对故障原因缺乏明确的分析，以致互相推委，问题就难于解决。应该指出，对于多数并联性能不好的柴油发电机组，当它们单独运行的时候，其机械性能和电气性能都是良好的。这就说明，问题的发生是由于机组并联后建立了某种相互联系所引起的，因此在分析这些问题时，必须从各并联机组特性及参数的相互配合着手；同时又说明，那些影响发电机组并联运行的因素，在发电机组单独使用的时候，往往是被忽略的或被视为无关紧要的。因此，这里有必要首先对柴油发电机组并联运行的一般概念和原理予以简要的介绍。

两台发电机组并联后，它们之间的联系在哪里呢？主要在发电机的端点即母线上，因此问题的分析必须首先从电气方面入手。

图 1-1 是发电机并联运行的典型原理图。每台机组都包

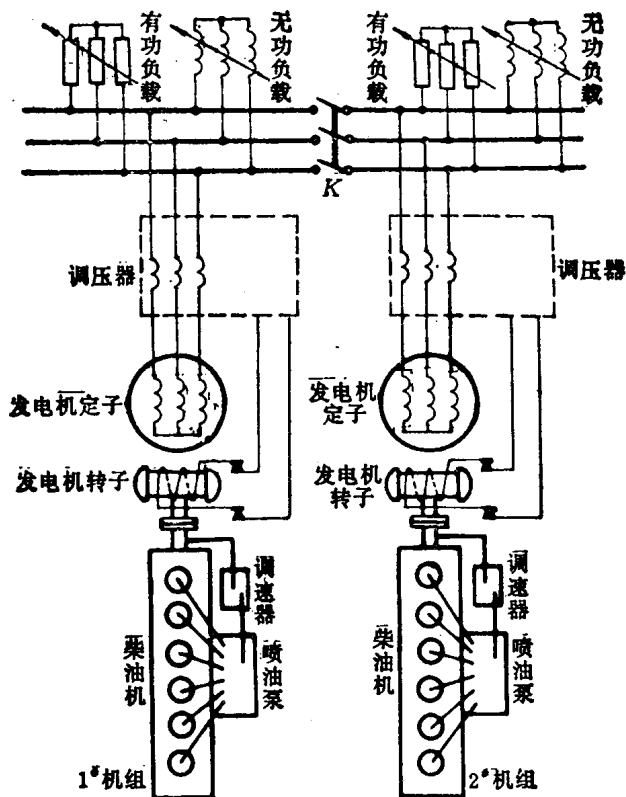


图1-1 柴油发电机组并联运行原理图

括柴油机、调速器、发电机、调压器等环节，两台发电机的端点通过母线并联在一起。每台发电机的转子通过联轴节和柴油机的曲轴相联结。因为发电机转子和柴油机的旋转部分是一个整体，所以有关发电机转子的讨论，实际上也包含了柴油机的旋转部件，反过来也是一样。

对于单独运行的柴油发电机组来说（图 1-1 中开关K处

于分断状态), 不管负载的大小及其成分如何, 发电机的调压器总可以通过改变发电机的励磁电流, 把发电机电压自动地维持在所要求的精度内, 而柴油机的调速器通过调整柴油机的燃油供给, 自动地把柴油机转速维持在所需要的精度内。从电的角度看, 就是保证了用电设备的频率和电压的稳定性, 负载所消耗的电能和向原动机提供的燃料能量保持了平衡。如果每台机组的外接负载不超过发电机和柴油机的允许值, 那么机组的运行就不会出现不正常的现象。

现在我们假设经过整步后把两台机组并联在一起——将开关 $K$ 闭合。显然, 调压器和调速器维持电压和转速恒定的职能并没有因此而改变, 但与前面唯一不同之处, 就是原来由各台发电机分别承担的负载, 现在变成由两台发电机共同承担了, 因此除了总的能量平衡之外, 还出现了两台机组如何分配负载的问题。调速器和调压器就其原理来说, 对并联机组间的负载关系是不能作出直接反映的, 因此我们就要分析发电机负载大小和它的内部参数间的相互关系, 以及发电机负载和调速器及调压器特性之间的关系, 从而找出并联机组间负载分配的规律和控制负载分配的办法。可以说, 并联运行的绝大多数问题, 都和并联机组间如何分配它们的公共负载有关。

首先看发电机负载大小和它的内部参数间的关系。我们的出发点是, 所有并联运行的同步发电机, 在正常条件下总是保持完全相同的端电压和严格一致的频率。如果忽略图1-1中调压器电流绕组两端的压降, 单纯分析发电机某一相定子绕组电势和端电压的关系, 就可根据图1-2(a)所示的简单等效电路图, 画出发电机的简化电势矢量图, 如图1-2(b)所示。图中 $\dot{U}$ 为发电机端电压或母线电压;  $i$ 为发电机电流。

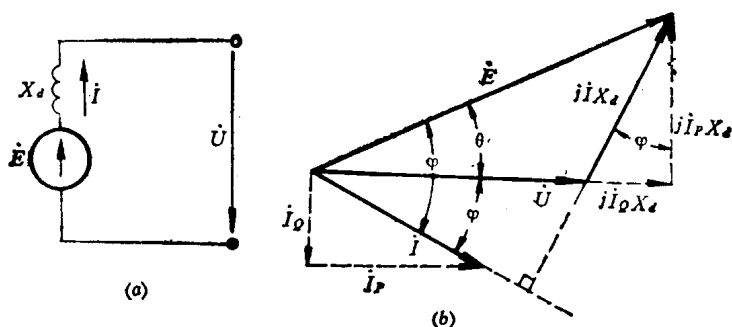


图1-2 发电机的等效电路 (a) 和电势矢量图 (b)

电压矢量  $\dot{U}$  和电流矢量  $\dot{i}$  的相位差为  $\varphi$ ,  $\varphi$  角的大小显然取决于发电机负载的性质。通常同步发电机定子绕组的电阻相对于电抗来说总是可以忽略不计的, 因此可以把发电机内部的压降看作是纯感性的, 其大小为  $IX_s \rightarrow X_s$  为发电机的同步电抗, 方向和电流矢量  $\dot{i}$  相垂直。在矢量图1-2(b)中我们用  $j\dot{i}X_s$  表示发电机的压降矢量, 其中符号  $j$  称为旋转因子,  $j$  和某一矢量相乘就相当于把该矢量逆时针旋转  $90^\circ$ , 因此  $j\dot{i}X_s$  就全面地表示了发电机内部压降的大小和方向。

发电机的空载电势  $\dot{E}$  将等于其端电压和内部压降的矢量和, 矢量  $\dot{E}$  和矢量  $\dot{U}$  的相位差为  $\theta$ ,  $\theta$  称为功率角。 $\dot{E}$  和  $\dot{i}$  的相位差为  $\psi = \theta + \varphi$ 。发电机的输出功率为

$$P = mUI \cos \varphi$$

式中  $m$  ——发电机的相数, 一般  $m = 3$ 。

由矢量图可以看出:

$$U \cos \varphi = E \cos \psi$$

$$IX_s \cos \psi = U \sin \theta$$

将以上两式代入发电机的功率表达式, 可得

$$P = \frac{mEU}{X_d} \sin \theta \quad (1-1)$$

式 (1-1) 中的  $m$  和  $X_d$  是常量。如果发电机的电压也比较稳定的话, 发电机的输出功率就和电势  $E$  和  $\sin \theta$  成正比。对于某一给定的  $E$  值, 可以绘制一条功率  $P$  和功角  $\theta$  的关系曲线, 称为功角特性。对于不同的励磁电流, 也即不同的电势, 功角特性将是一族如图 1-3 所示的正弦曲线。当图中的

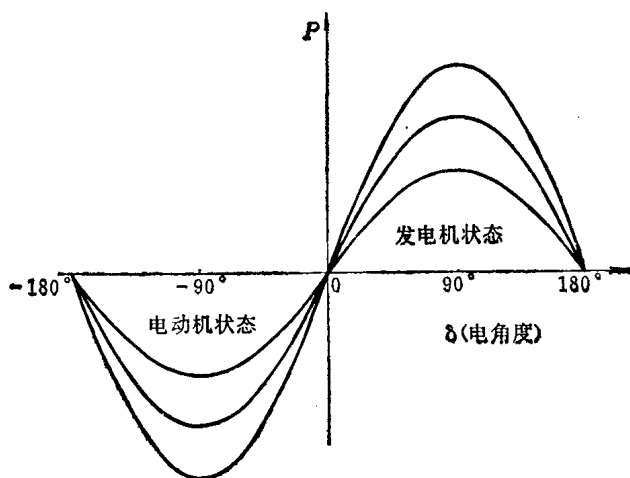


图1-3 同步发电机的功角特性

$\theta$  角为负值时, 电机的功率亦为负值, 表示此时电机工作在电动机状态, 通过母线从外部吸取电能。

现在来分析上述各个电量和转子机械运动之间的关系。大家知道, 发电机的空载电势是由转子磁通旋转而产生的, 我们用  $d$  和  $q$  分别表示转子的纵轴和横轴, 如图 1-4 所示。转子磁通  $\psi$  总是沿着  $d$  轴方向, 根据电磁感应定律, 由这一磁通所感生的电势  $E$  应滞后磁通  $90^\circ$ , 因此  $E$  应沿着  $q$  轴的

方向。换句话说，转子励磁电流的数值决定了电势  $E$  的大小，转子的横轴总代表着电势的位置和方向。当定子绕组流过三相负载电流的时候，定子电流所产生的旋转磁通（即电枢反应磁通）将使通过气隙的转子磁通变形和削弱，也即使磁通矢量的大小和方向有所改变，发电机电压就是由这一新的合成磁通  $\psi_s$  建立的，我们把发电机定子绕组的电压矢量也画在转子上（见图1-4）。从图 1-4 可以看出，发电机的磁

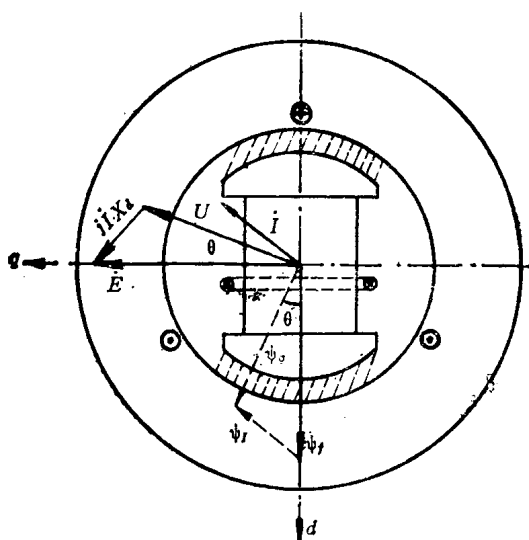


图1-4 同步发电机的电压和磁链矢量图

链（磁通）矢量图和电压矢量图不论是形状或者随负载电流的变化规律都是相似的，因此我们可以用这样的模型来比喻发电机内部的电磁现象：原动机带动发电机的转子，通过一些象弹簧一样的磁力线  $\psi_s$ ，拖着定子的电压矢量一起旋转，从而把机械功率转化为电磁功率。随着功率的增加，磁力线

与主轴间的夹角  $\theta$  也增大, 表明弹性磁力线被拉伸, 在功率角  $\theta$  达到  $90^\circ$  时, 发电机的功率达最大值。以后, 发电机的功率 (即原动机的负载) 将随着  $\theta$  的增大而减小。可以看出, 在  $\theta > 90^\circ$  时, 如果不考虑惯性的影响, 原动机功率和其负载是不能平衡的, 发电机也不可能在此状况下稳定工作; 当  $\theta$  超过  $180^\circ$  时, 磁力线的拉力将和转子运动方向一致, 原动机反而被发电机用外部电能加速, 电机落入电动机状态, 和电网失去同步。

由此我们得到一个启示, 即可以把整个发电机看成是一个弹性联轴节, 弹性联轴节的特性可由式 (1-1) 和图 1-3 表示, 而所有并联发电机组都可以看作是由这样一些联轴节在机械上互相联系在一起的等效柴油机, 共同拖动一个公共的负载, 这样就可以用一定的机电当量把电气部分也转换到统一的机械系统中去。这样做不但在发电机电磁参数 (如电压、电流) 变化不剧烈时是允许的, 而且在侧重分析机械问题时也会带来很大的方便。

图 1-2 的发电机矢量图和式 (1-1) 的功角特性固然适用于单独运行的发电机, 但主要还是用于分析发电机的并联工作。因为在发电机单独工作时, 从矢量图可以看出, 其功角不可能超过  $90^\circ$ , 也不可能为负值, 但是当发电机并联运行时, 情况就可能复杂得多。例如, 图 1-5 表示了两台发电机并联运行的情况。如前所述, 它们具有共同的电压, 两台机组的总功率应和负载功率相平衡, 而每台机组的功率大小则和该机组的功率角有关, 图中  $\theta_1 > \theta_2$ , 即第一台机组的功率  $P_1$  大于第二台机组的功率  $P_2$ 。按照矢量图和公式 (1-1), 功角差  $\theta_{12}$  反映了两台机组的功率差别, 对于一般发电机参数来说,  $\theta_{12} = 20^\circ \sim 30^\circ$  电角度, 就足以使两台发电机的功率

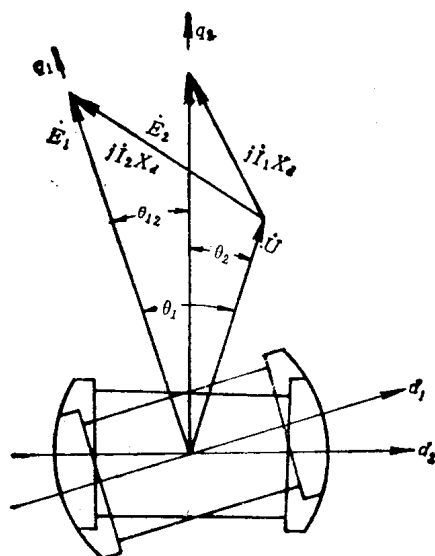


图1-5 并联运行发电机的电压及电势矢量图

差别等于发电机的额定功率。由于总的负载功率是不变的，因此，一台机组的功角（功率）增加，另一台机组的功角必然减小，甚至成为负值。这就说明，在分析发电机功率变化的时候，必须要和其他并联机组的功角变化联系起来。

发电机的电磁功率就是柴油机的负载功率，柴油机负载的改变必然要影响柴油机的转速，导致调速器动作以改变其供油量，这说明在分析发电机功率变化的时候还必须和柴油机及其调速系统的动作过程联系起来。此外，发电机功率或负载电流的变化必然要导致调压器动作，以改变发电机的励磁电流，因此式（1-1）中的电势、功角、甚至电压和频率往往都不是固定值，把上述一切因素综合在一起进行分析，显然是很复杂的。

为了便于分析和定性地说明问题，人们常利用机组和无穷大电网并联的概念，即假定所研究的发电机组和一台功率为无穷大的发电机并联，整个电网的电压和频率被无穷大机组保持在固定值，而不受小功率机组功率变化的影响。这样我们就可把着眼点放在一台机组上，使问题大大简化，然后再把所得到的结论推广到容量相当的机组并联的条件中去。在某些情况下，如当电网容量大大超过单台发电机组容量的时候，当然也可直接用和无穷大电网并联的概念来解释。

前面曾经提到，并联运行的同步发电机其频率是严格一致的，在分析发电机功角特性时也指出，发电机的功角一般不会超过 $90^\circ$ ，就是在转子摆动过程中，功角的瞬时值也不应超过 $180^\circ$ ，否则发电机就要失去同步。或者说，在整个同步运行期间，不管运行持续了多长时间，两台发电机磁极轴线转动角度之差，积累起来不可能超过 $180^\circ$ 电角度

发电机频率和原动机转速的关系为：

$$f = \frac{np}{60} \quad (1-2)$$

式中  $f$  ——发电机的电压频率，Hz；  
 $n$  ——原动机的机械转速，r/min；  
 $p$  ——发电机的磁极对数。

由此可见，如果发电机的磁极对数相同，在整个同步运行期间，不管其负载分配是否有误差或振荡，两台柴油机的积累转数之差，一般不会超过 $\frac{1}{2p}$ 转。我们所以要强调这一概念，是因为有的机修人员总想用检测柴油机机械转速的方法，来分析发电机并联运行中出现的不正常现象。显然，用一般的检测手段，这样做是行不通的。我们在以后也会谈到并