

310417

清

柴油发电机组 并联运行的稳定性



柴油发电机组 并联运行的稳定性

〔苏〕B. И. 托尔申 著

田治喜 吴霞芳 译

耿惠彬 校

内 容 提 要

本书论述了交流柴油发电机组的并联运行稳定性问题, 分析了两台同型柴油发电机组并联运行于一个恒定总负载下的稳定性和柴油发电机组并入无限功率电网运行时的稳定性, 以较大的篇幅讨论了柴油发电机组在电站运行中出现的交互振荡的原因及其消除方法, 综合分析了调节系统的机械和电气部分内所发生的过程, 同时着重研究了机械部分的过程。在分析中应用了自动调节理论。

本书可供从事电站研究、设计和维护工作的工人、技术人员和院校师生参考。

УСТОЙЧИВОСТЬ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ

В. И. Толшин

Издательство «Машиностроение»

Ленинград 1970

*

柴 油 发 电 机 组 并 联 运 行 的 稳 定 性

[苏] В. И. 托尔申 著

田治喜 吴霞芳 译

耿惠彬 校

*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可出字第074号

本书在北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张6 1/2 166千字

1977年2月第一版, 1977年2月第一次印刷 印数 00,001—13,200册

统一书号: 15034·1482 定价: 0.84元

目 录

前言	5
第一章 并联运行的柴油发电机组调节系统的结构	7
§1 并联运行的柴油发电机组调节系统的试验结果	7
§2 一些国家论述柴油发电机组并联运行稳定性和强迫振荡的文献简介	8
§3 并联运行的柴油发电机组的调节系统线路图	10
§4 调节系统广义结构方框图和主要耦合	14
第二章 柴油机低频干扰力矩的分析	18
§5 一般概念	18
§6 由各缸供油量不均匀引起的干扰力矩	18
§7 由供油装置工作不稳定引起的干扰力矩	25
第三章 柴油机的传递函数和频率特性	33
§8 基本概念	33
§9 包括喷油泵齿条和柱塞之间的间隙的环节的传递函数和频率特性	34
§10 柴油机燃油环节的传递函数和频率特性	35
§11 柴油机热力环节的传递函数	44
§12 柴油机频率特性的试验确定	47
第四章 调速器的传递函数和频率特性	55
§13 直接和间接作用式调速器的传递函数和频率特性	55
§14 喷油泵轴的扭转变形对悬置式调速器的频率特性的影响	63
§15 调速器的某些非线性	71
§16 各种因素对调速器频率特性的影响的试验验证	75
第五章 同步发电机及其调压器在并联运行时的传递函数	80
§17 命题	80
§18 并联运行之各同步发电机相互作用的一般电路	81
§19 同步发电机转子的传递函数	86
§20 具有静态调压系统的发电机调压器的传递函数	90
§21 电压校正器的传递函数	98
§22 发电机转子、调压器和电压校正器传递函数之各常数的计算实例	102
§23 发电机传递函数的试验核定	107
第六章 并联运行柴油发电机组调节系统线性模型的稳定性	109
§24 并联运行柴油发电机组调节系统的线性模型	109

§ 25 调节系统的结构分析	113
§ 26 调速器的参数对调节系统稳定性的影响	119
§ 27 以双脉冲调节来提高稳定余量	124
§ 28 供油装置的特性对并联运行稳定性的影响	129
§ 29 发电机和调压器的参数对并联运行稳定性的影响	135
§ 30 具有不同飞轮质量的机组并联运行的稳定性	143
§ 31 并联运行机组线性化调节系统的不稳定原因	143
§ 32 ДТР100/1500 和 ДТР200/1500 两型柴油发电机组并联运行稳定性的 研究结果	147
第七章 并联运行柴油发电机组调节系统的自激振荡	160
§ 33 分析方法的选择	160
§ 34 采用可断开等速反馈时的自激振荡	162
§ 35 滑阀套筒油口流量系数的非线性对机组单独和并联运行 稳定性的影响	166
§ 36 并联运行柴油发电机组的稳定性和自激振荡的试验研究方法	174
第八章 并联运行柴油发电机组调节系统的强迫振荡	176
§ 37 强迫振荡的计算方法	176
§ 38 强迫振荡的振幅及其影响因素	179
§ 39 发生分谐波振荡的可能性	184
§ 40 ДТР 150/750 型机组交互振荡的研究结果	192
参考文献	206

前 言

交流柴油发电机组(以后有时简称为机组)无论是在互相并联运行,还是在并入无限功率电网运行时,在许多场合中往往出现功率和电流的周期性振荡,同时伴随以转速振荡、电压和频率的不稳定以及调速器元件的振荡。

功率振荡时,并联运行的各机组的总负载是不变的,因此,一台机组的功率的增加和另一台机组的功率的减少是同时进行的。通常把这种现象称为交互振荡,有时也通俗地称为游车。

无论是在机组台架试验中,还是在实际运行的船上或陆上电站中都曾发现有交互振荡的情况。

机组并联运行时的交互振荡不同于电气系统的自激和自摆现象^[9],后者是与发电机-电网系统的容量相关的,并可以用自动调压器予以消除。而交互振荡,在大多数场合中,是受包括并联运行的各发电机(或并入电网运行的各发电机)和短输电线的系统所限制的。

试验表明,交互振荡的发生会造成如下不利后果:

机组在并联运行时不能加至额定负载;

电压和频率不稳定,因而电能品质不佳;

柴油机调速器和油泵的各元件工作于大振幅的振动状态下,因而其工作可靠性和使用寿命将下降;

柴油机发生扭矩振荡,因而柴油机的各零件和机座经受了激烈的震动。

例如,ДП150/750、ДП1500/703 和 ДП200/1500 各型机组在并联运行调整试验中所发生的有功功率交互振荡的振幅达额定功率 $P_{аном}$ 的 60~100%。在这样大的振幅下,当两台机组并联运行于 50% 的总额定负载时,发电机就要周期性地过渡至电动机

工况和周期性地过载。当严重过载时,保护装置就要动作,而将发电机切断。

在某些场合中,并联运行时的电压不稳定度达额定值的 1~2%,这不能满足许多用电设备的要求。

到目前为止,电气人员往往把故障的原因用系统的机械元件的影响来解释,而机械人员又将其归结于系统的电气元件的影响。

必须强调指出,对于许多实际场合非常重要的交互振荡实质目前还没有弄清楚。

以上情况表明,研究机组并联运行时的稳定性和交互振荡的原因以及消除交互振荡的途径乃是柴油发电机组行业所面临的十分迫切的问题。

因此,本书的目的是:分析柴油发电机组并联运行时的交互振荡的实质,阐明调节系统各主要参数对其稳定性的影响性质和程度。

按照所提出的方法,从调节系统的结构分析出发(假定这种调节系统是由典型的线性和非线性环节构成的),进行评价并联运行稳定性的尝试。

为此,本书讨论了一些与供油装置和自激发电机调压系统的特性对调节过程的影响相关的一些新问题。

在列写调速器、柴油机和发电机的传递函数时参照了文献[44, 20, 30]等。

书中以较多的篇幅讨论了调节系统的机械元件。

对于论述调压系统的过渡过程●所提出的方法是近似的。

书中给出了某些型号柴油机的并联运行稳定性的试验研究结果。

● 某些电工专业书籍中把“过渡过程”称为“暂态过程”,相应地,有“暂态电流”、“暂态电抗”、“次暂态电抗”等,本译文中,为与自动调节原理和机械部份的名称统一起见,仍译为“过渡过程”相应地有“过渡电流”、“过渡电抗”、“超过渡电抗”等译法。

第一章 并联运行的柴油发电 机组调节系统的结构

§1 并联运行的柴油发电机组调节系统的试验结果

许多机组在试验中出现了功率交互振荡的现象，例如 ДГР 100/750、ДГР 150/750、ДГР 100/1500、ДГР 200/1500 和 ДГР 1500/703 等型号的机组在并联运行调整试验中都曾出现过功率交互振荡。这几型机组都是供柴油机发电站用的，其原动机依次是 6Ч18/22、6ЧН18/22、6Ч15/18、12Ч15/18 和 16ДН23/30 型柴油机。除 16ДН23/30 型柴油机装有间接作用式调速器外，其余均装有直接作用式调速器。

上列各型机组的交流发电机，频率为 50 赫，电压为 220/400 伏，具有直接相复激型静态激磁系统。

所出现的功率交互振荡的基本特点如下：

1) 上列各型机组的功率交互振荡的频率均限于很窄的范围内，在 2~6 赫之间。在一些场合中还出现了分谐波振荡，其频率为干扰力频率的 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{3}$ 等。交互振荡的频率往往不同于分谐波频率。

2) 如果两台同型机组在并联运行时发生了交互振荡，那么在该型机组并入无限功率电网或与不同型号和功率的其他机组并联运行时也要发生交互振荡，而且振荡的性质实际上变化很小。

3) 功率交互振荡的振幅在从 0 到机组额定功率的 50~60% 或更高一些的范围内。

在大多数场合中，机组单独运行时的调节指标符合现行苏联国家标准 ГОСТ 10511-63 的要求。

为了阐述机组并联运行不稳定的原因，我们先将一些国家在论述这一问题方面的文献予以简单的介绍。

§ 2 一些国家论述柴油发电机组并联运行 稳定性和强迫振荡的文献简介

对机组并联运行的研究,无论是哪一国家的,都基本上可分为如下三个方面:

- 1) 研究并联运行的机组的调节系统的强迫振荡;
- 2) 研究机组并联运行的稳定性;
- 3) 研究对并联运行有影响的某些个别问题。

文献[41]指出,在研究强迫振荡时,可以将两台机组并联运行这种结构型式视作扭转振荡型式,其中最简单的方案是以一个广义质量代替每一机组的旋转质量。用文献[41]给出的方法可以近似计算强迫振荡的振幅,但是,对于研究稳定性和自激振荡,这种方法是不适用的。

文献[12]讨论了并联运行的静态问题,其中所列举的试验结果部份地揭示了交互振荡的实质,例如,它证明供油装置可能引起交替变化的喷油和频率为 $n/120$ 赫(对于二冲程柴油机)和 $n/240$ 或 $n/480$ 赫(对于四冲程柴油机)的干扰力。应该指出,在这种情况下,如果各柴油发电机组以电气同步互相联接或与电网相联接,其扭振系统可能发生共振。

文献[35]论述了同步发电机在轴上扭矩不均匀情况下的并联运行问题,指出功率交互振荡主要是有功功率的振荡,电网电压向量和电势向量的夹角的变化振幅可按二阶方程式确定,把已知的干扰力矩的振幅列入方程式的右端项。该文献中提出的强迫振荡计算方法考虑了发电机的阻尼力矩和同步力矩,但是其中没有考虑调速器和调压器的传递函数。

许多文献在考虑电气元件和机械元件的同时作用的情况下研究了柴油发电机组的并联运行稳定性。

文献[52]讨论了理想化调速系统的微分方程式,将这种理想化的系统表示成由两个振荡环节和一个微分环节串联而成,并得出了下列结论:

1) 在调速器的固有频率 ω_{pc} 大于发电机的固有频率 ω_{pom} 的情况下, 调速器的阻尼是必要的, 而发电机的阻尼是无益的;

2) 在 ω_{pc} 低于 ω_{pom} 的情况下, 发电机必须要有阻尼绕组, 而调速器的阻尼是无益的;

3) 如果 $\omega_{pc} = \omega_{pom}$, 则发电机和调速器的阻尼都是无益的。按本书的分析结果, 这一条结论未得证实。

文献[15]利用稳定性的代数判据讨论了文献[52]提出的理想化系统。

文献[53、54]的稳定性研究具有较大的参考价值, 其中用频率法对机组并联运行稳定性进行了概括的分析, 近似地考虑了柴油机、调速器和发电机的方程式。但是用该文献给出的方法未必能回答功率振荡的原因问题, 这是因为其中忽略了许多因素, 例如供油规律的变化和调速器中的非线性等因素对并联运行稳定性的影响等。

在研究同步发电机的稳定性和强迫振荡的文献中, И. Д. 乌鲁索夫的著作[44]中论述了发电机并入无限功率电网运行的问题。描述发电机过渡过程的乌鲁索夫方法的独创之处在于将发电机的方程式表示成力矩特性的形式, 这就建立了便于用频率法进行解析研究的调节线路。

该书还论述了通过采用人为阻尼作用来降低同步发电机转子的摆动的方法, 并导出了新的稳定性的频率判据, 用这一新的判据分析该书中所考察的系统是较方便的。本书中将用到乌鲁索夫的一系列结论和方法, 在第五章中将予以详细地讨论。

文献[20、30、55、22 和 29]属于研究第三方面的文献, 这些文献讨论了构成系统的各单独元件在振荡时的物理过程以及各元件的参数对整个系统的振荡的影响。

A. M. 卡茨和 B. И. 克鲁托夫的著作[20 和 30]论述了各型调速器的传递函数。

文献[55]在研究柴油机频率特性方面, 最早进行了供油装置的工作对柴油机频率特性的影响的定性分析。曾证明, 如果柴油

机输油管内的残余压力随每循环供油量的增加而增高, 则柴油机的放大系数小于 1; 如果残余压力随每循环供油量的增加而降低, 则柴油机的放大系数大于 1, 在这种情况下, 共振转速(在共振转速下柴油机的放大系数最大)是 $n/240$ (对于四冲程柴油机)和 $n/120$ (对于二冲程柴油机)。但是, 该文献中未揭示出这一现象的本质。

在研究这类问题的最近文献中, 文献[26]详细地讨论了 Д1П 1500/703 型机组在并入无限功率电网运行时所发生的自激振荡的原因和通过适当调整调速器的等速反馈而消除了这种振荡的情况。该文献中所用的方法没有考虑发电机激磁系统对机组并联稳定性的影响。文献[37、33、43]论述了自激发电机及其调压器的过渡过程。文献[25、19]在研究我们所讨论的这类系统的稳定性中应用了数字电子计算机。

上面所列举的诸文献均没有考虑由供油装置的影响所决定的柴油机的传递函数。

文献[19、25、33]中为了论述发电机的过渡过程而应用了高列夫—派克法。这种方法为用数字电子计算机研究电气因素对并联运行稳定性的影响提供了很大的可能性。但是, 由于高列夫—派克法过于复杂, 对于本书所讨论之这类系统, 如应用这种方法, 将会使一般性结构分析复杂化。

总之, 尽管有许多文献在某种程度上揭示了柴油发电机组并联运行时的不稳定的实质; 但是对许多问题的讨论还是不够明确的, 诸如柴油机干扰力矩的实质、调速器和调压器的各参数对交互振荡的影响性质和程度, 以及调节过程中调速器和调压器的相互作用等问题。本书的目的之一正是要填补这些方面的空白, 并比较详细地讨论其中的某些问题。

§ 3 并联运行的柴油发电机组的调节系统线路图

在发生交互振荡的大多数场合中, 发电机具有应用相复激变压器的直接相复激式静态调压系统。所发生的交互振荡的另一特

点是其频率比电网频率和机组单独运行时的单节点形式的扭振频率低得多。例如前述各机组并联运行时的交互振荡频率在 3~6 赫的界限内, 而其单节点形式的扭振频率为数十赫, 双节点形式为数百赫, 而电网频率是 50 赫。这就允许对并联运行之柴油发电机组的调节系统建立较之实际调节线路简化得多的简化结构方框图。

简化的办法是将柴油发电机组的转子● 用一个广义质量来表示。只有在最复杂的场合中才将机组的转子用两个以非线性挠性联接的并决定着机组单独运行时的单节点扭振形式的广义质量来表示。机组的双节点和三节点形式的固有扭振频率大大高于本书所要研究的频率, 故不予考虑。

此外, 另一个简化办法是, 把相复激变压器和在许多场合中将电压校正器看作是无惯性环节。

这样, 在综合分析系统的机械和电气线路时就可以不考虑柴油机的扭转振荡问题, 在某些场合中也可以忽略电压校正器的参数的影响, 电压校正器的试验或计算的静态特性完全可以用于研究动态工况。

图 1 所示为两台并联运行的柴油发电机组调节系统的机械和电气部份的联合线路。

从该线路图可以看出, 柴油机、发电机、调速器、调压器、电压校正器和均衡联接部份都表示成为包括在闭环调节系统中的元件, 其中的调速器是间接作用式的, 带有刚性和柔性反馈。

我们来讨论在两台机组并联运行于稳定工况时调节线路中各元件的相互作用。这一问题在文献[12、30]中已有详细的论述。在并联运行于稳定工况时, 两台机组的转子严格地同步旋转, 其旋转角速度对应于电流的频率

$$f_s = \frac{np}{60},$$

式中 n ——转速(转/分);

p ——发电机的极对数。

● 系指整个机组的转动部份, 而非专指发电机的转子。——校者注

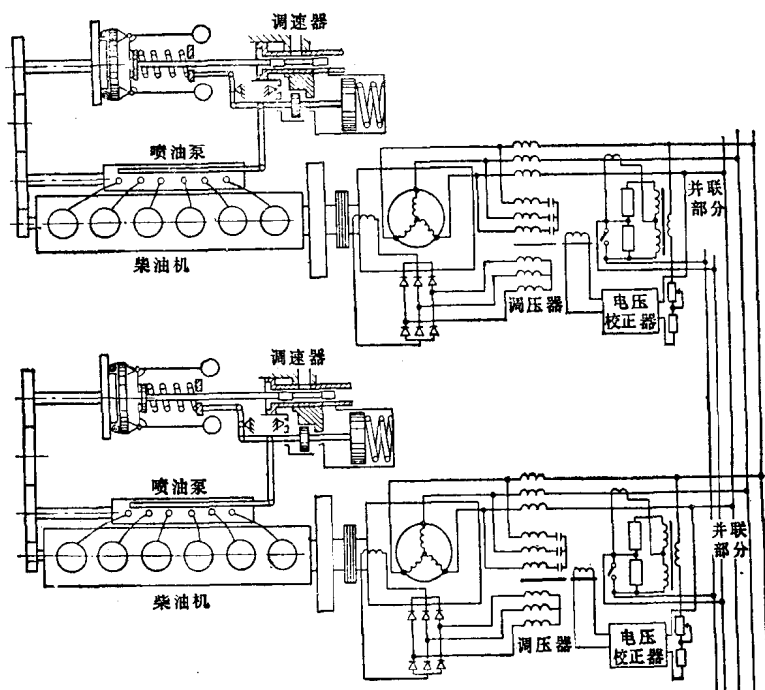


图1 并联运行之柴油发电机组的调节线路

柴油机的功率和扭矩 M 。取决于每循环供油量或齿条的位置，这是因为柴油发电机组的转速变化范围很小。齿条的位置又是由调速器按其静态特性给定的，这一静态特性就是齿条行程对转速的函数关系。

并联运行时，各机组的电磁力矩及其间的负载分配不均匀度取决于各机组调速器的静态特性是否精确一致，特别是其不灵敏区和非线性如何。用具有可调传动比的刚性反馈(见图1)可以调整间接作用式调速器的静态特性的斜率。用柔性反馈可以保证稳定性和减小过渡过程中系统的放大系数。为了在减小放大系数的同时又不致使转速急剧增大，在滑阀阀芯对其相对于套筒的平衡位置的偏差很大时使等速反馈 $\bullet$ 自动断开，这是通过将等速腔以

$\bullet$ 调速器中的等速反馈就是柔性反馈。——校者注

专用孔道与泄油腔相通来实现的。

图1所示的两台同步发电机通过公共汇流排向负载供电,其负载可以是混合性的(有功负载和感性负载)。稳定工况和过渡工况中自激调压系统的结构和作用原理在许多文献,例如[11、19]中,已有充分的阐述,因此下面只简单解释一下图中的线路。

从相复激变压器 $T\Phi K$ 的次级绕组取出电压,该电压与变压器的串联绕组和分路绕组的电流的几何和成正比。电流从 $T\Phi K$ 的次级绕组经整流器输入激磁绕组。发电机的端电压与转子磁场的磁通和定子电枢反应磁场的磁通的合成磁通成正比,在感性负载时,电枢反应起去磁作用,感性负载越大,去磁作用越强。因此,在相复激变压器中信号是这样相加的,即在感应电流的相对部份增大时(当减小 $\cos \varphi$ 时),相复激变压器次级绕组的电压增高。

由于调压器 PH 不能保证用电设备所要求的电压调整精度,线路中接入电压校正器 KH ,电压校正器根据被调节量与给定值的偏差来调整电压。当电压与给定值 u_0 有偏差时,电压校正器输出信号给相复激变压器的控制绕组。而在某些线路中是将电压信号送至输出扼流圈的控制绕组(图中未表示出来)。相复激变压器控制绕组(或输出扼流圈)的电流增大时,变压器铁芯的饱和度就增大,进而其电感值和放大系数降低。为了按频率进行补充校正,调压器中设有频率回路(图中未表示出来);而为了保证稳定性,可在调压器中实行刚性反馈或柔性反馈[●]。调压器和电压校正器一起对电压实行有差或无差调整。电压调整得不精确将导致发电机的无功电流重新分配,这是不希望的。

由于每台发电机的并联部份 BHP 内都有均衡联接,故而正比于每台发电机的电流的信号可以在并联部份内进行互相比。两个并联变压器的次级绕组磁场是相互反向的,因此,当两台发电机之间电流分配不均衡时,并联变压器的次级绕组将产生电压信号,该信号从并联部份输至电压校正器,以便通过电压校正器的调整

● 有一些电工专业书籍中称刚性反馈为硬反馈、柔性反馈为软反馈,本译文中,为与机械部份的名称统一起见,仍译为刚性反馈和柔性反馈。——校者注

作用,使无功电流趋于均衡,这时,并联部份中的几何相加是在考虑 $\cos \varphi_s$ 的情况下进行的, $\cos \varphi_s$ 越小,由电流不均衡而输至电压校正器的信号越大。一台柴油发电机组并入无限功率电网时的调节线路与图 1 稍有不同,其不同点是去掉了均衡联接,因为电压和频率已由无限功率电网给定不变,所以这种场合中电压校正器对调节过程的影响不大。

图中各元件的结构和工作情况,将根据需要在本书的相应章节中予以较详细的说明。

§ 4 调节系统广义结构方框图和主要耦合

图 2 所示为两台并联运行之柴油发电机组调节系统的广义结构方框图。该方框图对应于图 1 的线路图。结构方框图的用途是列出系统的各主要元件及其间的耦合。为了简化起见,假设发电机和柴油机之间的联轴节是绝对刚性的,同时还引入下列假设:

并联运行各柴油发电机组的总负载在交互振荡时是不变的;

柴油发电机组的旋转角速度的变化范围相当小,例如,在 ДП 100/1500、ДП 200/1500、ДП 1500/703 和 ДП 150/750 各型机组的交互振荡中,转速的变化不超过额定值的 2%。总汇流排的电压和负载的变化也在该范围内。负载电阻是不变的。下面我们将证明这些假设对于其他场合来说也是成立的,即与机组型号无关。

图 2 给出了系统的各主要元件及其间的主要耦合。

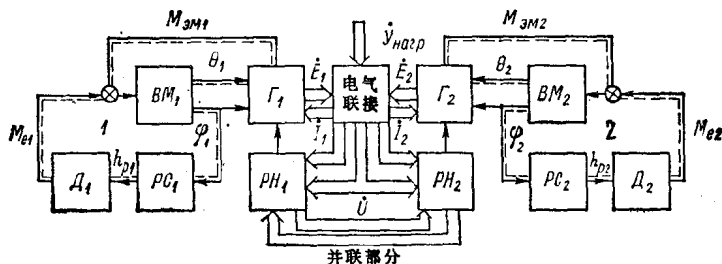


图 2 并联运行之柴油发电机组的调节系统结构方框图

两机组的旋转质量 BM_1 和 BM_2 是转速 n 或相对角 φ 的函数，表征旋转时两机组转子之相对位置的角度 θ_1 和 θ_2 的调节对象。旋转质量按众所周知的惯性力矩、扭转力矩和电磁制动力矩平衡的定律旋转。

图 2 中把电磁力矩 M_{em1} 和 M_{em2} 表示成 Γ_1 和 Γ_2 两环节的输出量， Γ_1 和 Γ_2 表示发电机和发电机的产生电磁力矩的元件。

柴油机 A_1 和 A_2 产生扭转力矩 M_{a1} 和 M_{a2} ，图中把扭转力矩表示成柴油机的输出量。取喷油泵的齿条行程 h_{p1} 及 h_{p2} 作为柴油机的输入量。这样，图中就把柴油机假想成为把燃油的化学能转变成机械功的没有旋转质量的机械。

调速器 PC_1 和 PC_2 的输出量分别是齿条行程 h_{p1} 和 h_{p2} ，而其输入量是机组的转速 n 或转速对额定值之偏差的相对值 φ_1 和 φ_2 。

显然，在假设总负载不变的条件下，并联运行之每台机组的电流和功率因数，无论在稳定工况下还是在稳定的振荡工况下，仅取决于两个参数，即机组的瞬时转速和两台发电机磁极的相对位置。磁极的相对位置可用每台机组的电势向量和总电场的电压向量之间的夹角 θ_1 和 θ_2 来表示。

因而， φ_1 、 φ_2 和 θ_1 、 θ_2 各量是发电机 Γ_1 和 Γ_2 的输入量。

发电机的输出量取为用复数表示的电势 $\vec{E}_1$ 、 $\vec{E}_2$ 和电流 $\vec{I}_1$ 、 $\vec{I}_2$ 。 $\vec{E}$ 和 $\vec{I}$ 决定着发电机的电磁力矩 M_{em} 。发电机电势和电流向量或复数值可用幅值和相对于所选择之坐标系的角度来表示。图 2 中用空心箭头表示向量，以区别于用实线箭头表示的标量。

图 2 中的 PH_1 和 PH_2 表示两台发电机的调压器和电压校正器。由负载电导 $\dot{y}_{наг}$ 所决定的发电机电流复数值和电压复数值是调压器的输入量。两调压器之间采用均衡联接（并联部份）。

柴油发电机组并入无限功率电网运行时不必考虑并联部份的作用。

在研究机组的并联运行时，通常是指机组单独运行时已符合现行要求。与单独运行时不同，并联运行之机组的转子是不能随

意改变其转速的，因为它是以“弹性”联系与无限功率电网或其他机组相联接着。

并联运行时，两台柴油发电机组之旋转磁场的轴线间的夹角愈大，作用在转子上的力图减小这一夹角的反作用力矩也就愈大。

可见，柴油发电机组转子的旋转质量类似于挂在弹簧上的质量，是一个振荡环节。

图2中用虚线标出的回路1(2)是一个振荡环节，以后将指明，其固有振荡频率是较低的。因此，在这一回路中低频振荡可能增强，进而导致低频交互振荡。然而，也正因为有这一特点，图2中各环节的动态方程式可以简化。在低频范围内可以精确地写出这些环节的传递函数。

通常都是预先假定机组的电气部份在发电机制造厂做过台架试验。这样，除柴油机外，包括发电机、调压器和并联部份的机组的电气部份在并联运行时不应出现自激振荡现象，这就是说，在分析交互振荡的原因时，可以认为，图2中之发电机-负载-调压器回路在没有回路1(2)与之相耦的情况下是不会出现自激振荡工况的。但是，应该指出，系统的电气部份不产生自激振荡的条件未必总能满足。根据前面所列举的交互振荡和调节线路的特点，也可以将上述某些试验结果推广概括于机组并联运行的其他可能方案，转子旋转角速度 ω 和电流频率 f 的最大振幅就属于这类试验结果。下面我们依次证明，在考虑到调节线路的上述特点时，这些值的变化幅度都是比较小的。我们假设有一虚轴以电流频率 f 与两台发电机的电流向量同步旋转。两台发电机的电势向量与这一虚轴的夹角 θ_1 和 θ_2 分别表征着由各发电机输给总负载的电磁功率。如果该轴线的旋转频率为 ω_s ，则转子的旋转角速度(发电机的电势与之严格相关)可以按下式计算：

$$\omega_k = \omega_s + \frac{d\Delta\theta_k}{dt},$$

由此