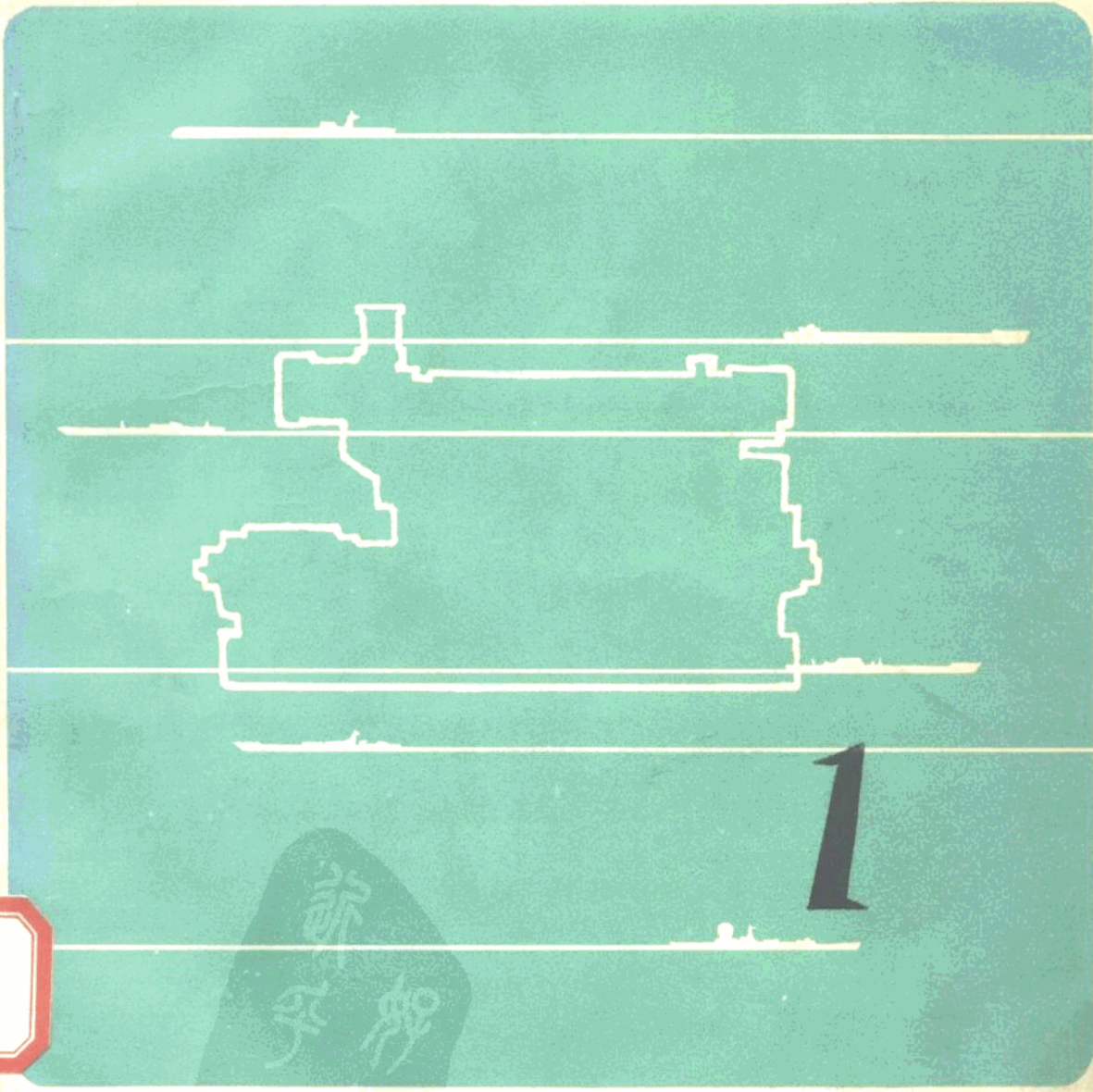


船舶电气设备

资料
选编



舰船特辅机电设备编辑室

船舶电气设备

资料选编

(内部发行)

1979年11月出版

编辑出版者 舰船特辅机电设备编辑室

印刷者 天津海洋石油研究院

发 行 者 上海市 5022 邮政信箱

定价：2.50 元

11557
736

前 言

随着船舶向大型化、高速化方向发展，船舶的电气化和自动化程度日益提高，国内不少单位对电站自动化、机舱集控和遥控、船舶电力拖动与推进、电力系统保护等问题进行了多年不断的探讨、试验、生产和应用的研究，取得了宝贵的经验，可喜的成绩。为满足有关方面的经验交流，特编辑出版《船舶电气设备资料选编》。

本《选编》收入了六机部于1978年12月在厦门市举行的“船舶电气设备科技情报交流会”上交流并经评审小组推荐的文章15篇。其中有：电站6篇；电力推进与拖动5篇；检测控制2篇；设备和电缆各1篇。《选篇》的内容反映了我国现阶段船电技术的发展概貌和水平，对指导生产、科技实验、教学应用，均有现实意义。

限于我们水平能力，不免有错有误，恳请读者批评指正。

编 者

1979年10月

目 录

一、柴油机交流发电机组并联大系统稳定性及其最佳负荷分配·····	项国波 (1)
二、船舶电力系统可靠性的分析计算·····	施亿生 (13)
三、船舶电站自动化的研制——阶段小结·····	吴虎人 (19)
四、船舶自动控制电站用控制装置——试验小结·····	王之杰 (32)
五、船舶交流电站快速无功补偿装置·····	吴炳麟 陈绍欽 何立高 (41)
六、船舶交流电站性能指标探讨·····	雷莹辉 (53)
七、船舶电网对地电容对非接地系统安全性的影响·····	蒋增佑 (67)
八、数字式集中检测装置在船舶上的应用探讨·····	林 曦 (82)
九、KKD—5型交流可控硅舵机控制箱·····	陈国民 (97)
十、我国船舶电力拖动的现状和发展·····	吴斐文 (102)
十一、35吨自动拖缆机电力拖动系统·····	喻远钦 庄任良 (123)
十二、船舶电力推进发展概况·····	金德昌 (140)
十三、交流恒力矩起货电动机和控制装置的研究 ·····	上海电器科学研究所八室 (154)
十四、海洋石油钻井船的电气设备·····	胡长吉 (161)
十五、电缆束的载流量理论与试验·····	金标义 (182)

柴油机交流发电机组并联大系统 稳定性及其最佳负荷分配

福州大学自动化研究所 项国波

作者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及其最佳负荷分配的问题,结果表明,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。文章提出消除这种危害性共振的理论依据和技术措施。

一、问题的提出

现在在以柴油机为动力的移动电站并联大系统中,存在的两个急待解决的理论和技术问题——大系统的稳定性和最佳负荷分配,引起国内外的兴趣[1—10]。参考文献[1, 2]把两台同型号同容量机组并联大系统的动态方程组演化为单状态非线性微分方程,应用非线性振动理论中的渐近方法[11]研究了均分负荷时大系统的稳定性。结果表明,并联大系统振荡的实质是柴油机在不正常工况时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理论根据及其技术措施。本文是参考文献[1, 2]的续文,这里将讨论不均分负荷对振荡的影响,实现最佳负荷分配的必要条件,和三种调节原理对功率分配的影响。

二、并联大系统的基本方程

图1给出两台同型号同容量柴油机交流发电机组并联运行时的结构图。

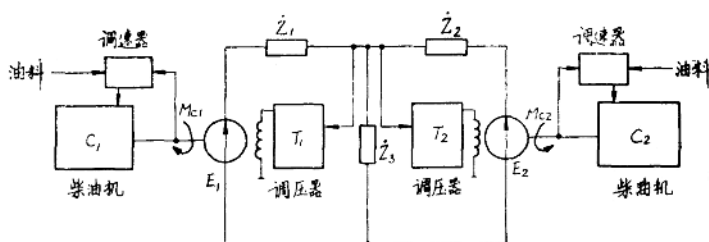


图1 两台同型号同容量柴油机交流发电机组并联大系统的结构图

\dot{E}_1, \dot{E}_2 —— 两台电机的励磁电势;
 z_1, z_2 —— 两台电机的阻抗;
 z_3 —— 电网的负荷阻抗

当两台机组稳定地并联运行时, 它们输送给负载的有功功率分别为:

$$P_1 = \frac{E_1^2}{z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 E_2}{z_{12}} \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) \quad (1)$$

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

式中: P_1, P_2 表示 1[#]、2[#] 机组的输出功率;

z_{11}, z_{22} 表示 1[#]、2[#] 电机的输入阻抗;

z_{12} 为两台电机间的转移阻抗;

$\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$ 为两机励磁电势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 间的夹角 (图 2)。

根据图 1 的等值电路, 上述阻抗分别为:

$$z_{11} = z_1 + \frac{z_2 z_3}{z_2 + z_3} \quad (3)$$

$$z_{22} = z_2 + \frac{z_1 z_3}{z_1 + z_3} \quad (4)$$

$$z_{12} = z_{21} = z_1 + z_2 + \frac{z_1 z_2}{z_3} \quad (5)$$

(1)、(2) 式中:

$$\alpha_{11} = 90^\circ - \psi_{11} = 90^\circ - \arg z_{11} \quad (6)$$

$$\alpha_{22} = 90^\circ - \psi_{22} = 90^\circ - \arg z_{22} \quad (7)$$

$$\alpha_{12} = 90^\circ - \psi_{12} = 90^\circ - \arg z_{12} \quad (8)$$

两台柴油机交流发电机组并联运行时的动态方程为:

$$M_1 \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} + \lambda_1 \frac{d\delta_1}{dt} + M_{k1} + M_{d01} + M_{\delta 1}(\delta_{12} \cdot 0) + \frac{dp_1}{d\delta_{12}} \Delta \delta_{12} = M_{c1} \quad (9)$$

$$M_2 \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} + \lambda_2 \frac{d\delta_2}{dt} + M_{k2} + M_{d02} + M_{\delta 2}(\delta_{12} \cdot 0) + \frac{dp_2}{d\delta_{12}} \Delta \delta_{12} = M_{c2} \quad (10)$$

式中:

M_1, M_2 —— 两台机组的转动惯量;

λ_1, λ_2 —— 两台电机的阻尼系数;

M_{k1}, M_{k2} —— 两台机组的空载阻转矩。

$$M_{d0i} = \frac{E^2}{\omega_s Z_{ii}} \sin \alpha_{ii}, \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

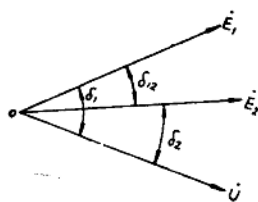


图 2 两台发电机并联运行时的电势矢量图

$$M_d \delta_i(\delta_{1,2,0}) = \frac{E_1 E_2}{\omega_{\infty} z_{12}} \sin(\delta_{1,2} - \alpha_{1,2}) \quad (12)$$

$$M_{c1} = M_{c01} + \sum_{m=1}^{\infty} M_m \sin(m\nu_1 t + \psi_m) \quad (13)$$

和

$$M_{c2} = M_{c02} + \sum_{\mu=1}^{\infty} M_{\mu} \sin(\mu\nu_2 t + \psi_{\mu}) \quad (14)$$

分别表示两台柴油机的谐波转矩。

若方程 (9) 和 (10) 中交流谐波分量为零,且系统处于平稳运行状态,则有:

$$M_{\pi 1} + M_{d01} + M_{\delta 1}(\delta_{1,2,0}) = M_{c01} \quad (15)$$

$$M_{\pi 2} + M_{d02} + M_{\delta 2}(\delta_{1,2,0}) = M_{c02} \quad (16)$$

实际上,对于活塞式原动机而言,它们的转矩是不平稳的,即使在稳定运行中,在周期性脉动转矩的驱动下,其功率角 δ_i , $i=1,2$,也是在某一许可范围内振荡,振荡振幅的大小取决于如下方程组的解:

$$M_1 \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} + \lambda_1 \frac{d\delta_1}{dt} + \frac{dp_1}{d\delta_{12}} \Delta \delta_{12} = M_{v1} \quad (17)$$

$$M_2 \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} + \lambda_2 \frac{d\delta_2}{dt} + \frac{dp_2}{d\delta_{12}} \Delta \delta_{12} = M_{v2} \quad (18)$$

方程 (17) 和 (18) 所描述的单台柴油机交流发电机组功率角 δ_i 的脉动情况示于图 3。为了减少功率 δ 的脉动,通常用加大飞轮惯量 M_i 来“辗平”振荡的振幅。但是,如果不相应地增加电机的阻尼系数 λ_i ,将会降低系统的稳定性。这是我国现行移动电站中存在的一个主要问题,因为 T-2 系列同步机都没有阻尼绕组。

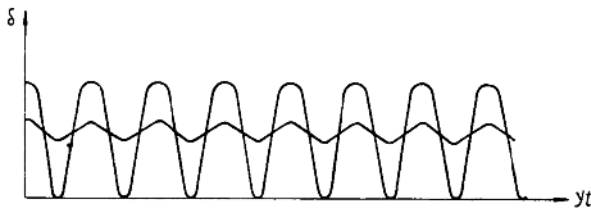


图 3 柴油机交流发电机组正常运行时功率角 δ_i 的强迫振荡的图像

当两台机组型号和容量都相同时, $M_1 = M_2 = M$, $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, 则有:

$$\frac{d^2 \Delta \delta_{12}}{dt^2} + \gamma \frac{d \Delta \delta_{12}}{dt} + \omega_2 z(\cos \delta_{1,2}) \Delta \delta_{12} = \varepsilon \sum_{n=1}^{\infty} M_n \sin(n\nu t + \psi_n) \quad (19)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \Delta \delta_{12}}{dt^2} &= \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} - \frac{d^2 \delta_2}{dt^2}, \\ \frac{d \Delta \delta_{12}}{dt} &= \frac{d \delta_1}{dt} - \frac{d \delta_2}{dt}, \\ \frac{d p_1}{d \delta_{12}} - \frac{d p_2}{d \delta_{12}} &= 2 \frac{E_1 E_2}{z_{12}} \cos \alpha_{12} \cos \delta_{12}; \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$\gamma = \frac{\lambda}{M}$, 机组的阻尼系数;

$w_{2z} = 2 \frac{E_1 E_2}{M z_{12}} \cos \alpha_{12}$, 并联大系统固有的振荡频率;

$\varepsilon = \frac{1}{M}$, 并联大系统的小参数;

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} M_n \sin(n \nu t + \psi_n) &= \sum_{n=1}^{\infty} M \sin(m \nu_1 t + \psi_m) - \\ &- \sum_{\mu=1}^{\infty} M_{\mu} \sin(\mu \nu_2 t + \psi_{\mu}) \end{aligned} \quad (21)$$

方程 (19) 就是描述并联大系统动态过程的基本方程。下面分别讨论两种运行情况的稳定性。

三、同步驱动下的振荡过程

当两台柴油机准确同步时, 存在

$$\sum_{n=1}^{\infty} M_n \sin(n \nu t + \psi_n) = 0 \quad (22)$$

方程 (19) 取

$$\frac{d^2 \Delta \delta_{12}}{dt^2} + \gamma \frac{d \Delta \delta_{12}}{dt} + w_{2z} (\cos \delta_{12}) \Delta \delta_{12} = 0 \quad (23)$$

或

$$\frac{d^2 \Delta \delta_{12}}{dt^2} + w_{2z} \Delta \delta_{12} = \varepsilon f \left(\delta_{12}, \frac{d \delta_{12}}{dt} \right) \quad (24)$$

式中非线性项取:

$$\varepsilon f \left(\delta_{12}, \frac{d \delta_{12}}{dt} \right) = -\gamma \frac{d \delta_{12}}{dt} + w_{2z} [1 - \cos \delta_{12}] \Delta \delta_{12} \quad (25)$$

为了使研究的问题更有普遍意义, 我们将研究两机不均分负荷时的自由振荡情况, 这时功率角差为:

$$\delta_{12} = \delta_{12 \cdot 0} + \Delta \delta_{12} \quad (26)$$

于是非线性函数方程 (25) 可以表示为:

$$\varepsilon f\left(\delta_{12}, \frac{d\delta_{12}}{dt}\right) = -\gamma \frac{d\Delta\delta_{12}}{dt} + w_{2z} \left[1 - \sum_{n=0}^{\infty} \cos\delta_{12 \cdot 0} \frac{(-1)^n \Delta\delta_{12}^{2n}}{(2n)!} + \sum_{n=0}^{\infty} \sin\delta_{12 \cdot 0} \frac{(-1)^n \Delta\delta_{12}^{2n+1}}{(2n+1)!} \right] \Delta\delta_{12} \quad (27)$$

式中, $\delta_{12 \cdot 0}$ 取决于方程 (15) 和 (16) 的联立解。

根据渐近理论 [11], 方程 (24) 的一次近似解可以写为:

$$\Delta\delta_{12} = \delta_{mb} \cos \psi_b \quad (28)$$

式中:

$$\frac{d\delta_{mb}}{dt} = -\frac{\varepsilon}{2\pi\omega_z} \int_0^{2\pi} f\left(\delta_{12}, \frac{d\delta_{12}}{dt}\right) \sin \psi_b d\psi_b; \quad (29)$$

$$\frac{d\psi_b}{dt} = \omega_z - \frac{\varepsilon}{2\pi\omega_z \delta_{mb}} \int_0^{2\pi} f\left(\delta_{12}, \frac{d\delta_{12}}{dt}\right) \cos \psi_b d\psi_b, \quad (30)$$

把方程 (27) 所确定的非线性函数 $\varepsilon f\left(\delta_{12}, \frac{d\delta_{12}}{dt}\right)$ 和待解方程 (28) 代入方程 (29) 和 (30), 积分后, 求得:

$$\delta_{mb} = \delta_0 e^{-\frac{\gamma}{2} t} \quad (31)$$

$$\psi_b = \omega_z \left\{ \left(\frac{1 + \cos\delta_{12 \cdot 0}}{2} \right) t + \cos\delta_{12 \cdot 0} \left[\frac{3\delta_0^2}{16\gamma} (e^{-\gamma t} - 1) - \frac{15\delta_0^4}{2304\gamma} (e^{-2\gamma t} - 1) + \dots + \theta_0 \right] \right\} \quad (32)$$

于是, 方程 (28) 所示的解取:

$$\Delta\delta_{12} = \delta_0 e^{-\frac{\gamma}{2} t} \cos \omega_z \left\{ \left(\frac{1 + \cos\delta_{12 \cdot 0}}{2} \right) t + \cos\delta_{12 \cdot 0} \left[\frac{3\delta_0^2}{16\gamma} (e^{-\gamma t} - 1) - \frac{15\delta_0^4}{2304\gamma} (e^{-2\gamma t} - 1) + \dots + \theta_0 \right] \right\} \quad (33)$$

式中:

δ_0 —— 初始条件确定的振幅;

θ_0 —— 初始条件确定的相位。

方程 (33) 指出, 并联大系统自由振荡是收敛的, 收敛的速度正比于大系统的阻尼系数 γ , 因为

$$\gamma = \frac{\lambda}{M} \quad (34)$$

所以为了提高系统的稳定性，在加大飞轮惯量 M 的同时，必须相应地增加发电机阻尼绕组的阻尼系数 λ ，这就证明了第二节所做的结论；其次，我们看到，负荷不均分程度 $\delta_{12,0}$ 对系统的稳定性没有影响，它只影响大系统自振荡的周期， $\delta_{12,0}$ 愈大，自振荡周期愈长；当 $\delta_{12,0} = 0$ 时，亦即系统处于均分负荷的情况下，方程(33)取：

$$\Delta \delta_{12} = \delta_0 e^{-\frac{\gamma}{2} t} \cos \omega_s \left[t + \frac{3\delta_0^2}{16\gamma} (e^{-\gamma t} - 1) - \frac{15\delta_0^4}{2304\gamma} (e^{-2\gamma t} - 1) + \dots + \theta_0 \right] \quad (35)$$

方程(35)的振荡图象如图4实线所示；当 $\delta_{12,0} = \frac{\pi}{2}$ 时，

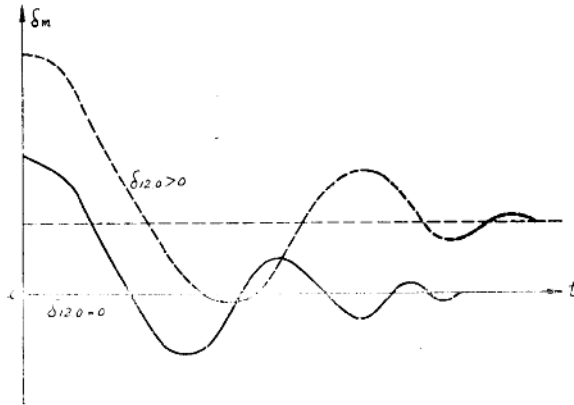


图4 准确同步运行时功率角 δ_m 自由振荡的图象

$$\Delta \delta_{12} = \delta_0 e^{-\frac{\gamma}{2} t} \cos \frac{\omega_s}{2} t \quad (36)$$

方程(36)指出，在这种极限状态下，非线性系统的非等时性的性质消失了，大系统自振荡的频率最低。当 $\frac{\pi}{2} > \delta_{12,0} > 0$ 时，大系统自振荡图象如图4虚线所示，它就是函数式(33)所示的图象。

可见，同步运行时，柴油机交流发电机组并联大系统是渐近稳定的。

四、柴油机低频干扰力矩对振荡过程的影响

实际上，要使两台柴油机产生的转矩满足准确同步条件，其概率小得可以略去不计，加大飞轮惯量虽然可以减少周期性转矩的振幅值，但不可能完全消除它，这种“微弱”的低频干

扰转矩, 在非线形振荡系统中, 当大系统参数设计不当时, 常常会激起危险性的共振, 使机组无法正常运行。正如下面将要分析的那样, 造成共振现象的原因是多方面的, 如电机的阻尼强度、负载性质和大小, 以及柴油机性能等等, 但是柴油机异常工况时出现的低频干扰转矩却是主要矛盾。因此, 必须研究方程 (19) 非齐次非线性方程解。

然而, 方程 (19) 那样的非线性振荡方程, 和一般单频强迫振荡或共振方程不同, 它具有无穷多次简谐力, 如果不加分析, 就无法摆脱数学上的困难。但是, 如果我们不去纠缠纯数学的严谨, 而从直观的物理现象入手, 这种困难程度就会减少。实际上, 能在系统中激起共振的频率却只有一个, 因而可以用单频共振方程代替方程 (19) 那样无穷多次简谐力作用下的非线性振荡方程, 因此描述两台柴油机交流发电机组并联大系统振荡状态的微分方程便取:

$$\frac{d^2\delta_{1,2}}{dt^2} + \omega_z^2 \delta_{1,2} = \varepsilon f\left(\delta_{1,2}, \frac{d\delta_{1,2}}{dt}\right) + \varepsilon M\nu \sin(\nu t + \psi_\nu) \quad (37)$$

式中, ν 为共振时的外频。由于实际系统中具有无穷多次简谐力, 因此所选择的频率 ν 也带有随机性质的。

当 $\delta_{1,2,0} \neq 0$ 时, 根据渐近理论 [11], 方程 (37) 的一次近似解可以表示为:

$$\delta_{1,2} = \delta_{1,2,0} + \Delta\delta_{1,2} \quad (38)$$

其中,

$$\Delta\delta_{1,2} = \delta_{m,0} \cos(\nu t + \theta_b) \quad (39)$$

式中,

$$\frac{d\delta_{m,0}}{dt} = -\frac{1}{2\pi\nu} \int_0^{2\pi} \left[\varepsilon f\left(\delta_{1,2}, \frac{d\delta_{1,2}}{dt}\right) + \varepsilon M\nu \sin(\nu t + \psi_\nu) \right] \sin\psi_b d\psi_b \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_b}{dt} = \omega_z - \nu - \frac{1}{2\pi\delta_{m,0}\nu} \int_0^{2\pi} \left[\varepsilon f\left(\delta_{1,2}, \frac{d\delta_{1,2}}{dt}\right) + \varepsilon M\nu \sin(\nu t + \psi_\nu) \right] \cos\psi_b d\psi_b \end{aligned} \quad (41)$$

将方程 (27) 所示的非线性函数和待解方程 (39) 代入上两式, 积分后, 略去 $\delta_{m,0}$ 五次方以上所有项, 则得,

$$\frac{d\delta_{m,0}}{dt} = -\frac{\gamma\delta_{m,0}}{2} - \frac{\varepsilon M\nu}{\omega_z + \nu} \cos\theta_b' \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_b'}{dt} = \omega_z \left[\frac{1 + \cos\delta_{1,2,0}}{2} - \cos\delta_{1,2,0} \frac{3\delta_{m,0}^2}{16} \right] - \nu + \\ + \frac{\varepsilon M\nu}{\delta_{m,0}(\omega_z + \nu)} \sin\theta_b' \end{aligned} \quad (43)$$

式中: $\theta_b' = \theta_b - \psi_b$;

$\psi_b = \gamma t + \theta_b$ 。

令方程 (42) 和 (43) 的导数为零, 则得

$$-\frac{\gamma \delta_{mb}}{2} - \frac{\varepsilon M v}{\omega_z + v} \cos \vartheta' = 0 \quad (44)$$

$$\omega_d(\delta_{mb}) - v + \frac{\varepsilon M v}{\delta_{mb}(\omega_z + v)} \sin \vartheta' = 0 \quad (45)$$

式中,

$$\omega_d(\delta_{mb}) = \omega_z \left[\frac{H \cos \delta_{12 \cdot 0}}{2} - \cos \delta_{12 \cdot 0} \frac{3 \delta_{mb}^2}{16} \right] \quad (46)$$

消去方程 (44) 和 (43) 中的 ϑ' 则有:

$$\delta_{mb}^2 \{ [\omega_d(\delta_{mb}) - v]^2 + (\gamma \omega_z)^2 \} = (\varepsilon M v)^2 \quad (47)$$

方程 (47) 指出, 当

$$v = \omega_d(\delta_{mb}) \quad (48)$$

时, 非线性系统发生共振, 它的振幅取

$$\delta_{mb} = \frac{\varepsilon M v}{\gamma \omega_z} \quad (49)$$

方程 (48) 所确定的曲线称为共振骨架线 (图 5 中的点划线)。

方程 (46) 和 (48) 指出, 两机不均分电网负荷愈大, 大系统共振频率愈低, 在极限的情况下, $\delta_{12 \cdot 0} = \frac{\pi}{2}$, 共振的频率最低:

$$v_{min} = \frac{1}{2} \omega_z \quad (50)$$

两机不均分负荷愈小, 大系统共振频率愈高, 当 $\delta_{12 \cdot 0} = 0$ 时, 共振频率最高:

$$v_{max} = \omega_z - \omega_z \frac{3 \delta_{mb}^2}{16} \quad (51)$$

当 $\varepsilon M v$ 和 ω_z 给定之后, 大系统共振图象可以根据如下方程来绘制:

$$v = \sqrt{\left[\omega_z \left(\frac{1 + \cos \delta_{12 \cdot 0}}{2} - \cos \delta_{12 \cdot 0} \frac{3 \delta_{mb}^2}{16} \right) \right]^2 \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon M v}{\delta_{mb}} \right)^2 - (\gamma \omega_z)^2}} \quad (52)$$

其图象示于图 5。

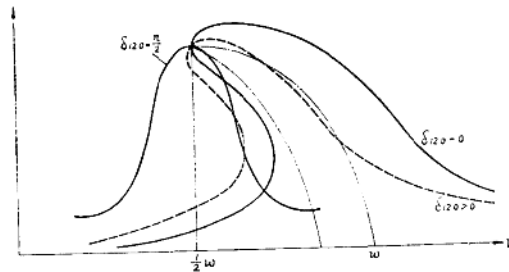


图 5 共振时 $\delta_m = f(v)$ 的函数图象

根据参考文献[2],共振发生时,在三相四线制供电系统的中线中,会出现受共振频率强烈调制的以三倍频为载波的调幅电流

$$i_0 = I_{0m} \cos(3\omega_0 t + \varphi_0) \quad (53)$$

式中:

ω_0 ——电网基波角速度;

I_{0m} ——中线调幅电流的幅值,它取

$$I_{0m} = \frac{1}{Z_0} \left[18E_{3m} \frac{M\nu}{\lambda\nu^2} - 36k_{c\nu} \frac{M^2\nu}{\lambda^2\nu^4} \sin(\nu t + \theta) \right] \sin(\nu t + \theta) \quad (54)$$

其中: E_{3m} ——发电机3次谐波电势的振幅值;

$k_{c\nu}$ ——发电机结构系数。

方程(54)指出,共振频率愈低,中线电流被调制得愈激烈。而调幅的中线电流相当于正反馈作用,因此,不均分负荷的程度愈大,共振频率愈低,大系统共振愈严重。

由于柴油机低频干扰转矩为一组无穷多次简谐力,大系统固有振荡频率 ω_s 又和负载大小、功率因数、电机饱和程度等有关,因之, ω_s 不是恒量,而是随机变量。这种随机性和无穷性的组合,使满足方程(48)共振条件的频率将不是一个,而是一组。因此,满足方程(52)的共振曲线也将不是一根,而是一簇,不过,由于 $M\nu$ 随着 ν 值的提高而下降,而且这种下降率至少不低于三次方律,因此高频共振的振幅是微不足道的。考虑了这些因素后,共振频谱图象如图6所示。

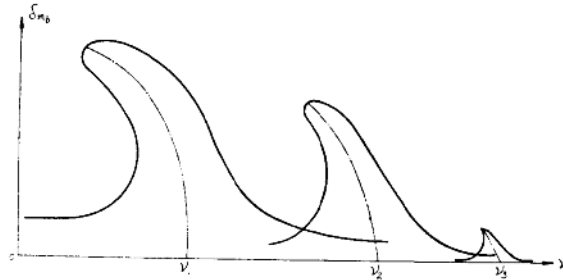


图6 并联大系统的共振频谱

根据以上所做的分析,不均分负荷只影响共振的强度,而不改变共振的性质。因此,参考文献[1, 2]所提出的克服共振的理论根据及其技术措施在这里仍然实用,不过数量要做相应的改变。

五、实现最佳负荷分配的必要条件

不均分电网负荷不仅不能发挥机组的能力,而且还会加强电网共振的强度。因此人们希望参预并联运行的机组不仅平稳,而且都能按比例地均分电网的负荷。为此,令

$$p_1 = p_2 \quad (55)$$

则有

$$\delta_1 = \delta_2 \quad (56)$$

这时,

$$\begin{aligned} & \frac{(k_1 i_{f1} \omega_1)^2}{z_{11}} \sin \alpha_{11} - \frac{k_1 k_2 i_{f1} i_{f2} \omega_1 \omega_2 \sin \alpha_{12}}{z_{12}} \\ & = \frac{(k_2 i_{f2} \omega_2)^2}{z_{22}} \sin \alpha_{22} - \frac{k_1 k_2 i_{f1} i_{f2} \omega_1 \omega_2 \sin \alpha_{12}}{z_{12}} \end{aligned} \quad (57)$$

式中:

$$k_1 i_{f1} \omega_1 = E_1;$$

$$k_2 i_{f2} \omega_2 = E_2.$$

其中:

k_1 、 k_2 ——1[#]、2[#] 电机结构系数;

i_{f1} 、 i_{f2} ——1[#]、2[#] 电机励磁电流;

ω_1 、 ω_2 ——1[#]、2[#] 电机转子角速度。

方程 (57) 是一个相当复杂的多元非线性函数, 求其一般解是比较困难的。但是, 在某些特殊情况下, 这个解却是非常简单的。

的确, 当两台机组型号和容量均相同时, 存在如下关系:

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= k_2; \\ z_{11} &= z_{22}; \\ \sin \alpha_{11} &= \sin \alpha_{22}. \end{aligned} \right\} \quad (58)$$

则有

$$\left. \begin{aligned} z_{11} &= z_{22}; \\ \sin \alpha_{11} &= \sin \alpha_{22}. \end{aligned} \right\} \quad (59)$$

考虑到方程 (58) 和 (59) 的关系, 方程 (57) 取:

$$\frac{i_{f1}}{i_{f2}} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (60)$$

因为均分负荷时, 存在

$$\omega_1 = \omega_2 \quad (61)$$

的同步运转关系, 则有

$$i_{f1} = i_{f2} \quad (62)$$

方程 (58)、(61) 和 (62) 叫做两机均分电网负荷的必要条件, 这是因为这里研究的仅是静态功率分配问题。实际上, 在柴油机交流发电机组组成的并联大系统中, 其负荷变化远比市电电网负荷激烈得多, 整个大系统几乎时刻都处于动态过程中; 其次从数学上来看, 方程 (58)、(61) 和 (62) 也不是满足方程 (57) 所示的恒等式的唯一一组条件, 因之, 我们只能把满足上述三个方程的条件叫做必要条件, 而不是充要条件。定性来看, 如果机组的机电时间常数的标么值相同, 柴油机和发电机的功率匹配系数也相同, 在初始条件相同的条件下, 也能实现动态过程均分电网负荷的目的。

现在扼要地叙述一下这三个必要条件的可实现性问题。详细讨论见参考文献[13]。

方程 (58) 的条件属于电机结构和参数设计制造工艺问题。如果两台发电机不仅容量相同, 而且型号也相同, 这个条件就自然得到满足了; 如果待并两机不仅容量不同, 而且型号也不同, 例如我国现行的 T-2 系列同步发电机那样, 这个条件一般来说是不能满足的。但

是，只要明确了这些关系，进行统一设计，实现这一条件是不难的。

方程(61)是柴油机及其调速器的设计、制造工艺和材质问题。就现有的调速器来看，绝大多数是按负反馈原理来设计的，原理的本身具有克服非线性，减少离散度，提高线性度的作用。因此，从理论上来看，实现这一条也是不难的。在一些严格要求均分负荷的场合，还可以采用调频调载装置，即大系统理论中所述的“协调器”来消除由于工艺原因造成的“残余”的不均分负荷。

方程(62)属于发电机及其调压器的设计制造和调整问题。这一条也是可实现的。应该指出的是，在现有的调压器中，尽管线路众多，举不胜举，但就其调节原理而言，只有三种方式：扰动调节原理、负反馈调节原理和复合调节原理。不言而喻，在没有采取均压措施的情况下，按扰动调节原理设计的各种相复励调节器是很难实现方程(62)的条件；而按负反馈原理设计的各种调压器，则具有最好的线性度，最小的离散度；复合调节原理则居中，如果正确地分配扰动补偿和负反馈强度，应用这种原理来设计自动电压调节器，不仅具有可以接受的线性度，而且还具有相当强的强励能力。因此，做为并联大系统运行用的调压器，应以以后两个原理来设计为宜。如果再配以按无功调差原理设计的无功负荷调差装置，实现这一条件也是不难的。

应该指出，不管设计原理如何精确，由制造工艺等所带来的离散是不可避免的。因此，不管是调速器，或是调压器，它们和柴油机或发电机构成的调频或调压特性，都应该是有差的，而且并联的机组愈多，调差也应该愈大，那种片面追求调压率，在并联大系统中将会引起大系统负荷分配不稳定。

六、结 语

移动电站发展到现在已有七十多年历史，不论是柴油机及其调速器，还是发电机及其调压器，在各自领域里都有很大的发展。但是把它和电网负荷一起看成是一个不可分割的大系统，从大系统的角度来分析各个子系统的主要参数的设计原则却是不多的。本文和参考文献[1, 2]是一种尝试，错误在所难免，请批评指正。

参 考 文 献

- [1] 项国波，“柴油机交流发电机组并联运行稳定性的探讨”，《船电通讯》，1973，3，上海电器科学研究所；
- [2] 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；
- [3] Г. А. Мелешкин，“Переходные режимы судовых электро-энергетических систем”，《Судоостроение》，1971；
- [4] 田治喜、吴霞芳译，“柴油发电机并联运行的稳定性”，国防工业出版社，1977；
- [5] 上海电器科学研究所编，“三次谐波励磁发电机的并联运行专题”，《中小型电机技术情报》1975，1；
- [6] 上海电器科学研究所编，“谐波励磁发电机并联运行问题讨论”，《中小型电机

技术情况》1976, 2;

[7] 上海电器科学研究所编, “船舶发电机自动并联运行控制器专辑”, 《船电通讯》1973, 4—5;

[8] 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;

[9] 武田幸男 [日], “船舶规范对船用交流发电机并联运行的规定”, 《船电通讯》, 1973, 4—5, 上海电器科学研究所;

[10] 横田馨 [日], “晶体管自动并车装置及自动负荷分配装置”, 《船电通讯》1973, 4—5, 上海电器科学研究所;

[11] Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский, “Асимптотических методы в теории нелинейных колебаний”, 1955, Техтеогиз;

[12] 项国波, “非线性自动控制系统若干问题的对数分析方法”, 《自动化学报》1965年, 第三卷, 第三期, 科学出版社;

[13] 项国波, “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, 1979.4。

船舶电力系统可靠性的分析计算

上海交大 320 教研组 施 亿 生

本文从介绍船舶电力系统可靠性的概念开始,叙述了先用逻辑代数函数写出工作能力条件,再转化为全概率函数,以求出可靠度——无故障工作概率的方法。接着对有故障和修复变化过程的复杂电力系统用计算机进行可靠性分析计算的方法也作了介绍。最后对复杂网络可靠性分析的发展——把模型网图存入计算机进行运算作了初步叙述。

舰船电力系统使用的有效性,包括电力系统的可靠性和生命力两个方面。

舰船电力系统工作的可靠性,是指电力系统在舰船昼夜运行的环境工作条件(如温度变化大、湿度大、盐雾腐蚀、横倾、纵倾、振动、冲击等)下,保持正常工作的能力。

舰船电力系统的生命力,是电力系统最大限度地恢复或保持电能保证并使战斗器材及辅机继续工作时,与战斗及事故破损作斗争的能力。此时需计及武器的爆破半径和命中率。

在舰船电力系统的生命力计算方法方面,已有许多以概率论原理为基础的比较完善的方法,并在我国得到应用。所以本文只对船舶电力系统可靠性的计算分析作一下介绍。

电力系统的可靠性包括无故障性、可修复性和耐久性。

无故障性是电力系统在正常使用条件下,在规定时间内能工作的特性。它是可靠性的基本特性。

可修复性是电力系统予先发现和排除故障的能力。耐久性是电站在必要的维修条件下,长期使用的能力。

为了减少船舶电力系统的重量、尺寸、价格和维修工作量,提高电站使用的有效性,需要分析计算船舶电力系统的可靠性。

通常可靠性是用平均故障间隔时间(即平均无故障工作时间)来表示的。此处主要用到另一个数量标准,即我们有把握的程度或证明多么可靠的程度。具体来说,可靠性的数量标志为无故障概率,即无故障次数与总试验次数之比,也叫做可靠度。

一般元件的可靠度呈负指数分布,即可靠度

$$R = e^{-\frac{t}{m}}$$

其中: m 为平均无故障工作时间;

t 为工作时间。

计算船舶电力系统可靠性的目的之一是确定满足对船舶电力系统规定的可靠性要求的元件的可靠性数值。以便对所设计的船舶电力系统中各元件提出可靠性的数值要求,或者用于选择元件和它们的连接方法。第二个目的是确定船舶电站的可靠性数值,以便改进现有船舶电力系统的线路,或使用方法以提高可靠性。也可用来论证类似船舶电力系统对可靠性的数量要求。