

船用同步发电机的整步 及 TZT-1型自动整步仪

國防工業出版社

船用同步发电机的整步及 TZT-1 型自动整步仪

何朝昌 梁惠英 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书共分二章。第一章简要介绍船舶电站同步发电机整步的基本知识，包括整步的常用操作方法及其优缺点与适用场合；准同步合闸的条件；合闸瞬间和允许合闸差频周期的选定方法；合闸时可能出现的误差角及由此而产生的冲击电流和冲击转矩；在船舶电站中粗同步并车的意义；第二章简要地介绍TZT-1型交流发电机通用自动整步仪的特点、基本原理、性能及试验结果。

本书可供从事船舶电站及其他中小型陆用电站的科研、设计、制造和运行管理的技术人员、工人、船员及大专院校有关专业的师生参考。

船用同步发电机的整步及TZT-1型自动整步仪

何朝昌 梁惠英 编

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

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₃₂ 印张 2⁵/₈ 52千字

1978年12月第一版 1978年12月第一次印刷 印数：0,001—4,600册

统一书号：15034·1758 定价：0.23元

前 言

在以华主席为首的党中央抓纲治国的方针指引下，我国人民正在为建设一个具有现代农业、现代工业、现代国防、现代科学技术的伟大的社会主义强国而大踏步前进。在科学技术领域中，自动化产品，自动化系统不断涌现，成为技术革命的重要内容之一。

TZT-1 型交流发电机通用自动整步仪是针对船舶电站的特点，为减少船员操作的劳动强度，避免发电机误合闸事故的发生，为提高船舶电站的运行质量和对负荷的连续供电，为船舶电站进一步实现完全自动化而研制的。

TZT-1 型交流发电机通用自动整步仪研制以来，曾多次征求船员、船舶管理部门、工厂及大专院校同志的意见，不断改进，并在数次技术交流会上作了介绍和讨论。它已在船舶电站中进行了较长时间的实船使用考验，证明此装置线路合理，工作稳定、可靠、动作准确迅速、操作简便，就是在电网频率频繁地剧烈地波动的情况下，也能使发电机可靠地实现快速自动合闸，深受广大船员的欢迎。

此装置虽然为船舶电站而研制，但对其它中小型电站完全适用。

由于我们水平有限，经验不足，本书一定会有不少缺点和错误，衷心希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章	同步发电机整步的基本知识	1
§ 1	概述	1
§ 2	同步发电机整步的基本方法	2
§ 3	同步发电机准同步合闸的条件	4
§ 4	同步发电机合闸瞬间的选定	10
§ 5	同步发电机合闸时的误差角及其允许值	12
§ 6	同步发电机合闸时滑差角速度的选定	19
§ 7	在船舶电站中采用电抗器并车的意义	22
第二章	TZT-1 型交流发电机通用自动整步仪	25
§ 1	概 述	25
§ 2	整步仪的基本构成环节及其基本原理	27
§ 3	提高动作可靠性的几点说明	56
§ 4	TZT-1 型交流发电机通用自动整步 仪在准同步合闸中的应用	63
§ 5	恒定越前时间方案的探讨	65
§ 6	试验结果	70
参考资料		77

第一章 同步发电机整步 的基本知识

§1 概 述

随着交流电的广泛应用，如何使同步发电机安全可靠地并入电网，就成为一项重要的课题。

当各台发电机转子以相同的电角速度旋转时，同步发电机才能在电力系统中并联运行，这时发电机的运行称为是同步的。在稳态运行的情况下，各台发电机转子间的相角差是由发电机所带的有功负荷情况来决定的。当各台发电机的有功负荷情况变化不相同，转子间的相角差就要发生变化。在有功负荷剧烈变化的过程中，这种变化尤为明显。如果某些电机的转子与其它一些电机的转子间的相对位移角在允许的相角差极限范围内，这些转子间的相对位移称为同步振荡。此时发电机的运行仍认为是同步的。

发电机在没有并入电力系统并联运行以前，一般情况下是不与其它发电机同步的。为了使发电机与其它发电机并联运行，必须采取一定的措施，这些措施的完成称为整步。整步的操作是电力系统运行中非常重要的一项操作。这一操作过程如果执行得不正确，就会在电力系统中引起非常严重的事故，它会使发电机受到很大的平衡电流冲击和转矩冲击，

引起电力系统深度的电压跌落，同步发电机失步，系统解列，电网失电，甚至使发电机组遭受破坏。

考虑到上述情况，同步发电机的整步要满足以下两个基本要求：

1. 同步发电机在合闸瞬间的平衡冲击电流和冲击转矩不超出允许值，保证设备安全可靠地运行；
2. 同步发电机合闸后，转子能够被拉入同步。

§ 2 同步发电机整步的基本方法

同步发电机整步的基本方法有三种：

1. 自同步法

用这种方法整步时，将待并发电机的转速升高到接近于额定转速后，在不加励磁的情况下，先合上发电机的主开关，然后再加上励磁，利用自整步力矩的作用使发电机拉入同步。

自同步法的优点是：操作简单、迅速，不需要增加复杂的并联设备。缺点是：发电机合闸后有大的电流冲击、转矩冲击及电网电压的深度跌落，特别是在发电机组功率与电网功率相差不多时尤为严重。

在船舶电站中，由于待并发电机的容量与运行发电机的容量相等或相差不大，为了保证供电的质量，很少采用自同步法使发电机并入电网并联运行。

2. 准同步法

这种方法的示意图如图 1 所示。

这种方法是将待并发电机电压、频率和相位调整到与电网电压、频率和相位十分接近的情况下，合上发电机的主开关。用这种操作方法使发电机合闸时所引起的平衡冲击电流

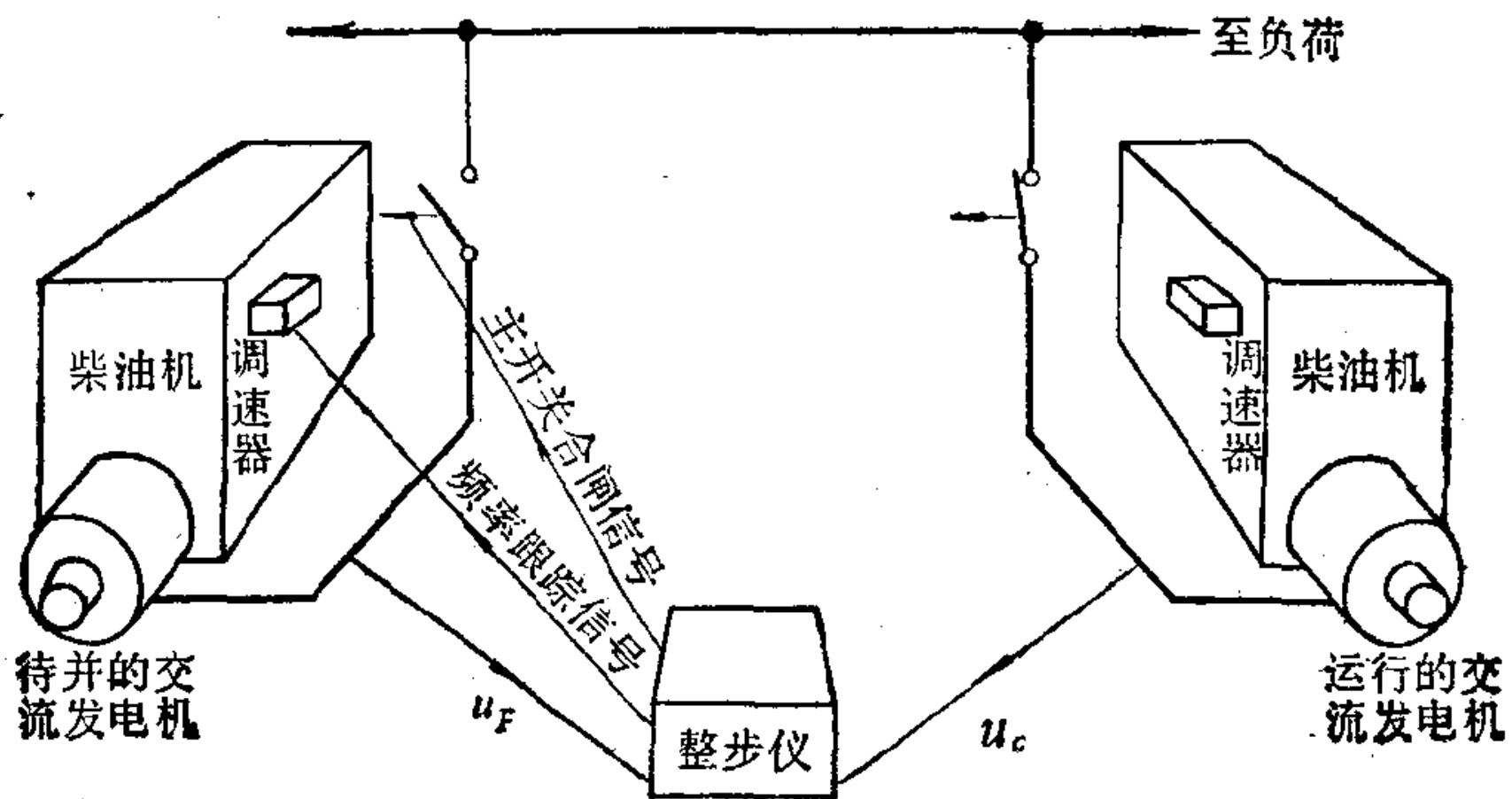


图 1 准同步法示意图

和冲击转矩最小。

发电机采用准同步法进行合闸时，需要对它的电压、频率和相位作长时间的精细的操作和检查。在电网频率经常地、剧烈地变化的情况下，如果主开关合闸动作时间不够快，非但需要很长时间的的操作，而且容易发生误合闸事故。因此这种方法一般只能在发电机调压性能较好，电站负荷较稳定，且主开关合闸动作时间足够快的情况下才能可靠地应用。

3. 粗同步法

粗同步法也叫电抗器同步法，它的示意图如图 2 所示。

这种方法是将待并发电机电压和频率调整到大体上接近电网的电压和频率后，先通过电抗器把发电机接入电网，待发电机拉入同步后合上主开关，然后把电抗器切除。

因为发电机并入电网是通过限流电抗器进行的，所以对发电机的电压、频率和相位不需要象准同步法那样严格的要求和检查。

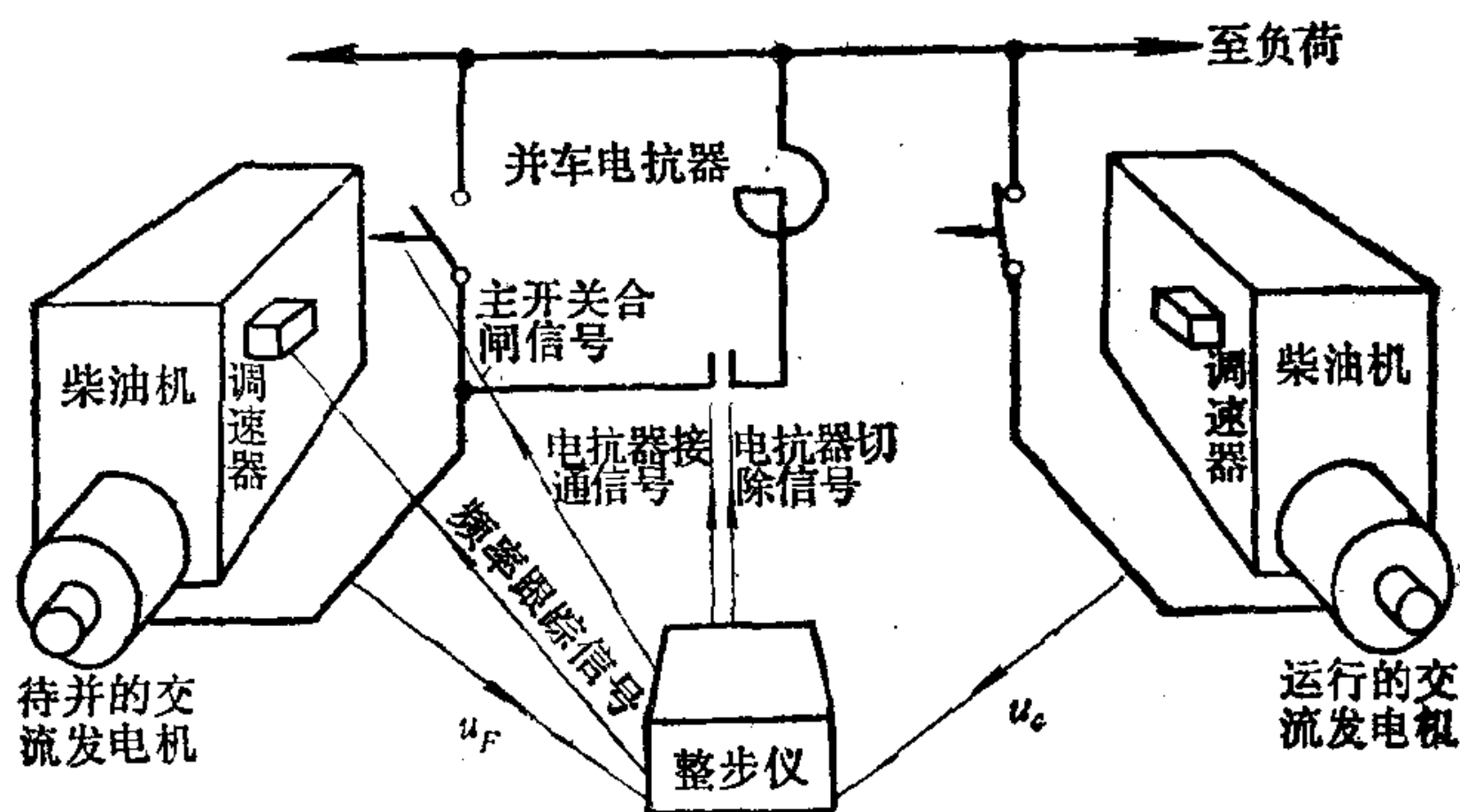


图 2 粗同步法示意图

发电机采用粗同步法进行整步时，虽然合闸过程中有一定的平衡冲击电流、冲击转矩和一定的电压跌落，而且，开关保护、配电装置比较复杂，设备重量也比较大，但是，以后将说明，由于采用此法在电网电压和频率频繁地、剧烈地变化或周期性地变化的情况下亦可安全、可靠地使发电机并入电网，因此，它是船舶电站中广为采用的一种整步方法。

§ 3 同步发电机准同步合闸的条件

同步发电机为了实现准同步合闸，必须满足一定的条件，这就是（假定相序是一致的）：

1. 待并发电机的端电压 U_F 与电网电压 U_c 在数值上相等，即 $U_F = U_c$ ；
2. 待并发电机频率 f_F 与电网频率 f_c 相同，即 $f_F = f_c$ ；
3. 发电机主开关触头闭合瞬间，其电压与电网电压同相。

在理想的条件下，即这些条件完全满足时，发电机主开关合闸瞬间的平衡冲击电流和冲击转矩均等于零，发电机合闸后保持同步。

要绝对准确地满足上述的三个条件实际上是不可能的。在实际工作中，发电机合闸时允许有一些电压上的不等、电压相位上的差别及频率上的不完全一致等情况存在。但实际条件与理想条件之间的差别不应该超出所允许的范围。

由于发电机合闸时不可能完全满足上述的三个条件，因此合闸时要产生平衡冲击电流。

当发电机和电网的电压在数值上不等时，在合闸瞬间产生的平衡冲击电流，其周期分量是无功性质的；

当发电机和电网在频率上不一致时，在合闸瞬间的平衡冲击电流，是有功性质的；

当发电机和电网的电压在相位上不相同时，在合闸瞬间的平衡冲击电流，其周期分量，既有有功性质的，也有无功性质的。

在研究发电机的自动整步时常常要引入差频电压和脉动电压的概念。

所谓差频电压是待并发电机频率与电网频率不一样而差数不大，以及电压的幅值相等或接近相等时，这两个交流电压的差。

设待并发电机电压和电网电压分别为 u_F 和 u_c ，在任何时间 t 有：

$$u_F = U_{Fm} \sin(2\pi f_F t + \delta_F) \quad (1-1)$$

$$u_c = U_{cm} \sin(2\pi f_c t + \delta_c) \quad (1-2)$$

式中 u_F 、 u_c ——待并发电机电压和电网电压的瞬时值；

U_{Fm} 、 U_{cm} ——待并发电机电压和电网电压的最大值；

f_F 、 f_c ——待并发电机和电网的频率；

δ_F 、 δ_c ——待并发电机电压和电网电压的初相角。

若 $U_{Fm} = U_{cm} = U_m$ ，则由于待并发电机频率与电网频率不一致而形成的差频电压为：

$$\begin{aligned} u_s &= u_F - u_c = U_{Fm} \sin(2\pi f_F t + \delta_F) - U_{cm} \sin(2\pi f_c t + \delta_c) \\ &= 2U_m \sin\left[\pi(f_F - f_c)t + \frac{\delta_F - \delta_c}{2}\right] \cos\left[\pi(f_F + f_c)t + \frac{\delta_F + \delta_c}{2}\right] \end{aligned} \quad (1-3)$$

若待并发电机和电网电压的初相角相同且为零，即 $\delta_F = \delta_c = 0$ 时，则有

$$\begin{aligned} u_s &= 2U_m \sin[\pi(f_F - f_c)t] \cos[\pi(f_F + f_c)t] \\ &= u_{sm} \cos[\pi(f_F + f_c)t] \end{aligned} \quad (1-4)$$

$$u_{sm} = 2U_m \sin[\pi(f_F - f_c)t] \quad (1-5)$$

式中 u_s ——待并发电机电压与电网电压之间的差频电压。

由方程式 (1-4) 和 (1-5) 可以看出，差频电压 u_s 为一个其幅值按正弦规律变化的电压，即在任何时间 t ，这个电压的幅值为：

$$u_{sm} = 2U_m \sin[\pi(f_F - f_c)t]$$

上述的这种关系可以进一步用波形图加以说明，如图 3 所示。

图 3 中 $a)$ 和 $b)$ 分别表示待并发电机电压和电网电压，把这两个电压曲线逐点相减就得图 3 $c)$ 的曲线 u_s ，即为差频电压波形曲线，由这曲线可以看出差频电压的幅值是随时间也即随 u_F 和 u_c 的相位差而变化。当待并发电机电压和电

网电压相位相同时, u_{sm} 为零; 当两者相位相反时, u_{sm} 为最大。在 u_s 的波形曲线上, 把所有峰点 (最高点) 和所有谷点 (最低点) 连起来, 则得此差频电压的所谓包迹曲线, 如

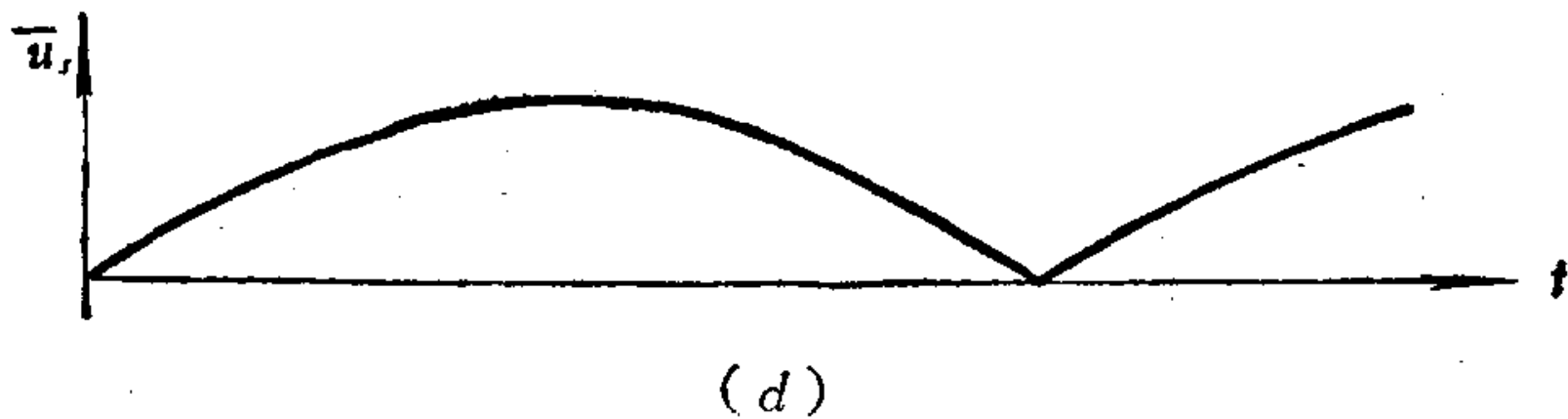
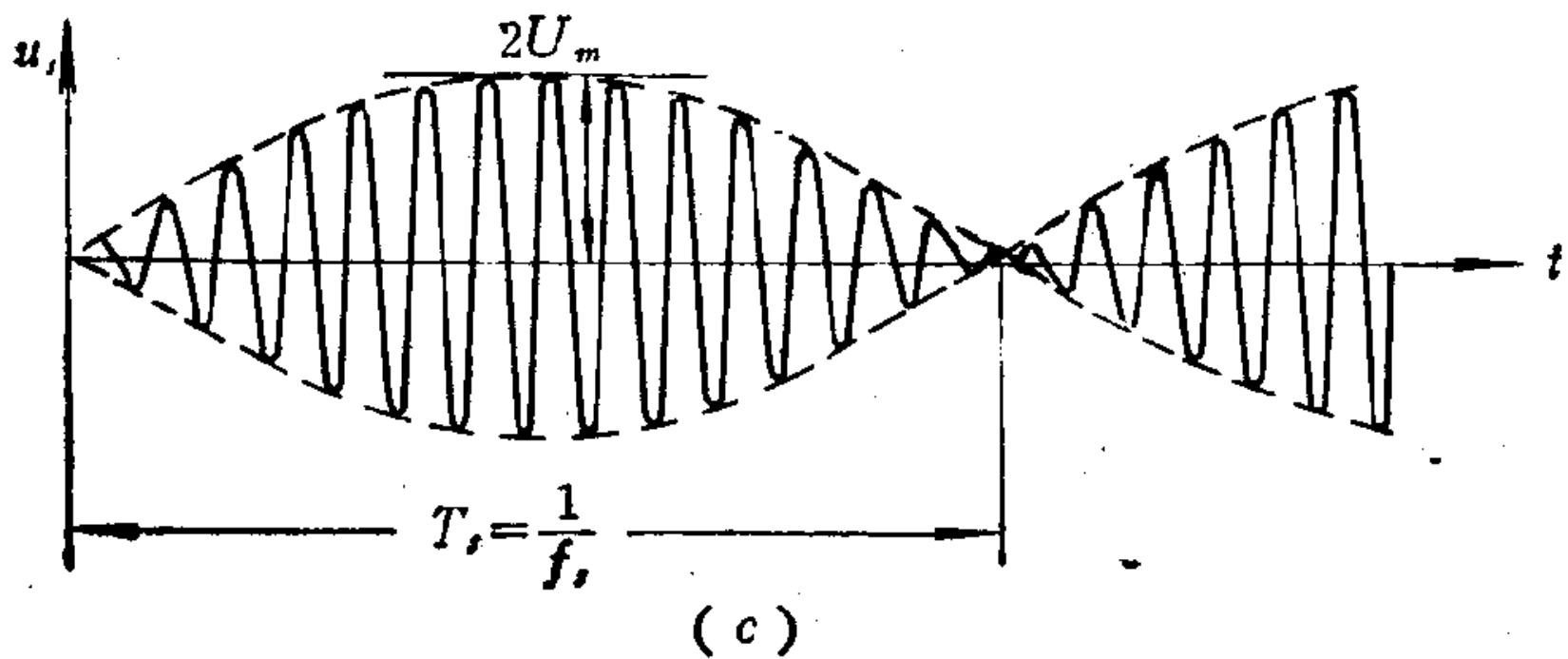
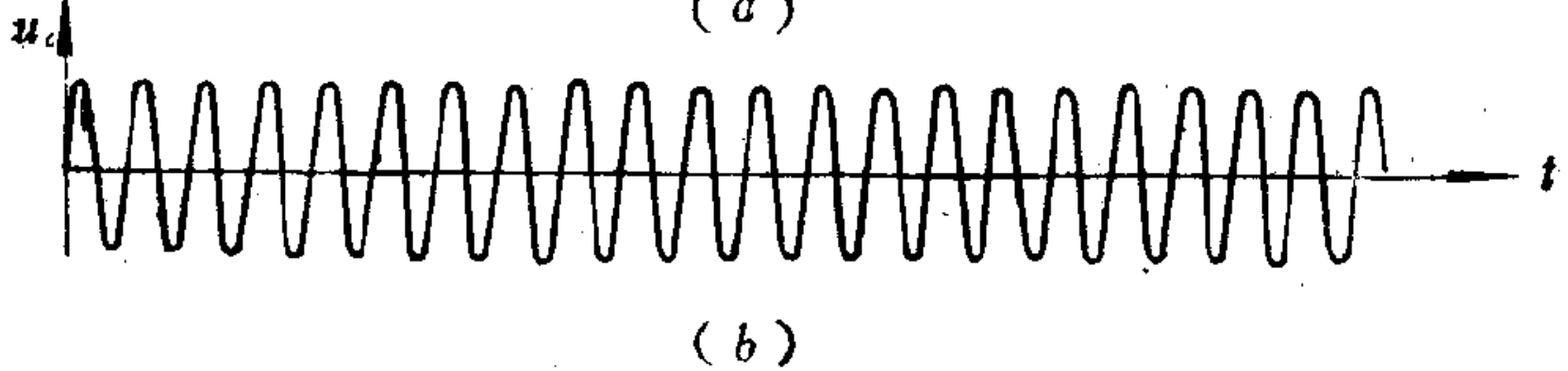
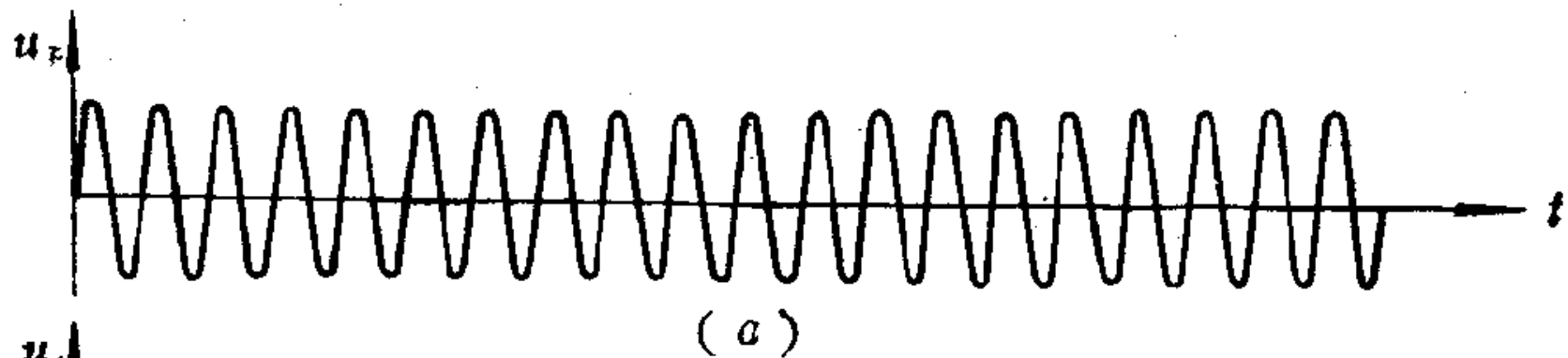


图 3 差频电压与脉动电压波形图

图 3 c) 上的虚线。这曲线实际上就是由下式所表示的曲线:

$$u'_{sm} = \pm |2 U_m \sin \pi (f_p - f_c) t|$$

差频电压 u_s 经整流、滤波后就得到如图 3 d) 所示的曲线。与这曲线相应的可以写出方程式:

$$\bar{u}_s = |K U_m \sin \pi (f_p - f_c) t| \quad (1-6)$$

式中 K ——决定于整流、滤波参数的常数。

为讨论方便起见, 我们称由方程式 (1-6) 所表示的电压 $\bar{u}_s$ 为脉动电压[●]。

方程式 (1-5) 和 (1-6) 也可以写成:

$$\begin{aligned} u_{sm} &= 2 U_m \sin \pi (f_F - f_c) t \\ &= 2 U_m \sin \pi f_s t \\ &= 2 U_m \sin \frac{\omega_s}{2} t \end{aligned} \quad (1-7)$$

$$\begin{aligned} \bar{u}_s &= |K U_m \sin \pi (f_F - f_c) t| \\ &= |K U_m \sin \pi f_s t| \\ &= \left| K U_m \sin \frac{\omega_s}{2} t \right| \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中 f_s ——待并发电机电压与电网电压之间的滑差频率;

$$f_s = f_F - f_c$$

ω_s ——待并发电机电压与电网电压之间的滑差角频率, 或叫转子的滑差角速度。

$$\omega_s = 2 \pi f_s$$

脉动电压曲线上邻近两次过零所经过的时间称为差频周期, 用 T_s 表示。它与滑差频率及滑差角频率之间的关系为:

● 在一般书中把差频电压称为脉动电压。在这里我们把由方程式 1-6 所表示的电压称为脉动电压; 把方程式 1-4 所表示的电压称为差频电压。

$$T_s = \frac{1}{f_s} = \frac{2\pi}{\omega_s} \quad (1-9)$$

为讨论方便,有时需要用矢量图来说明差频电压的概念。电压矢量图见图 4 所示。

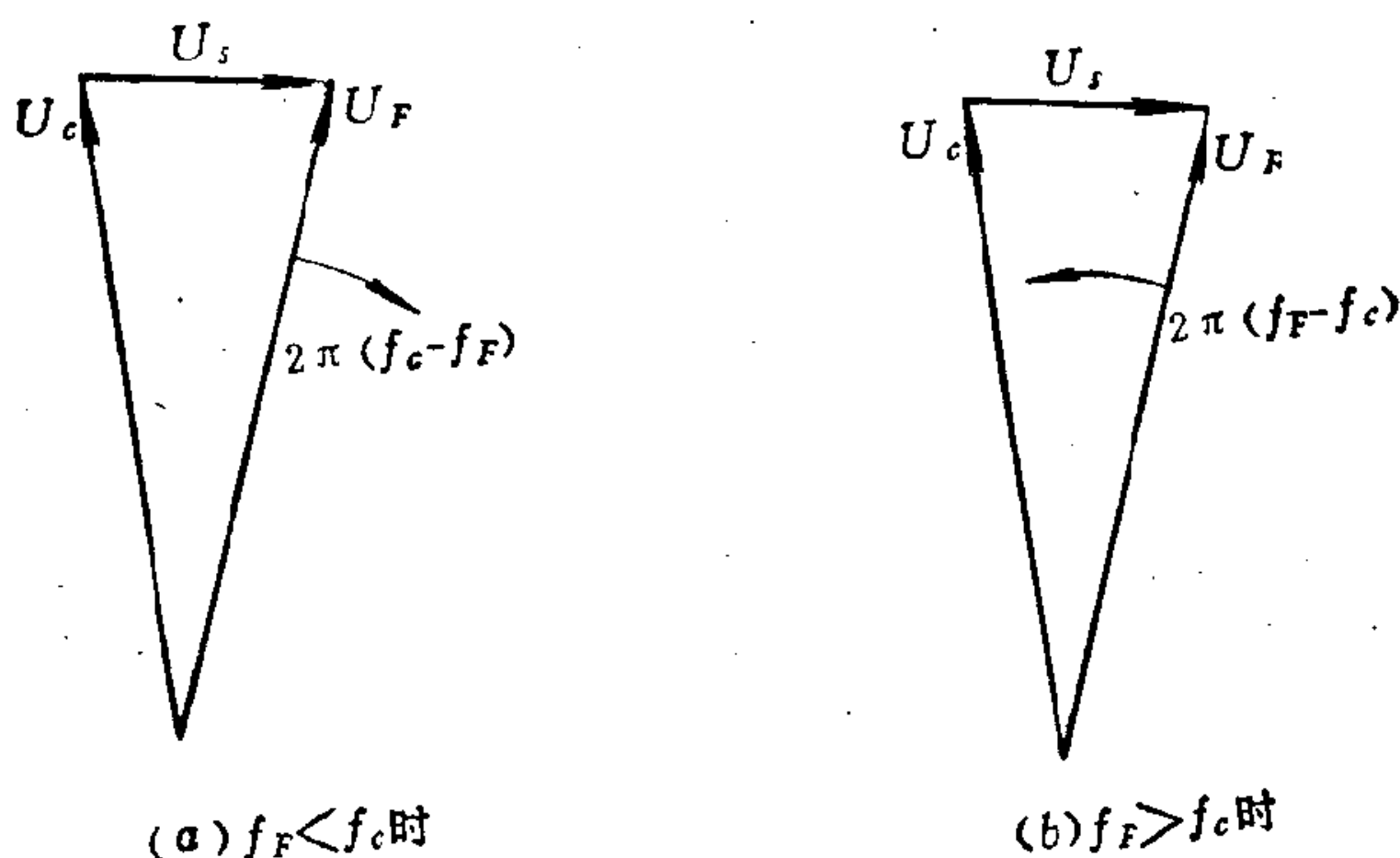


图 4 电压矢量图

当待并发电机频率与电网频率不相同时,待并发电机电压矢量 U_F 就要相对电网电压矢量 U_c 而旋转,其旋转角速度为 $|2\pi(f_F - f_c)|$; 当待并发电机频率 f_F 低于电网频率 f_c , 即 $f_F < f_c$ 时, U_F 就以 $2\pi(f_c - f_F)$ 的角速度沿顺时针方向绕 U_c 旋转,如图 4 a) 所示; 当 $f_F > f_c$ 时, U_F 就以 $2\pi(f_F - f_c)$ 的角速度沿逆时针方向绕 U_c 旋转,如图 4 b) 所示。 U_F 与 U_c 的矢量差即为 U_s , 随着 U_F 绕 U_c 转动,差频电压矢量的大小和方向也随着改变,而它在横轴上的分量即为由方程式 (1-4) 所表示的差频电压。

运用差频电压和脉动电压的概念,同步发电机准同步合闸的三个条件就可以用以下二个条件来代替:

1. 差频周期 T_s 应足够大, 使得滑差频率 f_s 或滑差角速度 ω_s 的绝对值不超过允许的范围。例如: 当电网频率 $f_c = 50$ 赫及滑差角频率极限允许值为 0.2 赫时, 差频周期应为:

$$T_s = \frac{1}{f_s} \geq \frac{1}{0.2} = 5 \text{ (秒)}$$

这条件代替了前面所说的第二个条件。

2. 发电机合闸时, 主开关触头应在差频电压的幅值(或脉动电压)变为零时闭合。这条件代替了前面所说的第一个和第三个条件。

§ 4 同步发电机合闸瞬间的选定

无论是手动合闸还是自动合闸, 发电机合闸瞬间的选择是一个重要的问题。

为了保证发电机主开关合闸瞬间的平衡冲击电流等于零, 就必须使主开关的触头在脉动电压过零的点 ($\delta = 0$ 或 $\delta = 360^\circ$) 闭合。这个零点所特具的条件称为“最合适的条件”。对应于这个条件的瞬间称为“最合适的瞬间”。

因为每一个开关电器, 包括发电机的主开关及整步装置在内, 都有自己的动作时间 t_k 和 t_z 。因此, 为了保证主开关触头在“最合适的瞬间”闭合, 就必须比这“最合适的瞬间”越前一个时间 t_n 发出主开关合闸的信号, 如图 5 所示。

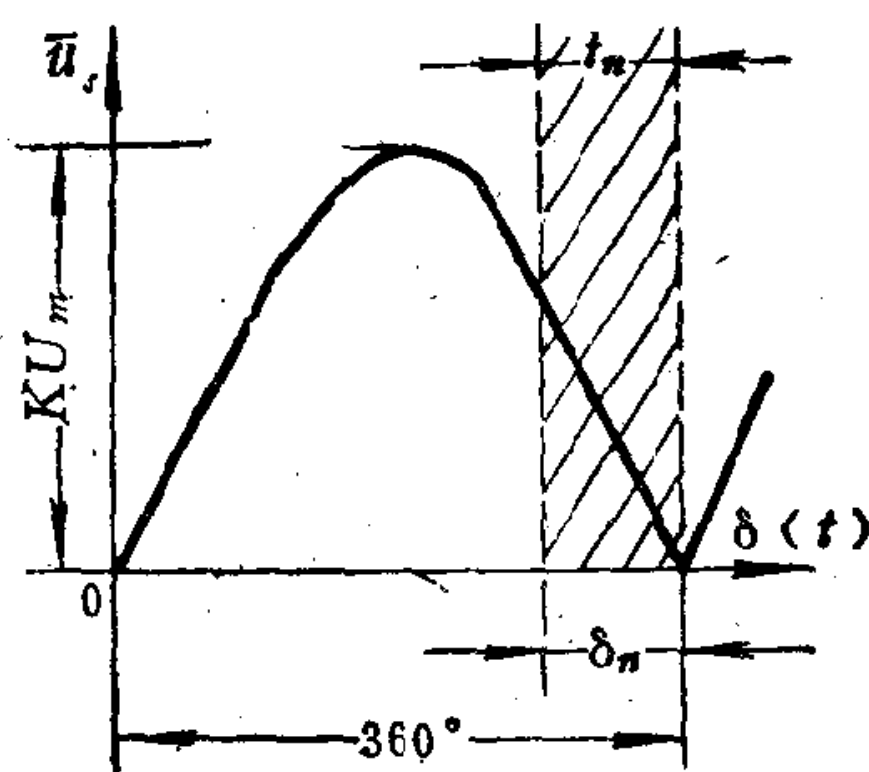


图 5 发电机合闸时越前时间和越前相角

在理想的情况下，这个越前时间必须准确地等于发电机主开关及整步装置的动作时间之和，即

$$t_n = t_K + t_Z$$

在原理上有两种不同的选择发电机合闸瞬间的方法，那就是恒定越前时间法和恒定越前相角法。

由给出合闸信号到待并发电机电压相位与电网电压相位相同时的这段时间，称为越前时间。

给出合闸信号瞬间待并发电机电压相位与电网电压相位的差，称为越前相角。

越前时间 t_n 和越前相角 δ_n 的关系可用下式表示：

$$\delta_n = |\omega_s| t_n \quad (1-10)$$

恒定越前时间法的自动整步装置，保证在给定的越前时间下发出发电机合闸的信号。如果这种装置在不同的（但必须是允许的）发电机频差下工作，则将在不同的越前相角下发出发电机合闸的信号，因为要保证越前时间 $t_n = \frac{\delta_n}{\omega_s}$ 不变。

恒定越前相角法的自动整步装置，保证在给定的越前相角下发出发电机合闸的信号。这时越前时间并不是一个确定的数值，而是决定于发出合闸信号时发电机的频率差，因为要保证越前相角 $\delta_n = |\omega_s| t_n$ 不变。

原则上，恒定越前时间的自动整步装置是可以做到发电机主开关触头在其电压相位与电网电压相位完全相同的条件下闭合的。恒定越前相角的自动整步装置原则上是不能实现准同步合闸的。

实际上，我们将说明，在船舶电站中，由于与发电机容

量可以比拟的各种负荷（如感应电动机等）的起动和制动而引起电网电压、频率的波动，同时由于发电机主开关动作时间的离散性，也不是恒定的，这将使合闸时产生相角误差，而且主开关动作时间越长，可能出现的相角误差就越大。因此，准同步合闸的自动整步装置，只能在电站负荷稳定，因而频率较稳定，且主开关动作时间足够快的情况下才能可靠地运用。

在这种情况下，与越前时间相对应的越前相角必然是很小的。采用恒定越前相角的自动整步装置控制发电机合闸时，主开关触头闭合瞬间的相角误差也是很小的，而且，恒定越前相角的自动整步装置，线路简单，调试方便，因而在船舶电站中获得了广泛的应用。

§5 同步发电机合闸时的误差角 及其允许值

前面已经说过，发电机合闸时总是希望主开关触头在“最合适的瞬间”（即 $\delta = 0$ ）闭合，但实际上是不可能的。它总是存在着一定的误差角。因为发电机的主开关和自动整步装置的动作时间并不是固定不变的，而且在船舶电站中发电机转子的滑差角速度也不是常数。

在具有恒定越前时间的自动整步装置中，计算的越前时间是根据主开关和自动整步装置动作时间无误差的假设来进行的。在这种条件下，与合闸设备的计算的越前时间相对应的越前相角为：

$$\begin{aligned}\delta_p &= \omega_{sn}(t_K + t_Z) = \omega_{sn}t_p \\ t_p &= t_K + t_Z\end{aligned}\quad (1-11)$$