

高等学校教材

电力系统自动化

华北电力学院 李先彬 编

水利电力出版社

第一版前言

本书为“电力系统继电保护与自动化”专业“电力系统自动化”课程的教材，根据有关会议精神，本书还考虑到工程技术人员的需要，因此取材既着重反映国内在“电力系统自动化”方面的基本情况，又适当介绍国外在这方面的发展趋向与科研成果，同时还考虑学生毕业后在实际工作中对自动化技术方面的要求，书中附有“*”的内容为本课程的非基本部分，可供教学时选用。

本书共分九章。第一、二章由曲和南编写，第八、九章由黄考涌编写，其余各章均由李先彬编写。李先彬任本书主编。全书由山东工学院刘从爱、王华云进行审阅。

在本书编写的具体工作中，得到各方面有关同志的大力支持与帮助，在此表示感谢。

本书中一定存在不少错误与缺点，望读者批评指正。

编 者

1981.5.29

第二版前言

本书是在第一轮教材《电力系统自动化原理与技术》的基础上，由华北电力学院李先彬副教授根据教学大纲的要求重新修改编写的。全书由华中工学院樊俊教授审阅。书中附有“*”的内容仍可作本课程的非基本部分，供教学时选用。

本书在编写工作中，曾得到有关同志的支持与帮助，在此表示感谢。

书中尚有错误缺点，请读者批评指正。

编 者

1985.5.31

目 录

第一版 前言	
第二版 前言	
第一章 同步发电机的自动准同期	1
1-1 概述	1
1-2 整步电压	5
1-3 正弦整步电压与线性整步电压的特性比较	15
1-4 自动准同期装置举例	16
第二章 同步发电机的自动调节励磁系统	31
2-1 同步发电机正常运行时的有关特性及对自动调节励磁系统的要求	31
2-2 同步发电机的励磁机系统	37
2-3 励磁系统中转子磁场的建立与灭磁问题	44
2-4 自动调压器的概念与基本框图	53
2-5 可控硅全晶体管型自动调压器各环节的工作原理	54
2-6 晶体管自动励磁调节器举例 (ZTL-1型)	64
2-7 励磁调节器静态特性的调整	69
第三章 相复励自动调压器	73
3-1 功率电源对调压器强励特性的影响	73
3-2 相复励自动调压器KFD-3的工作原理	75
3-3 KFD-3工作特性的调整	91
*3-4 KFD-3工作方式的计算及例题	98
第四章 自动调节励磁系统的动态特性与有关问题	109
4-1 概述	109
4-2 自动调节励磁系统的稳定性	111
4-3 线性化的同步发电机动态方程式	122
4-4 励磁调节对电力系统动态稳定的影响	130
4-5 励磁系统对暂态稳定的影响	136
第五章 电力系统实时调度引论	139
5-1 电力系统调度自动化发展的回顾	139
5-2 电力系统调度的主要任务	141
5-3 电力系统的分区、分级调度	142
5-4 电力系统实时调度的主要内容	144
5-5 中心调度计算机配置问题简介	149
5-6 软件问题	151
第六章 电力系统运行方式的状态估计	154

6-1	测量系统误差的随机性质	154
6-2	最小二乘法估计	158
6-3	电力系统运行方式的数学模型	165
6-4	电力系统最小二乘法状态估计	172
6-5	P - Q 分解法的状态估计	181
*6-6	递推估计	189
6-7	电力系统运行状态估计框图	194
第七章	电力系统的实时安全调度	200
7-1	导论	200
7-2	电力系统运行状态的安全分析	204
7-3	电力系统稳定性在线分析的简单介绍	223
7-4	提高电力系统调度的安全水平的总框图	232
7-5	电力系统运行状态的安全监视	237
第八章	电力系统按频率自动减负荷	245
8-1	概述	245
8-2	按频率自动减负荷的工作原理与各轮最佳断开功率的计算	249
8-3	减负荷装置	255
第九章	电力系统的自动调频与经济调度	259
9-1	概述	259
9-2	调频问题	261
9-3	调频方法	266
9-4	电力系统负荷的经济分配	276
9-5	自动调频系统举例	283
*9-6	优化潮流的简单介绍	289
	参考文献	293

第一章 同步发电机的自动准同期

1-1 概 述

在一个电力系统中，如果各发电机转子都以相同的电角速度运转，各发电机转子间的相对电角度不超过允许值，此种运行方式称为发电机的并列运行，并称参加并列运行的各发电机为同步的。

一、引言

一般情况下，一台未投入系统参加并列运行的发电机与系统中其它发电机是不同步的。发电机投入系统参加并列运行的操作称为并列操作。并列操作是电力系统运行中的一项重要操作，不但正常运行时需要它，在事故处理中有时也需要

通过它来迅速恢复整个系统的安全供电；不但在发电厂中需要它，在电力系统也需要它。图1-1说明需要进行并列操作的两种基本情况。图1-1(a)表示

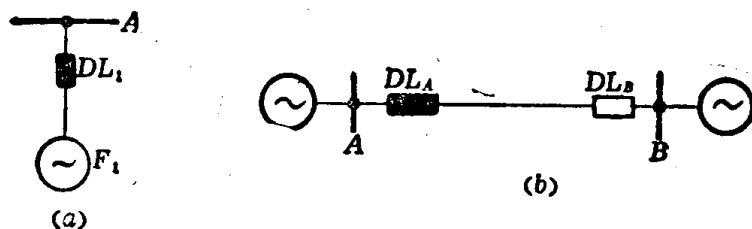


图 1-1 发电机并列示意图

发电机 F_1 欲与母线 A 并列运行时，必须利用断路器 DL_1 进行并列操作；图1-1(b)说明，无论是因为事故或基建等原因，系统两部分要实现同步运行时，也必须利用断路器 DL_A 进行并列操作。

同步发电机的并列操作可采用准同期方法或采用自同期方法。当采用准同期方法时，待并发电机应先励磁，然后按准同期的条件，通过并列操作，使发电机并入系统；采用自同期方法时，待并发电机需在发电机定子并入系统后方给其转子励磁。

“将发电厂的一个机组用准同期的方法并入母线”与“将电力系统的两部分用准同期的方法进行并列运行”，可以说是两个问题。由于具体条件不同，它们的自动化方案也有较大的差别；如果一般地来讨论“电力系统并列操作的自动化”问题，显然涉及的面较广，内容也较为烦琐。因此，本教材仅讨论同步发电机用准同期方法与母线进行并列的“并列操作自动化”问题，因为它是自动并列问题中最常见的，同时在技术上也最有典型性的问题。

在发电厂中，每一有可能进行并列操作的断路器，都是电厂的同期点。例如图1-2中，每个发电机的断路器都是同期点，因为各发电机的并列操作，都在各自的断路器上进行；母线联络开关也都是同期点，它对于同一母线上的所有发电单元都是后备同期点；当变压器检修完毕投入运行时，可以在变压器低压侧断路器上进行并列操作；三绕组变压器的三侧都有同期点，这是为了减少并列运行时可能出现的母线倒换操作，保证迅速可靠地恢复

供电；110kV以上线路，当设有旁路母线时，在线路主断路器因故退出工作的情况下，也可利用旁路母线断路器进行并列操作；而母线分段断路器一般不作为同期点，因为低压侧母线解列时，高压侧是连接的，没有同期要求。

二、滑差

图1-1(a)中， DL_1 按准同期条件合上之前，待并发电机 F_1 的电压 U_f 及其频率 f_f 与发电厂母线电压 U_x 及其频率 f_x 一般是不相等的。在并列过程中，两者的频率差是一项很重要的参数，称为滑差频率 f_s 。显然，可令

$$f_s = f_f - f_x$$

当两个交流电压的频率不等（但较接近），而具有公用接地点时，如图1-3(a)所示，一般可用两个有相对旋转速度的矢量来表示它们，如图1-3(b)。两个交流电压 \dot{U}_f 、 \dot{U}_x 间的瞬时相角差 δ ，就是图中两矢量间的夹角；两电压矢量间的相对旋转电角速度称为滑差角速度 ω_s （简称滑差）。于是，得

$$\begin{aligned} \omega_s &= \frac{d\delta}{dt} \\ &= \frac{d(\varphi_f - \varphi_x)}{dt} \\ &= \frac{2\pi d(f_f t - f_x t)}{dt} \\ &= 2\pi(f_f - f_x) \\ &= 2\pi f_s \end{aligned}$$

式中 φ_f 与 φ_x ——发电机交流电压瞬时相角与母线交流电压的瞬时相角。

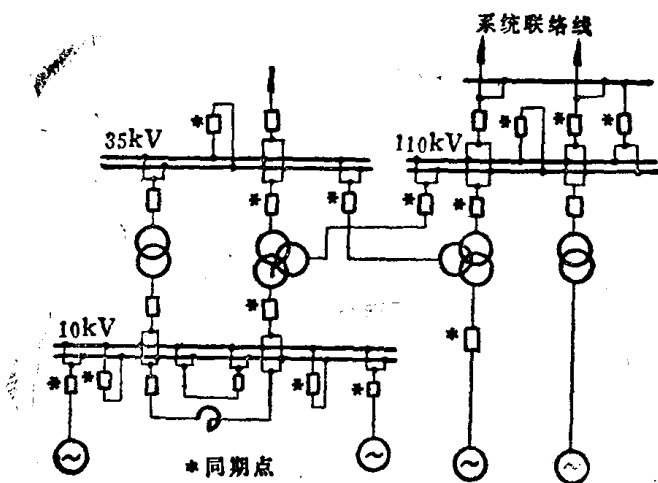


图 1-2 发电厂的同期点举例

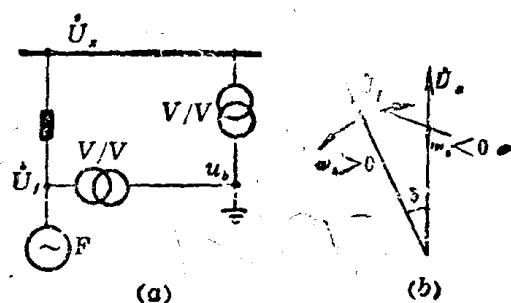


图 1-3 滑差电压原理图

很显然， ω_s 是有正负值的，其方向与所规定的参考矢量有关。图1-3(b)中以系统电压 \dot{U}_x 为参考矢量，于是 $f_f > f_x$ 时， $\omega_s > 0$ ，当 $f_f < f_x$ 时， $\omega_s < 0$ 。反之若以 \dot{U}_f 为参考矢量，则 ω_s 的方向恰好相反。

滑差也可以用标么值表示，即

$$\omega_{s*} = \frac{2\pi f_s}{2\pi f_x}$$

$$= \frac{f_s}{50}$$

ω_s 的百分值为

$$\omega_s(\%) = \frac{f_s}{50} \times 100(\%)$$

滑差周期为

$$T_s = \frac{2\pi}{|\omega_s|}$$

$$= \frac{1}{|f_s|}$$

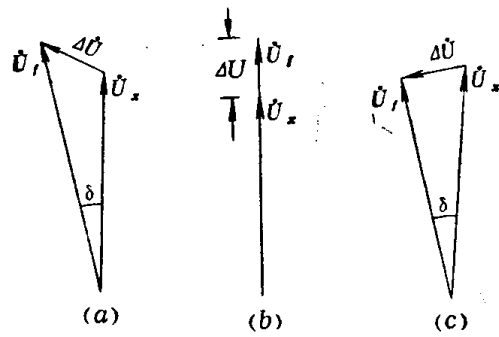


图 1-4 准同期条件的分析

滑差 ω_s 的大小或滑差周期 T_s 都可以用来确定地表示待并发电机与系统之间频率差的大小。滑差大则滑差周期短；滑差小则滑差周期长。发电厂在人工进行正常手动并列操作时，一般取滑差周期在10s~16s之间。

三、准同期条件的分析

为避免并列时出现的冲击电流与振荡现象，准同期并列的三个条件为：

- (1) 待并发电机电压与母线电压的幅值相等；
- (2) 待并发电机频率与母线频率相等；
- (3) 断路器主触头闭合瞬间，待并发电机电压与母线电压间的瞬时相角差为零。

以上三个条件是准同期并列时的理想条件，在实际运行中，这三个条件是很难同时满足的。如，第二个条件要求 $\omega_s = 0$ ，根据图1-3，当 $\omega_s = 0$ 时，发电机电压 U_g 与系统电压 U_x 相对静止， \dot{U}_g 与 \dot{U}_x 之间的相角差 δ 就会保持不变，于是第三个条件要求的瞬时相角差为零就很难同时得到满足。

既然理想的准同期条件是很难实现的，则在并列时，必然会出现暂态冲击电流与拖入同步过程中的振荡现象。因此，要严格控制准同期并列时的具体条件，使得同步发电机并入电网时，不致受到过大的冲击。

对发电机的准同期来说，冲击电流与振荡过程两个因素中，冲击电流是主要的，将冲击电流限制在安全运行的范围内，振荡过程将是可忽略不计的。这一点在以下的分析中可明显地看出。

如图1-4(a)所示，假定开关合上瞬间，待并发电机电压 \dot{U}_g 与母线电压 \dot{U}_x 之差 $\Delta\dot{U}$ 既存在幅值差 ΔU ，也存在相角差 δ ，在分析由此而产生的冲击电流时，可将其分解为两种典型情况：只存在电压幅值差 ΔU [如图1-4(b)所示]时，产生的冲击电流；只存在相角差 δ [如图1-4(c)所示]时，产生的冲击电流。总的冲击电流应该是这两种典型情况下产生的冲击电流的矢量和，现分别讨论如下。

1. 只存在电压幅值差 ΔU 时 与电力系统短路电流暂态过程的分析相似，如图1-5所示，在只存在 ΔU 时，产生的是无功冲击电流 \dot{I} 。冲击电流的最大值为

$$I'_{ch.\max} = \frac{1.9 \times \sqrt{2} (U_g - U_x)}{X''_d} \quad (1-1)$$

$$= 2.69 \Delta U / X''_d$$

式中 U_x 、 U_f 、 ΔU ——相应电压的有效值；

X_d'' ——发电机 d 轴次暂态感抗。

同步发电机的出厂质量需保证该机能承受空载额定电压时端部短路电流的冲击；但应注意，这是极限数据，不是安全数据。由于准同期操作是经常性的操作，为了保证其安全，操作时一般不允许冲击电流超过端部短路电流的二十分之一到十分之一。据此，由式 (1-1) 得准同期并列的一个条件为：电压差 ΔU 不能超过额定电压值的 5~10%。

2. 只存在相角差 δ 时 当合闸的相角差很小时，因图 1-4 (c) 中 $\Delta \dot{U}$ 产生的冲击电流最大值为

$$I_{ch.\max}'' = \frac{2.69 \times U_x}{x_q''} 2 \sin \frac{\delta}{2}$$

式中 x_q'' ——发电机 q 轴次暂态感抗。

当 δ 很小时， $2 \sin \frac{\delta}{2} \approx \sin \delta$ ，于是

$$I_{ch.\max} = \frac{2.69 U_x \sin \delta}{x_q''}$$

这等值于图 1-6 的情况，此时的冲击电流属有功冲击电流。

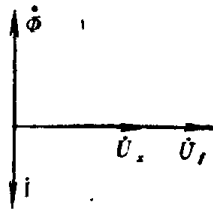


图 1-5 无功冲击电流分量矢量图

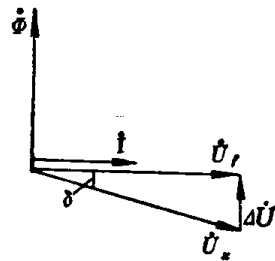


图 1-6 有功冲击电流分量矢量图

对于汽轮发电机， x_d'' 与 x_q'' 相近，因此，为保证安全运行，可取

$$\frac{10 \sin \delta}{x_q''} = \frac{10 \sin \delta}{x_d''} = \frac{1}{x_d''}$$

于是得最大允许合闸相角为

$$\begin{aligned} \delta_{y.\max} &\approx \sin \delta \\ &= 0.1 \text{ 弧度} \\ &= 5.73^\circ \end{aligned}$$

最大误差合闸相角是由断路器的合闸时间误差与人工估计值或自动准同期装置的动作值的误差造成的，它应不大于最大允许合闸相角，即

$$\begin{aligned} \delta_{y.\max} &= \omega_s \Delta t_{\max} \\ &= \omega_s (\Delta t_{DL.\max} + \Delta t_{z.\max}) \end{aligned}$$

式中 Δt_{\max} ——合闸时间总误差的最大值；

$\Delta t_{DL.\max}$ ——断路器机构等造成的时间误差最大值；

$\Delta t_{z.\max}$ ——自动（或人工）准同期装置合闸时间误差的最大值。

在合闸时间的误差中，断路器的机械机构元件，如弹簧、传动机构等的时间误差所占的比

重是较大的，如果自动准同期装置的合闸时间误差远小于断路器合闸机构的时间误差，则

$$\Delta t_{\max} \approx \Delta t_{DL.\max}$$

Δt_{\max} 的数值一般为 0.07~0.12s。由此可以得出待并发电机并入电网时的最大允许滑差的一般数据为

$$T_{s.\max} = \frac{2\pi}{\omega_{sy.\max}} \\ = \frac{2\pi \Delta t_{\max}}{\delta_{cl.\max}}$$

如取 Δt_{\max} 为 0.1s，则得

$$T_{s.\max} \approx 6 \sim 7 \text{ s}$$

从以上的例子也可看出，由于冲击电流的限制，并列合闸时的滑差与相角都必须较小，它使得在正常准同期过程中，同步发电机的振荡过程成了比较次要的因素，因而不必考虑其影响了。

我国的运行经验是，在发电机并入电网时，滑差周期控制在10s左右较为合适。

四、自动准同期装置的功能

自动准同期装置一般具有两种功能：一是自动检查待并发电机与母线之间的电压差及频率差是否符合并列条件，并在满足这两个条件时，能自动地提前发出合闸脉冲，使断路器主触头在 δ 为零的瞬间闭合。二是当电压差、频率差不合格时，能对待并发电机自动进行均压、均频，以加快进行自动并列的过程。

由于一般断路器的合闸机构为机械操作机构，从合闸命令发出，到断路器主触头闭合瞬间止，要经历一段合闸时间（此时间一般约为0.1~0.7s），因而自动准同期装置在检查压差和频差已符合并列条件时，还必须比相角差 δ 为零这一时刻提前一段时间发出合闸命令（提前的时间等于断路器合闸时间），才能使断路器主触头闭合时的相角差恰好为零。自动准同期装置提前发出合闸脉冲的这一段期间，一般称为“越前时间”，由于该越前时间只与断路器合闸时间有关，与滑差及压差均无关，故称其为“恒定越前时间”。在发电机的自动准同期装置中，恒定越前时间是它的关键部分，其工作原理等将在后面讨论。

1-2 整步电压

一、正弦整步电压

自动准同期装置检查待并发电机是否满足同期条件，一般可以利用整步电压来实现。整步电压可以是正弦的，也可以是线性的，下面将分别讨论之。

首先须了解滑差电压。若母线电压瞬时值为

$$u_x = U_{xm} \sin(\omega_x t + \varphi_{ox})$$

发电机电压瞬时值为

$$u_f = U_{fm} \sin(\omega_f t + \varphi_{of})$$

式中 U_{xm} 、 U_{fm} ——相应电压的幅值；
 ω_x 、 ω_f —— \dot{U}_x 、 \dot{U}_f 的电角速度；
 φ_{ox} 、 φ_{of} ——相应电压的初相角。

母线电压瞬时值与发电机电压瞬时值之差为滑差电压，即

$$u_s = u_x - u_f$$

图1-7则为矢量表示的滑差电压图。

在滑差存在的情况下，母线电压与发电机电压之间的相角差 δ 不为常数，而是时间 t 的函数，为 $\delta = \omega_s t + (\varphi_{of} - \varphi_{ox})$ ，即随着时间 t 的变化， δ 以 $0 \sim 2\pi$ 为周期，做周期性变化。因而，滑差电压的幅值 U_s 也由小到大地作周期性变化。为讨论问题的方便，假定：母线电压的幅值 U_{xm} 与发电机电压的幅值 U_{fm} 相等，即 $U_{xm} = U_{fm} = U_m$ ；初相角均为零，即 $\varphi_{ox} = \varphi_{of} = 0$ ；而且 ω_x 和 ω_f 在所讨论的范围内是不变的。则

$$\begin{aligned} u_s &= u_x - u_f = U_{xm} \sin(\omega_x t + \varphi_{ox}) - U_{fm} \sin(\omega_f t + \varphi_{of}) \\ &= U_m \sin \omega_x t - U_m \sin \omega_f t = 2U_m \sin \frac{1}{2} \omega_s t \cos \frac{1}{2} (\omega_x + \omega_f) t \end{aligned}$$

图1-8示出了滑差电压波形图。滑差电压是一个角速度为 $\frac{1}{2} (\omega_x + \omega_f)$ ，幅值（包络线）作正弦变化的交流电压。由于准同期并列时，滑差 ω_s 很小，所以滑差电压的频率仍接近工频（50Hz）

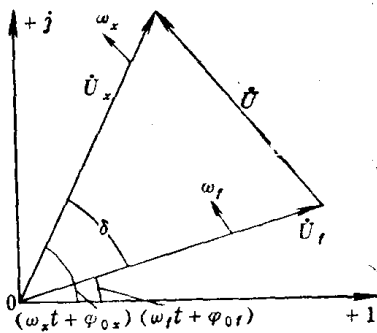


图 1-7 用矢量表示的滑差电压图

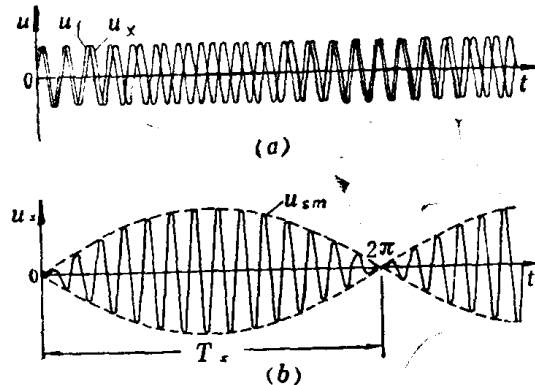


图 1-8 滑差电压波形图

滑差电压的幅值变化规律为

$$u_{sm} = 2U_m \sin \frac{1}{2} \omega_s t = 2U_m \sin \frac{\delta}{2}$$

当 $\delta = \pi$ 时，滑差电压幅值达最大， $u_{sm(\max)} = 2U_m$ ；当 $\delta = 0$ 时，滑差电压幅值有最小值 $u_{sm(\min)} = 0$ 。该点通常称为滑差电压的零点。相角差 δ 从 $0 \sim 2\pi$ 的时间（即两相邻滑差电压零点之间的时间）就是滑差电压的周期 T_s 。

由于滑差电压的零点表示母线电压和发电机电压之间的相角差为零，又由于滑差周期 T_s 的长短反映了滑差 ω_s 的大小，因而，利用滑差电压包络线波形的变化规律来检查准同期的条件是十分有效的。下面将讨论滑差电压的这一功能。

利用图1-9 (a) 表示的电路，将滑差电压的包络线波形（图1-9, b 中的虚线部分）检出，示于图1-9 (c)，即为整步电压 u_{zb} 。

$$u_{zb} = 2U_m \left| \sin \frac{1}{2} \omega_s t \right|$$

上式说明，当 $U_{xm} = U_{fm}$ 时， u_{zb} 只是相角差 δ 的正弦函数，称为正弦整步电压。当 $U_{xm} \neq U_{fm}$ 时，用矢量表示的滑差电压图示于图1-10。

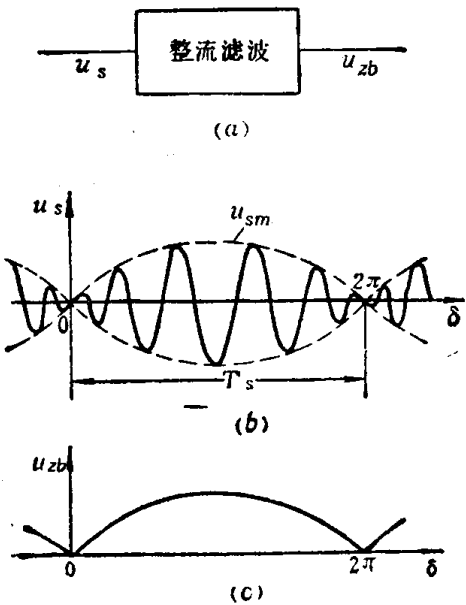


图 1-9 正弦整步电压的获得

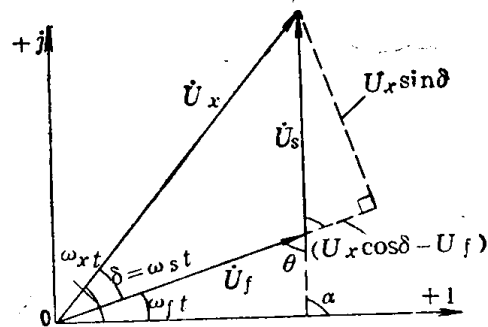


图 1-10 $U_{xm} \neq U_{fm}$ 时，用矢量表示的滑差电压图

由图1-10可知， $U_{xm} \neq U_{fm}$ 时，滑差电压 \dot{U}_s 仍随相角差 δ 的变化作周期性变化，若将其瞬时值用下式表示

$$u_s = U_{sm} \sin \alpha$$

则式中滑差电压幅值 U_{sm} 和 α 角均可由矢量图1-10求出

$$U_{sm} = \sqrt{(U_{xm} \sin \delta)^2 + (U_{xm} \cos \delta - U_{fm})^2}$$

$$\alpha = \omega_f t + \theta = \omega_f t + \text{tg}^{-1} \frac{U_{xm} \sin \delta}{U_{xm} \cos \delta - U_{fm}}$$

式中 $\delta = \omega_s t$, $\theta = \text{tg}^{-1} \frac{U_{xm} \sin \omega_s t}{U_{xm} \cos \omega_s t - U_{fm}}$

所以滑差电压瞬时值为

$$u_s = \sqrt{(U_{xm} \sin \omega_s t)^2 + (U_{xm} \cos \omega_s t - U_{fm})^2} \sin(\omega_f t + \theta)$$

$$= (U_{xm}^2 + U_{fm}^2 - 2U_{xm}U_{fm} \cos \omega_s t)^{1/2} \sin(\omega_f t + \theta)$$

虽然表达式与 $U_{fm} = U_{xm}$ 时不同，但其变化规律仍然相似。

滑差电压的幅值 U_{sm} 与 δ 有关。当 $\delta = \pi$ 时，滑差电压振幅有最大值

$$U_{sm(\max)} = |U_{xm} + U_{fm}|$$

当 $\delta = 0$ 时，滑差电压振幅有最小值

$$U_{sm(\min)} = |U_{xm} - U_{fm}|$$

其波形示于图1-11。

二、利用正弦整步电压检查同期条件的原理

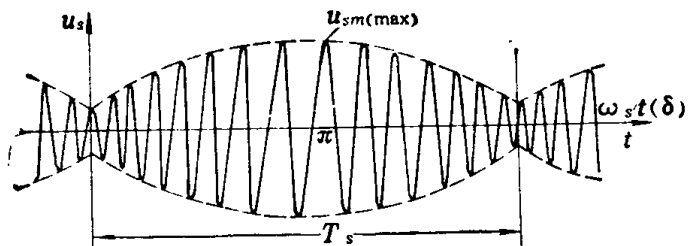


图 1-11 $U_{xm} \neq U_{fm}$ 时滑差电压波形图

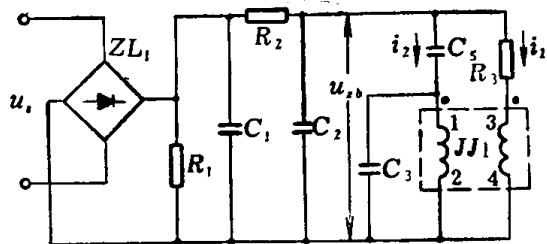


图 1-12 获得恒定越前时间的原理图

1. 获得“恒定越前时间”的原理 正弦整步电压的自动准同期装置的“恒定越前时间”是通过对正弦整步电压进行“比例-微分”的电路得到的，如图1-12所示，图中 R_1 为负载电阻， C_1 、 C_2 、 R_2 为 π 型滤波回路， C_3 为微分电容， R_3 为恒定越前时间整定电阻， R_3 并可分档调节， C_3 为微分回路滤波电容。极化继电器 JJ_1 线圈1-2和3-4匝数相等，其极性如图所示。当 $i_1 + i_2 \leq 0$ 时，继电器返回。

滑差电压 u_s 经 ZL_1 整流和 π 型滤波器滤波后，得到正弦整步电压

$$u_{zb} = 2U_m \left| \sin \frac{1}{2} \omega_s t \right|, \text{ 并通过 } R_3 \text{ 和 } C_3 \text{ 加至继电器 } JJ_1.$$

假定继电器线圈感抗可忽略不计，则

$$i_1 = 2U_m \sin \frac{1}{2} \omega_s t / R_3 = 2K_1 U_m \sin \frac{\omega_s t}{2}$$

$$i_2 = C_3 \frac{du_{zb}}{dt} = K_2 U_m \omega_s \cos \frac{1}{2} \omega_s t$$

式中 K_1 ——与 R_3 有关的常数；

K_2 ——与 C_3 有关的常数。

由于 $i_1 + i_2 = 0$ 为继电器返回的临界条件，即

$$K_1 \cdot 2U_m \sin \frac{1}{2} \omega_s t + K_2 \cdot U_m \omega_s \cos \frac{1}{2} \omega_s t = 0$$

$$\operatorname{tg} \frac{1}{2} \omega_s t = -\frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{\omega_s}{2}$$

在 $\frac{1}{2} \omega_s t$ 数值不大时，

$$\operatorname{tg} \frac{1}{2} \omega_s t \approx \frac{1}{2} \omega_s t$$

所以

$$\frac{1}{2} \omega_s t = -\frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{\omega_s}{2}$$

$$t_d = -\frac{K_2}{K_1} \quad (1-2)$$

上式说明，继电器 JJ_1 在 $i_1 + i_2 = 0$ 时返回，其返回瞬间“ t_d ”与 ω_s 的大小无关，而是一个仅与 K_2 、 K_1 的数值有关，即与 R_3 、 C 的大小有关的常量，右端的负号表示与所取时间标尺的方向相反，即为“越前”时间。故 t_d 为恒定越前时间。 t_d 的大小可以通过改变 R_3 、 C 来调整。当然 t_d 应等于断路器的合闸时间；这样在每个滑差周期内，当 JJ_1 返回，从而对断路器发出合闸命令时，断路器就能保证在 $\delta = 0$ 时闭合。

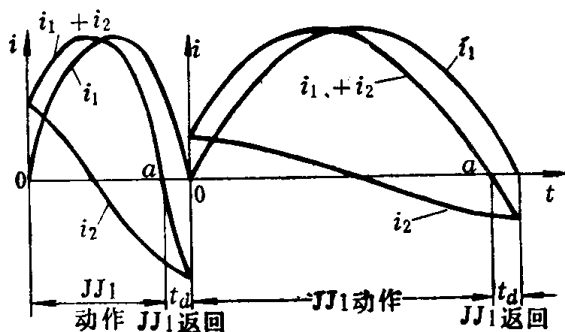


图 1-13 JJ_1 动作波形图

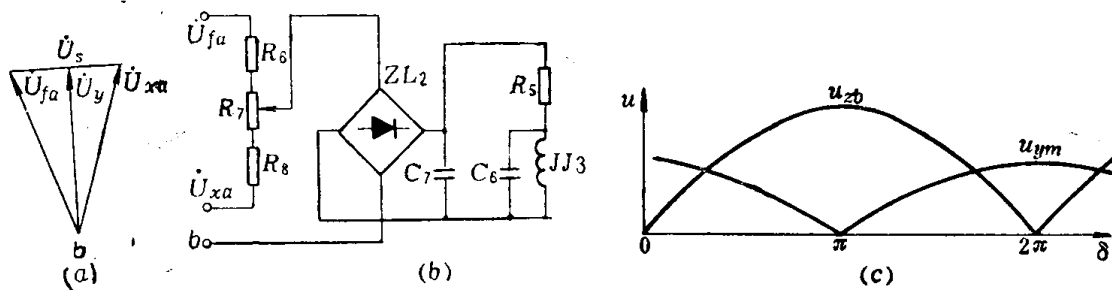


图 1-14 压差检查原理图

2. 压差检查的原理 如图1-14所示。压差检查由整流桥 ZL_2 、电位器 R_7 、电阻 R_6 、 R_8 、 R_5 、电容 C_6 、 C_7 和极化继电器 JJ_3 等构成。分压回路 $R_6 \sim R_8$ 接系统和发电机 a 相电压，并由电位器 R_7 取出滑差电压 U_s 的中点。

因为
$$\dot{U}_y = \frac{1}{2}(\dot{U}_x + \dot{U}_f)$$

若
$$U_{fm} = U_{xm} = U_m,$$

则
$$U_y = \left(U_m \cos \frac{1}{2} \omega_s t \right) \sin \frac{1}{2} (\omega_x + \omega_f) t$$

利用整流滤波的方法，可以获得 u_y 的包络线，其包络线方程为

$$u_{ym} = U_m \cos \frac{1}{2} \omega_s t$$

此电压与正弦整步电压比较，呈余弦变化。如图1-14(c)所示。

当 $\delta = 0$ 时， u_{ym} 有最大值，其值等于 U_m ；当 $\delta = \pi$ 时， u_{ym} 有最小值，其值等于 0。若 $U_{fm} \neq U_{xm}$ 并 $\delta = \pi$ 时， U_{ym} 也有最小值，但不为零，因而可以利用 JJ_3 来判断 $\delta = \pi$ 时 u_{ym} 的大小，若 u_{ym} 超过允许值，表示电压差不合格，其原理可证明如下。

仿图1-10，可得在图1-14情况下

$$\begin{aligned} u_y &= \frac{1}{2} \sqrt{(U_{xm} + U_{fm} \cos \delta)^2 + (U_{fm} \sin \delta)^2} \sin \left(\omega_x t - \text{tg}^{-1} \frac{U_{fm} \sin \delta}{U_{xm} + U_{fm} \cos \delta} \right) \\ &= \frac{1}{2} [U_{xm}^2 + U_{fm}^2 + 2U_{xm}U_{fm} \cos \delta]^{1/2} \sin \left(\omega_x t - \text{tg}^{-1} \frac{U_{fm} \sin \delta}{U_{xm} + U_{fm} \cos \delta} \right) \end{aligned}$$

其幅值部分为

$$|U_{ym}| = \frac{1}{2} [U_{xm}^2 + U_{fm}^2 + 2U_{xm}U_{fm} \cos \delta]^{1/2}$$

当 $\delta = \omega_s t = \pi$ 时， $U_{ym} = |U_{fm} - U_{xm}| / 2$,

因而 $\delta = \pi$ 时， U_{ym} 的数值代表了电压差的大小。

如图1-15所示，当电压差小于允许值时，继电器 JJ_3 将在 $\delta = \pi$ 附近返回（此时 $U_{ym} < JJ_3$ 的返回电压值），表示电压差合格；当电压差不合格时， U_{ym} 的数值均高于 JJ_3 的返回电压值， JJ_3 一直处于动作状态。因此， JJ_3 是否返回，可以表示电压差是否合格。

改变 R_5 可以改变 JJ_3 的整定值，从而可以改变允许电压差的大小， R_5 越大，允许电压差越大，反之越小。

3. 滑差检查 利用正弦整步电压检查滑差的原理如下。

设有一以恒定越前相角为动作条件的极化继电器，则不论滑差 ω_s 如何变化，从极化继电器每次动作到滑差电压过零点之间的相角均保持恒定，即 $\delta_A = |\omega_s| t_A$ ， δ_A 为常数。当 ω_s 为不同数值时，恒定越前相角 δ_A 对应的越前时间 t_A 也不为常数， t_A 与 ω_s 成反比。如果把恒定越前相角 δ_A 的大小按允许滑差 ω_{syx} 时恒定越前时间 t_d 对应的越前相角值来整定，即令

$$\delta_A = \delta_{dyx} = |\omega_{syx}| t_d$$

则当实际滑差为不同数值时，该继电器动作的越前时间为

$$t_A = \left| \frac{\omega_{syx}}{\omega_s} \right| t_d$$

显然，当

$$|\omega_s| > |\omega_{syx}| \text{ 时, } t_A < t_d$$

$$|\omega_s| = |\omega_{syx}| \text{ 时, } t_A = t_d$$

$$|\omega_s| < |\omega_{syx}| \text{ 时, } t_A > t_d$$

因此，只要比较 t_A 与 t_d 的大小，即可以判断 ω_s 的数值是否符合同期条件。上述结论清楚地说明：只有 $t_A > t_d$ ，也就是恒定越前相角的极化继电器先动作，而“恒定越前时间”的极化继电器后动，则表示 ω_s 小于其允许值 ω_{syx} ；相反 $t_A < t_d$ ，则表示实际滑差大于允许值。图1-16说明了滑差检查的上述原理。

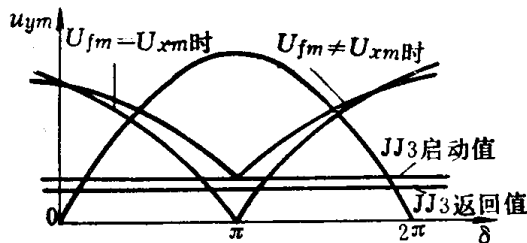


图 1-15 压差检查波形图

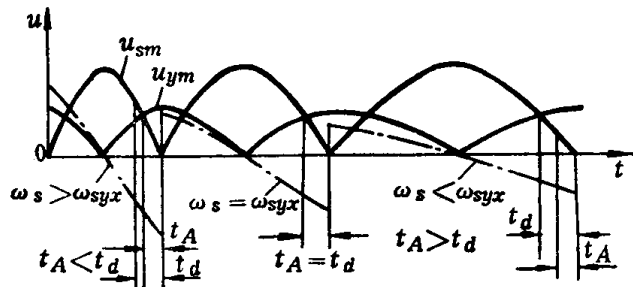


图 1-16 频差检查波形图

恒定越前相角由JJ2产生，如图1-17。JJ2的1—2线圈加电压 $U_{zb} = 2U_m \left| \sin \frac{1}{2} \omega_s t \right|$ ，JJ2的3—4线圈加电压 $u_{vm} = U_m \left| \cos \frac{1}{2} \omega_s t \right|$ ，所以 $i_1 = K_1 \cdot 2U_m \left| \sin \frac{1}{2} \omega_s t \right|$ ， $i_3 = -K_3 \cdot U_m \left| \cos \frac{1}{2} \omega_s t \right|$ 。由于线圈1—2与3—4匝数相等，故JJ2的返回条件为 $i_1 + i_3 = 0$ ，即

$$K_1 \cdot 2U_m \left| \sin \frac{1}{2} \omega_s t \right| - K_3 U_m \left| \cos \frac{1}{2} \omega_s t \right| = 0$$

则

$$\left| \operatorname{tg} \frac{1}{2} \omega_s t \right| = \frac{K_3}{2K_1}$$

在 δ 很小时，即

$$\left| \frac{1}{2} \omega_s t \right| = \frac{K_3}{2K_1}$$

所以

$$|\delta_A| = \frac{K_3}{K_1}$$

即JJ2在恒定越前相角时返回。 K_3 是与 R_4 大小有关的常数， K_3 与 R_4 成反比。

还应指出，虽然 $\delta_A = \frac{K_3}{K_1}$ ，但 ω_{syx} 的整定却只能通过改变 K_3 （即 R_4 ）来达到，而改

变 K_1 (即 R_3) 是达不到目的的。这是因为 K_1 的变化将同时引起恒定越前时间 t_d 的整定值变化, 由于

$$t_d = \frac{K_2}{K_1}$$

得

$$\frac{K_3}{K_1} = \delta_A = \omega_{syx} t_d = \omega_{syx} \cdot \frac{K_2}{K_1}$$

于是

$$\omega_{syx} = \frac{K_3}{K_2}$$

这说明 ω_{syx} 的整定值是与 K_1 无关的。

虽然在滑差检查原理中, 使用了恒定越前时间 t_d , 但在实际工作中, 恒定越前时间 t_d 的整定 (改变 K_1 即 R_3) 与允许合闸滑差 ω_{syx} 的整定 (改变 K_3 即 R_4) 可以互不影响, 各自独立地进行, 给准同期装置的整定带来很大的方便。

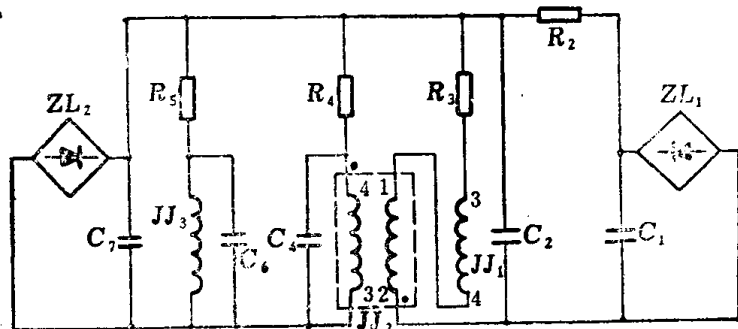


图 1-17 获得恒定越前相角原理图

三、线性整步电压

线性整步电压是指整步电压的大小与相角差 δ 间是线性的比例关系, 在自动准同期装置中采用的线性整步电压, 一般呈三角形波形 (如图 1-18)。图 1-18 (a) 表示相角差 δ 由 $0 \sim 2\pi$ 变化

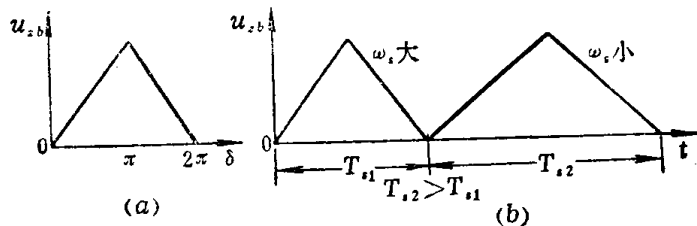


图 1-18 线性整步电压波形图

时, 线性整步电压的波形, 其特点如下。

当 δ 在 $0 \sim \pi$ 区间时, 线性整步电压 u_{zb} 与相角差 δ 成正比, 即 $u_{zb} = K\delta$ 其中 K 为比例常数, 线性整步电压的大小随 δ 的增加而增大; 当 $\delta = 0$ 时, 线性整步电压有最小值, 其值为零; 当 $\delta = \pi$ 时, 线性整步电压有最大值, 其值为 $K\pi$, 是常数。当 δ 在 $\pi \sim 2\pi$ 区间时, 线性整步电压仍与相角差 δ 成正比, 即 $u_{zb} = K(2\pi - \delta)$, 此时线性整步电压的大小随 δ 的增加而成比例地减少, 到 $\delta = 2\pi$ 时, 又达到最小值, $u_{zb} = 0$ 。因此, 线性整步电压幅值的大小与相角差 δ 之间是线性关系, 而与同期电压 \dot{U}_s 、 \dot{U}_f 的幅值无关。

图 1-18 (b) 将线性整步电压的角度横坐标 δ 改为时间横坐标 t , 由于 $t = \frac{\delta}{\omega_s}$, 故滑差 ω_s 不同时, 线性整步电压虽然最大值一样, 但是它们的滑差周期的长短却不同。线性整步电压同样也可以用于检查同期条件。下面介绍产生线性整步电压的一种方法。

图 1-19 为半波线性整步电压发生器, 它由三极管 BG_1 和 BG_2 等构成的相敏电路组成。母线电压和发电机电压经变压器 B_1 、 B_2 和限流电阻 R_1 、 R_2 加至三极管 BG_1 、 BG_2 的基极, 其极性如图 1-19 所示。

在图 1-19 中, 只有 BG_1 和 BG_2 的基极电位同时为负, 两个三极管同时截止时, a 点才

能输出高电平；若 BG_1 、 BG_2 两个三极管中有一个基极电位为正，则由于这个三极管导通，使 a 点输出低电平。

半波线性整步电压发生器的实际波形如图1-20所示。其中图1-20(a)表示加到三极管 BG_1 、 BG_2 基极的交流电压波形 u_x 和 $-u_f$ ，由于只有这两个电压同时为负时， BG_1 、 BG_2 才截止， a 点才输出高电平，所以 a 点输出的是一系列幅值一定，宽度与相角差 δ 的大小成正比的脉冲，如图1-20(b)所示。此脉冲在 $\delta = \pi$ 时达到最宽；当 $\delta = 2\pi$ 时，脉冲宽度为零。由于在交流电压的一个周期内只能产生一次脉冲，因而称为“半波线性整步电压发生器”。图1-20(b)的一系列脉冲，经滤波回路滤波后，呈三角波形输出，如图1-20(c)。因此“线性整步电压发生器”有时也称“三角波整步电压发生器”。

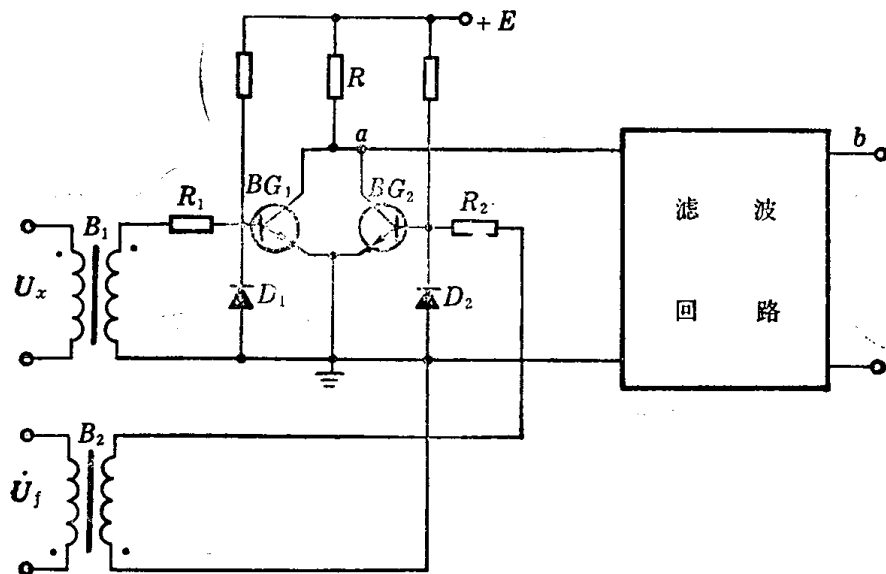


图 1-19 半波线性整步电压发生器

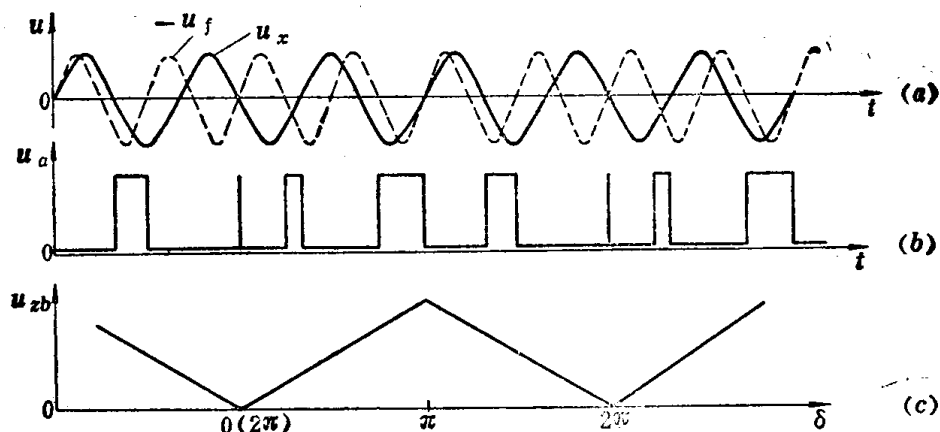


图 1-20 半波整步电压波形图

很显然，另外还有一种全波线性整步电压发生器。它能在交流电压的一个周期内产生两次脉冲，一次在正半周，另次在负半周；这些脉冲也是幅值相同，宽度与相角差 δ 的大小成正比的。将这系列脉冲进行滤波后，也能得到特性如图1-20(c)表示的全波线性整步电压。理解一个全波线性整步电压发生器的工作原理，并不困难，对随后的线性整步电压自动准同期原理的讨论，亦非必要，故不赘述。由于全波线性整步电压发生器的脉冲数量