

电力系统自动化原理与技术

华北电力学院编

电力工业出版社

电力系统自动化原理与技术

华北电力学院 编

电力工业出版社

内 容 提 要

本书共分九章,专门阐述电力系统中应用较为普遍的自动准同期、同步发电机的自动电压调整、电力系统的自动调频、自动减负荷、电力系统实时调度的状态估计、安全调度及经济运行等的自动化原理,以及自动装置与自动控制系统的工作特性等。对常用的自动装置还附有整定计算的公式与例题。

本书为高等学校教材,也可供有关专业工程技术人员参考。

电力系统自动化原理与技术

华北电力学院编

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行 • 各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 20.75印张 472千字 1插页

1981年12月第一版 1981年12月北京第一次印刷

印数 00001—12200 册 定价 2.20 元

书号 15036·4245



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、二两章由曲和南编写，第八、九章由黄孝涌编写，其余各章均由李先彬编写。李先彬同志任本书主编。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.

目 录

前言

绪论	1
第一章 同步发电机的自动准同期	4
1-1 概述	4
1-2 整步电压	8
1-3 正弦整步电压与线性整步电压的特性比较	19
1-4 利用正弦整步电压的自动准同期装置 举例 (ZZQ-1 型)	20
1-5 利用线性整步电压的自动准同期装置 举例 (ZZQ-5 型)	26
*1-6 水轮发电机的自同期	42
第二章 同步发电机的自动调节励磁系统	47
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	47
2-2 同步发电机的励磁机系统	53
2-3 励磁系统中转子磁场的建立与灭磁问题	61
2-4 自动调节器的概念与基本框图	70
2-5 可控硅全晶体管型自动调节器各环节的工作原理	72
2-6 晶体管自动励磁调节器举例 (ZTL-1 型)	81
2-7 励磁调节器静态特性的调整	87
第三章 相复励自动调压器	91
3-1 功率电源对调压器强励特性的影响	91
3-2 相复励自动调压器 KFD-3 的工作原理	93
3-3 KFD-3 工作特性的调整	109
*3-4 KFD-3 工作方式的计算及例题 (附公式推导)	119
*附录	130
第四章 自动励磁调节系统的动态特性与有关问题	138
4-1 概述	138
4-2 自动励磁调节系统的稳定性	140
4-3 线性化的同步发电机动态方程式	152
4-4 励磁调节对电力系统动态稳定的影响	160
4-5 励磁系统对暂态稳定的影响	165
第五章 电力系统实时调度引论	168
5-1 电力系统调度自动化发展的回顾	168
5-2 电力系统调度的主要任务	170
5-3 电力系统的分区、分级调度	171
5-4 电力系统实时调度的主要内容	173

5-5 中心调度计算机配置问题简介	178
5-6 软件问题	181
第六章 电力系统运行方式的状态估计	183
6-1 测量系统误差的随机性质	183
6-2 最小二乘法估计	187
6-3 电力系统运行方式的数学模型	194
6-4 电力系统最小二乘法状态估计	201
6-5 P - Q 分解法的状态估计	212
*6-6 递推估计	219
6-7 电力系统运行状态估计框图	225
第七章 电力系统的实时安全调度	231
7-1 导论	231
7-2 电力系统运行状态的安全分析	235
7-3 电力系统稳定性的在线估计	252
7-4 提高电力系统调度的安全水平的总框图	260
7-5 电力系统运行状态的安全监视	263
第八章 电力系统按频率自动减负荷	274
8-1 概述	274
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	278
8-3 减负荷装置	284
*8-4 电力系统的再同期与自动减负荷	288
第九章 电力系统的自动调频与经济调度	293
9-1 概述	293
9-2 调频问题	294
9-3 调频方法	298
9-4 电力系统负荷的经济分配	305
9-5 自动调频系统举例	313
*9-6 优化潮流的简单介绍	319
参考文献	325

绪 论

电力系统自动化,简单说来就是适应电力系统本身的规律,应用某些自动控制原理,并采用相应的自动化装置,来达到提高电能生产质量及减轻运行人员劳动强度的目的。

电力系统自动化同其它生产过程的自动化一样,包括两方面的内容。一方面是自动化的共有规律,一般称为自动控制的基础理论问题;另一方面是不同生产过程的不同任务与完成这些任务的具体不同方案问题。本书着重后一方面内容的阐述,涉及到前一方面的内容时,其目的仍是为了后一方面内容的需要,因为用基本原理来阐述某些具体内容,更易于理解。

电力系统自动化这门学科,解放前在我国几乎是空白。解放后,随着电力工业的发展和对电能质量要求的日益提高,电力系统自动化也得到了很大的发展。为保证其它工业企业有足够的能源,电力工业必须先行,因而电力系统的自动化必将出现更大进步。

下面就电能的生产过程与其它产品的生产过程的特点作个比较。

电能的生产过程的主要特点是:

(1) 生产的电能是不能瞬时储藏的;

(2) 电力系统分布的区域十分辽阔,而联系又十分紧密。

电能生产的这些特点决定了电力系统自动化是不能由其它学科替代的。例如,对于一种产品能够储藏的生产过程,可用图0-1(a)表示。在整个生产运输、传送与消耗过程中,任何阶段的“产品”($x_1, x_2, \dots, x_i, \dots$)都是可以储藏的,如果生产链条中的某一环节(如生产流程 i)发生了故障[如图0-1(b)所示],该生产过程 i 必须退出工作,前面流程的“产品” x_{i-1} 可以存入仓库,而 x_i 可以改由储存库供给,整个生产过程并不中断。所以生产过程中的可储藏性使得在生产过程中可以有下述不等式

$$x_0 \neq x_1 \neq x_2 \neq \dots \neq x_i \neq \dots \neq x_n$$

这给生产过程的自动化带来不少方便。但是电能的生产过程是不可储藏的,如果生产流程 i 发生了故障须退出工作时,必须采取其它迂回的途径组成生产流程 i' (或投入备用设备),如图0-2所示,否则尽管其它生产流程完好,整个生产过程也会全部中断。即电能的生产过程必须满足

$$x_0 = x_1 = x_2 = \dots = x_i = \dots = x_n$$

式中 x_n ——用户耗用的电能。

上式中 x_n 是随时间而变化的。在电力系统的分析讨论中,将 x_n 分解为有功功率及无功功率,在输电与配电,发电与用电等关系中,上式功率平衡的概念可表示为

$$\left. \begin{array}{l} P_i = 0 \\ Q_i = 0 \end{array} \right\}$$

式中 P_i ——任一生产流程输入与输出的有功功率;

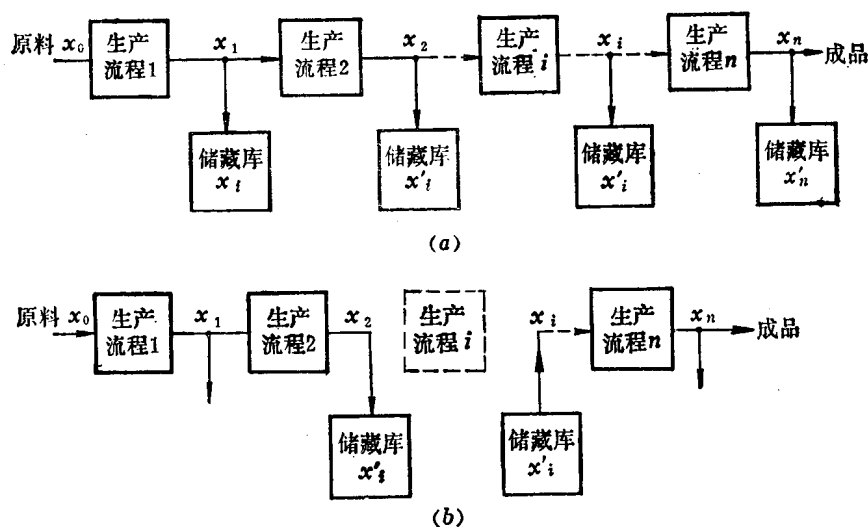


图 0-1 可储藏半成品的生产过程示意图

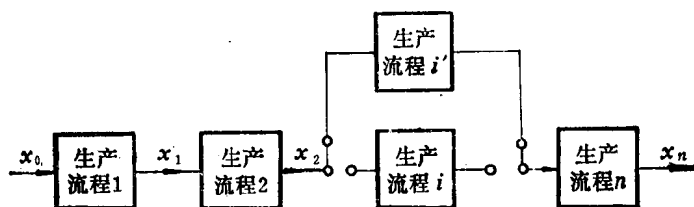


图 0-2 不可储藏性对生产过程的影响

Q_i ——任一生产流程输入与输出的无功功率。

这正是电力系统随时随地都应该满足的规律。

如用人工的方法使上式得到满足、并保证电能生产的质量是不可能的，这正体现电能生产的不可储藏性是推动电力系统自动化发展的重要因素，因此，远在现代性能较好的自动化设备投入运行之前，电力系统的机械式自动调节器就得到了广泛的应用。

还应注意，发电厂与用户相距相当远，这就增加了为满足上式进行自动化的困难，这也是与其它生产过程自动化不同的地方。

电能生产也有经济性问题，它与系统运行的安全性问题联系紧密，两者既相矛盾又相依赖，而电力系统自动化对此矛盾双方都能较好地加以兼顾。如图0-3的两种接线中，从供电安全方面着眼，最好是开关1与2都投入运行，以便在任何一条线路或变压器发生故障退出工作时，变电站A都不致失去电源。但这种运行方式显然是不经济的，因为它使得接于母线A上的电器投资因遮断短路电流容量的加大而增加，因此，最好是单路运行。这两种互相矛盾的运行方式，在备用电源自动投入的作用下，可得到相当好的兼顾。正常时，只有开关1投入，所以母线A上的电器都只按一路短路电流进行容量校验；但在开关1无论由于何种原因而跳开时，开关2都会自动迅速地投入，以代替开关1的工作，保证了系统既安全又经济的运行效果。

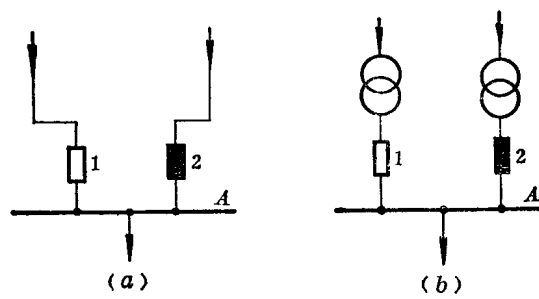


图 0-3 电力系统自动化举例

由上例可见，电力系统运行在安全与经济两方面的要求，至今仍是促使电力系统自动化不断发展的重要因素。

根据教学大纲的要求，本书的内容分两方面：

第一方面是介绍常规自动装置的工作原理。常规自动装置主要分散在各电厂与变电所内，包括同步发电机的自动准同期、励磁系统的自动调节及电力系统按频率自动减负荷等问题。

第二方面介绍电力系统的实时调度。其中大部分是讨论与调度计算机有关的工作原理。

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，其中(a)图表示

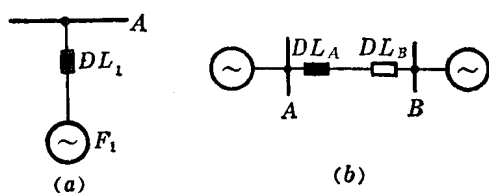


图 1-1 发电机并列示意图

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；(b) 图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的同时方给其转子励磁。

“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；同时，它们又都可以采用自同期的方法进行并列。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；110千伏以上线路，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，也可利用旁路母线开关进行并列操作；而母线分段开关一般不作为同期点，因为低压侧母

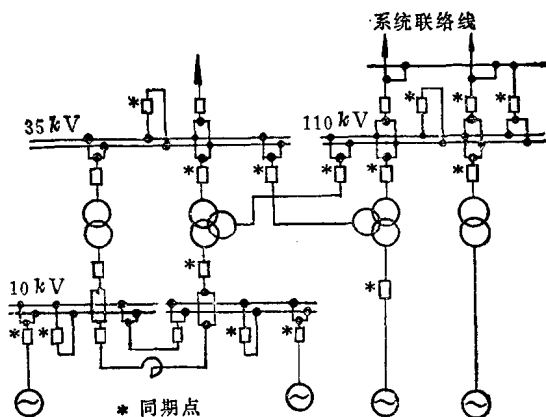
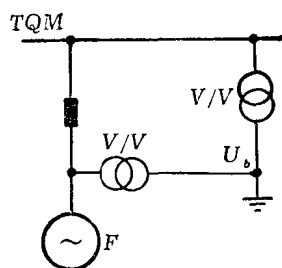
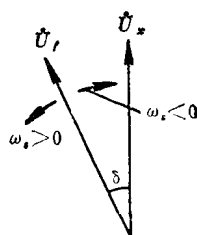


图 1-2 发电厂的同期点举例



(a)



(b)

图 1-3 电压滑差示意图

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，该电压一般可用两个有相对旋转速度的矢量来表示，如图 1-3 (b)，两个交流电压 $\vec{U}_f$ 、 $\vec{U}_x$ 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。

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 $\vec{U}_x$ 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 $\vec{U}_f$ 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

$$\begin{aligned}\omega_{s*} &= \frac{2\pi f_s}{2\pi f_x} \\ &= \frac{f_s}{50}\end{aligned}$$

ω_s 的百分值为

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

滑差周期为

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

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

滑差 ω_s 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的频率差。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10秒至16秒之间。

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，这三个条件是不可能同时满足的。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 $\dot{U}_f$ 与系统电压 $\dot{U}_s$ 相对静止， $\dot{U}_f$ 与 $\dot{U}_s$ 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不可能实现的，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，振荡过程将是忽略不计的。这一点在以下的分析中

可明显地看出。

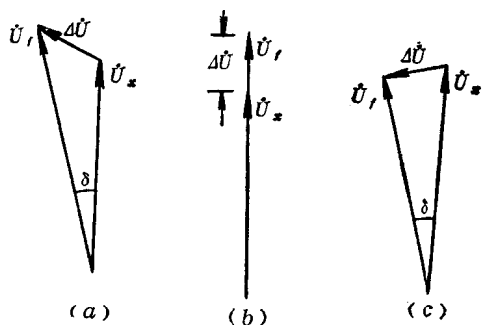


图 1-4 准同期条件的分析

如图1-4(a)所示，假定开关合上瞬间，待并发电机电压 $\dot{U}_f$ 与母线电压 $\dot{U}_s$ 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

$$I'_{c.h.max} = \frac{1.9 \times \sqrt{2} (U_f - U_x)}{X''_d} = 2.69 \Delta U / X''_d \quad (1-1)$$

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 5~10%。

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

$$I''_{c.h.max} = \frac{2.69 \times U_x}{x''_q} 2 \sin \frac{\delta}{2}$$

式中 x''_q ——发电机 q 轴次暂态感抗。

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

$$I_{c.h.max} = \frac{2.69 U_x \sin \delta}{x''_q}$$

于是

这等值于图 1-6 的情况，此时的冲击电流属有功冲击电流。

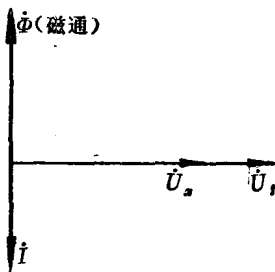


图 1-5 无功冲击电流分量矢量图

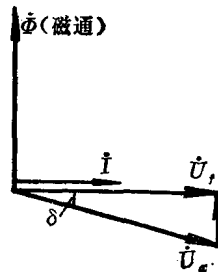


图 1-6 有功冲击电流分量矢量图

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

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

最大允许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，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、脱扣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 0.07~0.12 秒。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

$$\begin{aligned} T_{s.min} &= \frac{2\pi}{\omega_{s.y.max}} \\ &= \frac{2\pi \Delta t_{max}}{\delta_{ch.max}} \end{aligned}$$

如取 Δt_{max} 为 0.1 秒, 则得

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

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 10 秒左右较为合适。

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, 并在满足准同期并列条件时, 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 0.1~0.7 秒), 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段时间, 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

$$u_x = U_{xm} \sin(\omega_x t + \varphi_{0x})$$

发电机电压瞬时值为

$$u_f = U_{fm} \sin(\omega_f t + \varphi_{0f})$$

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_{0x} 、 φ_{0f} ——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为滑差电压的矢量图。

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 $\delta = \omega_s t$ ，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 u_s 的幅值，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 $\varphi_{0x} = \varphi_{0f} = 0$ ，并假定 ω_x 和 ω_f 在所讨论的范围内是不变的，则

$$\begin{aligned} u_s &= u_x - u_f \\ &= U_{xm} \sin(\omega_x t + \varphi_{0x}) - U_{fm} \sin(\omega_f t - \varphi_{0f}) \\ &= U_m \sin \omega_x t - U_m \sin \omega_f t \\ &= 2 U_m \sin \frac{1}{2} \omega_s t \cos \frac{1}{2} (\omega_x + \omega_f) t \end{aligned}$$

图 1-8 示出了滑差电压波形图，它是一个角速度为 $\frac{1}{2}(\omega_x + \omega_f)$ ，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 50 赫兹。

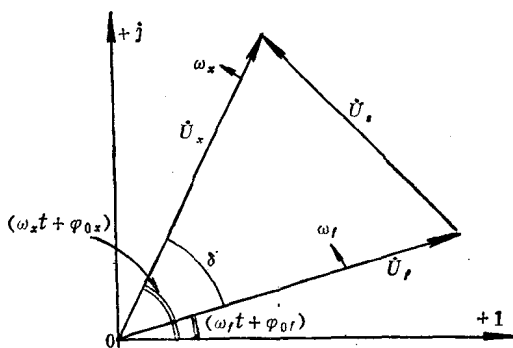


图 1-7 滑差电压矢量图

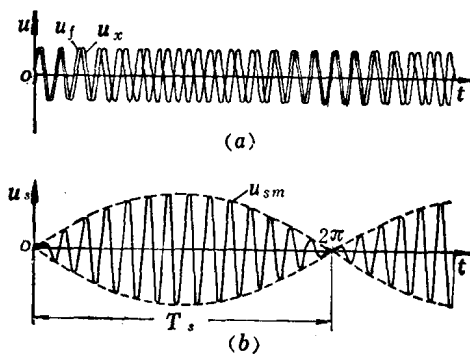


图 1-8 滑差电压波形图

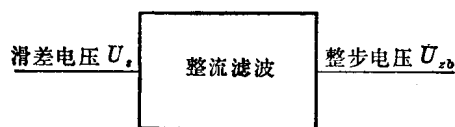
滑差电压的幅值变化规律为

$$\begin{aligned} u_{sm} &= 2 U_m \sin \frac{1}{2} \omega_s t \\ &= 2 U_m \sin \frac{\delta}{2} \end{aligned}$$

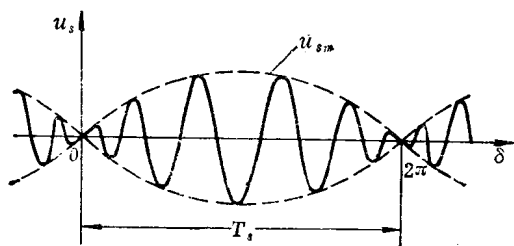
当 $\delta = \pi$ 时, 滑差电压幅值达最大, $u_{sm(max)} = 2U_m$; 当 $\delta = 0$ 时, 滑差电压幅值有最小值, $u_{sm(min)} = 0$, 该点通常称为滑差电压的零点。相角差 δ 从 $0 \sim 2\pi$ 的时间 (即两相邻滑差电压零点之间的时间) 就是滑差电压的周期 T_s 。

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, 利用滑差电压的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。下面就讨论滑差电压的这一功能。

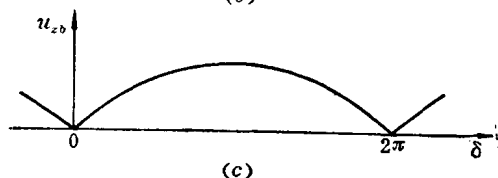
利用图1-9(a)表示的电路, 将滑差电压的包络线波形 [图1-9(b)中的虚线部分] 检出,



(a)



(b)



(c)

图 1-9 正弦整步电压的获得

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, 称之为正弦整步电压; 当 $U_{xm} \neq U_{fm}$ 时, 滑差电压的矢量图示于图1-10。

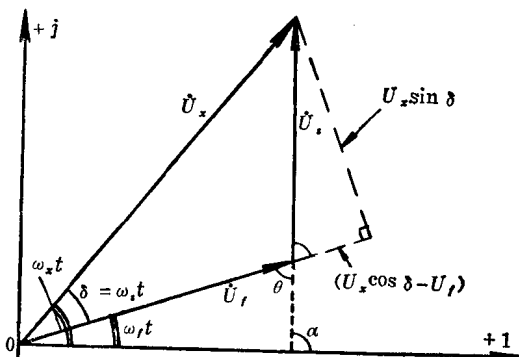


图 1-10 $U_{xm} \neq U_{fm}$ 时滑差电压矢量图

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 的变化而作周期性变化, 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

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

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

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

所以滑差电压瞬时值为

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

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

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。

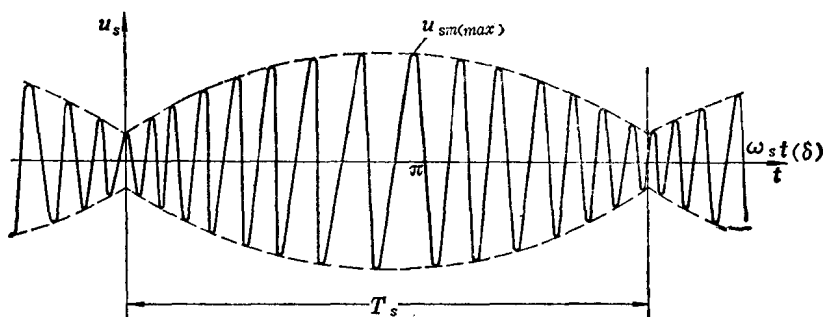


图 1-11 $U_{xm} \neq U_{fm}$ 时滑差电压波形图

二、利用正弦整步电压检查同期条件的原理

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。其原理如下。

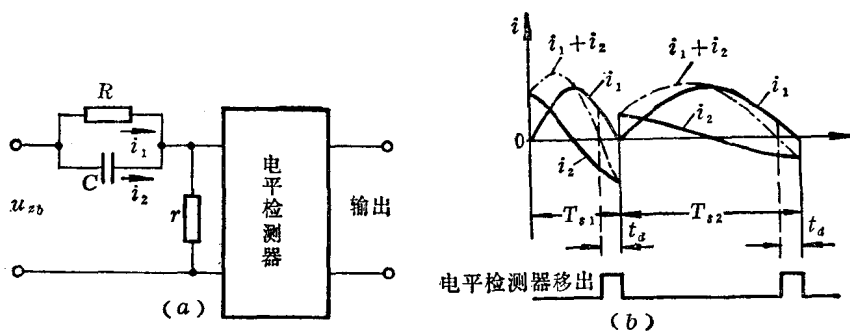


图 1-12 获得恒定越前时间原理图

由于 $u_{zb} = 2U_m \sin \frac{1}{2}\omega_s t$, 若忽略 r 的影响, 则

$$i_1 = \frac{u_{zb}}{R} = \frac{2U_m}{R} \sin \frac{1}{2}\omega_s t$$

$$i_2 = C \frac{du_{zb}}{dt} = CU_m \omega_s \cos \frac{1}{2}\omega_s t$$

令电平检测器翻转电平为 $i_1 + i_2 = 0$, 并设此时 $t = t_d$, 则

$$\frac{2U_m}{R} \sin \frac{1}{2}\omega_s t_d + CU_m \omega_s \cos \frac{1}{2}\omega_s t_d = 0$$

$$\sin \frac{1}{2}\omega_s t_d + RC \frac{\omega_s}{2} \cos \frac{1}{2}\omega_s t_d = 0$$