

张德平 蒋龙升 刘家成

同步电机同步原理和装置

电力工业出版社

内 容 提 要

本书是有关同步电机同步问题的专业读物，系统地介绍了各种准同步方式和自同步方式的原理和接线，发电厂同步点选择原则，有关同步仪表和自动装置的原理和调试方法，同时对同步的基本理论和同步时同步电机的过渡过程也作了较详细的阐述。

本书主要供从事发电厂和电力系统自动化专业的科研、制造、设计、试验、运行人员阅读。也可作为大专院校相应专业师生的教学参考。

同步电机同步原理和装置

张德平 蒋龙升 刘家成

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门内大街六铺炕)

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 32开本 12.75印张 282千字

1982年7月第一版 1982年7月北京第一次印刷

印数 00001—12330册 定价 1.05元

书号 15036·4331

前 言

迄今我国尚无系统地介绍有关同步电机同步问题方面的著作。作者在自己多年从事同步问题的研究、制造和发电厂设计的实践经验基础上，将现有的资料整理成册供读者参考。

本书较系统地介绍了准同步方式和自同步方式，同步点选择，同步接线，有关仪表和装置的工作原理和调试方法，并对同步的基本理论和同步时同步电机的过渡过程也作了较详细的阐述。

书中介绍的ZZQ-3A型自动准同步装置和ZZQ-5型自动准同步装置，分散的自动准同步接线，用励磁回路交流分量监视滑差的自动自同步接线、原理和现场试验等，均是作者在有关同志配合和支持下共同研制和完成的。书中提出了在准同步时允许合闸极限角的通用计算公式。对同步闭锁角的整定值以及根据冲击电磁力矩和冲击电流计算同步合闸的允许条件方面，进行了进一步分析和探讨。

本书由张德平、蒋龙升、刘家成同志负责编写。蒋龙升同志编写了第四章的第一、二节和第五章的第二节，刘家成同志编写了第四章的第三节和第五章的第一、三节，其余均由张德平同志编写，并由张德平同志最后统稿、定稿。樊俊教授审稿。

在编写过程中，曾得到不少同志的帮助，王克成同志还参加了部分工作，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，错误及不当之处在所难免，恳请读者指正。

作者

1981.11.

目 录

前 言	
概 述	1
第一章 同步方式和同步点选择	3
第一节 同步方式	3
第二节 同步点选择	11
第二章 手动准同步	15
第一节 分散手动准同步	15
第二节 集中手动准同步	20
第三节 同步仪表	23
第四节 同步闭锁	45
第五节 电压向量和同步点电压的抽取	56
第六节 接线	69
第三章 自动准同步	78
第一节 电压差、频率差和相位差的影响	78
第二节 集中和分散的自动准同步方式	82
第三节 恒定导前相角的半自动准同步装置	90
第四章 恒定导前时间的自动准同步装置的工作	
原理	103
第一节 概述	103
第二节 ZZQ-3A型自动准同步装置的工作原理	108
第三节 ZZQ-5型自动准同步装置的工作原理	151
第五章 恒定导前时间的自动准同步装置的调试	
方法	190

第一节	准同步装置调试时所需主要设备仪器和导前时 间的测量方法	190
第二节	ZZQ-3A型自动准同步装置的调试方法	195
第三节	ZZQ-5型自动准同步装置的调试方法	212
第六章	准同步计算	225
第一节	d 、 q 坐标系统及其基本关系式	225
第二节	准同步时的电流和电磁力矩	231
第三节	准同步合闸允许条件的分析	242
第四节	非同步并列时最大冲击电磁力矩	262
第七章	自同步	267
第一节	自同步并列方式的条件	267
第二节	励磁状态对自同步过程的影响	274
第三节	自动调速器特性对自同步过程的影响	277
第四节	手动自同步	282
第五节	半自动自同步	291
第六节	自动自同步	295
第七节	自同步试验	310
第八章	异步运行和自同步过程的参量计算	317
第一节	自同步时发电机的定子电流	317
第二节	同步发电机在无励磁情况下投入系统的电磁 力矩	348
第三节	自同步时发电机转子回路的电流	367
第四节	自同步时发电机转子回路的电压	377
附图 1	ZZQ-3A型装置电源部分原理图	384
附图 2	ZZQ-3A型装置整定、信号和出口部分原理 图	385
附图 3	ZZQ-3A型装置合闸部分的测量和运算回 路原理图	386

附图 4	ZZQ-3A型装置合闸部分的逻辑回路原理图	387
附图 5	ZZQ-3A型装置调频部分的频率方向判别回路原理图	388
附图 6	ZZQ-3A型装置调频部分的逻辑回路原理图	388
附图 7	ZZQ-5型装置合闸部分的整流、相敏、滤波、比例微分、投入电源闭锁回路原理图	389
附图 8	ZZQ-5型装置合闸部分的导前时间、导前相角、合闸逻辑回路原理图	390
附图 9	ZZQ-5型装置调频部分的超前鉴别、脉冲展宽回路原理图	391
附图 10	ZZQ-5型装置调频部分的区间鉴别、冲击脉冲、电气零点回路原理图	392
附图 11	ZZQ-5型装置调压部分的电压差测量、电压比较回路原理图	393
附图 12	ZZQ-5型装置调压部分的调压继电器、电压差闭锁回路原理图	394
附图 13	ZZQ-5型装置调压部分的调压脉冲宽度、调压脉冲间隔回路原理图	395
附图 14	ZZQ-5型装置电源部分的测量变压器和出口继电器回路原理图	396
附图 15	ZZQ-5型装置电源部分的辅助电源回路原理图	397
参考文献	398

概 述

发电机以致电力系统联合起来并列运行，不仅能提高供电的可靠性和供电质量，而且能使负荷分配更加合理，减少电力系统储备容量，达到经济运行的目的。特别是利用水电厂和火电厂各自的特点，联合运行、统一调度，能使整个电力系统获得最好的经济效益。

然而，只有当各发电机转子以相同的电角速度旋转，各发电机转子间的相角差不超过允许的极限值，发电机出口的归算电压必须近似地相等时，各发电机才能联合并列运行。也就是说，只有满足这些条件，发电机在电力系统中运行才是同步的。

各发电机出口电压的大小是由发电机所带的无功负荷的情况及距离负荷的远近所决定的。在稳态运行情况下，各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。当各发电机的有功负荷发生变化而又不相同时，转子间的相角差也就改变了。甚至，当各发电机容量不相同或各发电机原来所带的有功负荷不相同，即使有功负荷变化相同，其转子间的相角差也要改变。在有功负荷剧烈变化的过程中，例如发生短路故障时，这种变化特别明显。若某些发电机的转子与其他一些发电机的转子间的相对位移在允许的相角差极限内时，这些转子间的相对位移属于同步位移，超出极限值就失去同步。

发电机在没有投入电力系统并列运行时，一般与系统中

的发电机是不同步的。要使发电机与系统中已运行的发电机并列运行，必须完成一定的操作。将发电机投入电力系统并列运行的操作称为并列操作或称同步并列。

当发电机投入电力系统与其他发电机并列运行的瞬间，要产生冲击电流和冲击力矩。这些冲击将引起电力系统的电压下降，严重时可能对被投入机组的原动机和发电机产生危险。此外，被投入系统的发电机有可能不是一下子拉入同步，因而要引起非同步运行下的附加的冲击。

根据上述情况，发电机在同步并列时要满足以下两个基本要求：

(1) 投入瞬间发电机的冲击电流和冲击力矩不超出允许值；

(2) 被投入的发电机能够拉入同步。

发电机的同步并列可以是手动的、也可以是自动的。手动同步时，发电机投入电力系统的所有并列操作包括调节机组的转速、调节发电机的电压和断路器合闸等均由运行人员手动进行。自动同步时，所有这些操作均由自动装置自动完成。

有时也采用介乎上述两者之间的半自动同步并列。此时一部分的操作由运行人员手动完成，而另一部分的操作则由装置自动完成。

第一章 同步方式和同步点选择

第一节 同步方式

根据发电机投入电力系统并列运行的方法不同，常用的同步方式有两种，即准同步方式和自同步方式。无论采用哪一种同步方式，首先必须保证等待并列的发电机（又叫待并发电机）相电压的旋转方向和已工作的发电机（或系统）相电压的旋转方向相同，即相序相同。如果违反这一条件，发电机投入电力系统后，将导致发电厂或变电所主要设备的严重事故。不过，这个问题在发电机安装调试时已经解决，因此同步并列不需再另行考虑这一条件。

准同步方式是对已励磁的发电机的电压和频率进行调节，促使发电机与系统同步，即电压相等；角速度（或频率）相等；相位相同。然后将发电机投入电力系统，在理想的情况下，断路器合闸瞬间，发电机定子电流等于零，电磁力矩也等于零。这是准同步方式的最大优点。

但是，实际情况总是不可能完全符合理想条件的，发电机以准同步方式并列时，总要产生冲击电流和冲击电磁力矩的。在绝大多数情况下这些冲击电流和冲击电磁力矩是不大的，对发电机组并不会产生什么危害。但在个别情况下，由于某种原因造成非同步并列，在发电机和电力系统间的相角差 δ 等于 180° 时，发电机的冲击电流要比发电机出口三相短路电流大1倍（见第三章第一节）。在相角差 δ 等于 $120^\circ \sim 145^\circ$ 非同步并列时，冲击电磁力矩将达到最大值，并且比发

电机出口三相短路时所产生的电磁力矩大好几倍。在最不利的情况下非同步合闸，汽轮发电机最大冲击电磁力矩可达其额定力矩的18~36倍左右，而在出口三相突然短路时，最大电磁力矩仅达额定力矩的7~11倍。对于无阻尼回路的水轮发电机在上述相应的情况下，分别为额定力矩的10~28倍和3~6.5倍左右；具有阻尼回路的水轮发电机，则分别为额定力矩的8~26倍和3~8倍左右（详见第六章第四节）。因而可能引起主要设备的严重损坏。

国内外运行经验说明，由于电压互感器二次接线中的错误，同步表或自动准同步装置的不正确工作，运行人员在手动准同步过程中误操作，或者在断路器合闸过程中（尤其合闸时间很大的断路器）相角急剧拉大等等原因均发生过发电机在非同步合闸时遭受损坏的情况。这是采用准同步方式必须认真对待的问题。

例如，一九七七年我国有一台汽轮发电机在自动准同步过程中非同步合闸，发电机遭受重大冲击，绕组绝缘损伤，造成短路，使发电机严重损坏。事故后检查发现发电机定子绕组端部变形位移最大达103毫米，绕组端部上下层绑线大部分断开；有的上下绕组在槽处烧伤断股流铜液，烧坏铁芯；对绕组进行耐压试验，三分之二被击穿，损失很大。据分析，事故的原因主要是自动准同步装置与调速器调速性能配合不协调，产生过调现象，使待并发电机与电力系统间不仅存在频率差，而且存在着反向急速变化，可能造成相角差很大的情况下非同步合闸，使发电机承受巨大的电动力而损坏。

由于可能出现上述危险，要求有关同步的二次接线必须正确无误；有关仪表和装置的误差必须满足规定要求，高度

可靠；手动准同步时，一般要由具有较丰富经验的运行人员进行操作。此外，在准同步时，待并发电机与电力系统间的电压、角速度、特别是它们间的相角必须十分仔细地调节和校准，尽量减小冲击电流和冲击力矩。

仔细调节和校准电压、角速度和相角需要花费较长的时间，因此采用准同步并列所需的时间，在正常情况下一般约为2~4分钟，如果调速器工作不稳定或者当电力系统处于事故情况下，由于电力系统频率和电压的急剧变化，往往需要十几分钟或更长的时间。目前有些电气液压式调速器中装有频率跟踪装置，在开机过程中靠它使机组的频率与电力系统的频率自动赶齐，大大加快了准同步的时间。

至于有些用户负荷容量（如大型扬水站所用的电动机）与发电厂容量相当或占的比例很大，又是频繁启停时，可能使电力系统的频率出现很大的变化率。在这种情况下，即使在断路器合闸过程中（即已发出合闸脉冲），发电机也可能以不容许的相角 δ 投入电力系统而造成非同步合闸。这些问题除尽可能选用合闸时间短的断路器作为同步点外，目前大部分自动装置均未能妥善解决。

经验还说明，以上所述准同步方式带来的缺点，主要是设备不协调、装置故障、接线错误等方面的缺点。运行人员误操作的事故也发生过。

准同步方式虽然有如上缺点，但在正常情况下，尤其采用自动准同步时，均能得到较理想的效果，因此准同步方式仍然得到广泛应用，成为主要的同步方式。

自同步方式是待原动机转速升高到接近同步转速时将未加励磁的发电机投入电力系统，接着加上励磁，发电机自行拉入同步。

因为待并的发电机不加励磁，也就不存在对电压和相角进行调节和校准的问题，只要对机组的转速进行调节即可。这样既能简化接线、节省仪表和装置，又能大大地缩短同步并列的时间。特别是在电力系统事故而出现低频率、低电压的情况下，能使机组迅速并入系统。采用自动自同步的水轮发电机，从发出开机脉冲至发电机并入系统所需的时间一般为20~40秒，有的机组投入电力系统甚至带上一定数量的有功、无功负荷仅15~20秒即可。对于大容量的机组，而且采用差频继电器的自动自同步，一般也不过一分多钟。

自动自同步方式给水电厂在电力系统事故时低频启动备用机组并迅速投入电力系统运行，提供了很好的条件，对防止电力系统瓦解、事故扩大和较快地恢复正常供电起了重要作用。例如我国有一大型水电厂在历次电力系统发生事故时，能在一分半钟的时间内连续自动启动两台机组并投入电力系统运行，自动带上负荷，防止电力系统事故的扩大。另一个水电厂在一次电力系统事故中，备用机组迅速启动，以自同步方式投入电力系统，很快带满负荷，防止了电力系统的瓦解。还有一个水电厂在一次电力系统事故中，在主力火电厂全部停电的情况下，靠低频启动备用机组，以自同步方式将发电机并入电力系统，保住了主力火电厂的厂用电源，从而使电力系统很快恢复正常供电。

因为待并的发电机不加励磁，从根本上消除了可以引起设备严重故障的非同步合闸的可能性。在一般情况下，自同步时的力矩不会超过发电机出口突然三相短路时的力矩（在第七章中还要谈到）。更不会出现准同步时在最不利的条件下非同步合闸，其相应的最大瞬时力矩可达突然三相短路时的相应力矩的几倍以上的问题。

上述均是自同步方式的重要优点。但是自同步方式也有一些较大的缺点。

未加励磁的发电机投入电力系统时伴随有短时超过额定值的冲击电流和电磁力矩，并且引起电力系统电压短时下降。

冲击电流使定子绕组，特别是绕组的端部产生电动力引起振动和位移。曾在—台 85500 千伏安水轮发电机上，实测了该机在自同步并列过程中定子绕组端部的位移情况，发现位移中包括：定向位移、频率为50赫的振动位移和频率为100赫的振动位移。实测的结果示于图1-1。

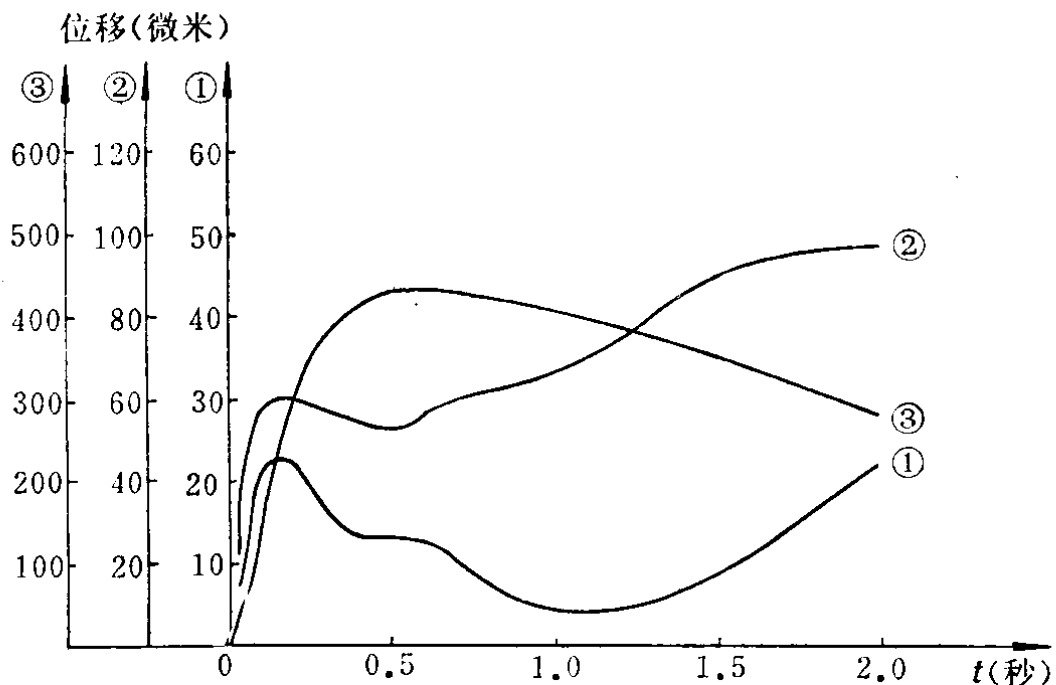


图 1-1 自同步时发电机定子绕组端部位移和振动
 曲线①—切向位移(微米)；曲线②—径向位移(微米)；
 曲线③—轴向位移(微米)

其中50赫和 100 赫的振动在各方向的位移中的最大幅值如表1-1所示。

实测说明，自同步时发电机定子绕组端部是存在着多方

表 1-1

自同步时位移的最大幅值

频 率 (赫)	位 移		
	切 向 (微米)	径 向 (微米)	轴 向 (微米)
50	11.2	24.3	300
100	5.6	4	150

向的振动和位移，但其最大值不超过 1/3 毫米，因此不会引起绕组端部的直接损坏。但担心的是经常连续使用有可能对定子绕组绝缘和端部产生积累性的变形和损坏，这对定子绕组绝缘已老化、端部固定存在不良情况的一些发电机，就得限制自同步方式的经常使用。

当然不同型号的发电机，由于定子绕组的结构和固定方式的不同，在自同步中所产生的振动和位移也必然不同，同时冲击电流大小还与试验时电力系统容量大小、连接方式、本电厂的主接线等等有关，上述实测结果仅作为例子，供说明问题，不能视为一般规律。

电磁力矩将使机组大轴产生扭矩，而且伴随着机组振动。上述同一机组实测情况是：机组正常启动时，大轴在启动点的力矩为98.4吨-米，交变分量达 278 吨-米；在自同步时，选取不利的条件大轴交变力矩仅120吨-米。自同步时引起的大轴力矩变化，包含有迅速衰减的50赫的交变力矩分量和存在较长周期的力矩波动。上述机组自同步时大轴交变幅值为50~60吨-米，较长周期的力矩波动为20~30吨-米，振荡周期约为0.6秒左右，一般在 1.5~2 个周期内衰减至零。

机组振动的测点放在上部机架上，振动变化与大轴力矩变化相对应，一种为迅速衰减的振动分量，一种为与力矩波

动相对应的振动，不同同步方式所测的振动数值见表 1-2。

表 1-2 不同同步方式的振动数值

同步方式	次数	水平振动值 (10^{-2} 毫米)	垂直振动值 (10^{-2} 毫米)
自动准同步	1	11	12
	2	9.7	8.7
用差频继电器的自动自同步	1	16.9	17.4
	2	18.8	17.4
延时加励磁的自动自同步	1	19.5	23.2
	2	16.9	27.5

由表1-2可以看出，自同步与准同步相比，振动值大1.5~3倍左右，但振动时间较短，一般为0.3~0.4秒。

总的来说，自同步时的力矩和振动一般均不比突然三相短路更为严重。因为突然三相短路的后果在设计制造发电机时，均已进行过校核，所以自同步的应用，并不会给发电机造成严重后果。

自同步时需由电力系统吸取大量无功功率，造成电力系统中各主要发电厂和变电所的母线电压下降。电压下降的程度与当时电力系统中已工作的发电机容量、电力系统接线、待并发电机容量的大小等等因素有关。实践说明，我国除某些电力系统在某些运行方式下电压下降值超过允许值外，大部分情况下电压均能维持在不低于60%额定值，因此是允许的。因为有了快速励磁和强励装置在工作，一般在0.5~1秒或稍长的时间内就可以使电压恢复到95%额定值以上，因而一般不会由于电压降低影响到用户的正常工作。

综上所述，准同步和自同步两种并列方式均有各自的优缺点。因此需要根据具体情况加以妥善选择应用，取长补短

短、相互配合、使它们发挥最好的作用。

水利电力部一九七九年颁发的《继电保护和自动装置设计技术规程》中对同步发电机的并列作了如下规定：

发电机的并列，在正常情况下，一般采用准同步方式。在故障情况下，为加速故障处理，对水轮发电机一般采用自同步方式，对汽轮发电机也可采用自同步方式。

发电机采用自同步并列方式时，应符合下列要求：

(1) 定子绕组的绝缘及端部固定情况良好，且端部接头应无不良现象；

(2) 自同步并列时，定子超瞬变电流的周期分量不应超过允许值。当无专门规定时，一般表面冷却的同步电机，在自同步合闸时，冲击电流允许值为：3000千瓦以上与母线直接连接的汽轮发电机，其超瞬变电流周期分量不应超过 $0.74/X''_d$ 倍额定电流；3000千瓦及以下的汽轮发电机、各种容量的水轮发电机和同步调相机以及与变压器作单元连接的汽轮发电机则不作规定。

同步并列装置按下列规定装设：

(1) 当采用准同步方式时，一般装设自动准同步装置和手动准同步装置，并均应带有非同步闭锁。对6000千瓦及以下发电机可只装设带有非同步闭锁的手动准同步装置；

(2) 当采用自同步方式时，在水轮发电机上一般装设自动自同步装置，在汽轮发电机上一般装设手动或半自动自同步装置。

这些规定是针对以上谈到的具体情况，根据我国电厂运行经验制定的。

同一九五九年水利电力部制定的《继电保护和自动装置规程》相比有如下一些重要变化：