

田中兴 王义林 主编

小型水电站 机电设备 运行与安全管理



水利电力出版社

小型水电站 机电设备运行与安全管理

田中兴 王义林 主编

水利电力出版社

(京)新登字 115 号

内 容 提 要

本书依据部颁规程,结合小型水电站安全运行与管理的工作实际,着重阐述了小型水电站水轮发电机组的启动与停机、机电设备的安全运行、小型水电站自动化、机电设备常见事故的处理、机电设备的检修、水电站的经济运行、水电站的安全管理等方面的内容。全书资料丰富,详略得当,有很好的实用性,本书可作为对小水电运行工人进行技术培训和技工学校的专业教材,也可供小水电管理人员、技术人员参考。

小 型 水 电 站 机电设备运行与安全管理

田中兴、王义林 主编

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

北京京建照排厂照排

北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 7.75 印张 172 千字

1994 年 9 月第一版 1994 年 9 月北京第一次印刷

印数 0001—2100 册

ISBN 7-120-01853-1/TV·673

定价 8.50 元

前 言

我国小水电事业发展迅速,截止 1992 年底全国小水电装机容量已达到 14420MW,年发电量 442 亿 kW·h。小水电已成为我国农村能源的重要组成部分。在国民经济特别是在农村经济的发展中起着越来越突出的作用。

为了提高小水电职工的业务素质和安全管理水平,适应小水电事业发展的需要,我们编写了这本《小型水电站机电设备运行与安全管理》培训教材。

本书结合小型水电站的运行管理实际,依据部颁规程编写而成。全书共分七章,内容包括水轮发电机组的起动与停机、机电设备的运行、小型水电站自动化、机电设备常见事故的处理、机电设备的检修、水电站的经济运行和水电站的安全管理。全书理论联系实际,通俗易懂,适合于初中以上文化程度的小型水电站运行、检修人员使用,也可供有关技术人员、大专院校有关专业师生参考。

全书由吉林省地方水电局田中兴,长春水利水电高等专科学校王义林、何宝海,吉林省水电勘测设计院徐进等同志参加编写,由田中兴、王义林同志主编。长春水利水电高等专科学校史振声、吉林省电力勘测设计院岳保良同志主审。吉林省地方水电局徐锋、孙廷东同志参加了全书的资料收集和技术校核工作。

本书在编写过程中,得到了水利部农村水电司、吉林省水利厅的关心和支持。吉林省地方水电局、长春水利水电高等专科学校为本书的出版做了大量工作。浙江省水电技工学校同志提出了许多有益的建议和意见。在此谨表衷心感谢。

限于编者水平,书中难免存在缺点和错误,恳请读者批评指正。

编 者

1993 年 8 月

目 录

前 言

第一章 水轮发电机组的启动与停机	1
第一节 水轮发电机组的启动	1
第二节 机组的并列	6
第三节 机组的解列与停机	17
第二章 机电设备的运行	21
第一节 水轮发电机组的运行与维护	21
第二节 励磁系统的运行	30
第三节 变压器的运行与维护	34
第四节 厂用电系统的运行	40
第五节 高低压配电装置的运行	46
第六节 继电保护及自动装置的运行	49
第三章 小型水电站自动化	52
第一节 水电站自动化元件	52
第二节 水轮发电机组的自动控制	55
第三节 辅助设备的自动控制	62
第四节 水力量测系统	65
第五节 计算机在水电站监控系统中的应用	65
第四章 机电设备常见事故的处理	69
第一节 水轮发电机组的事故处理	69
第二节 变压器的事故处理	71
第三节 厂用电系统事故处理	73
第四节 配电装置的事故处理	75
附录一 关于发电机及变压器绝缘电阻的规定	79
附录二 蓄电池绝缘电阻的测定	80
附录三 励磁系统投入运行前的试验项目	81
第五章 机电设备的维护与检修工作	83
第一节 水轮发电机组的维护工作	83
第二节 水轮发电机组的检修工作	85
第三节 电气设备检修工作	91
第六章 水电站的经济运行	94
第一节 水轮发电机组的动力特性	94
第二节 机组间负荷的最优分配	100

第三节	最优组合方案的确定	103
第四节	机组流量的最优分配	106
第七章	水电站的安全管理	108
第一节	安全工作的基本要求	108
第二节	保证安全的组织措施	110
第三节	保证安全的技术措施	113
第四节	在低压配电装置和二次回路上工作	114
第五节	电气试验及其他安全措施	115
参考文献	118

第一章 水轮发电机组的启动与停机

本章主要介绍水轮发电机组的启动、并列、解列和停机的有关问题，并对试运行中需要注意的问题做适当说明。

第一节 水轮发电机组的启动

一、启动前的检查

(一) 水轮机引水及泄水部分检查

电站的挡水建筑物与引水建筑物无异常，电站水位、水头在设计范围之内，是机组投入运行前必要的水力条件。机组水力条件的具体检查项目有：

- (1) 进水口拦污栅应无杂物阻塞，进水口附近无飘浮杂物。
- (2) 压力水管、蜗壳、尾水管、尾水渠等处无阻塞现象。所有进入孔都可靠地封闭。
- (3) 各闸门的启、闭设备动作灵活，启闭可靠、指示正确。水轮机前的闸门应在全关位置，尾水闸门应提起。

(二) 机组机械部分检查

水轮机、发电机机械部分无异常，机组的辅助设备无异常，才允许机组投入运行。具体要检查以下几个方面：

(1) 机组转动部分及固定部分的联接件与紧固件无松动，所有焊缝无开裂或其它异常，所有地脚螺栓均无松动。

(2) 机组转动部分与固定部分间的各处间隙（包括导轴瓦的间隙，定子与转子间的气隙，轴承盖板、挡油圈、密封环与主轴的间隙以及发电机风扇与挡风圈的间隙等等），均应符合要求。

(3) 机组的同心度、水平度、垂直度等均符合要求。

(4) 机组的油、气、水各系统管路畅通，各阀门动作灵活、位置正确。

(5) 机组各轴承无异常，轴承油箱油位正常，油质符合要求。轴承对地绝缘电阻值符合要求。

(6) 各测温、测流、测液位的信号装置完好。

(7) 立式机组在启动前应按规程要求将转子顶起 5~8mm，以利于机组启动时镜板与推力瓦间油膜的形成。

关于启动前顶转子的条件，目前尚无统一规定，下列条款可做必须顶转子的参考条件。

- 1) 新投入运行三个月以内的机组，停机时间超过 24h 以上者；
- 2) 运行时间不满一年的机组，停机时间超过 72h 以上者；
- 3) 运行时间一年以上的机组，停机时间超过 240h 以上者；

4) 推力油箱排油检修后，重新启动前的机组。

顶转子可采用手压油泵或压力油源向风闸给油的方式进行。要用百分表监视转子顶起高度。待润滑油已进入推力瓦面后，即可将转子落下，检查风闸应完全落下。顶转子工作应在蜗壳充水前进行。

(8) 机组制动系统正常，风闸在落下位置。

(三) 调速器部分检查

调速器是机组的调节、控制装置，对机组安全运行关系极大。机组投入运行前要对调速器进行全面检查，一定要保证调速器的液压手动部分、自动调节部分及控制机构都处于良好状态。

(1) 无论手动调速器、电动调速器或自动调速器，控制导水机构从全关到全开都应动作灵活、可靠，无卡阻现象，开度指示应正确无误。

(2) 全开、全关与空载位置的限位开关动作可靠，整定位置准确。

(3) 紧急关闭时间符合设计要求数值。暂态转差系数、缓冲时间常数、局部反馈系数均符合最佳参数整定值。永态转差系数符合使用要求数值。

(4) 油压装置自动控制可靠，油压、油位正常，油管无渗漏，油质符合要求。

(5) 调速器各连杆、杠杆位置正确，销子无脱落。各切换阀位置正确。事故电磁阀在复归位置。

(6) 锁锭操作灵活，位置正确。

(7) 打开总供油阀门向调速器充压力油。为确保接力器内无空气，应液压手动接力器全行程缓慢往复移动几次，最后停在全关位置。此后保持总供油阀门在全开位置不动，调速器一直保持充油状态。

(8) 调速器各表计指示正确。

(9) 调速器工作电源齐备。

对调速器进行各种必要的检查之后，一定要使调速器确实处于起动前的准备状态：

1) 油压装置处于自动起动状态，油压、油位正常；

2) 总供油阀门全开；

3) 调速器在液压手动位置；

4) 开度限制全关，主接力器全关，开度黑针、限制红针均在零位；

5) 转速调整指针在零位（额定位置）；

6) 事故电磁阀在复归位置；

7) 主配压阀在油压作用下升起至高位；

8) 锁锭在投入位置；

9) 调速器各机构无异常，各参数整定符合要求。

(四) 电气部分检查

机组起动前，应对发电机、励磁装置、开关柜、保护盘、动力盘、变压器及线路等各部分进行全面检查，确认其正常无故障，并使它们处于符合要求的状态。

(1) 发电机、励磁装置和所有电气设备接线正确，连接紧固可靠。各引线无损伤，绝缘

良好。所有应接地处均可靠接地。

(2) 发电机、励磁装置和所有电气设备外部整洁，内部无杂物、灰尘，无临时接线，无遗留工具。

(3) 灭磁开关处于断开位置，磁场变阻器放在最大阻值位置。可控硅励磁装置的多圈电位器首次投入运行时放在零位。

(4) 电刷压力适当，刷握位置正确，电刷接触良好。集电环或整流子表面光洁无毛刺。

(5) 电流互感器、电压互感器接线无误，极性正确，其副边接地可靠。

(6) 变压器主体无缺陷，瓷套管无破损、无裂纹、无油垢。引线及连接良好，切换分接开关在要求位置。变压器外壳接地可靠。变压器油枕处油色、油位正常，散热器、瓦斯保护及测温装置良好。

(7) 继电保护盘、测温盘、配电盘、动力盘上所有仪表、开关、继电器、指示灯等均完整无缺，符合要求。

(8) 交流电源、直流操作电源及信号电源具备，并符合规定要求。

(9) 所有电气部分均按规定进行严格试验，并处于符合要求的状态。在发电机起动前要测量发电机定子及励磁回路的绝缘电阻，应不低于允许数值。

(10) 送电线路正常，无任何故障。如线路检修后，应作绝缘电阻测试。

(11) 机组及所有电气设备内和输电线路无人工作，所有临时试验接线及临时安全接地措施均已拆除。

以上简要列出水轮发电机组开机前的主要检查项目。对于正常运行期间的机组，在起动前的检查中要重点注意规定检查项目中有无不正常的因素。对于新安装或检修后的机组起动前的检查，则要按有关规程的要求，一项项逐一进行仔细检查、试验，发现问题及时处理，直至完全符合要求为止。对于长时间停运的机组，在其重新投入运行前，对起动前的检查及必要的测试工作，也应按规定项目有针对性地进行。

二、机组起动操作

当机组起动前检查一切正常，并且发电机的断路器、灭磁开关都在断开位置，水轮机主阀及导叶都在全关位置，尾水闸门在全开位置，即可进行机组起动操作。

(一) 液压手动起动机组

液压手动起动机组是利用调速器的开度限制手轮进行开机操作，这是中小水电站最常用的一种起动方式，其操作步骤如下：

(1) 投厂用电源和操作电源。

(2) 压力钢管充水。在主阀和导叶关闭的情况下，手动或电动开启进水闸门，向压力钢管充水，检查压力管道应无漏水现象。

(3) 蜗壳充水。在导叶关闭的情况下，手动、电动或液压操作缓慢开启主阀向蜗壳充水。对于有旁通阀的主阀，应先开启旁通阀向蜗壳充水后再开启主阀。卧式机组进行蜗壳充水时，要打开蜗壳顶部的放气阀，待排尽空气后再将其关闭。

蜗壳充水中，要注意检查水轮机顶盖或前后盖板等处，应无漏水现象。

蜗壳充水时，要打开水轮机水压力表和尾水管真空表的旋塞开关，检查压力表指示应

与实际相符。

(4) 向机组供冷却水和润滑水。打开技术供水阀门，注意检查冷却水、润滑水的压力和水流情况应符合要求。

(5) 打开接力器锁锭。

(6) 向开方向缓慢转动调速器的开度限制手轮，控制接力器带动导叶逐渐开启。机组开始转动，监视机组转动情况及转速。如无异常，一直升速到额定转速，使机组在未加励磁的空载状态下稳定运行。

(二) 自动起动机组

自动起动机组是指由机组自动控制回路控制开度限制电动机，带动开度限制机构自动完成开机操作。自动化程度较高的中小水电站才具备自动开机条件。

用开度限制电动机自动起动机组的操作步骤如下：

(1) 投厂用电源和操作电源。

(2) 将调速器手、自动切换阀放自动位置。

(3) 压力钢管充水。

(4) 蜗壳充水。

(5) 向机组供冷却水及润滑水。

(6) 打开接力器锁锭。

(7) 在中控室操作开、停机控制开关发出开机命令脉冲，通过机组开机回路使开度限制电动机正转，带动开度限制机构按一定速度开至空载开度位置并自动停下来。导叶随之开启到相应的空载开度，机组转动，转速逐渐升高并达到额定转速。机组在未加励磁的空载状态下稳定运行。

(三) 手动起动机组

手动起动机组是指以手动调速装置控制机组起动，或在调速器无压力油源时以其手动机构控制机组起动的方式。手动起动仅适用于比较小的水轮发电机组，其操作步骤如下：

(1) 调速器切换阀放纯手动位置。

(2) 压力钢管充水。

(3) 蜗壳充水。

(4) 给冷却水、润滑水。

(5) 打开接力器锁锭。

(6) 用手动大手轮通过螺旋机构（或用手动油泵打油驱动操作机构），带动导叶逐渐打开，机组转动，手动控制导叶开启到空载开度，机组在未励磁的空载状态下稳定运行。

(四) 发电机加励磁建立电压

不论以何种方式起动机组，当机组平稳升速到额定转速，在未加励磁的情况下以额定转速稳定运行，而无任何异常时，即可对发电机加励磁、建立电压并升压到额定电压值。加励磁建电压的操作步骤如下：

(1) 合上发电机的灭磁开关，接通发电机转子的励磁回路。

(2) 发电机起励建压。

对于采用可控硅励磁的发电机，在合上起励开关、按下起励按钮时，发电机电压会很快建立起来。然后缓慢调节调压多圈电位器，使发电机端电压平稳升到额定值。

对于有励磁机的发电机，则要缓慢调节磁场变阻器，使发电机电压平稳升到额定值。在调整电压的过程中，应始终保持机组为额定转速值（频率为 50Hz 额定值）。

三、机组起动及空载运行中的检查项目和注意事项

（一）起动中检查项目与注意事项

1. 手动开机检查项目与注意事项

在开机过程中，要注意监视机组的振动与摆度是否在允许范围之内，是否有异常声响，各轴承的润滑及温升情况，各油、气、水管路有无渗漏，各水力表计指示是否正常。

如果是机组试运行的第一次手动开机，除更仔细进行上述检查外，还要记下机组开始转动的始动开度，并要将机组在 50% 额定转速下稳定运行一定时间。然后再使机组达到额定转速，记下对应当时运行水头的机组空载开度。机组在空载额定转速下稳定运行一定时间，并对机组空载运行下的振动、摆度及轴承的温度定时记录，直至稳定为止，检验其是否符合要求。

在机组起动升速的过程中，如果在某个开度上产生强烈振动，应立即提高转速使之快速滑过振动区，以保护机组不受损坏。

2. 自动开机应注意的问题

根据机组容量和自动化水平的不同，中小机组的“自动开机”的自动化程度也有所不同。但是，多数电站都是由控制开度限制机构实现自动开机的，所以，开度限制机构的全关、空载、全开三个限位开关的位置必须整定好，并经反复检验无误，才可实施自动开机。特别是空载限位开关的位置，一定要符合当时运行水头下空载开度的位置。因为，对于没有永磁机的机组，在开机过程无法靠调速器的自动调节作用将机组调整到额定转速，机组转速仅由开度限制机构能否准确停止在空载开度位置来确定。空载开度位置整定不准，将造成空载转速偏离额定转速，甚至可能过速。

有永磁机为调速器飞摆电动机供电的机组，在起动过程中能靠开度限制机构和飞摆的自动调节作用相配合，使机组转速准确达到额定转速。

一般中小机组由于自动化程度不高，只能实行简单的自动开机。只有对于容量较大、自动化程度较高的机组，才能实现完全的自动开机。

3. 关于轴承冷却问题

不论是手动起动、自动起动、正常运行起动，还是试运行起动，在所有起动过程中都不应忽视给轴承油箱冷却器供冷却水的问题。发电机在运行时，轴承处机械摩擦产生的热量，由轴承传入油中。这部分热量由冷却水帮助散出（只有容量很小的机组才采用自然散热的方式），否则将会加速油的劣化，影响轴承寿命。对于设有轴承水冷却器的机组，建议在一般情况下不要采用不给冷却水的起动或运行方式。特别是对于试运行机组，因轴承接触面未经很好磨合，油膜形成不够好，更不要做不放冷却水的运行试验。

（二）空载运行中的检查项目及注意问题

1. 机组未励磁空载运行中的检查

机组在未加励磁的空载运行中的检查项目，基本与起动中的检查项目相同。要注意监视机组的振动、摆度、声音、轴承温升，油、气、水系统的工作情况，以及各水力表计的指示情况。所不同的仅仅是起动中注意的是这些数据的变化情况，而在空载中要监测这些数据的稳定值，并看其是否符合规定值。对正常运行的机组，这些数据应与以往记录相符；对试运行机组，则要对各项数据进行仔细测量，作好记录，并与厂家给出的设备特性曲线、图表、数据相比较。

机组各轴承的温升，在试运行中要进行全过程监测，每隔 15min 做一次记录。对于温升较快或明显偏高的轴瓦更要特别注意。一般在空载运行中，轴承的温度不应超过 60℃，如果稳定最高温度超过 65℃，则应立即停机，找出原因并加以处理。

未加励磁的空载运行状态良好，表明机组水力的、机械的情况正常，即可进行励磁升压操作。

2. 机组励磁空载运行中的检查

对发电机进行励磁升压操作，发电机建立起电压，机组进入励磁空载运行状态。在机组升压过程中，应注意检查下列内容：

(1) 手动缓慢调节励磁装置，使发电机逐渐升压到额定值。在电压、频率均保持为额定值的状态下，检查励磁调节器的位置和导叶开度指示的位置，均应符合正常空载位置。

(2) 在升压过程中发电机与励磁装置无任何绝缘烧焦气味或异常声响。

(3) 在升压过程中发电机转子励磁回路的直流电压表和直流电流表指示正确，无反向指示，最后能稳定在空载额定位置。

(4) 在升压过程中发电机三相交流电压应平衡，电压随励磁调节相应逐渐增大，最后稳定在额定值。

(5) 在升压过程中发电机定子电流应始终为零。

(6) 发电机集电环、电刷接触良好，火花很小，跳动与最大火花均不超过允许范围。

(7) 励磁回路无接地现象。

(8) 继续监视机组未加励磁空载运行中各项检查内容，应无明显变化。

如果空载升压中发现任何异常，必须停机检查处理，直至合乎要求为止。如励磁投入后不能起励建压，应检查励磁回路，找出存在问题，进行妥善处理。若属于剩磁太弱无法起励建压，则应用于电池或蓄电池进行“充磁”。

对于试运行的机组，首次空载升压成功后，要对发电机和励磁装置按规定进行必要的特性试验（详见第二章）。

对空载励磁建压的机组，经上述各项检查均无异常，表明机组空载下水力的、机械的、电气的情况均属正常。即可准备同期并列操作，将机组并入系统带负荷运行。

第二节 机组的并列

将发电机投入电力系统与系统中已运行的发电机并联运行的操作，叫做并列或称同期并列。中小型水轮发电机组投入电力系统并列运行，能提高供电可靠性和提高供电质量，而

且使负荷分配更合理，水能利用更充分，有利于实现经济运行，可以更好发挥机组的效益。

要使发电机投入电力系统，必须满足一定条件，进行一系列合理操作，并要解决一系列技术问题。本节将对并列有关问题加以详细介绍。

一、并列前的检查项目

(一) 线路充电检查

对于新架设或经检修后的线路，在并列前应该按规程对线路进行全面检查和测试，并对线路进行充电试验。充电试验前要断开线路上所有的用户开关。线路充电可由系统供电，按输电线路、户外母线、变压器、户内母线排逐级充电的方式，将系统电压送至机组的并列点之前。充电试验中，线路、电气设备及表计应无任何异常。线路充电亦可由发电机供电，用机组向线路逐级加压送电的方式，向线路充电，一直到变电所入口开关之前。

(二) 相序检查

对于新安装或检修后的机组，或者线路进行大修后，都必须进行相序检查（定相）。只有确认与系统相序一致的发电机才允许并列。相序一致是指待并发电机相电压与系统（或已工作的其它发电机）相电压的旋转方向相同。如果错误地将和系统相序不一致的发电机并入系统，将产生极大的冲击电流和冲击力矩，无法实现同步运行，并导致机组、发电厂或变电所主要设备的严重事故。不能仅仅根据发电机出线的标记和母线与线路的颜色标记“定相”，一定要按正确方法实地进行相序测定。

发电机定相工作常采用相序表（相序指示器）进行测定。相序表的额定电压必须和被测电压相一致，故高压机组定相必须在电压互感器二次侧进行，只有出线电压为 400V 的低压机组，才可直接在发电机出线上进行相序测定。

用相序表进行相序测定的方法如下：

(1) 将相序表的 A、B、C 的三根引出线分别接在未带电母线电压互感器 2YH 二次侧的 a、b、c 三个低压端子上，然后合上母线排与电网的联络开关 2DL，使电网电压送至母线排。按下相序表开关，如相序表按顺时针方向旋转，说明电网及母线电压为顺相序，参见图 1-1 (a)。

(2) 拉开母线与电网的联络开关 2DL，起动待测定相序的机组，待发电机电压升至额定电压时，合上隔离开关及发电机断路器 1DL，将发电机电压送至母线。这时按下相序表开关，如果相序表仍按顺时针方向旋转，则表明发电机也是顺向序，发电机与电网相序一致。本项测定亦可在发电机出口电压互感器 1YH 的二次侧再进行一次。

若测定发现发电机与电网的相序不相同，应停机处理，在主接线上易于改变相序处改接两条一次线。调换相序后，再升压复验相序，直至相序相同并符合顺相序的要求为止。

测定相序后，母线上的黄、绿、红颜色标记与实测的 A、B、C 相必须对应一致。

测定相序也可使用电子相序表，参见图 1-1 (b)。

如现场无相序表，亦可用一个小型三相电动机来进行相序测定，其接线与试验方法和用相序表测定时相类似。当电网供电、机组供电电动机的旋转方向均为顺时针方向时，表明发电机与系统相序一致且都为顺相序。

也可用一个电容器或一个电感（如日光灯镇流器）和两个灯泡，连接成三相无中线 Y 型

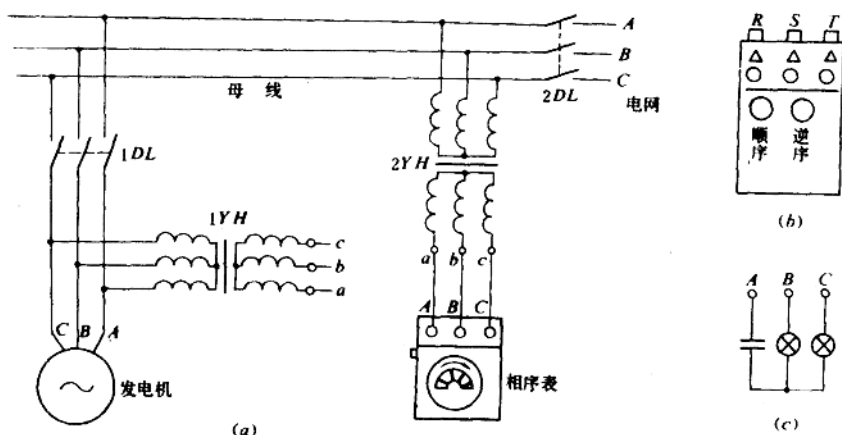


图 1-1 相序校验接线图

(a) 接线图; (b) 电子相序表; (c) 自制相序指示器

接线的负载, 参见图 1-1 (c), 制成一个简单的相序指示器, 来进行定相工作。这个装置是利用三相负载不对称所产生的中性点偏移, 来进行相序指示的。若把电容 (或电感) 的引出线标为 A, 一个灯泡的引出线标为 B, 另一个灯泡的引出线标为 C。将自制的相序指示器接在母线排电压互感器的低压端子 a、b、c 上, 当分别由电网向母线供电和发电机向母线供电, 该指示器的两灯泡必然有一个较亮, 一个较暗。如果两次灯泡的亮暗情况一样, 都是 B 灯亮、C 灯暗 (或都是 C 灯亮、B 灯暗), 则表明发电机和电网相序相同。

正常运行期间的机组, 因安装、检修后已做过相序测定, 只要输电线路相序无变化, 则无需重作相序校验。

(三) 开关、开关柜及配电盘等的检查

并列前应检查从发电机出口到输电线路间的所有断路器、隔离开关, 动作应可靠, 分、合位置符合要求。屋内母线排、屋外母线、变压器应一切正常。发电机向系统送电的主回路及有关电气设备应一切正常。

并列前, 除作为并列点的断路器在分闸状态外, 其余隔离开关与断路器均应在合闸位置。

并列前应检查机组配电盘、继电保护盘的继电器、控制开关等, 均应处于完好状态, 电压互感器、电流互感器二次接线正确, 所有仪表指示正常、准确, 二次回路及所有装置无任何异常情况。

(四) 同期装置检查

并列前应对同期装置进行认真仔细检查。同期屏上的同步表、频率表、电压表均按规定进行过校验和调试, 并且接线正确, 指示正常。同期手柄、同期开关动作可靠、位置正确。

为防止发电机并列时, 由于同期装置不正常工作造成事故, 机组首次并列前重复检查

电压的相序是否相符，同步表的接线正确与否是非常必要的。

可以在机组未起动时，将同步表接入同步电源（同接入系统电源），检查同步表指针应指在同步标记红线位置。

在机组起动并建立电压后，改变发电机的频率，检查同步表指针转动方向是否与实际情况相符。当发电机频率低于系统频率时，指针应向“慢”的方向旋转，反之，发电机频率高于系统频率时，同步表指针应向“快”的方向转动。

在进行上述检查的同时，应检查同期屏上的频率表、电压表的指示应与实际相符，并和其他表计的指示相符。

只有在同期装置无任何异常时，才允许进行并列操作。

二、水轮发电机组的并列操作

（一）发电机并列的条件

发电机在并列时应达到以下基本要求：①合闸瞬间发电机承受的冲击电流和冲击力矩不超过允许值；②被投入的发电机能较快拉入同步转入稳定运行。为此，除保证待并机组和系统相序相同的先决条件外，采用准同期并列的机组还应具备下列三个条件。

（1）待并机组的频率与电网的频率相同。

（2）待并机组的电压与电网的电压相等。

（3）待并机组电压相位与电网电压相位相同。

如果能对待并机组进行精确调节，使发电机和系统同步，即电压相等，频率（或角速度）相同，相位相同，将发电机投入电力系统。在这种理想的情况下，断路器合闸瞬间发电机定子电流为零，冲击电磁力矩也为零，这样的理想并列实际上是无法做到的。

如果不符合并列条件而进行并列，将会产生不良后果。为易于了解各项要素对并列机组的影响，我们假定其它条件都符合要求，单独讨论其中一项条件不符合要求的情况。而且由于发电机电压和电力系统电压都是三相对称的旋转相量，故只需分析一个对应相的情况。

1. 电压大小不等

当待并发电机与系统的频率相同，电压的相位相同（相角差 $\delta=0$ ），仅电压的有效值不同时，参见图 1-2 (a) 所示，由于发电机与系统间的电压差 ΔU 的存在，在并列瞬间，会在发电机定子绕组中产生环流，即合闸瞬间的冲击电流。因为发电机和电网的电抗很小，即使较小的 ΔU 也会产生较大的、滞后 $\Delta U 90^\circ$ 的无功电流。如果 ΔU 很大，则冲击电流会达到很大的数值，该电流将对发电机定子绕组端部产生作用力，损坏绕组结构。

一般要求待并发电机和电网的电压有效值的差值不得超过额定电压的 5%~10%。

2. 电压的相位不同

当待并机组与系统的频率相同，电压有效值相同，仅电压的相位不同时，由于相角差 δ 的存在，会在发电机与系统间产生一个电压差 ΔU [可由相量图求得，如图 1-2 (b) 所示]。相角差较大， ΔU 也较大。当 $\delta=180^\circ$ 时，即发电机与系统电压极性相反， ΔU 有最大数值，等于额定电压值的二倍。如果在这时合闸，冲击电流是非常大的，相当于发电机出口发生三相突然短路时短路电流的二倍，无功环流瞬态值可达发电机额定电流的十余倍之多。

这样大的冲击电流，会使发电机定子绕组端部承受巨大的电动力而严重损坏（如定子绕组端部严重变形，绕组绝缘损坏），造成绕组短路、断股、甚至烧坏。当相角差 δ 在 $0 \sim 180^\circ$ 之间时，则冲击电流不仅有无功分量，也有有功分量，此电流将在发电机轴上产生冲击力矩。当相角差在 135° 左右时合闸，水轮发电机承受的冲击力矩最大，这个力矩的最大值，比发电机出口三相短路时所产生的电磁力矩还要大好几倍，可达额定转矩的几十倍。这样大的冲击力矩突然施加到水轮发电机的主轴上以及作用在定子机座的地脚螺栓上，必然对水轮发电机的机械部分造成严重破坏。

只有在相角差很小时并列，才能使差值电压 ΔU 很小，才能使合闸瞬间的冲击电流和冲击力矩不超过允许的数值，才不会对发电机造成损伤。

发电机电压和电网电压相位不同，对应不同的相角差 δ ，同名相之间的差值电压 ΔU 的不同数值如表 1-1 所示。

表 1-1 相角差 δ 与差值电压 ΔU 间的对应关系

相角差 δ	0°	60°	120°	180°	240°	300°
差值电压 ΔU	0	U	$\sqrt{3}U$	$2U$	$\sqrt{3}U$	U

并列时允许的最大相角差为 $\delta \leq 10^\circ$ （约为 360° 电角度的 3%）。

3. 频率不相同（角速度不同）

若待并联发电机与系统频率不相同，即使调整发电机与电网电压的有效值相等也是无意义的，更无法将电压的相位调整相同。因为发电机与电网电压相量旋转角速度不等，这两

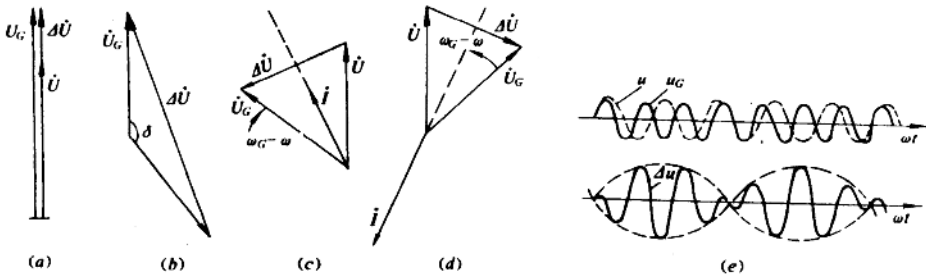


图 1-2 并联投入时差值电压 ΔU 的变化情况

(a) $U_G > U$, $\delta = 0$ 时; (b) $U_G = U$, $\delta > 0$ 时;

(c)、(d) $U_G = U$, $f_G \neq f$ 时; (e) 拍振电压波形图

组相量的夹角将随时间而变化，发电机和电网之间将出现大小和相位均不断变化的电压差 ΔU [相量图见图 1-2 (c)、(d)]，其值在零至二倍额定电压之间变化。这个幅值时大时小有规律变化的电压称拍振电压，拍振电压随时间往复变化的波形图，如图 1-2 (e) 所示。拍振变化的快慢与频差有关，频差大，拍振变化快；频差小，拍振变化慢。从拍振电压波形图的包络线，可以明显看出拍振变化的快慢。差值电压在 $0 \rightarrow 2U \rightarrow 0$ 之间往复变化的频率为

$f_c - f$ (是拍振频率的二倍), 其周期为 $\frac{1}{f_c - f}$, 在此期间经历一次最大值和最小值变化 (f_c 表示机组频率, f 表示电网频率)。

由拍振电压产生一个大小和相位同样随时间变化的拍振电流。拍振电流的有功分量和转子磁场作用, 使发电机轴上的转矩也时大时小交替变化, 发电机产生功率振荡 (发电机交替吸收无功和送出有功)。如果在频差过大时合闸, 不但冲击电流过大, 而且由于功率振荡严重, 使发电机无法拉入同步, 并会对机组造成严重损坏。

只有当发电机与系统的频率差很小时, 拍振变化足够缓慢, 在接近 $\Delta\omega = 0$ 的瞬间合闸并列, 可以使冲击电流最小, 而且这时冲击电流有功分量的自整步作用 (在 $f_c > f$ 时, 电流的有功分量产生制动转矩; 在 $f_c < f$ 时, 电流的有功分量产生与转动方向相同的转矩), 可以将并入系统的发电机快速牵入同步运行。

并列时允许的最大频率差不得超过额定频率的 $0.2\% \sim 0.5\%$ ($0.1 \sim 0.25\text{Hz}$)。

以上分别分析了频率、电压、相角差对并列的影响。实际上它们是密切相连、互相影响的。其中以频率、相角差的影响更大。

要使待并发电机和系统做到频率、电压、相角差完全相同是不可能的。实际上只要将频率、相角差、电压都控制在允许偏差范围之内, 即符合并列条件。在符合并列条件的情况下, 将发电机投入电力系统的合闸瞬间, 发电机定子电流表无突然过分增大和摆动, 电压表无明显降低, 发电机无过大的冲击声响, 系统无明显波动。这样的并列是成功的。

同步发电机在不符合同期条件时进行并列, 即是非同期并列。非同期并列是发电厂的一种严重事故。在频率差和相角差都很大的情况下非同期合闸, 过大的冲击电流和冲击力矩会使发电机受到损坏; 强烈的功率振荡会使得发电机无法进入同步。当发电机功率振荡的频率和发电机转子的固有频率接近时, 由于共振更会加剧机组的振动, 造成机组的严重损坏。有时, 非同期并列当时可能未发现严重损坏, 但很可能造成严重隐患。

为防止非同期并列, 手动准同期并列操作, 应由同期操作考试合格并有经验的运行人员进行。另外, 在准同期接线中应设置对非同期合闸能加以闭锁的保护回路, 如有可能要尽量采用自动或半自动准同期装置。

(二) 发电机并列的方式

1. 准同期并列方式

对于空载已励磁的待并发电机组, 在其频率、电压、相位与系统的频率、电压、相位相一致 (严格说是在允许偏差范围之内) 时, 进行并列的方式称为准同期并列。

准同期并列的优点是投入瞬间发电机和电网间电流冲击很小。但是, 精确调节电压、频率、相角使之符合要求, 较费时费事, 一般至少要用 $2 \sim 4\text{min}$ 。如果调速器稳定性差, 或者电力系统处于事故情况下, 频率和电压急剧变化, 并列往往需十几分钟甚至更长时间。因而起动机耗水较多, 并且具有发生非同期并列的可能性。准同期并列虽有上述缺点, 但是在正常情况下正确的准同期并列, 可以使合闸瞬间的冲击电流和冲击力矩减至很小。并且在具有同期闭锁保护、采用自动准同期装置、或由较高技术水平的运行人员进行操作时, 并列的成功率是很高的。因此, 准同期并列方式得到广泛应用。