

大中型水电站典型启动试验

李志祥 李利华 付丽华 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

大中型水电站典型启动试验

李志祥 李利华 付丽华 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书基于国内大中型水电站投产初期情况,同时依据国家、行业及电力调度等相关标准,结合实践经验,对水电站常用的发输变及公用设备等典型设备整体性启动试验作了整理,主要包括水电站启动试验的准备、开关站设备送电试验、机组试验、公用系统设备试验等。试验偏重在试验项目、试验接线、试验程序和安全风险分析与控制措施等方面作了介绍,具有内容翔实、覆盖面全面,操作性强的特点,对新投产水电站和设备换型后试验有较好的参考价值。

本书可供水电站运行、设备维护、机电安装、电力调度及机电设备试验调试相关专业技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

大中型水电站典型启动试验 / 李志祥, 李利华, 付丽华编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014.9
ISBN 978-7-5170-2538-2

I. ①大… II. ①李… ②李… ③付… III. ①水力发电站—电力系统运行—试验 IV. ①TV737-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第218869号

书 名	大中型水电站典型启动试验
作 者	李志祥 李利华 付丽华 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.5印张 283千字
版 次	2014年9月第1版 2014年9月第1次印刷
定 价	46.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

中国水电资源丰富，总量居世界首位。中国的水力资源理论蕴藏量为 6.94 亿 kW，年发电量 60829 亿 kWh，技术可开发装机容量为 5.42 亿 kW，均居世界首位。

与其他国家相比，我国能源结构调整的任务更重，其中水力发电是技术成熟的可再生能源发电技术，不仅在当前以化石能源为主的能源结构中具有重要作用，而且在未来以可再生能源为主的能源结构中也具有独特地位，是补偿风能和太阳能发电不平衡和不连续性的重要能源。

大力开发水电是改变能源结构最现实的途径。水能资源是稳定的、清洁的、可再生的，发展水电是实现我国向国际社会承诺的 2020 年节能减排目标的重要举措。

至 2012 年年底，中国已经建成的装机容量 40MW 及以上水电机组，总装机容量为 1.38 亿 kW，占技术可开发容量的 25.4%。截至 2012 年，40MW 及以上水电机组 729 台，大中型水轮机组 426 台，至 2020 年大中型水电机组将达到 2000 台左右，若计及星罗密布的小型水电站，水电机组设备数以万计。

按照国家大中型水电发展战略，“十二五”规划全国将开工建设水电 1.6 亿 kW，到 2015 年，全国水电装机容量达到 2.9 亿 kW，重点开工建设的大型水电站（包括金沙江、雅砻江、大渡河、澜沧江、黄河上游、雅鲁藏布江

等) 将超过 50 个。规划到 2030 年, 还将在 2020 年基础上新增水电装机容量 7000 万 kW; 到 2050 年, 再在 2030 年基础上新增水电装机容量 7000 万 kW。

当前我国水电建设的高速发展和老设备的更新改造、设备大修的现状并存。而电力生产的安全关系国计民生, 国家特别重视, 先后出台了《中华人民共和国电力法》与《中华人民共和国安全生产法》等相关法律, 以及行业规程规范、重大反事故控制措施、安全性评价标准等。水电建设的高速发展也带来了专业技术人员和管理人员快速流动以及设备制造周期缩短等问题, 因此控制和规范水电站设备启动试验的项目与程序, 合理做好启动试验, 对确保设备正常运行和电站的可靠安全有着现实意义。

本书立足于某大型水电站投产以来设备典型启动试验案例, 依据当前国家及行业相关标准的要求, 进行全面整理和编制, 以期能够为水电站运行、维护人员提供参考, 亦希望本书能为我国今后的大型水电站的设备启动试验提供参考和借鉴。在此感谢参与此书审阅工作并提出宝贵意见的三峡水力发电厂叶华松、倪高明、徐新田、丁万钦、刘辉、周兴华等同志。

编者

2014 年 8 月

目 录

前言

1 概述	1
1.1 水电站启动试验的意义	2
1.2 水电站启动试验的分类和特点	3
1.3 水电站启动试验的现状与面临的挑战	4
2 水电站启动试验的准备	5
2.1 试验依据	5
2.2 安全措施	6
2.3 试验条件	7
2.4 试验前检查	8
2.5 试验的内容与分析	9
3 开关站设备送电试验	11
3.1 500kV GIS 新设备投产启动试验程序	12
3.2 500kV GIS 站内短差及短引线保护装置换型后启动试验程序	19

3.3	发电厂 500kV 线路保护及短引线保护改造后试验程序	22
4	机组试验	24
4.1	新投产机组启动试验	24
4.2	机组 A/B 修后启动试验	56
4.3	机组 C 修后启动试验	67
4.4	发电机型式试验	68
4.5	机组进相试验	87
4.6	机组 PSS 试验	91
4.7	机组稳定性及相对效率试验	94
4.8	发电机动平衡试验	101
4.9	机组利用电气制动回路进行转子注磁试验	103
4.10	发电机用电制动升流启动试验	108
4.11	励磁调节器换型并网前试验	110
4.12	励磁调节器换型并网后试验	135
4.13	机组调速器一次调频功能试验	148
5	公用系统设备试验	155
5.1	10kV 厂用电系统启动试验	155
5.2	直流系统试验	160
5.3	监控系统出厂试验	174
5.4	监控系统现场试验	188
5.5	进水口快速门液压启闭机机、电、液联调试验	204
5.6	泄洪闸门液压启闭机机、电、液联调试验	209
5.7	门机载荷试验	215

1 概 述

水电站可以按照不同类别进行分类，主要有：按照能源转换的技术特点分类，如利用流动的水能量或由于自然流入湖泊等能量发电的电站、抽水蓄能电站、利用潮汐能发电的电站等；按照电网供电特点分类，如基荷电站、调峰调频电站等；按照水能的利用特点分类，如仅仅以发电为目的的电站、多用途综合功能电站（如电站拦水大坝兼顾有防洪、航运、灌溉、供水等功能）等。

装机容量是水电站的一个重要参数，按照装机容量可分为大、中、小型水电站。由于每一个国家容量值各不相同，很难找到一个明确的界限，通常的标准是装机容量在 50MW 以下为小型电站，装机容量在 50~300MW 为中型电站，装机容量在 300MW 以上的为大型电站。

随着当前水电机组容量的不断增加，超大装机容量水电站建设也不断增加。2003 年是中国水电建设史上的里程碑，也是中国水力发电设备制造和运行管理史上的里程碑。自 2003 年至今，700MW 级别的水电机组成为主力电站装备，长江三峡水利枢纽工程首批 700MW 水电机组的成功投产，使中国从此登上了 700MW 水电机组制造和运行的大舞台。

2003 年至今，前后开工建设和投运了数百万千瓦以上的大型水电站，如广西的龙滩电站、青海的拉西瓦电站、湖北的三峡电站、云南的小湾电站、四川云南的溪洛渡和向家坝电站、四川的锦屏一级和二级电站等。

大型水电站投资大，建设周期长，运行后除在电网起骨干作用外，一般由于水域大

的特点均兼顾着水利工程的其他功能。如三峡电站除发电功能外，三峡工程还有防洪、航运、生态、补水抗旱等功能。

严格控制大型水电站的安全是运行管理的首要任务，控制运行管理的风险，主要落实在技术和管理措施上，不同阶段有着不同的特点，但控制期越早越好。对于电站运行管理者而言，不论是新设备还是改造换型设备，均应参与到设计、制造、安装、试验各阶段，而投入商业运行前的启动试验是整体设备质量、性能的综合检验，是保障设备长期稳定运行的重要环节。

1.1 水电站启动试验的意义

当前我国水电建设的高速发展和老设备的更新改造、大修的现状并存。电力生产的安全关系着国计民生与科学发展，先后出台了《中华人民共和国电力法》与《中华人民共和国安全生产法》等相关法律，以及行业规程规范、重大反事故控制措施、安全性评价标准等。控制和规范水电站设备启动试验项目与程序，对确保设备正常运行和电站的安全有着现实意义。

不论是何种类型水电站，其设备构成基本一致，主要由水轮机、水轮发电机、主变压器、升压站、站内配电设备、水工设备、起重设备、监控系统、公用系统等组成。针对不同的设备，以及是否是新工程、设备换型改造或不同重点的设备检修等情况，启动试验项目和内容据实而定，它可以用于安装单位、设备厂家与运行管理单位交接验收的见证性试验，为合同规定的运行指标评价与技术改进、安全整改提供数据与鉴定依据，也用于判定是否满足国家或行业相关规程标准。

水电站水轮发电机组与成套设备启动试验及试运行是水电站基本建设工程完成或检修工程完成后的运行交接验收的重要部分，是检查电站机电设备设计、制造、安装及检修或技改质量的重要环节。它是水轮发电机组等设备或系统启动试运行为中心，对机组引水、输水、尾水建筑物和金属结构、机电设备进行全面的考验，验证水工建筑物和金属结构、机电设备的设计、制造、施工、检修质量是否符合设计要求，同时通过启动试验对机电设备进行相关调整和整定复核，使其达到稳定安全、经济运行的目的。

通过设备启动试验，可以尽早发现设备存在的影响安全运行的不利因素，并为提出相应的解决措施提供科学的决策依据，及时消除隐患。

1.2 水电站启动试验的分类和特点

水电站设备启动试验按照设备本身和功能相对独立分类，可分为单个设备、单元配套设备、系统设备等不同规模的启动试验。典型的启动试验的对象有单个设备（如单台断路器、电流互感器、单套保护装置等）、水轮发电机组、主变压器、发变组单元设备、整个开关站系统、辅助公用系统、计算机主站系统、厂用电配电设备等。针对新设备投产或设备不同等级的检修或有针对性的技术改造、设备换型改造等，启动试验实际项目应有针对性和目的性，试验除了对本设备或单元系统的检验外，还要同步检验相对关联设备、系统、水工建筑的影响，具体要以现场实际需求为准，如水轮发电机组 A 修、B 修、C 修后的启动试验，新设备投产启动试验等。

水电站设备启动试验按照目的和性质分类，概括地分有功能试验、稳定性试验、性能参数试验等，其主要特征是设备安装或检修完成后进行的整体性且与正常运行工况一致状态下的带电或旋转运行。

功能试验用以检验设备在正常或规定的运行条件下是否达到了应有的基本功能，如电气设备试验核对相位与接线、设备启停控制、测量设备输入与输出、机械传动等回路和监控对象动作是否正确等。

稳定性试验用以检验设备在规定的运行条件下是否满足长期安全运行的条件，如轴承热稳定试验、发电机定子热稳定试验、机组振动摆度检测等。

性能试验用以检验设备满足质量的程度。如调速器调节规律与品质检测等。

各种试验的目的和过程实际上是交叉和同步的。如针对水电站，机电设备启动试验的监测重点：机械设备主要包括振动、摆度、温升、压力、噪音、机械部件随动性等；电气一次设备主要包括温升、振动、电晕、噪音等；电气二次设备主要包括接线与控制逻辑、测量幅值与精度、控制定值、控制参数及规律等。主要试验方法是利用现场设备、装置、表计直接观察并外接监测装置录波和分析。

1.3 水电站启动试验的现状与面临的挑战

当前处于水电站建设高速发展时期，面临着人员快速流动、设备制造周期缩短、设备更新改造多的现状，启动试验针对不同的相关方，如制造、设计、运行单位等，有不完全统一的需求，而目前国家或行业相关标准的要求也比较零散，缺少相对集中的启动试验标准，因此进行启动试验总结有着现实意义。例如，设备型式试验除了根据合同进行验证验收外，还为后续制造、安装的合理性或改进措施提供依据；电气设备的功能测试和参数测试为电力系统建模提供基础数据、验证核实动态调节品质是否满足安全、稳定、可靠、经济性的要求。

由于水电站各设备处于不同的阶段，启动试验项目必须结合实际制定，不管是何种规模的启动试验，形成组织、参与人员、试验程序上的统一认识是基础。一般而言，应有试验组织体系，包括指挥人、操作人、试验人、记录人等，还要有应急处理预案等。

指挥人员应对整个试验范围、试验项目的目的、流程、风险与处置方案有较全面了解，具有较强的实际经验。参与试验人员应对试验对象、接线、风险、项目和目的非常熟悉。其中按照国家或行业标准的相关要求，有些项目必须由有技术监督资质的单位和技术人员进行，如 PSS 试验需要电网认可的相关单位，如电科院等进行验证和取证建模。操作人员应对现场设备熟悉、熟练掌握操作规程和应急处理方法，提前熟悉试验方案。对接入运行系统的操作，现场运行人员和相应调度人员应做好必要的事故预案。

2 水电站启动试验的准备

2.1 试验依据

水电站启动试验的依据是根据对象和实际项目而定，主要包括国家、行业标准，设备制造、安装和试验合同文件、设备厂家说明书等，主要依据有：

《水轮发电机组启动试验规程》(DL/T 507—2002)。

《电网运行准则》(DL/T 1040—2007)。

《电网调度规程》。

《发电机组并网安全条件及评价》(GB/T 28566—2012)。

《水轮机电液调节系统及装置调整试验导则》(DL/T 496—2001)。

《大中型水轮发电机微机励磁调节器试验与调整导则》(DL/T 1013—2006)。

《大中型水轮发电机静止整流励磁系统及装置试验规程》(DL/T 489—2006)。

《发电机励磁系统调度管理规程》(DL/T 279—2012)。

《电力变压器检修导则》(DL/T 573—2010)。

《微机继电保护装置运行管理规程》(DL/T 587—2007)。

《继电保护及安全自动装置检验规程》(DL/T 995—2006)。

《水电厂计算机监控系统试验验收规程》(DL/T 822—2012)。

- 《三相同步电机试验方法》(GB/T 1029—2005)。
- 《电力系统稳定器整定试验导则》(DL/T 1231—2013)。
- 《电力工程直流系统设计技术规程》(DL/T 5044—2004)。
- 《电力系统用蓄电池直流电源装置运行与维护技术规程》(DL/T 724—2000)。
- 《电力用直流电源监控装置》(DL/T 856—2004)。
- 《用于交流和直流的断路器》(GB 10963.2—2008)。
- 《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》(GB 50150—2006)。
- 《微机型防止电气误操作装置通用技术条件》(DL/T 687—1999)。

2.2 安全措施

水电站设备启动试验前应有一定的事故预案，做好试验期间必要的异常预防与有效的控制措施，既要保障试验范围内的设备安全，也要确保整个运行系统及试验人员的可靠和安全。

首次电站设备启动试验时，必须提前研究并做好防火、防厂房灌水、防设备带电或建立压力后的设备损坏、防机组转动振动带来共振等措施。按照功能需求，确保优先投运消防系统或消防水灭火试验功能正常，确保检修排水系统和建筑物渗漏排水系统正常投运。实际试验前，对试验系统与运行系统进行隔离，对正在检修或安装的水轮机及厂房排水廊道相关阀门位置和人孔门状态进行检查确认，防止公用廊道串水、水淹厂房等事故发生。水电站首台机组启动试验或泄水建筑设备试运行应提前做好建筑物与试验设备的振动传感器与接线的安装，与启动试验同步进行振动监测。

对于接入电网的设备试验，涉及跨区域范围的设备试验应由上级调度部门作为统一的协调，并按照调度部门规程要求提前制定调度方案，建立快捷的调度通信方式。

电气设备并入系统，为了防止设备故障和避免扩大事故、减少对运行系统的影响等，主要的技术安全措施有：并入前做好继电保护计算并下达通知单和整定完成，以提高设备保护的灵敏度，其定值的整定计算应按照不同的调度管理权限范围各负其责。电网调度部门还应考虑影响范围内的电网安全稳定装置、切机切负荷、母线低频率保护的定值或出口方式做调整。

接入电网后，调度人员应监视和控制电网内重要送电断面潮流，若有异常通过相关

发电站的出力调整至正常范围，若属现场设备异常造成，通知现场暂停试验，分析原因并处理好后再进行试验。操作及试验过程中，如果电网发生事故，应立即停止相关操作，按照调度规程统一指挥处理事故。

2.3 试验条件

水电站设备启动试验前应具备运行技术与环境的基本条件和合规性要求，以保障设备启动运行的安全性。与水电站机电设备的功能和运行要求基本类似，启动试验所具备的条件主要是在工程进度要求、设备和运行技术条件、运行环境要求、组织管理措施等方面。

对于新建水电机组的启动试验应具备以下条件：

(1) 应满足电力调度管理的要求。水电站运行管理单位与电力调度机构签订《并网调度协议》，对于新投产水电站或扩建、改建工程后的机组首次并网 90 日前，向电网调度机构提供规定的技术资料，并报送并网运行申请书并得到批准。

(2) 新设备或改造换型设备应满足并入电网的技术要求，主要有：

1) 电气一次设备交接试验项目完整、合格。

2) 接地装置及接地引下线满足热稳定校验要求。

3) 机组应按照电网要求配置电力系统稳定器（PSS 装置）或具有同类功能的其他装置，静态试验合格。

4) 调度自动化设备的性能指标满足所接入系统的要求。电网调度机构相关自动化系统已经试验完成。

(3) 启动试验范围内工程进度及安全措施应满足的启动条件主要有：

1) 土建工作完工，道路畅通，照明良好；相关设备安装试验结束。传动、连锁试验正常，具备启动条件。

2) 各保护定值有书面定值计算报告和整定通知单，并整定和试验结束。

3) 设备现场标识正确、明显、齐全。设备正式调度命令已下达。

4) 运行与试验必需的各种工器具及必须的安全措施（如接地线、围栏、标示牌）已准备齐全。

5) 试验现场通信畅通。

(4) 运行技术与组织管理准备到位。现场运行规程和管理制度已编制，相关人员已熟悉和明确职责。

(5) 启动试验组织技术措施到位，主要有：

1) 完成了设备启动试验方案编制、审批。

2) 所有参加试验的试验人员经过技术交底并熟悉方案。对于入网参数测试和模型测试应按照规定由有资质的单位进行并完成相关准备手续。

3) 大型启动试验应成立试验组织机构并明确职责，如试验指挥部等。

2.4 试验前检查

水电站设备启动试验前的检查是非常重要的一环，应提前根据所试验的设备及范围制定检查表，检查内容或项目应明确，有检查人和复核人签字栏。对于水电站主要设备的检查范围，不同设备和不同目的的启动试验可以视具体情况有针对性地调整。

2.4.1 设备检查

设备检查主要包括：

(1) 水轮机引水系统及相关管道、阀门、闸门、孔洞、测量系统等检查。

(2) 水轮机各部件及真空破坏阀、顶盖排水系统、主轴密封系统、水导轴承润滑冷却系统、筒形阀及操作系统、测量系统与管路等检查。

(3) 调速系统及油压装置、调速器电调柜、锁定装置、事故配压阀和分段关闭装置、测速装置等试验记录和检查。

(4) 水轮发电机各部件及定转子气隙、导轴承及推力轴承系统、推力轴承的高压油顶起装置、发电机转子集电室、发电机机械制动系统、冷却器测量和控制的试验记录和检查。

(5) 励磁系统及交直流灭磁开关、转子过电压保护系统的试验记录和检查。

(6) 油、气、水系统的检查，包括机组冷却水供水系统、厂内渗漏排水和检修排水、全厂透平油和绝缘油系统、高低压空气压缩机及供气系统的试验记录等。

(7) 电气一次设备的检查，包括发电机出口与中性点引出线、电流互感器、电压互

感器、发电机断路器、隔离开关、电制动开关、母线及避雷器、接地网与接地装置、照明系统等。

(8) 变压器与附属设备的试验、变压器油油化试验等检查。

(9) 电气二次系统及回路的检查，包括机组电气控制和保护设备、计算机监控系统现地控制单元、全厂开关站控制单元、进水口工作闸门控制单元、公用设备控制单元、直流电源设备及机组设备操作、控制、测量、发电机同期、通信等回路试验记录。

(10) 消防水机报警系统及设备、现场防火措施检查。

2.4.2 安全隔离措施检查

安全隔离措施检查主要有启动试验现场与运行系统安全隔离措施全面检查，接入电网的安全技术措施、试验定值、调度试验方案等检查试验现场消防设备、应急通道或措施检查。

2.4.3 组织管理措施检查

试验涉及的操作、试验、监视、应急处理等联系人和指挥人员已明确。有试验协作单位的安全技术交底及合同条签字已完成。

2.5 试验的内容与分析

水电站设备启动试验主要包括开关站、机组及公用系统设备等。本书中重点列举了某大型水电站设备的典型启动试验，试验的主要内容有新投产开关站设备接入送电、新机组投产启动、机组检修（含励磁、保护换型）后启动及公用系统监控、直流、快速门、门机等试验，机组一次调频试验、励磁及 PSS 试验、发电机型式试验。试验内容主要在试验目的、试验条件、试验程序、注意事项与控制要求等方面进行了描述，并重点体现了试验程序或试验大纲。

实际试验必须按照相关程序顺序逐步进行，试验中的每一步，包括检查、操作、检测等，均采用人员观察和试验设备数据记录等方式，对过程中的现象、数据，应结合专

业技术标准逐步分析，判断当前设备是否有异常，主要节点是否按照过程控制要求进行有效执行，若发现异常，判断是否需要暂停试验，或采取措施纠正和重新进行试验，以保证当前试验结果对设备的安全运行或后续的试验不影响，方可进行下一步试验。例如在机电设备启动试验中，对于机组运行振动摆度超标，可以采取转子配重方式纠正等，使机组运行稳定性必须满足安全运行的基本条件。设备整体试验完成后，应初步全面综合分析试验结果，判断试验是否达到试验目的，最终须由试验人员编制试验报告和得出明确的试验结果。