

ICS 27.100

F 24

备案号: 42630-2014

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1270 — 2013

火力发电建设工程机组甩负荷试验导则

Load rejection test guide for turbine in fossil fired power construction plant

2013-11-28 发布

2014-04-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 II

引言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 目的和要求 2

 4.1 目的 2

 4.2 要求 3

5 试验通则 3

6 试验记录与测量 4

7 试验条件 4

8 常规法甩负荷试验方法 6

 8.1 试验组织及人员安排 6

 8.2 甩负荷前机组的运行状态 6

 8.3 试验程序 7

 8.4 试验合格标准 7

9 结果整理及计算 7

 9.1 自动记录数据 7

 9.2 特征值计算 8

10 安全措施及注意事项 10

附录 A（规范性附录） 汽轮机测功法甩负荷试验 12

附录 B（资料性附录） 甩负荷试验报告编写基本要求 15

附录 C（资料性附录） 汽轮机调节系统超速保护控制 OPC 的典型型式 16

附录 D（资料性附录） 汽轮发电机组甩负荷试验励磁调节系统要求及发电机电压静差率和电压调差率测量 18

附录 E（资料性附录） 燃气轮机及燃气-蒸汽联合循环机组甩负荷试验 19

附录 F（规范性附录） FCB 试验 20

附录 G（资料性附录） 甩负荷试验汽轮发电机转子转动惯量 J 计算方法 21

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业火电建设标准化技术委员会归口。

本标准起草单位：广东电网公司电力科学研究院。

本标准参加起草单位：华北电力科学研究院有限责任公司、东北电力科学研究院有限责任公司、浙江省电力公司电力科学研究院、湖北省电力试验研究院、甘肃电力科学研究院。

本标准主要起草人：田丰、顾红柏、江学荣、冯姗姗、陈冀平、陶雷果、黄润泽、邵主建、雷俊、魏强、邱龙、魏丰年、王晓红、闫永生、丁联合、孙曰泰、毛永清、鲁学农。

本标准自实施之日起，代替原电力工业部建设协调司建质（1996）40 号文《汽轮机甩负荷试验导则》。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

引 言

本标准按国家能源局国能科技〔2010〕14 号文《关于下达 2009 年第二批能源领域行业标准制（修）订计划的通知》要求编写。

甩负荷试验是检验火力发电机组调节系统动态特性的重要试验，也是防止发生超速事故的措施。试验不仅考核发电机组调节系统的动态特性，还可以检验各配套辅机及相关系统设计对甩负荷工况的适应性。但试验涉及汽轮机、锅炉、电气、热工和化学等专业，并对汽轮机寿命有损伤，是一项存在风险的大型试验。为适应我国火电建设高参数、大容量发电机组迅速发展的需要，规范甩负荷试验工作，有必要建立适合我国国情、适用、统一的甩负荷试验行业标准。

本标准在总结近年来我国甩负荷试验经验的基础上，对原电力工业部建设协调司建质〔1996〕40 号文《汽轮机甩负荷试验导则》进行了补充和修改，是各种容量、各型调节系统机组进行甩负荷试验的通用性技术标准。

火力发电建设工程机组甩负荷试验导则

1 范围

本标准规定了火力发电建设工程机组甩负荷试验的目的、要求、方法和过程等技术管理内容。

本标准适用于各类新建、扩建和改建火力发电建设工程各种容量机组机械液压型、电液调节型调节系统验收试验和考核试验，也适用于已投产的火力发电机组的甩负荷试验。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2900.46 电工名词术语 汽轮机及其附属装置

GB/T 5578 固定式发电用汽轮机规范

GB/T 7409.3 同步电机励磁系统大、中型同步发电机励磁系统技术要求

GB/T 7596 电厂运行中汽轮机油质量

DL 5190.3 电力建设施工技术规范 第3部分：汽轮发电机组

DL/T 571 电厂用磷酸酯抗燃油、运行与维护导则

DL/T 616 火力发电厂汽水管道与支吊架维修调整导则

DL/T 656 火力发电厂汽轮机控制系统验收测试规程

DL/T 701 火力发电厂热工自动化术语

DL/T 711 汽轮机调节控制系统试验导则

DL/T 824 汽轮机电液调节系统性能验收导则

DL/T 843 大型汽轮发电机励磁系统技术条件

DL/T 892 电站汽轮机技术条件

DL/T 1083 火力发电厂分散控制系统技术条件

DL/T 1091 火力发电厂锅炉炉膛安全监控系统技术规程

3 术语和定义

GB 2900.46、DL/T 701 和 DL/T 711 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用，以下重复列出了 DL/T 711 的某些术语和定义。

3.1

额定负荷 rated power, P_0

制造商给定的汽轮机输出功率，机组在规定的终端参数，且不超过规定的寿命条件下经济运行。额定负荷也称额定出力、额定功率或满负荷。

3.2

额定转速 rated speed, n_0

在电网标准频率下的发电机组工作转速。

3.3

瞬时最高转速 maximum transient speed, n_{\max}

发电机组甩负荷后，在调节系统控制下的瞬时最高转速。若在额定转速甩去额定负荷时，为额定

瞬时最高转速；若在额定转速甩去最大负荷时，为最大瞬时最高转速。

3.4

危急遮断器设定转速 over-speed trip setting, n_w

为保证机组安全而调整或设定的危急遮断器动作的转速。

3.5

转速不等率 steady-state speed regulation, δ

汽轮机调节系统静态特性曲线的斜率，通常以对应空负荷与额定负荷的转速差值与额定转速的百分比来表示。

3.6

同步器 synchronizer

全液压调节系统中用于一定范围内平移调节系统静态特性曲线以调整机组转速或改变负荷的装置。

3.7

汽轮机紧急跳闸系统 emergency trip system, ETS

汽轮机运行过程中，出现可能危及设备安全的异常时，停止汽轮机运行的保护系统。

3.8

数字电液调节系统 digital electro-hydraulic control system, DEH

按电气、液压原理设计，通过计算机实现控制逻辑的汽轮机调节、保安系统。

3.9

超速保护控制 over-speed protection control, OPC

一种抑制汽轮机超速的超驰控制功能。该功能触发后，立即抢断调节系统控制权，瞬时短暂关闭调节汽阀，复位后交回调节系统控制。触发 OPC 的条件有并网开关跳闸、转速超速至 103%、转速变化率（加速度）超限、负荷/功率不平衡或者它们的综合作用。

3.10

快速返回功能 fast cut back, FCB

当发电机组甩负荷时，使本机组不停运的一种控制措施。根据甩负荷后机组的不同运行要求，可分为带本机厂用电运行、机组维持空负荷额定转速运行和停机不停炉三种。本标准提及的 FCB 是发电机组甩负荷后带本机厂用电运行。

3.11

阀门快控 fast valving, FV

常称“快关”，是指当电网瞬间故障而使发电机大幅甩负荷时，快速关闭调节汽阀，减少机械和电气功率的明显不平衡。延时再次开启，以改善转子角速度的飞升和系统的暂态稳定，不致造成系统振荡。

3.12

常规法甩负荷试验 routine load rejection testing

发电机并网开关突然断开、主汽阀不关闭、机组与电网解列失去全部或部分负荷的情况下，测取转速变化的动态过渡过程，考核汽轮机调节系统转速控制特性的方法。

3.13

测功法甩负荷试验 load rejection testing by dynamometer method

在机组不与电网解列，通过瞬间关闭调节汽阀，测取发电机有功功率变化的动态过渡过程，计算后获得转速飞升曲线。

4 目的和要求

4.1 目的

甩负荷试验应是考核汽轮机调节系统的动态特性，测取动态过程有关参数的过渡过程曲线，验证

调节系统和超速保护控制系统 OPC 的品质，计算特征值。

4.2 要求

4.2.1 汽轮机甩负荷后超速保护应不动作，动态过程能迅速稳定。

4.2.2 机组及各配套辅机、附属设备和相关控制系统的设计应适应甩负荷工况。

5 试验通则

5.1 新投产或汽轮机调节系统经重大改造，或已投产但尚未进行甩负荷试验的机组，应进行甩负荷试验。

5.2 试验可按附录 A 选用测功法或常规法进行。选用原则应符合下列规定：

- a) 汽轮机调节系统的考核试验、首台新型汽轮机或调节系统改造后的机组，应采用常规法；
- b) 已获得汽轮发电机组轴系转子转动惯量，可采用测功法进行。

5.3 下列机组不宜进行甩负荷试验：

- a) 未设置旁路系统；
- b) 仅设置 5% 串级启动疏水系统；
- c) 配置不具备热备用功能的启动旁路系统；
- d) 甩负荷后汽轮机不能维持额定转速空转。

若特殊情况需要进行试验，试验目的应以验证汽轮发电机组调节系统防超速能力、测取相关数据计算特征值为宜。

5.4 下列两种情况应进行甩 100% 负荷试验：

- a) 设计有 FCB 功能的机组；
- b) 机组没有设计 FCB 功能，但电网或建设单位有特殊要求。

5.5 没有设计 FCB 功能、电网或建设单位也没有特殊要求的机组，可不进行甩 100% 负荷试验。

5.6 甩负荷试验宜在移交商业运行前完成，也可安排在移交商业运行后立即进行。

5.7 试验应取得电网调度的同意，并在调度安排下进行。

5.8 参加试验的各方，应对试验方法、标准等达成共识。

5.9 试验应成立领导组织机构和试验组织机构，明确试验总指挥。

5.10 试验主持方应结合机组的具体情况及制造商的要求，编写试验措施，并经过审批。处于建设期调试的机组，应经试运指挥部总指挥批准；已投入商业运行的机组，应经分管生产的副厂长/总工程师批准。

5.11 试验前主持方应进行技术和安全交底，检查确认各项预备性试验及试验条件，对暴露的问题提出处理意见。试验结束后应及时提交试验报告，试验报告编写的基本要求可参见附录 B。

5.12 甩负荷试验运行操作人员应按试验措施进行各项操作，如遇异常情况，按运行规程执行。

5.13 主机和 DEH 设备制造商应参加甩负荷试验，对试验提供技术指导服务。

5.14 试验用仪器、仪表的精度、频响特性和采样频率应能满足被测对象的需求。

5.15 甩负荷试验前，应核查确认 OPC 的设计功能及其与调节系统的逻辑关系，满足甩负荷试验的要求。典型机组 OPC 型式可参见附录 C。

5.16 甩负荷试验可根据机组的具体情况对设备的运行状态及参数的控制方法等做适当调整。

5.17 甩负荷试验应在机组稳定运行、回热系统全部投入的状态下进行。

5.18 试验可同时测取发电机励磁调节系统相关特性。测量方法和有关参数应满足 GB/T 7409.3 和 DL/T 843 的规定，参见附录 D。

5.19 部分热控自动调节在工况大幅变化时调节品质欠佳，结合机组的实际情况，可改为手动进行调节。

5.20 凝汽式、背压式汽轮机甩负荷试验，应按甩 50% 和 100% 额定负荷两级进行。当甩 50% 额定负荷

后，若第一次飞升转速超过 105%额定转速，则应中断试验，查明原因，具备条件后，重新进行 50%甩负荷试验。

5.21 可调整抽汽式汽轮机甩负荷试验，应先按凝汽工况进行，再进行带抽汽甩负荷试验。

5.22 燃气轮机或燃气-蒸汽联合循环机组甩负荷试验应按签订的合同、制造商提供的程序或相关标准进行，可参照附录 E 执行。

5.23 进口机组的甩负荷试验应按预先达成协议采用的标准/签订的合同/制造商规定执行，并和现场制造商代表商定后再进行。

6 试验记录与测量

6.1 甩负荷试验记录应来自分散控制系统（distributed control system, DCS）、就地记录和自动采集仪器。

6.2 主、辅机及附属设备重要监视项目和调整参数记录，视不同机组类型和具体特点而定。应包括转速、主蒸汽压力和温度、再热蒸汽压力和温度、调节级压力、高压缸排汽压力和温度、给水流量、汽包/汽水分离器水位、总风量、润滑油压力、燃料量等。

6.3 甩负荷前初始值、甩负荷过程中极值和甩负荷过程结束稳定值记录可见表 1。

表 1 参数记录汇总表

序 号	名 称	单 位	初始值	过程极值	稳定值	备 注
1						
2						
3						
4						
...						

6.4 自动采集仪记录的项目应至少包括：

- 并网开关跳闸信号；
- OPC 动作信号；
- 汽轮机转速；
- 调节汽阀以及参与调节的主汽阀阀位。

其余记录项目可根据机组的具体情况确定，采集机组有功功率、主蒸汽压力和温度、再热蒸汽压力和温度、调节级压力、抽汽止回阀阀位和控制油压力等信号。

6.5 通过自动采集仪测取的转速信号，其测量精度应为±0.03%及以上。若 DEH 测速卡件无法满足要求，宜通过直接测量来自汽轮机轴测速齿轮盘的脉冲信号进行。

6.6 自动采集仪宜采用 12 位以上 A/D 转换器实现，采样频率应不小于 500Hz。

7 试验条件

7.1 汽轮发电机组已经过满负荷运行考验，应符合 GB/T 5578、DL 5190.3 和 DL/T 892 等标准的规定。主机重要监视参数应在要求范围内，设备无缺陷，性能良好。

7.2 调节系统静态特性应符合 DL 5190.3、DL/T 711 和 DL/T 824 等标准的规定和制造商的要求。

7.3 DEH 调节品质良好，应符合 DL/T 824 和 DL/T 656 等标准的规定，应设有完善的甩负荷逻辑，电液伺服阀包括各类型电液转换器的性能符合要求。

7.4 汽轮机、主要辅机重要监视仪表，尤其是转速表应投入正常，指示正确，报警及记忆打印功能符

合要求。

- 7.5 高压启动油泵，交流、直流润滑油泵，DEH 控制油 EH 油泵，高压备用密封油泵及发电机密封油泵的连锁应动作正常。
- 7.6 机组保护连锁，主、辅设备的热工和电气连锁保护应校验正常、动作可靠。
- 7.7 DCS 性能良好，应符合 DL/T 1083 的规定，执行机构灵活，能满足甩负荷试验要求。
- 7.8 数据采集系统（data acquisition system, DAS）及事件顺序记录（sequence of event, SOE）应正常。
- 7.9 汽轮机调节系统 OPC 回路应经检验正常，OPC 触发、复位等设定的逻辑及参数，OPC 复位后 DEH 的给定值、目标值及 PID 控制参数，应满足甩负荷试验的要求。
- 7.10 主汽阀、调节汽阀严密性试验应合格。
- 7.11 保安系统动作应可靠，超速试验合格。ETS 动作应正常。
- 7.12 汽门活动试验，包括全行程活动试验和部分行程松动试验应正常。
- 7.13 液压执行机构蓄能器投用，压力应正常。
- 7.14 高、中压主汽阀、调节汽阀总关闭时间应合格。
- 7.15 主机润滑油和液压控制油油质合格，应符合 GB/T 7596、DL/T 571 的规定。
- 7.16 高、低压加热器保护试验应合格。
- 7.17 抽汽止回阀、高压缸排汽止回阀、高压缸通风阀、抽汽电动阀、本体疏水阀和排汽缸喷水阀等连锁动作应正确。各种止回阀应能迅速关闭且严密。
- 7.18 除氧器、汽动给水泵、主机及驱动给水泵汽轮机轴封汽源切换正常，备用汽源应能投入。
- 7.19 汽轮机旁路系统应处于热备用状态，快开、快关、保护动作正常，调节品质良好。
- 7.20 锅炉炉膛安全监控系统（furnace safety-guard supervisory system, FSSS）应符合 DL/T 1091 的规定。
- 7.21 总燃料跳闸（master fuel trip, MFT）试验，各连锁、保护试验应合格，动作可靠。
- 7.22 锅炉过热器和再热器安全阀、排大气压力释放阀（pressure control valve, PCV）、汽包紧急事故放水阀校验应合格。
- 7.23 锅炉过热器、再热器各级减温水阀的严密性应符合要求。
- 7.24 燃油系统和点火稳燃系统，或者微油点火装置、等离子点火装置应正常。
- 7.25 锅炉炉水循环泵应正常。
- 7.26 保安电源、柴油发电机自动投入功能及带负荷能力应正常，并置于备用位置。不间断电源（uninterruptible power supply, UPS）可靠、正常。
- 7.27 厂用电系统切换应正常、可靠。
- 7.28 直流电源系统应正常、可靠，有足够的容量，各级熔断器配置合理。
- 7.29 发电机过电压保护、发变组保护应校验准确，发电机并网开关、灭磁开关跳合良好，自动励磁调节器（automatic voltage regulator, AVR）经调整完毕，品质良好。
- 7.30 电网频率应保持在 $50\text{Hz} \pm 0.2\text{Hz}$ 以内。
- 7.31 试验用仪器、仪表应校验合格，并已接入系统，调试完毕。
- 7.32 汽水管道的布置及支吊架的设置应符合 DL/T 616 的规定，可承受甩负荷时对管道系统产生的冲击。
- 7.33 试验现场应备有足够的消防器材，消防系统应处于可用状态。道路畅通，安全通道设有明显标识，照明及事故照明良好。
- 7.34 现场安全保卫措施应落实，试验无关人员撤离现场。
- 7.35 通信设施齐全，应经调校确认可靠。
- 7.36 燃煤、油、压缩空气气源、辅助蒸汽汽源等公用系统应正常、可靠。
- 7.37 机组接入的电网、供热网应具备甩负荷条件。

7.38 对于可调整抽汽式供热机组，供热管道抽汽止回阀、快速关断截止阀应关闭迅速、严密，连锁动作可靠。

8 常规法甩负荷试验方法

8.1 试验组织及人员安排

8.1.1 整个试验应在试验总指挥的统一指挥下，按照试验措施及实施细则进行。

8.1.2 试验组织机构应由技术组、运行操作组、动态测试组和维护组组成，职责分工明确。

8.1.2.1 技术组对试验负全面责任，负责试验计划制订、条件确认、过程指挥和异常情况的决策处理。

8.1.2.2 运行操作组负责运行操作和事故处理，并协助试验主持方做好试验过程中参数记录工作。

8.1.2.3 动态测试组负责试验用仪器、仪表的接入、操作和 DCS 记录数据的获取。

8.1.2.4 维护组负责安全隔离、运行设备的现场监护等，并协助做好相关测试工作。

8.1.3 参加试验人员应熟知试验措施和实施细则，并按要求做好准备工作。

8.1.4 自动采集仪和记录人员准备工作就绪，预先设置 DAS 相关参数，准备记录表格。

8.1.5 试验人员应按试验要求准备就绪。

8.1.6 应设专人监视转速的变化，并负责远方、就地打闸的应急处理。

8.1.7 甩负荷试验后，运行人员应负责各主机、辅机及附属设备运行参数和状况的调整。

8.2 甩负荷前机组的运行状态

8.2.1 汽轮机

8.2.1.1 辅助蒸汽系统、轴封、除氧器和汽动给水泵汽源应保持合理运行方式。

8.2.1.2 高、低压加热器应维持正常运行。

8.2.1.3 高、低压旁路控制方式应按机组实际进行设置，确认旁路喷水隔离阀已经开启。并于甩负荷试验前 1h，稍开旁路对其管道进行暖管。根据系统配置及机、炉运行状态决定旁路系统是否置“自动”状态。

8.2.1.4 疏水扩容器减温水、低压缸喷水应处于“自动”状态。

8.2.1.5 高、低压加热器，凝汽器，除氧器应调整至合理水位，调整方式置“自动”。

8.2.1.6 给水泵组、凝结水泵组和精处理系统应以合理方式运行。

8.2.1.7 应全面检查并记录汽轮机重要参数，确认处于正常的范围内。

8.2.1.8 核查汽轮机相关连锁保护状态，应满足甩负荷试验要求。

8.2.2 锅炉

8.2.2.1 主、再热蒸汽温度、压力、汽包水位应调整至试验要求，锅炉运行正常。

8.2.2.2 核查锅炉相关连锁保护状态应满足甩负荷试验要求。

8.2.2.3 甩负荷试验前，宜采取锅炉稳燃措施，满足甩负荷试验要求。

8.2.2.4 检查 PCV 阀应处于正常备用状态。

8.2.3 电气

8.2.3.1 确认/调整厂用电系统应在合理运行方式。

8.2.3.2 确认发电机过电压保护应正常投入，AVR 处于“自动”，可根据电网要求调整发电机无功功率。

8.2.3.3 应做好发电机有关参数的快速记录和人员准备工作。

8.2.3.4 核查电气相关连锁保护状态应满足甩负荷试验要求。

8.2.3.5 宜预先准备好重新并网的操作票。

8.2.4 热控

应确认相关组态逻辑、连锁保护状态已满足甩负荷试验要求。

8.3 试验程序

- 8.3.1 将机组负荷调整至试验目标值，参数应符合试验要求，维持稳定运行。
- 8.3.2 试验总指挥应对现场通信设备进行核对，保证联络畅通。
- 8.3.3 各专业应进行全面检查，确认机组运行状态稳定，满足甩负荷条件，及时向试验总指挥报告。
- 8.3.4 应由试验总指挥下令，通过值长向电网调度申请甩负荷，批准之后，告知试验总指挥。
- 8.3.5 试验总指挥宜以倒计时的方式，以“10、9…1、甩！”发令，当发到“甩”口令时，由指定操作人员断开发电机并网开关，机组与电网解列甩去负荷。期间试验人员按发令间隔次序进行相应操作。
- 8.3.6 试验过程中，试验人员如发现紧急情况，应发出中止请求，试验总指挥可决定中止试验。
- 8.3.7 具备FCB功能的机组，FCB试验可与甩负荷试验同时进行，见附录F。
- 8.3.8 甩负荷后，参加试验人员应按措施进行相应的操作和记录。
- 8.3.9 测试完毕，机组参数稳定，应由总指挥宣布试验结束，恢复机组正常状态。

8.4 试验合格标准

汽轮机（燃气轮机）调节系统动态特性良好，超速保护应不动作，动态过程应能迅速稳定。

9 结果整理及计算

9.1 自动记录数据

应根据自动采集仪记录的曲线（见图1），测取有关数据，包括初始转速 n_0 、第一次飞升转速 $n_{\max 1}$ 、瞬时最高转速 n_{\max} 、稳定转速 n_δ 、调节汽阀关闭后的转子继续飞升转速 Δn_r 、转速波动值 Δn_δ 、转速滞后时间 t_n 、达到最高转速的时间 t_{\max} 、稳定时间 t_δ 、调节汽阀延迟时间 t_1 、调节汽阀自身关闭时间 t_2 等。

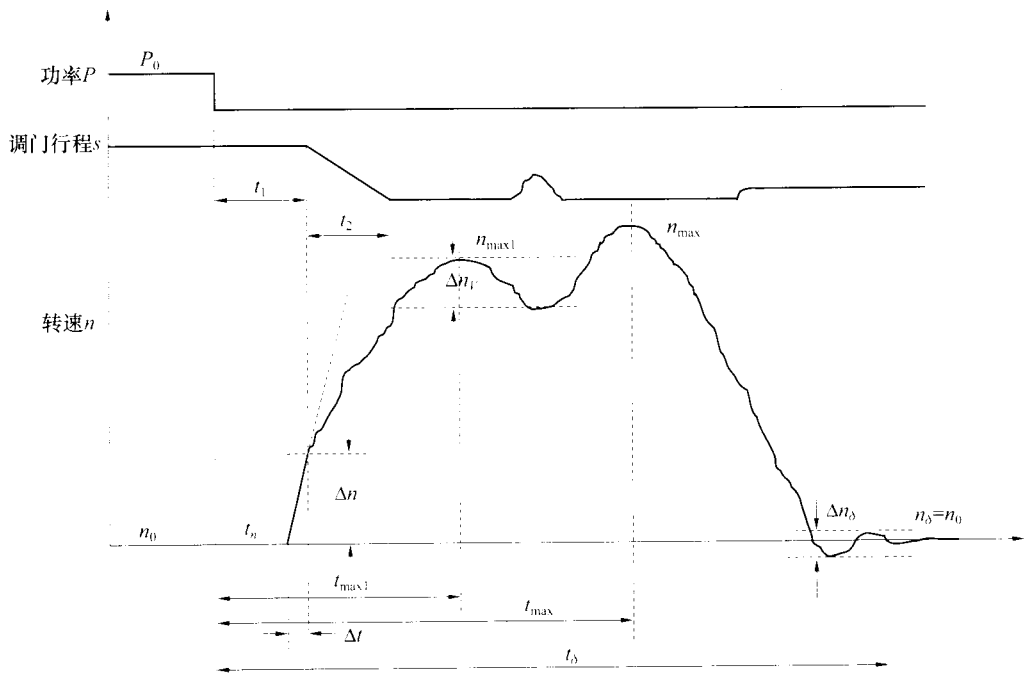


图1 同步器自动复位的全液压型调节系统/电液型调节系统DEH带二次飞升的常规法甩负荷试验记录曲线示意图

可将自动记录曲线测取的有关动态参数列于表 2 中。

表 2 甩负荷试验自动记录动态参数汇总表

序号	名 称	单 位	甩 50%负荷	甩 100%负荷	备 注
1					
2					
3					
4					
...					

9.2 特征值计算

9.2.1 同步器不自动复位的全液压调节系统

同步器不自动复位的全液压调节系统甩负荷试验自动记录曲线示意见图 2。相关特征值可计算如下：

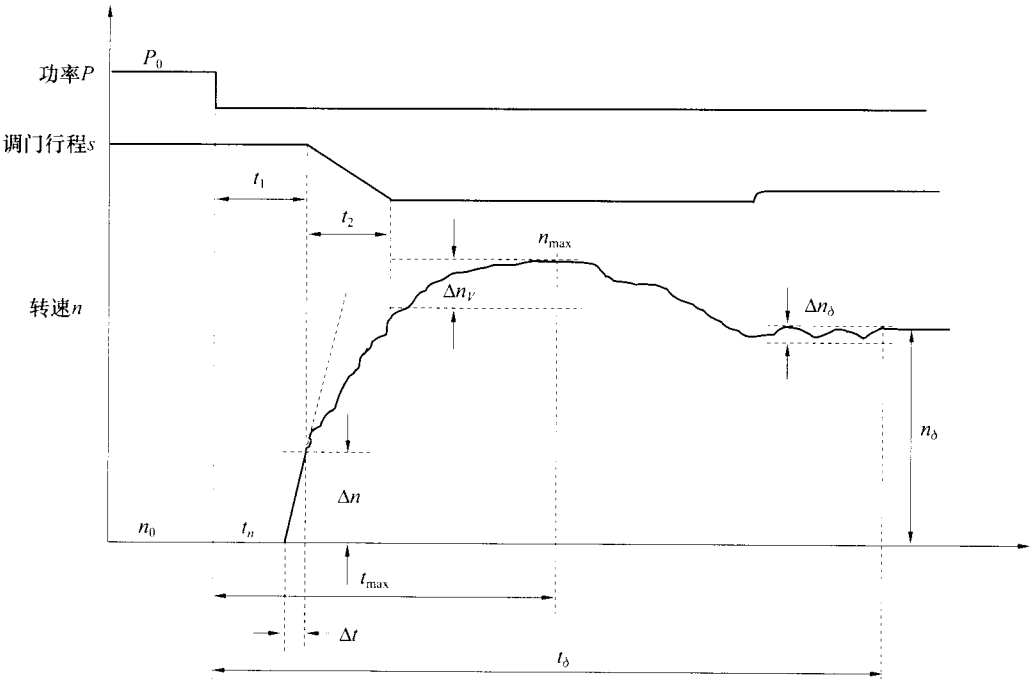


图 2 同步器不自动复位的全液压调节系统甩负荷试验自动记录曲线示意图

a) 转速动态超调量 φ (%) 计算见式 (1)。

$$\varphi = \frac{n_{\max} - n_0}{n_0} \times 100\% \tag{1}$$

b) 转子初始（最大）加速度 a_n [r/(min · s)], 计算方法参见附录 G，计算见式 (2)。

$$a_n = \frac{\Delta n}{\Delta t} \tag{2}$$

c) 转子时间常数 T_a (s) 计算见式 (3)。

$$T_a = \frac{n_0}{a_n} \tag{3}$$

d) 转子转动惯量 J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) 计算见式 (4)。

$$J = 1000 \frac{T_a P_0}{\omega_0^2 \eta} \tag{4}$$

式中：

- η ——发电机效率，%；
- P_0 ——机组功率，kW；
- ω_0 ——初始转速角速度，rad/s。

e) 蒸汽容积时间常数 T_i (s) 计算见式 (5)。

$$T_i = \frac{\Delta n_i}{a_n} \tag{5}$$

f) 转速不等率 δ (%) 计算见式 (6)。

$$\delta = \frac{n_\delta - n_0}{n_0} \times 100\% \tag{6}$$

g) 动静差比 β (无量纲) 计算见式 (7)。

$$\beta = \frac{n_{\max} - n_0}{n_\delta - n_0} \tag{7}$$

h) 稳定时间 t_δ (s)，甩负荷后，当转速趋于稳定值 n_δ 且其波动 Δn_δ 应达到式 (8) 的时间，即

$$\Delta n_\delta < \frac{\delta n_0}{20} \tag{8}$$

9.2.2 同步器自动复位的全液压调节系统或电液型调节系统 DEH

同步器自动复位的全液压调节系统或电液型调节系统 DEH 甩负荷试验自动记录曲线示意图 3，相关特征值可计算如下：

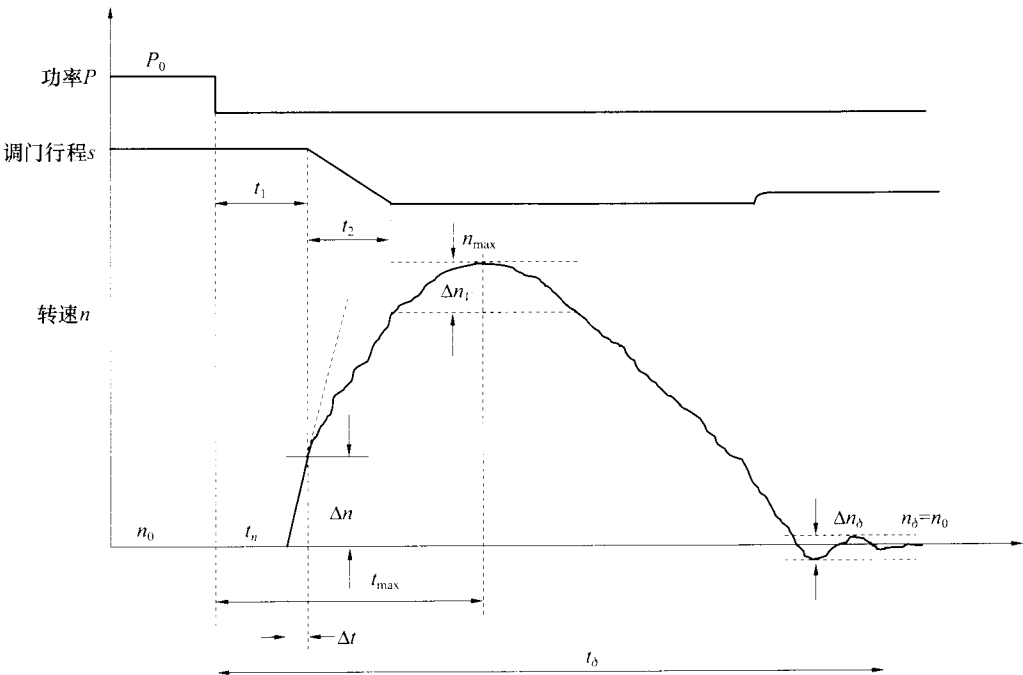


图 3 同步器自动复位的全液压调节系统或电液型调节系统 DEH 甩负荷试验自动记录曲线示意图

a) 转速动态超调量 $\varphi(\%)$ 计算见式 (9)。

$$\varphi = \frac{n_{\max} - n_0}{n_0} \times 100\% \quad (9)$$

b) 转子初始 (最大) 加速度 $a_n[\text{r}/(\text{min} \cdot \text{s})]$, 计算方法参见附录 G, 计算见式 (10)。

$$a_n = \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad (10)$$

c) 转子时间常数 $T_a(\text{s})$ 计算见式 (11)。

$$T_a = \frac{n_0}{a_n} \quad (11)$$

d) 转子转动惯量 $J(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ 计算见式 (12)。

$$J = 1000 \frac{T_a P_0}{\omega_0^2 \eta} \quad (12)$$

式中

η ——发电机效率, %;

P_0 ——机组功率, kW;

ω_0 ——初始转速角速度, rad/s。

e) 蒸汽容积时间常数 $T_V(\text{s})$ 计算见式 (13)。

$$T_V = \frac{\Delta n_V}{a_n} \quad (13)$$

f) 稳定时间 $t_\delta(\text{s})$, 甩负荷后, 当转速趋于稳定值 n_0 且其波动值 Δn_δ 应达到式 (14) 的时间。

$$\Delta n_\delta < \frac{\delta n_0}{20} \quad (14)$$

10 安全措施及注意事项

10.1 机组甩负荷后, 应进行下列检查:

- 汽轮机旁路系统应无水冲击, 支吊架、管道无异常;
- OPC 动作应正常;
- 主、辅机重要监视参数, 如主、再热蒸汽压力和温度, 高压缸排汽温度, 汽包/汽水分离器水位, 除氧器、凝汽器水位、压力等, 应在允许范围内;
- 抽汽止回阀应关闭;
- 汽轮机本体及抽汽系统疏水阀动作应正常;
- 中压缸启动方式的机组, 应确认高压缸通风阀处于“开启”;
- 给水泵组、凝结水泵进/出口压力、进口滤网压差应在允许范围内;
- 甩负荷安全措施中需要检查的其他项目。

10.2 若转速飞升使危急遮断器或超速保护动作, 应及时进行下列操作和检查:

- 全液压调节系统, 应将同步器摇至零位;
- 高、中压主汽阀和调节汽阀、抽汽止回阀、供热抽汽止回阀、高压缸排汽止回阀应处于关闭状态;
- 待机组转速降至复位转速时应及时复位;
- 机组转速下降至 2900r/min 时, 启动有关油泵。

10.3 若出现下列情况, 应立即打闸停机:

- 汽轮机各项参数达到主保护动作值而保护未动。

- b) 转速达 3300r/min 而超速保护未动作。打闸后若转速仍继续上升，则应采取一切切断汽源的措施，破坏真空紧急停机。
- c) 调节系统发生长时间大幅摆动，不能有效控制转速，OPC 频繁动作。
- d) 主、再热蒸汽温度在 10min 内突然下降 50℃，或降低至规程要求下限值。
- e) 轴承盖振动突然增加 0.05mm。
- f) 高压外缸上、下缸温差超过 50℃，高压内缸上、下缸温差超过 35℃。
- g) 运行规程规定的其他打闸情况。

10.4 全液压型调节系统，机组甩负荷后调节系统动态过渡过程尚未结束时，不得操作同步器，转速将稳定在同步器对应负荷位置转速。

10.5 全液压式可调整抽汽供热机组，动态过渡过程尚未结束时，不得操作调压器。

10.6 数字电液调节系统机组，甩负荷动态过渡过程中，不得更改调节系统的控制参数和设定目标转速。

10.7 应视给水流量按试验方案维持合理给水泵组运行，观察给水控制情况，确保泵组安全。对直流锅炉，应维持省煤器入口给水流量满足需要。

10.8 严密监视发电机端电压，发生过压应立即手动灭磁。

10.9 直流锅炉应维持合适煤水比，控制汽水分离器出口蒸汽过热度，维持控制过热器出口蒸汽温度稳定。

10.10 循环流化床锅炉 (circulating fluidized bed boiler, CFB) 燃料量的控制应考虑锅炉的热惯性，应按设备的具体特点，控制流化风量，调整床压，结合燃料量的调整维持床温，防止锅炉超压、超温。

10.11 甩 100% 负荷后，应迅速打开 PCV 阀，观察主蒸汽压力无上升趋势后关闭。

10.12 配套设计烟气脱硫/脱硝的机组，应结合具体的工艺系统和控制进行调整。

附 录 A
(规范性附录)
汽轮机测功法甩负荷试验

A.1 目的和范围

A.1.1 在机组不与电网解列，突然关闭进汽阀的情况下，测取发电机有功功率变化的过渡过程，经计算获得转速的飞升曲线。

A.1.2 用于新投产机组的验收试验，机组 A、B 级检修前后的校核试验。

A.2 试验条件

A.2.1 应已取得该型机组转子实测转动惯量，或制造商提供了该试验机组设计转动惯量值。

A.2.2 调节系统静态特性应符合要求。

A.2.3 保安系统应动作可靠，危急遮断器/电气超速保护设定转速值合格，各项主机保护试验合格，动作可靠。就地及远方停机装置应动作正常。

A.2.4 汽轮机、主要辅机监视仪表系统应正常，指示正确，报警及记忆打印功能符合要求。

A.2.5 高压启动油泵，交、直流润滑油泵连锁动作应正常。

A.2.6 数据采集系统及事件顺序记录应正常。

A.2.7 机组保护连锁，主、辅设备的热工和电气连锁保护应校验正常、动作可靠。

A.2.8 汽轮机调节系统 OPC 回路应正常。

A.2.9 调节系统液压执行机构蓄能器应投用，压力正常。

A.2.10 调节汽阀关闭时间应符合要求。

A.2.11 主机润滑油和液压控制油油质应合格。

A.2.12 高、低压加热器保护试验应合格。抽汽止回阀、高压缸排汽止回阀、抽汽电动阀、本体疏水阀和排汽缸喷水阀等连锁动作正确。

A.2.13 汽轮机旁路系统应处于热备用状态，手动快开、关闭正常。

A.2.14 锅炉过热器和再热器安全阀、PCV 阀应校验合格。

A.2.15 MFT 试验，各连锁、保护试验应合格，动作可靠。

A.2.16 保安电源、柴油发电机自动投入功能及带负荷能力应正常，并置于备用位置。UPS 可靠、正常。

A.2.17 其他辅助设备应运行正常，不存在影响试验进行的隐患。

A.2.18 电网频率保持在 $50\text{Hz} \pm 0.2\text{Hz}$ 以内。应取得电网调度的同意，并在调度安排下进行。

A.2.19 试验现场备有足够的消防器材，消防系统应处于可用状态。道路畅通，安全通道设有明显标识，照明（包括事故照明）良好。

A.2.20 现场安全保卫措施应已落实，试验无关人员撤离现场。

A.2.21 通信设施齐全，应经调校确认可靠。

A.2.22 燃煤、油、压缩空气气源、辅助蒸汽汽源等公用系统应正常、可靠。

A.2.23 机组接入的电网、供热网应具备进行甩负荷条件。

A.3 自动采集仪测量要求

A.3.1 自动采集仪记录的项目至少应包括：

a) 试验起始信号；

- b) 调节汽阀、主汽阀阀位;
- c) 发电机有功功率。

其余记录项目可根据机组的具体情况确定。

A.3.2 自动采集仪应采用 12 位以上 A/D 转换器实现, 采样频率不小于 500Hz。

A.3.3 发电机有功功率的测量精度应达 $\pm 0.2\%$, 时间常数应小于 50ms。当采用功率变送器时, 宜选用不自带有源滤波的功率变送器。也可通过发电机的电流互感器 (current transformer, CT)、电压互感器 (phase voltage transformers, PT) 测量其电流 I 、电压 U 以及相角差角 α , 通过向量计算的方法求出有功功率 P 。

A.4 试验程序

A.4.1 机组启动前, 应将试验用仪器、仪表校验接入系统, 调试完毕, 确保可靠。

A.4.2 应记录主、辅机及附属设备重要监视项目和调整参数之甩负荷前初始值、甩负荷过程中极值和甩负荷过程结束稳定值。

A.4.3 机组在带负荷不与电网解列的条件下, 应采取措施确保调节汽阀和抽汽止回阀可以关闭。

A.4.4 可视情况对 OPC 动作后的延时时间进行更改, 保证调节汽阀持续关闭时间足以使发电机负荷到零并出现逆功率。

A.4.5 试验可不分级, 直接进行甩 100%额定负荷试验。

A.4.6 试验应在机组额定参数、回热系统全部投入的正常方式进行。可调整抽汽式汽轮机, 应投入正常抽汽量。

A.4.7 宜模拟信号触发 OPC 动作, 发出试验起始指令, 迅速关闭高、中压调节汽阀, 抽汽止回阀。

A.4.8 锅炉应迅速降低负荷与该工况适应。

A.4.9 应确认发电机负荷到零并出现逆功率时, 待逆功率保护动作关闭主汽阀, 联跳发电机并网开关, 或 4s~6s 后手动打闸, 严禁带负荷解列。

A.4.10 测试完毕, 应由试验总指挥宣布试验结束, 恢复机组正常状态。

A.4.11 试验中的其他操作和安全事项, 可按常规法和有关运行规程执行。

A.5 数据整理及计算

A.5.1 根据试验获取的发电机有功功率过渡曲线, 可按式 (A.1) 对有功功率进行数值积分计算, 间接得出在时间 t 转子转速 n_t , 绘制转速飞升曲线, 见图 A.1。

$$n_t = n + \Delta n_t = n + (30.42/J) \cdot \frac{n_0}{n} \cdot \frac{P_0}{P} \int_{t_0}^t P(t) \cdot dt \quad (\text{A.1})$$

式中:

t_0 ——试验初始时间, 并网开关掉闸瞬间时间, s;

t ——转速飞升过程时间, s;

J ——转子转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

P ——试验起始功率, kW;

P_0 ——额定功率, kW;

n ——试验起始转速, r/min;

n_0 ——额定转速, r/min;

n_t ——在时间 t 的计算转速, r/min。

注: 当发电机有功功率降到零时, $t=t_1$, 对应转子最高飞升转速。

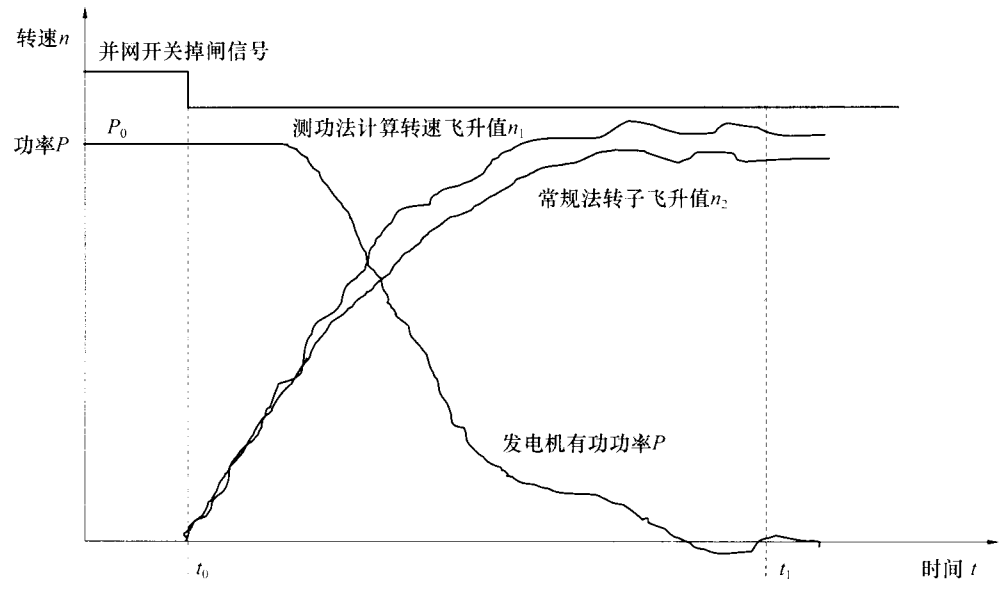


图 A.1 测功法甩负荷试验发电机有功功率实测曲线与飞升转速计算曲线示意图

A.5.2 测功法甩负荷试验转子计算转速飞升值 n_1 一般高于常规法转子实际飞升值 n_2 ，可按 DL/T 711 进行修正。

附录 B

(资料性附录)

甩负荷试验报告编写基本要求

B.1 基本原则

试验报告应由试验主持方负责编写，应符合有关文件管理、计量要求和质量保证体系。

B.2 试验报告内容

B.2.1 概述

应简要说明试验的背景，可介绍试验机组、委托方、承担方等的概况；试验性质是考核试验还是验收试验；试验方法采用的是常规法还是测功法；试验过程和结论，问题与处理等。

B.2.2 试验目的及范围

应说明试验进行的主要目的，是考核调节系统的动态特性，还是验证机组对甩负荷工况的适应性，说明试验涉及的系统。

B.2.3 设备简介

机、电、炉设备的型式、汽轮机调节保安系统的类型、动作原理，热力系统简述。

B.2.4 试验依据的标准

列出试验中实际采用的有关标准、规定。

B.2.5 测量用仪器仪表

测点一次元件位置、前置器、自动采集仪接入方式，测量仪器的精度、量程、频率特性及校验状况。

B.2.6 试验条件

试验前的准备工作，机组甩负荷前的起动、运行方式，预备性试验如汽门关闭时间测试、活动试验、转速提升试验、静态预测瞬时最高转速及其结果等，对试验条件进行评估。应描述甩负荷试验进行时的主要参数。

B.2.7 试验结果及分析

参数调整过程、转速飞升曲线描述，汇总原始记录表或图，记录结果的计算分析并说明计算的原理和过程，必要时，可进行误差分析和说明。

B.2.8 结论

试验结果与有关标准进行比较，做出评价和结论，阐述存在的问题，提出建议。

附录 C (资料性附录)

汽轮机调节系统超速保护控制 OPC 的典型型式

C.1 概述

大容量汽轮机组转子具有相对较小的转动惯量和转子飞升时间常数，发电机并网开关断开时，为抑制转速的过度飞升引入了超速保护控制 OPC，它立即强行关闭调节汽阀，复位后交回调节系统控制。我国首批引进型机组，提出采用并网开关跳闸及转速 103% 触发 OPC，得到广泛认同，许多机组 DEH 借鉴了这一思想。

OPC 的实现普遍采用了两位控制方式，使调节汽阀在甩负荷后关闭速度达到很高的水平。触发 OPC 的条件更加完善，除并网开关跳闸及转速 103% 触发 OPC 外，还有负荷水平、转速值、转速变化率、负荷功率不平衡及它们的综合。

不同 DEH 设计 OPC 动作后有不同的复位策略，复位后交由 DEH 按 PID 参数从当前转速值恢复同步目标转速。

C.2 典型 OPC 型式

C.2.1 微分器

在液压调节系统中引入附加加速度信号，设计随动活塞运动落后于主滑阀，利用其重叠度 Δ ，达到控制调节汽阀快速关闭的目的，传递函数为

$$N(s) = 1 - \frac{1}{T_2 s + 1} = \frac{T_2 s}{T_2 s + 1} \quad (\text{C.1})$$

式 (C.1) 中 T_2 为时间常数，由于是一个实际微分环节，故而称微分器，是采用加速度限制方法实现 OPC 的典型。

C.2.2 发电机并网开关跳闸及超速至 103% 额定转速触发

采用两位控制方式实现。当转速超过额定转速 103%，或在 30% 额定负荷以上发电机并网开关跳闸，OPC 动作，通过 OPC 电磁阀强行迅速关闭调节汽阀，经 2.5s~8s 延时，且转速低于 3090r/min (或 3060r/min)，OPC 复位。

C.2.3 超加速度保护和负荷/功率不平衡

C.2.3.1 汽轮机的转速上升到额定转速的 102%，即 3060r/min，且测算出的升速率也超过 57.5r/(min·s)，OPC 触发，快速关闭调节汽阀。转速降回到 3015r/min 以下，OPC 复位。

C.2.3.2 任何时刻检测或计算在 10ms 内代表负荷的发电机定子电流与额定电流的百分比，与代表汽轮机机械功率的中压联合汽阀出口压力与额定压力的百分比出现 40% 及以上的偏差，OPC 触发，在可调的时间范围如 2s~5s 后差值仍未消失则复位。

C.2.4 负荷/功率不平衡和转速频差信号

C.2.4.1 机组运行参数进入图 C.1 阴影区 OPC 将动作：

- a) 甩负荷时，汽轮机中压缸进汽压力的变化滞后发电机电流变化，两者相差 60% 时；
- b) 甩负荷转速达额定转速的 107%；
- c) 在以上 2 种边界状态中间的阴影区域。当返回非阴影区后，OPC 复位。

C.2.4.2 该型 OPC 设计空负荷运行时，仅当转速超过 107% 额定转速动作，甩 25% 额定负荷不动作；甩 50% 额定负荷时，转速飞升至相对应数值时动作；甩 75% 以上负荷，OPC 立即动作；带 60% 以上负

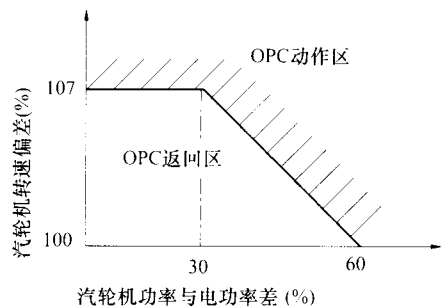


图 C.1 负荷/功率不平衡和转速频差信号综合的 OPC

荷出现功率不平衡，即使并网开关没有跳闸，OPC 也将动作。由于引入负荷/功率不平衡，它综合了阀门快控 FV 的特色。

附 录 D

(资料性附录)

汽轮发电机组甩负荷试验励磁调节系统要求及发电机电压静差率和电压调差率测量

D.1 甩负荷试验发电机励磁调节系统要求

在额定功率因数下,当发电机突然甩额定负荷后,发电机电压超调量不大于 15%额定值,振荡次数不超过 3 次,调节时间不大于 10s。

D.2 甩负荷发电机电压静差率和电压调差率测量

D.2.1 电压静差率测定

D.2.1.1 方法 1: 在额定负荷、无功电流补偿率为零的情况下测得机端电压 U_1 和给定值 U_{REF1} 后,在发电机空载试验中相同调节器增益下测量的给定值 U_{REF1} 对应的机端电压 U_0 ,按式 (D.1) 计算电压静差率 ε ,即

$$\varepsilon = \frac{U_0 - U_1}{U_N} \times 100\% \quad (D.1)$$

式中:

U_1 ——额定负荷下发电机电压, kV;

U_0 ——相同给定值下的发电机空载电压, kV;

U_N ——发电机额定电压, kV。

D.2.1.2 方法 2: 机组甩负荷试验时置无功电流补偿率为零,保持给定值不变,甩额定负荷,测量甩负荷前的发电机端电压 U_1 和甩负荷后的发电机端电压 U_0 ,然后按式 (D.1) 计算电压静差率。

D.2.2 电压调差率测量

D.2.2.1 方法 1: 保持给定值不变,设置无功电流补偿率,在功率因数为零情况下,甩 50%~100%额定无功功率,应测量甩负荷前后发电机端电压和无功电流值,按式 (D.2) 计算电压调差率 D ,即

$$D = \frac{U_0 - U_1}{U_N} \times \frac{I_N}{I_Q} \times 100\% \quad (D.2)$$

式中:

U_1 、 U_0 ——甩负荷前后的机端电压, kV;

I_Q 、 I_N ——甩前无功电流值和额定定子电流值, A;

U_N ——发电机额定电压, kV。

D.2.2.2 方法 2: 在功率因数为零、50%~100%额定无功功率负荷下测得机端电压 U_1 和给定值 U_{REF1} 后,在发电机空载试验中相同调节器增益下测量的 U_{REF1} 对应的机端电压 U_0 ,然后按式 (D.2) 计算电压调差率。

附 录 E
(资料性附录)

燃气轮机及燃气-蒸汽联合循环机组甩负荷试验

- E.1** 测功法甩负荷试验不适用于燃气轮机及燃气-蒸汽联合循环机组。
- E.2** 对于燃用重油、原油和轻油的燃机，要求燃油截止阀严密性试验应合格，燃油三通阀和燃油泵旁通阀阀杆无卡涩。
- E.3** 对于燃用液态天然气 (liquefied natural gas, LNG) 的机组，除满足相关条件外，还应确认调压站满足甩负荷的基本条件。
- E.4** 试验应在燃用设计燃料，保护和自动控制全部投入正常运行工况下进行。不得在两种燃料混合的方式进行甩负荷试验。
- E.5** 设计有补汽的汽轮机，补汽阀关闭的速度及其严密性应满足要求。
- E.6** 带有旁通烟囱的机组，要求烟气切换挡板门应可靠、灵活，经检验，相关控制和保护完好。
- E.7** 正常运行燃用原油/重油的燃机，轻、重油的切换应正常、可靠。
- E.8** 对于燃气轮机及单轴布置联合循环机组，甩负荷后要求燃机有关参数不超限制值使机组跳闸，维持空载在额定转速下稳定运行；分轴布置联合循环机组，燃气轮机、汽轮机甩负荷后的运行方式，按机组的实际情况决定，余热锅炉不应超温、超压。
- E.9** 对于分轴布置联合循环机组，汽轮机与燃气轮机的甩负荷试验应分别进行。汽轮机可按本标准相关条款执行。
- E.10** 联合循环机组相关连锁保护，主、辅设备运行工况及相应的控制应与甩负荷工况适应。
- E.11** 试验前，应对燃气轮机调节系统中加速控制环节、燃料及空气量控制系统的执行机构进行检查确认，并在静止状态进行模拟试验。
- E.12** 甩负荷后，燃气轮机燃烧室燃烧应稳定，进入燃烧室的燃料量能迅速稳定在对应额定转速空载值，同时关小压气机入口可转导叶 (inlet guide vane, IGV) 开度，维持进入压气机空气量与之适应。
- E.13** 联合循环机组甩负荷过程中自动采集仪器记录的项目还应包括燃气轮机燃料流量及相关控制阀，汽轮机高、中 (低) 压汽阀阀位等。
- E.14** 主、辅机及附属设备重要监视项目和调整参数记录，视不同机组类型和具体特点而定。应包括转速、压气机排气压力、燃机排气温度及其离散度、燃烧室旁通阀、余热锅炉汽包压力等。
- E.15** 燃气轮机转子转动惯量的计算应考虑压气机耗功、燃机做功因素的影响，单轴布置的联合循环机组，还需考虑汽轮机的耗功，具体按制造商提供相关的数据及公式进行。

附录 F
(规范性附录)
FCB 试验

- F.1 设计具有快速返回 (FCB) 功能的机组, 甩负荷试验可与 FCB 试验结合进行, 验证机组带厂用电持续运行的要求。
- F.2 FCB 试验前, 应确认设备配置、系统和 DCS 控制功能满足 FCB 功能要求。
- F.3 厂用电系统切换方式及相应的连锁保护应与 FCB 工况适应, 厂用电切换回路应可靠。
- F.4 汽轮机旁路阀在厂用电失去时应具备可靠的自动关闭功能。
- F.5 试验前还应检查 OPC 逻辑与设定值, 应与带厂用电孤岛运行方式适应。
- F.6 FCB 试验的条件、方法、安全措施及注意事项, 可按常规法甩负荷。
- F.7 进行 FCB 试验时, 不应采取临时措施及人工干预。
- F.8 机组实现 FCB 后, 不得对 DEH 调节控制参数或设定值做出更改。
- F.9 FCB 后, 除按常规法甩负荷试验检查项目进行检查外, 还应检查机组的频率变化对重要辅机的影响。
- F.10 频率超限但电动机高、低频保护未动作, 应立即打闸停机。
- F.11 机组 FCB 后带厂用电持续运行的时间按汽轮机制造商要求执行。

示例: 某 900MW 超临界机组 FCB 试验转速飞升过程曲线见图 F.1。

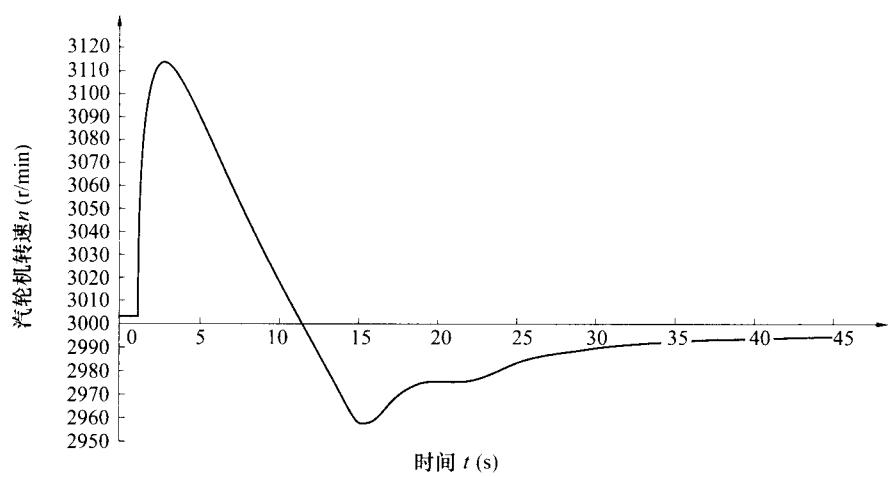


图 F.1 某 900MW 超临界机组 FCB 试验转速飞升过程曲线

附 录 G

(资料性附录)

甩负荷试验汽轮发电机转子转动惯量 J 计算方法

G.1 转子转动惯量 J 测取原理

G.1.1 汽轮发电机刚性转子绕轴转动的运动微分方程

汽轮发电机刚性转子绕轴转动的运动微分方程见式 (G.1)。

$$\sum M_i = M_d - \sum_{i=1}^n M_{r(i)} = J \frac{d^2\theta}{dt^2} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (G.1)$$

式中:

$\sum M_i$ ——作用于转子的合力矩;

$\sum_{i=1}^n M_{r(i)}$ ——各项阻力矩之和;

M_d ——汽轮机驱动力矩;

J ——转子的转动惯量;

θ ——转子旋转的角度;

ω ——转子旋转的角速度。

G.1.2 转子转动惯量计算公式

忽略各项阻力矩 $\sum_{i=1}^n M_{r(i)}$, 角速度 ω 、汽轮机机械轴功率 $P_T(t)$ 和发电机电气功率 $P_G(t)$ 之间关系见式 (G.2)。

$$P_T(t) = \sum M_i \omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad \omega = P_G(t) / \eta_G \quad (G.2)$$

式中:

η_G ——发电机的效率, %。

考虑到 $\omega = 2\pi n$, 最后得到转子的转动惯量见式 (G.3)。

$$J = \frac{P_{G0}}{\left(\frac{\pi}{30}\right)^2 n_0 \frac{dn}{dt} \eta_G} \quad (G.3)$$

式中:

n ——转子转速, 下标 0 表示初始值。

G.2 计算转子转动惯量存在的问题

G.2.1 $\frac{dn}{dt}$ 需从转子的飞升曲线上获取, 在转速飞升曲线初始段手工划切线求取 $\frac{dn}{dt}$ 将带来很大误差;

对于采用计算机数字测量技术, $\frac{dn}{dt}$ 可以采用在时刻 t 点的差分 $\frac{\Delta n}{\Delta t}$ 代替。从式 (G.3) 看到, $\frac{\Delta n}{\Delta t} / \frac{dn}{dt}$ 位于算式的分母, 也将带来不可忽视的误差。

G.2.2 甩负荷后采用高速、高精度测量仪器采集到的转子转速飞升过程曲线并非光滑, 不可避免地含有噪声的同时, 转子出现的“半速涡动”对转速测量产生干扰。

G.3 甩负荷转子飞升过程

在超速保护控制系统 OPC 介入情况下，甩负荷后转子的飞升可分为三个阶段：

- a) 发电机并网开关断开后，OPC 动作存在滞后，调节汽阀尚未开始关闭，此时蒸汽流量 Q 保持不变，转速 n 按接近线性规律升速，升速率 $\frac{dn}{dt}$ 近似常数。
- b) 调节汽阀开始关闭直至全关，在阀门严密的情况下，汽轮机进汽流量 Q 逐渐减少直至 0。相应地，进汽所做的功逐渐减小，随着进汽的减小和中间容积蒸汽压力的降低，机组有害容积包括各导汽管、汽缸和抽汽管道所存蒸汽的作功能力逐渐显现，在此阶段，转子的升速 $\frac{dn}{dt}$ 逐渐减缓。
- c) 各调节汽阀已经关闭，有害容积的剩余蒸汽继续做功，反映了蒸汽容积时间常数 T_V 的大小，随着这部分蒸汽的衰减，升速率 $\frac{dn}{dt}$ 将越来越小，当剩余蒸汽的作功恰好等于汽轮发电机各项

损失之和时，转子的动能不再增加，加速度 $\frac{dn}{dt}=0$ ，转子的转速 n 达到其最高飞升转速 n_{\max} 。

G.4 转子转动惯量 J 精确计算方法

计算转子初始（最大）加速度 a_n ，应对转子实测飞升转速 $n_i(t_i)$ 序列首先进行时域内 2 点邻近点平均（adjacent averaging smothing）或频域快速傅立叶变换（fast fourier transform filter, FFT）滤波（平滑）处理（见图 G.1），再对处理后调节汽阀延迟关闭时间范围内的 w 个数按转速线性拟合

$n_i(t_i)=at_i+b$ 的方式求取 $\frac{dn}{dt} \approx \frac{\Delta n}{\Delta t} = a = \frac{\sum_{i=0}^{w-1} (t_i - \bar{t})(n_i - \bar{n})}{\sum_{i=0}^{w-1} (t_i - \bar{t})^2}$ ，其中， $\bar{t} = \sum_{i=0}^{w-1} t_i / w$ ， $\bar{n} = \sum_{i=0}^{w-1} n_i / w$ ，避免计算

Δn 和 Δt ，可以有效提高计算转子转动惯量的准确性。

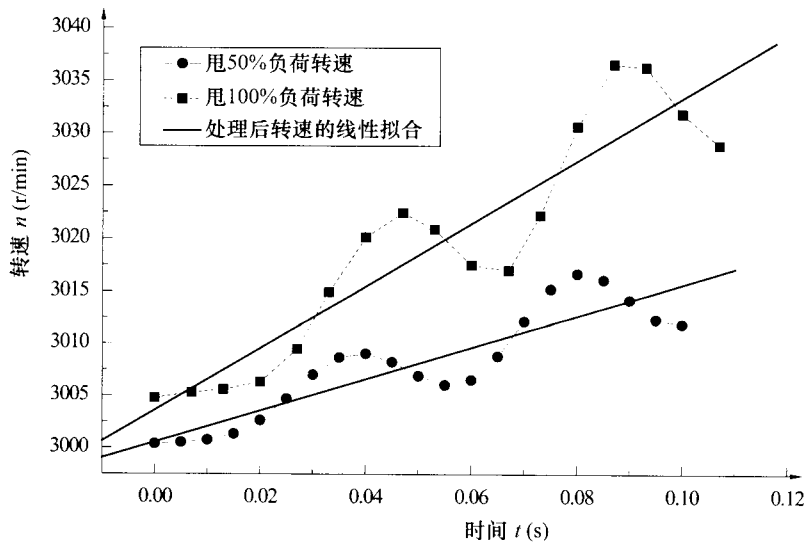


图 G.1 经 FFT 平滑后调节汽阀延迟关闭时间范围内转速飞升的线性化处理

中 华 人 民 共 和 国
电 力 行 业 标 准
火力发电建设工程机组用负荷试验导则
DL/T 1270—2013

*

中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)
北京博图彩色印刷有限公司印刷

*

2014 年 4 月第一版 2014 年 4 月北京第一次印刷
880 毫米×1230 毫米 16 开本 1.75 印张 47 千字
印数 0001—3000 册

*

统一书号 155123·1757 定价 15.00 元

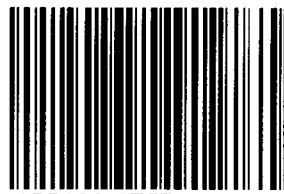
敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



关注我,关注更多好书



155123.1757

上架建议：规程规范/
电力工程/火力发电