



新疆清能电力科技有限公司
Xinjiang Qingneng Electric Power Technology Co., Ltd.

报告编码: QNDL-BG-2024-035

莫呼查汗干渠一级水电站 2号机组一次调频性能试验报告

新疆清能电力科技有限责任公司

二〇二四年九月

试验专用章



报

项目名称：莫呼查汗干渠一级水电站

2 号机组一次调频性能试验报告

工作时间：2024 年 09 月 12 日~15 日

项目负责人：刘信

新疆清能电力科技有限责任公司：马尊孝

莫呼查汗干渠一级水电站：张建

批 准：

张建

审 核：

刘信

编 写：

孙志刚



目 录

1	试验目的	1
2	试验依据及技术指标	1
2.1	试验依据	1
2.2	一次调频技术指标要求	1
3	试验仪器	2
4	电站、机组及调速器的基本参数	2
4.1	电站基本参数	2
4.2	水轮机参数	2
4.3	发电机参数	2
4.4	调速器参数	2
5	试验条件	2
6	试验项目及方法	3
6.1	静态试验	3
6.1.1	调速器测频回路校验	3
6.1.2	转速死区 i_x 及永态转差系数 b_p 测定	3
6.2	动态试验	4
7	试验过程与结果分析	4
7.1	调速器测频回路校准	4
7.2	有功功率、导叶开度输入信号率定	5
7.3	死区校核	5
7.4	试验工况	7
7.5	一次调频投退功能检查，一次调频动作信号检查	7
7.6	机组并网模式下一次调频测试	7
7.6.1	试验过程	7
7.6.2	试验数据处理分析	13
7.7	机组并网模式下模拟频率动态变化试验	14
7.8	机组并网模式下跟踪电网频率试验	15
8	结论和建议	16

1 试验目的

为保证电网及发电机组安全运行,充分发挥发电机组一次调频能力,使并网运行机组随时适应电网负荷和频率的变化,提高电能质量及电网频率的控制水平,依照各电厂所属区域调度管理规定及国网的相关要求,根据《DL/T 496 水轮机电液调节系统及装置调整试验导则》等相关标准,通过对水轮发电机组进行一次调频试验以检验机组一次调频性能,在确保机组安全稳定运行的情况下,测试并确定一次调频运行参数以满足电网一次调频的要求。根据试验的情况及时投入机组一次调频功能,对尚不能达到一次调频性能要求的机组调速系统提出相关参数调整和技术改造建议,并重新组织试验。

2 试验依据及技术指标

2.1 试验依据

- a) GB/T 9652.1 《水轮机控制系统技术条件》
- b) GB/T 9652.2 《水轮机控制系统试验》
- c) GB/T 31464 《电网运行准则》
- d) GB/T 28566 《发电机组并网安全条件及评价》
- e) GB/T 40595 《并网电源一次调频技术规定及试验导则》
- f) DL/T 496 《水轮机电液调节系统及装置调整试验导则》
- g) DL/T 1245 《水轮机调节系统并网运行技术导则》
- h) DL/T 1870 《电力系统网源协调技术规范》
- i) DL/T 563 《水轮机电液调节系统及装置技术规程》
- j) DL/T 2194 《水力发电机组一次调频技术要求及试验导则》

2.2 一次调频技术指标要求

- a) 机组一次调频频率死区: $\leq \pm 0.05\text{Hz}$
- b) 机组调速系统转速死区: $< 0.04\%$
- c) 机组调速系统永态转差率 b_p : $\leq 4\%$
- d) 一次调频动态性能:
 - 1)、自频差超出一次调频死区开始,至接力器变化开始变化的时间不大于 2s,或至有功功率开始变化的时间不大于 2s。
 - 2)、自频差超出一次调频死区开始,至机组有功功率达到 90%目标值的上升时间,应不大于 15s。
 - 3)、自频差超出一次调频死区开始,至功率调节达到稳定,所经历的时间不大于 30s。
- f) 一次调频限幅:
 - 1)、非额定有功功率工况下,水电机组参与一次调频的调频负荷变化幅度应不设限制;超出适用条件的,应对一次调频功率进行限制,一次调频功率变化幅度应不小于

10%额定有功功率。

2)、机组额定有功功率运行时应参与一次调频，增负荷方向一次调频功率变化幅度应不小于 8%额定有功功率，减负荷方向一次调频功率变化幅度应不设限制。

3)、水头不足导致机组功率无法达到额定有功功率工况下，机组最大出力下增负荷方向一次调频调节幅度应不小于 8%额定有功功率。

3 试验仪器

表 3-1 2 号机一次调频试验所用仪器

序号	型号	名称	生产厂家	备注
1	GEN3i	便携式数据记录分析仪	HBM	
2	DIT-TCS-150	水轮机调速系统综合测试装置	深圳东深智能技术有限公司	

4 电站、机组及调速器的基本参数

4.1 电站基本参数

装机台数：2

单机容量：5MW

4.2 水轮机参数

型号：HL80-WJ-98

功率：5.363MW

水头：2.43m

流量：2.4m³/s

转速：1000r/min

生产厂家：湖南汉龙水电设备有限公司

4.3 发电机参数

型号：SFW5000-6/1730

生产厂家：湖南汉龙水电设备有限公司

发电工况

额定容量：6.25MVA

额定电压：6.3kV

额定电流：435.3A

功率因数：0.8

额定转速：1000r/min

额定励磁电压 U_N ：75V

额定励磁电流 I_N ：510A

4.4 调速器参数

型号：GYWT-1800

生产厂家：杭州三和电控设备有限公司

4.4.1 主要技术指标

转速死区 i_x	$\leq 0.06\%$
轮叶随动系统不准确度 i_a	$< 0.8\%$
自动空载三分钟转速摆动相对值	$\leq \pm 0.18\%$
接力器不动时间 T_q	< 0.2 秒

4.4.2 电气部分主要技术参数

频率给定范围 F_G	45HZ~55HZ
功率给定范围 P_G	0~100%
永态转差系数 b_p	0~10%
人工失灵区 E	0~ ± 2 HZ
机频、网频信号电压	AC0.3V~110V
交流电源	AC200V
直流电源	DC220V 或 DC110V

5 试验条件

a)、试验机组各系统及设备工作正常，具备开机带负荷运行的条件，范围包括：引水系统、水轮机、调速系统、计算机监控系统、微机保护系统、水轮发电机、励磁系统、电气一次设备、电气二次系统及回路、油气水系统、消防系统及设备。

b)、调速器、计算机监控系统已按照相关规范的技术要求和试验实施方案对相关程序、参数以及硬件设备修改完毕，并对原程序和参数进行了可靠备份。

c)、本次试验使用的仪器已经过检定，并在使用有效期内。

d)、接入一次调频试验测试仪器的机组功率、PID 输出、导叶开度等信号准确可靠并满足精度要求。

e)、试验方案已经过各方认真讨论研究，上报电厂所属调度中心，并得到批准。

6 试验项目及方法

水轮发电机组一次调频试验时机组并入大电网运行，首先进行开环试验，开环试验完成且各项性能指标满足要求后，再进行机组跟踪电网频率运行试验，检验机组一次调频动作及响应情况。

6.1 静态试验

6.1.1 调速器测频回路校验

对调速器测频回路进行校准，使其在给定 50 ± 0.25 Hz 频率范围内的测频误差在 ± 0.003 Hz 以内，中小型机组应小于 ± 0.005 Hz。

6.1.2 转速死区 i_x 及永态转差系数 b_p 测定

按 DL/T 496《水轮机电液调节系统及装置调整试验导则》有关章节进行测定计算。

6.2 动态试验

a)、导叶开度输入信号率定

两点率定，调整负荷到 10%额定负荷作为率定点 1，调整负荷到额定负荷作为率定点 2。率定后检查导叶开度对应关系。

b)、设定人工频率死区

根据静态试验测定的转速死区设定人工频率死区，满足一次调频频率死区的要求。

c)、一次调频投退功能检查，一次调频动作信号检查

检查一次调频投退功能，投退时调速器、监控系统信号应正确。模拟一次调频动作，动作时调速器、监控系统信号应正确。

d)、校核机组一次调频的响应行为

设置调速器一次调频技术参数，在额定频率 50Hz 基础上分别施加正负阶跃频率偏差信号（ $\pm 0.15\text{Hz}$ 、 $\pm 0.25\text{Hz}$ 等），检验机组一次调频的响应行为。试验中记录时间不小于 60s（从阶跃施加开始）。如其响应行为不满足相关技术要求，则对调速器的相关程序及参数进行修改优化，然后重新进行试验。

e)、校核机组一次调频的调整负荷限幅功能

根据实际情况在额定频率 50Hz 基础上施加大阶跃频率偏差信号，检查机组一次调频的调整负荷限幅功能。如不满足相关技术要求则对调速器的相关程序及参数进行修改优化。

f)、模拟电网频率动态变化试验

调速器一次调频功能投入，在额定频率 50Hz 基础上模拟电网频率动态变化过程，检验机组一次调频的响应行为。动态变化过程一：在负荷为 60%额定功率下，电网频率 25s 内从 50Hz 升至 50.15Hz，稳定 8s，再在 25s 内从 50.15Hz 降至 50Hz；动态变化过程二：在负荷为 60%额定功率下，电网频率 15s 内从 50Hz 降至 49.85Hz，稳定 8s，再在 14s 内从 49.85Hz 升至 50Hz。

g)、跟踪电网频率试验

调速器切至“手动”方式，切除信号发生器的输出频率信号，恢复机频测量接线；调速器投入自动，投入一次调频功能。对电网频率、有功功率和导叶开度信号进行实时录波，记录电网频率越过机组一次调频频率死区时调速器动作情况。

7 试验过程与结果分析

2 号机组于 2024 年 09 月 13 日进行了一次调频试验。主要试验过程和测试结果分析如下：

7.1 调速器测频回路校准

调速系统测频回路测频误差小于 $\pm 0.003\text{Hz}$ ，基本满足测频精度的要求。

表 7-1 调速器测频回路校准

标称值	49.750	49.800	49.850	49.900	49.950	50.000	50.050	50.101	50.150	50.200	50.250
实测值	49.750	49.800	49.851	49.900	49.950	50.001	50.050	50.100	50.150	50.200	50.250
误差	0	0	0.001	0	0	0.001	0	-0.001	0	0	0

7.2 有功功率、导叶开度输入信号率定

a) 有功功率输入信号

b) 导叶开度输入信号

7.3 死区校核

死区设置为 0.04Hz，用频率发生器在机柜测频端子上加入正弦信号模拟机组转速，上下死区校核录波如图 7-1、7-2 所示。

由图 7-1 可见，当机组频率从 50Hz 开始，逐渐减低信号源频率，当频率为 49.96Hz 时，PIDOUT 和导叶（一次调频动作信号）未动作，当阶跃量为 49.95Hz 时，PIDOUT 和导叶（一次调频动作信号）动作。由图 7-2 可见，从 50Hz 增加信号源频率，当频率为 50.04Hz 时，PIDOUT 和导叶（一次调频动作信号）未动作，当阶跃量为 50.05Hz 时，PIDOUT 和导叶（一次调频动作信号）动作。由图可知，实际死区与设置死区基本相符。按照调度的要求，该机组人工死区最终设置为 $\pm 0.04\text{Hz}$ 。

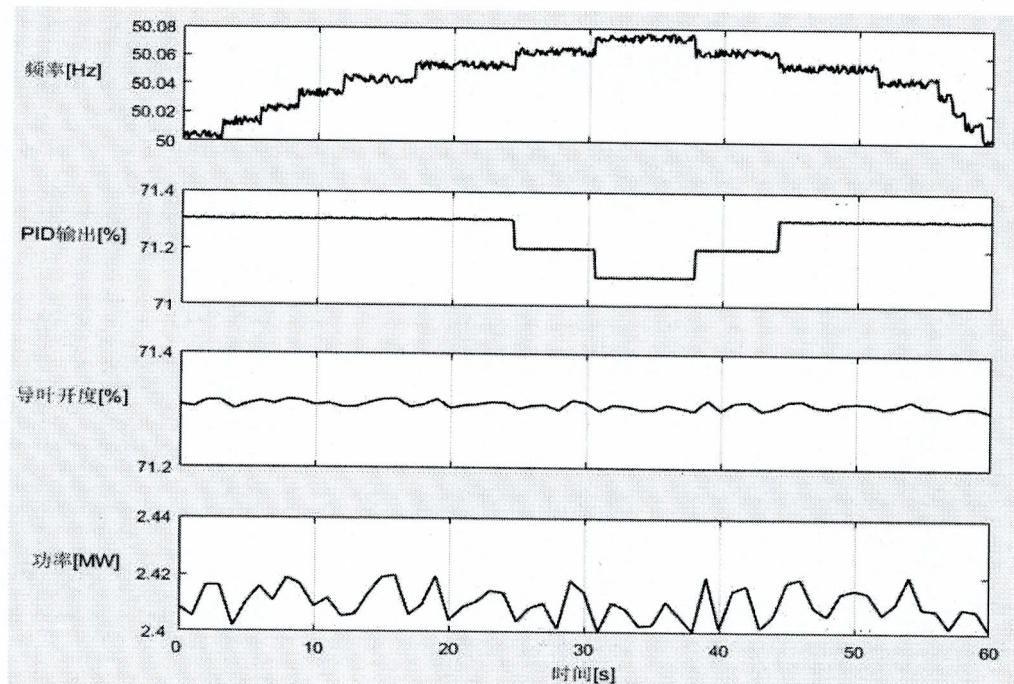


图 7-1 下死区校核

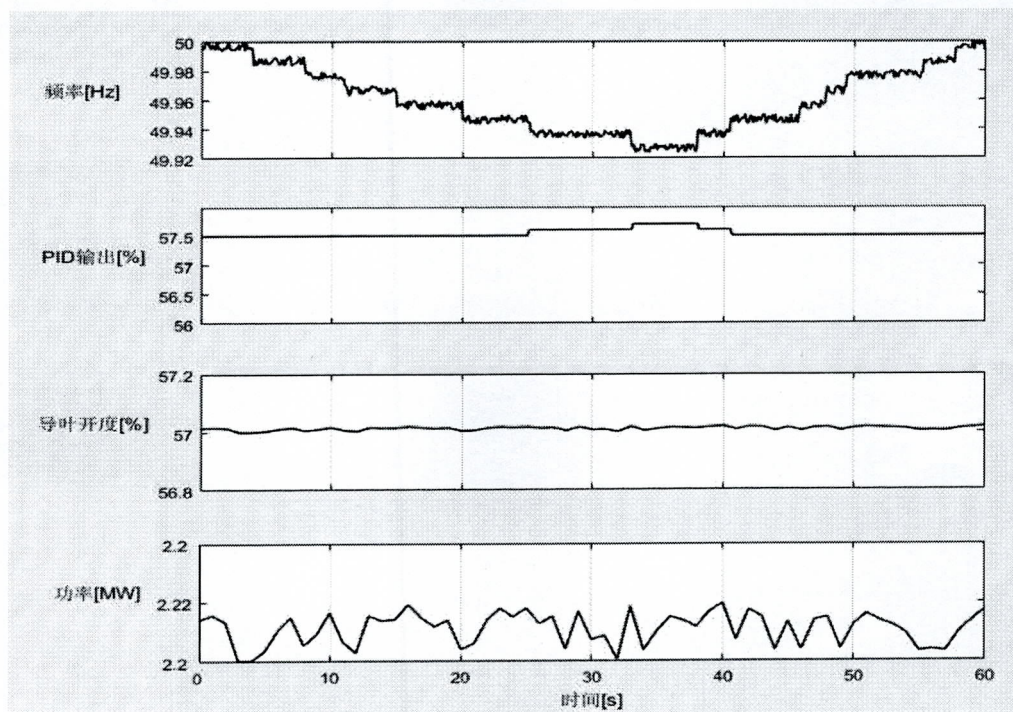


图 7-2 上死区校核

将调速器的 K_P 、 K_I 、 K_D 分别置于整定值,设置 $B_p=4\%$, 人工死区设置为 0Hz , 在机柜端子上加上信号源 50.00Hz , 现地自动模式下, 模拟并网, 调整导叶开度至 50% 。进行机组调节系统静特性试验, 试验结果见表 7-2。

表 7-2 $B_p=4\%$ 调速器静特性试验数据记录表

开启方向		关闭方向		导叶开度差值 绝对值
频率	导叶开度	频率	导叶开度	
50.8	9.403	50.8	9.574	0.171
50.7	14.37	50.7	14.703	0.333
50.6	19.551	50.6	19.743	0.192
50.5	24.545	50.5	24.771	0.226
50.4	29.682	50.4	29.932	0.25
50.3	34.631	50.3	34.972	0.341
50.2	39.863	50.2	40.112	0.249
50.1	44.889	50.1	45.062	0.173
50.0	49.856	50.0	50.293	0.437
49.9	54.886	49.9	55.205	0.319
49.8	59.984	49.8	60.224	0.24
49.7	65.036	49.7	65.345	0.309
49.6	70.202	49.6	70.356	0.154
49.5	75.294	49.5	75.445	0.151
49.4	80.433	49.4	80.535	0.102
49.3	85.394	49.3	85.643	0.249
49.2	90.403	49.2	90.403	0.000

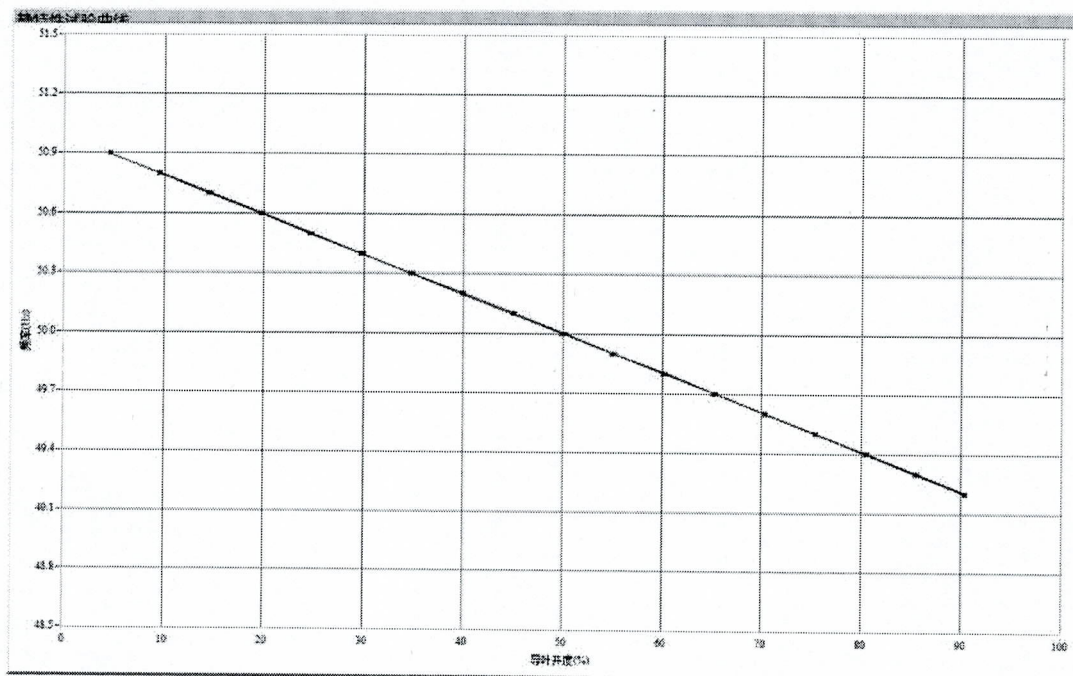


图 7-3 Bp=4%调速器静特性试验

计算出该调速器的转速死区、非线性度以及永态转差系数 b_p 的校验值，并绘制该调速器的静特性曲线图，如图 7-3 所示。

转速死区 i_x : 0.009%

线性度误差: 0.518%

试验时永态差值系数设为 $b_p=4\%$ ，永态转差系数 b_p 的校验值：

经辨识，永态转差系数为 $b_p=3.953\%$ ，设定值准确。

7.4 试验工况

试验时机组有功功率分别为 60%额定功率、75%额定功率、90%额定功率。

7.5 一次调频投退功能检查，一次调频动作信号检查

一次调频投退功能需要增加；一次调频动作、复归信号正常，调速器、监控系统信号正确。

7.6 机组并网模式下一次调频测试

7.6.1 试验过程

在额定频率 50Hz 基础上分别施加正负阶跃频率偏差信号 ($\pm 0.15\text{Hz}$ 、 $\pm 0.25\text{Hz}$)，检验机组一次调频的响应行为。经调整调速器参数，确定了一组新参数以满足电网一次调频性能的要求，即： $b_p=4\%$ 、 $K_p=12$ 、 $K_i=8$ 、 $K_d=0.8$ 。以下为几个典型试验图形记录：

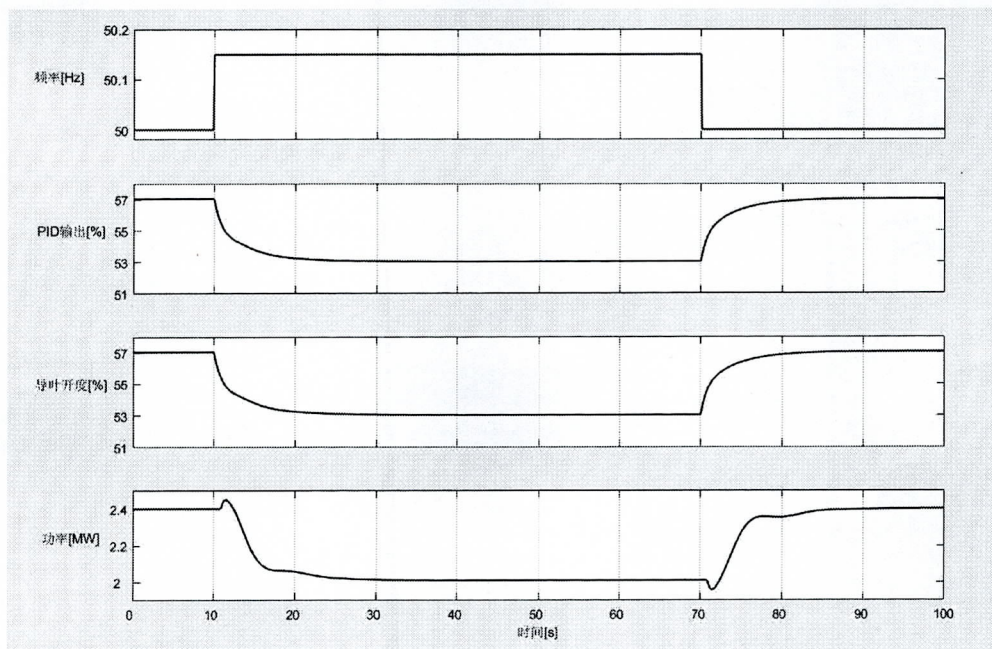


图 7-4 60%额定功率, +0.15Hz 正扰

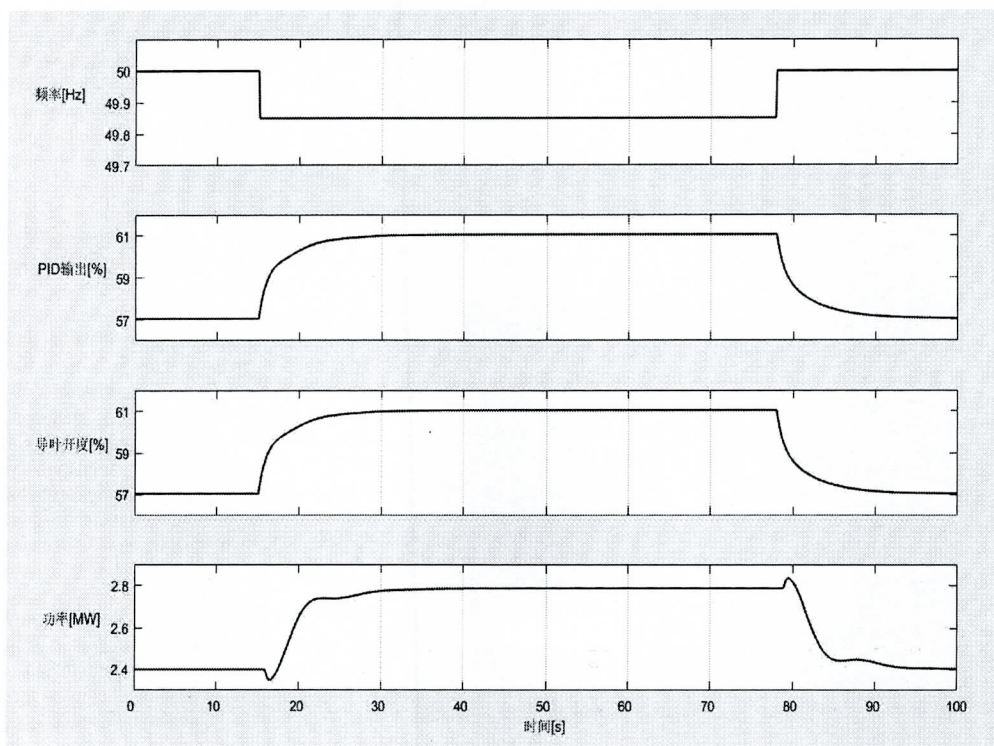


图 7-5 60%额定功率, -0.15Hz 负扰

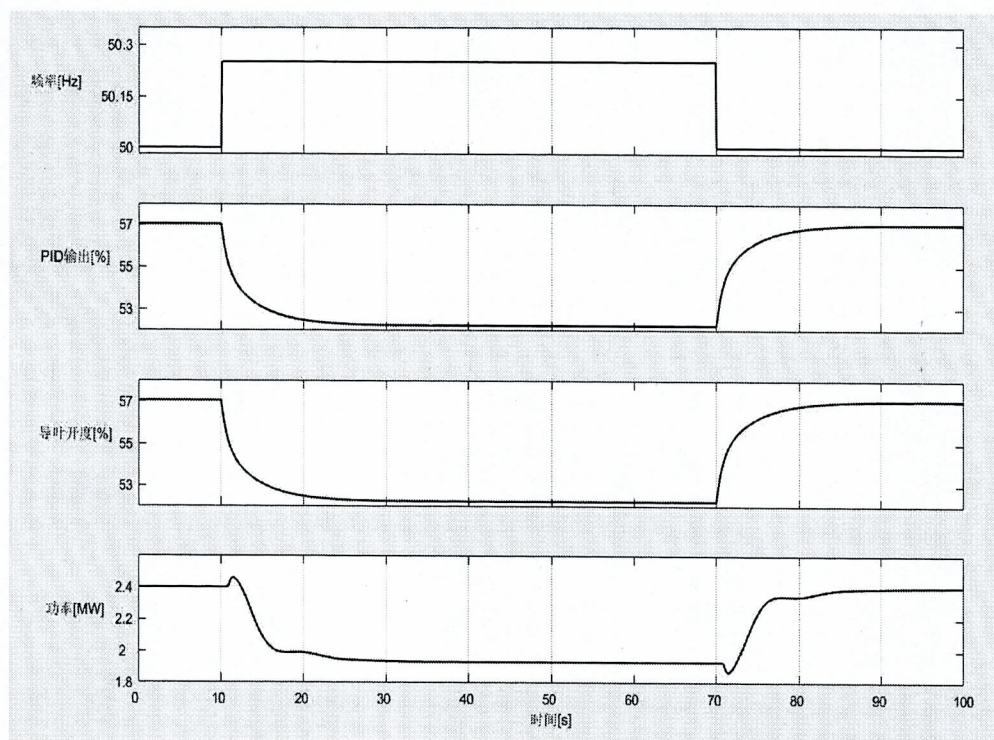


图 7-6 60%额定功率, +0.25Hz 正扰

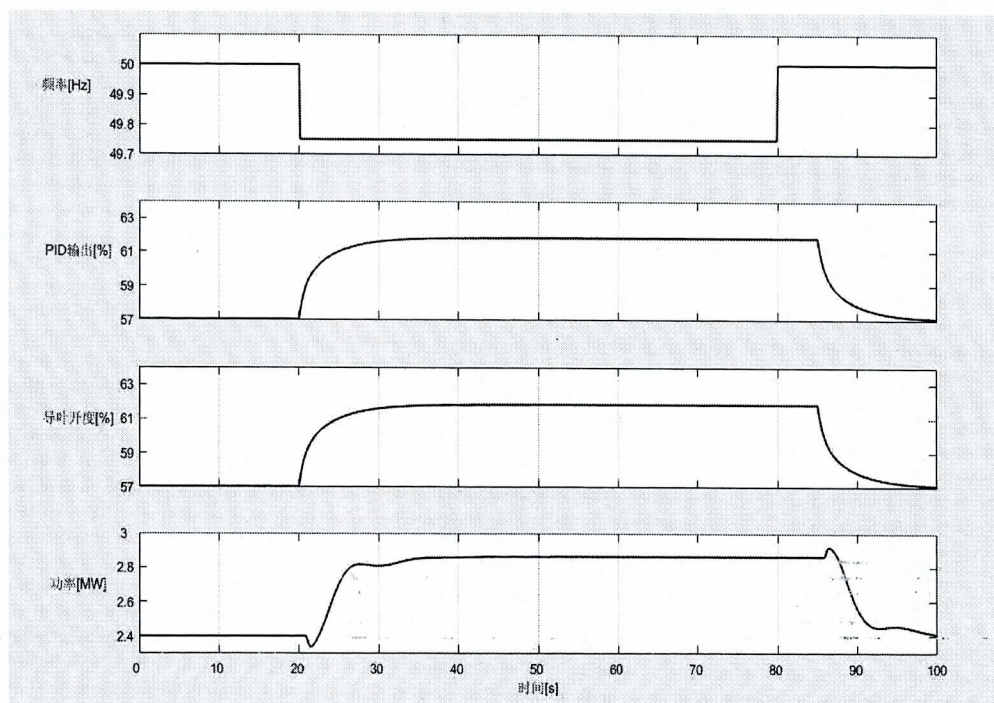


图 7-7 60%额定功率, -0.25Hz 负扰

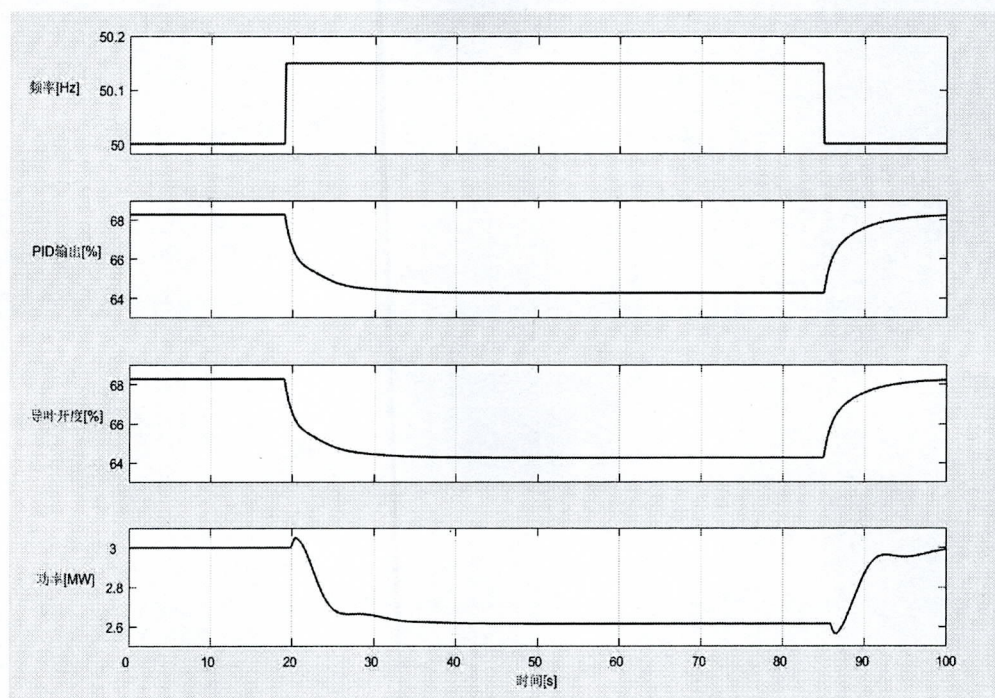


图 7-8 75%额定功率, +0.15Hz 正扰

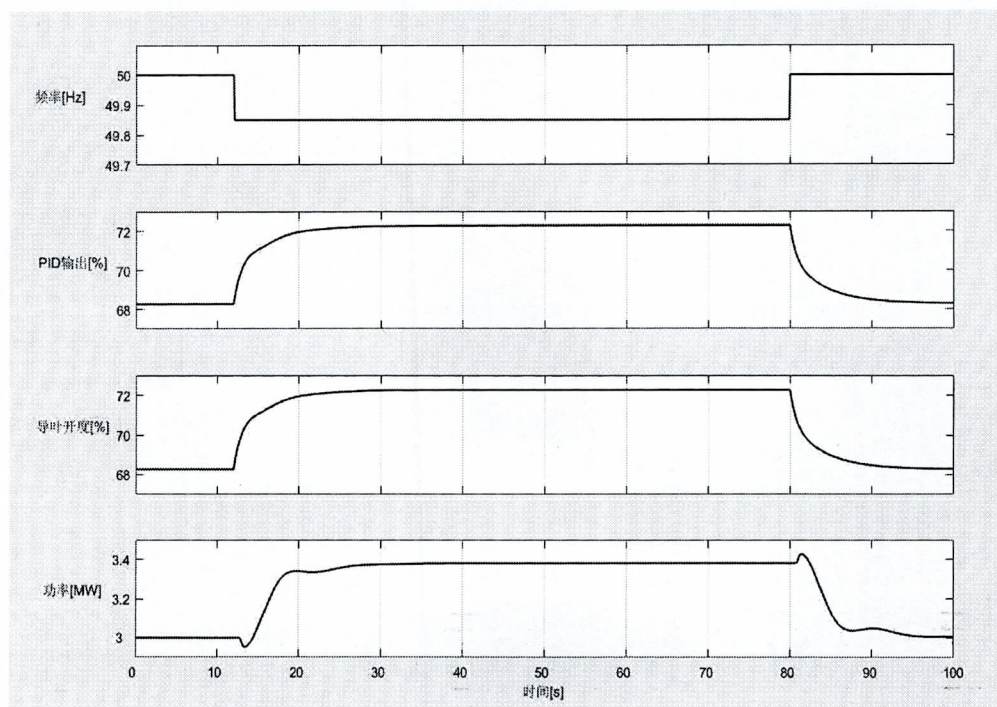


图 7-9 75%额定功率, -0.15Hz 负扰

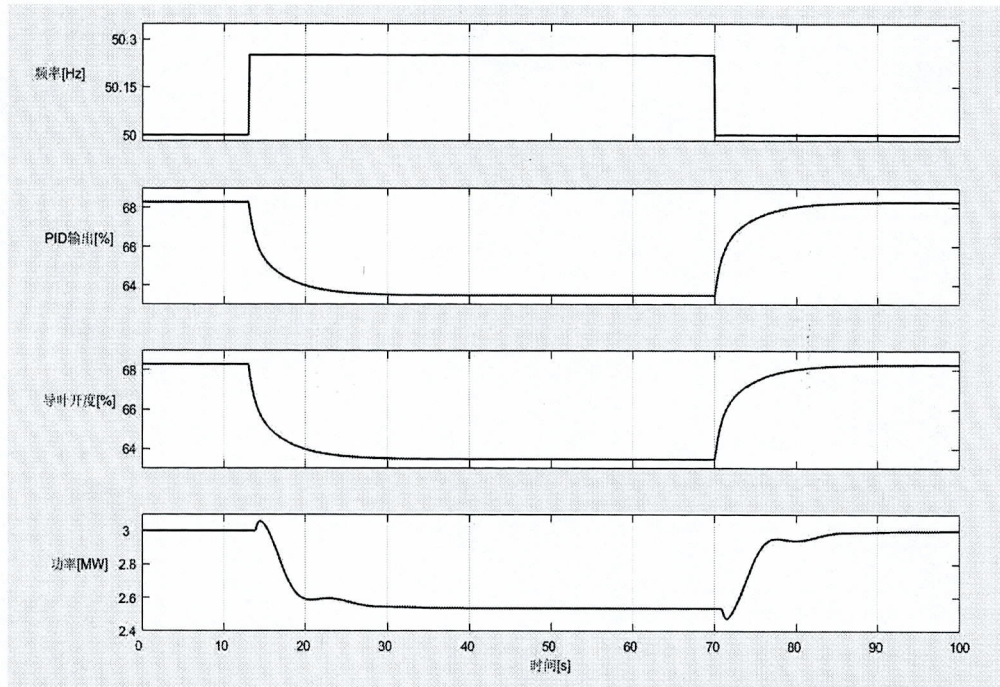


图 7-10 75%额定功率, +0.25Hz 正扰

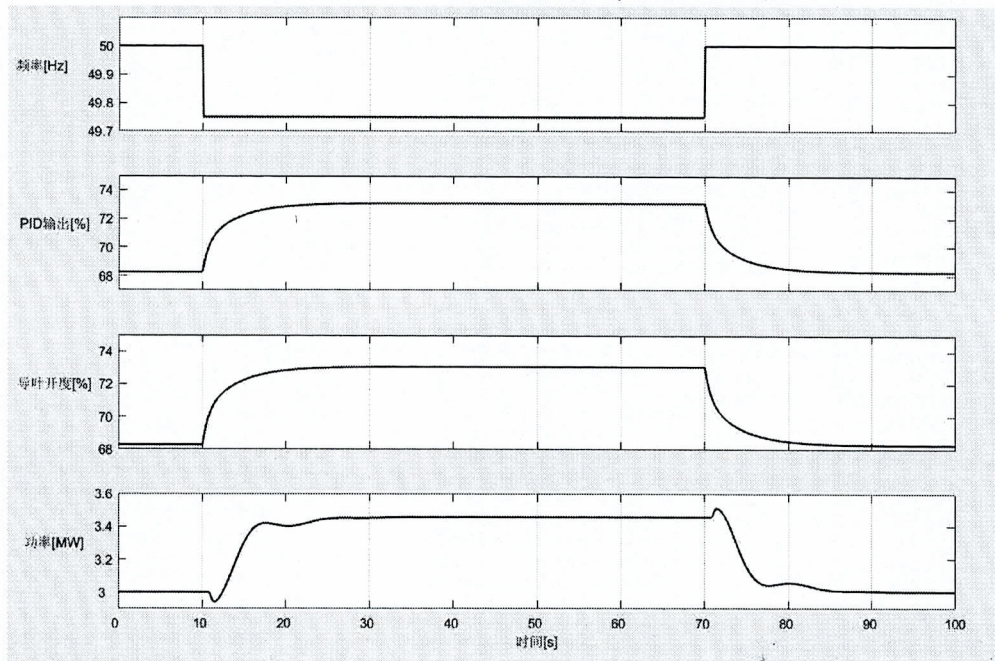


图 7-11 75%额定功率, -0.25Hz 负扰

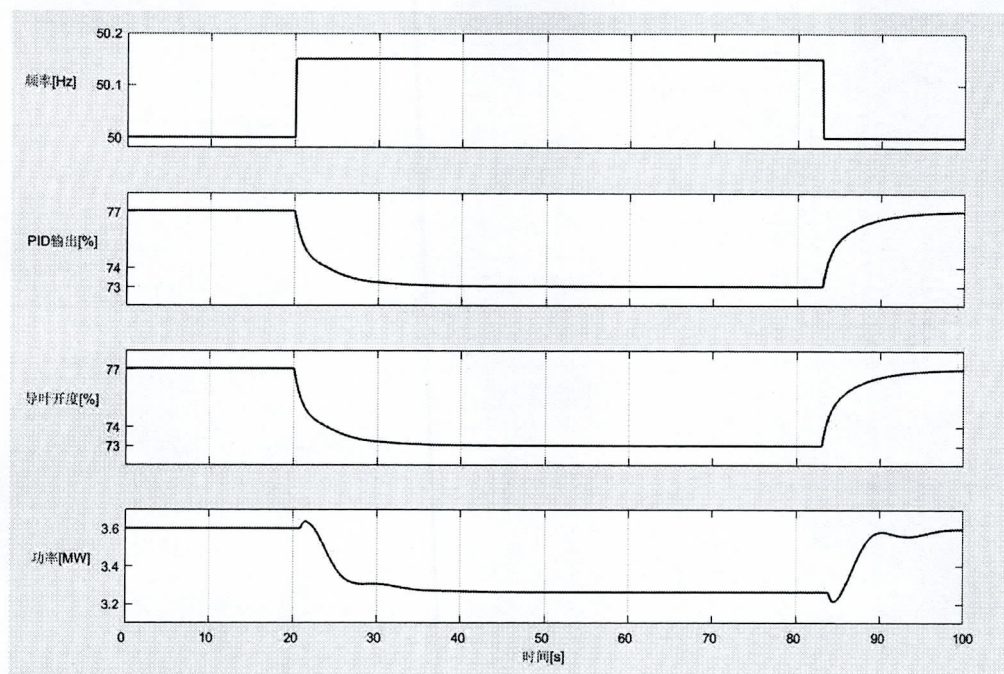


图 7-12 90%额定功率, +0.15Hz 正扰

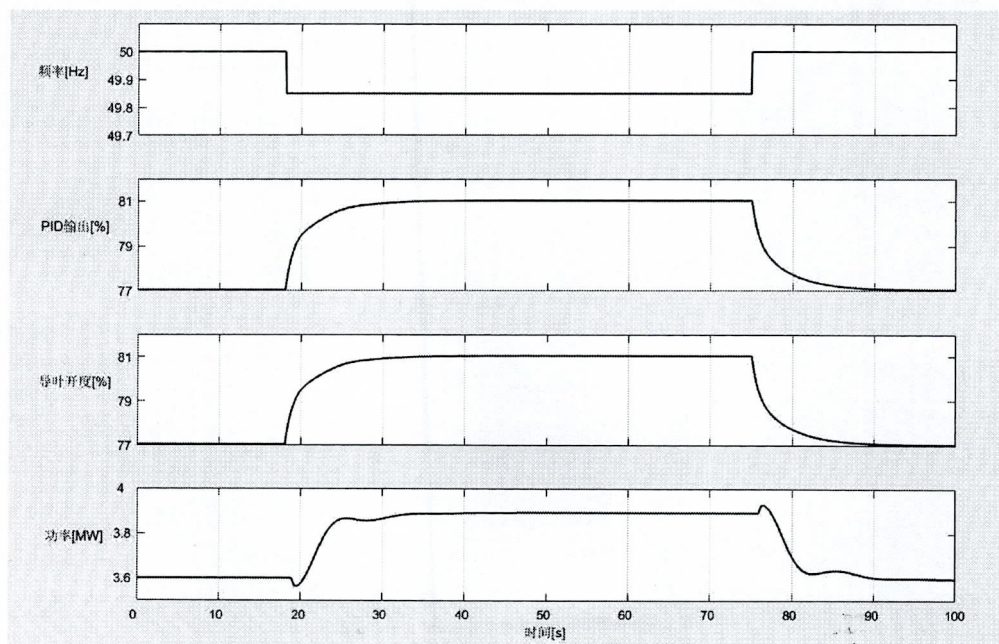


图 7-13 90%额定功率, -0.15Hz 负扰

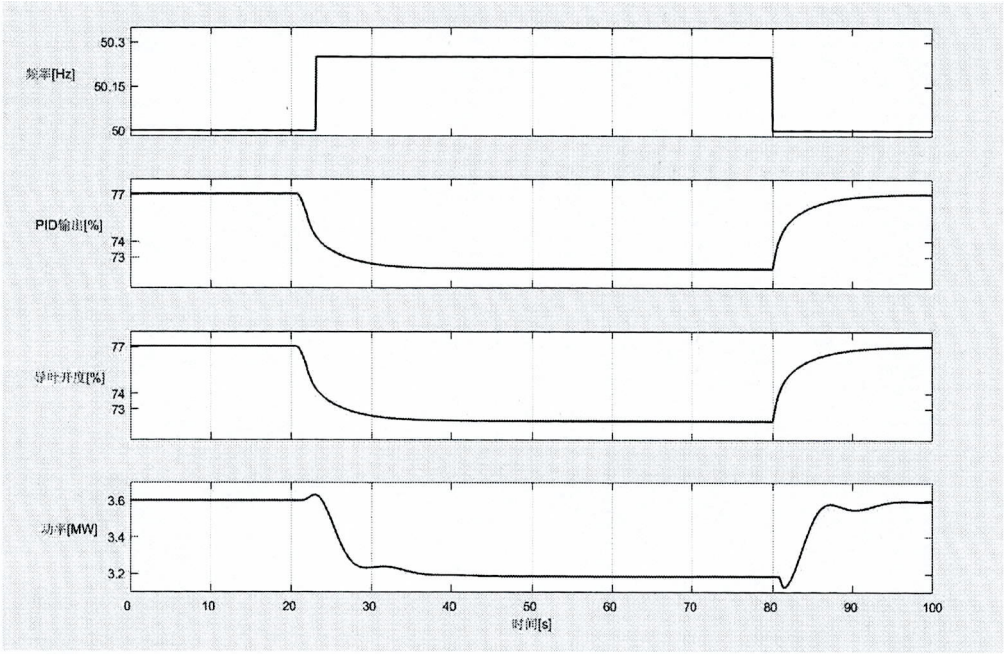


图 7-14 90%额定功率，+0.25Hz 正扰

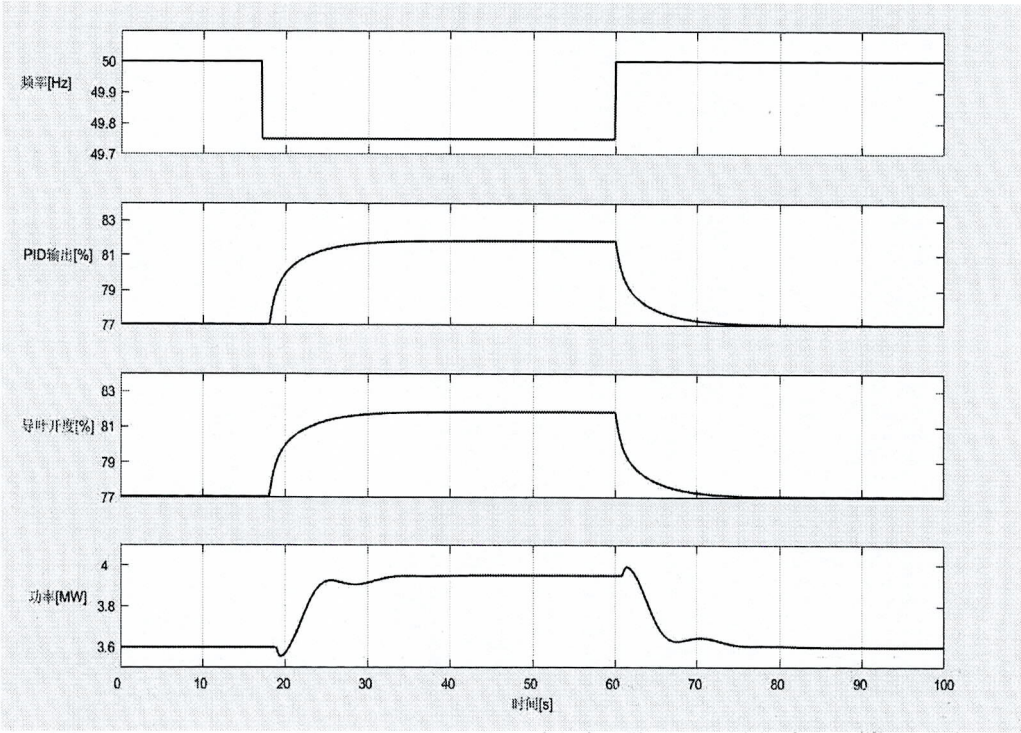


图 7-15 90%额定功率，-0.25Hz 负扰

7.6.2 试验数据处理分析

将以上试验数据记录进行计算后填入以下试验数据记录分析表，进行分类汇总计算：

表 7-3 60%额定功率频率阶跃响应

扰动频率 (Hz)	起始开度 (%)	扰动稳定开度 (%)	90%稳定开度 (%)	开度差 (%)	有效频差 (Hz)	开度响应滞后时间(s)	开度调整幅度达 90% 时间(s)	开度调整稳定时间(s)
0.15	57.37	53.23	53.61	-4.14	0.10	1	8	17
-0.15	57.38	61.62	61.24	4.24	-0.10	1	7	18
0.25	57.37	52.24	52.78	-5.13	0.20	1	7	15
-0.25	57.39	62.55	62.03	5.16	-0.20	1	8	16
最大值	57.39	62.55	62.03	5.16	0.20	1	8	18

表 7-4 75%额定功率频率阶跃响应

扰动频率 (Hz)	起始开度 (%)	扰动稳定开度 (%)	90%稳定开度 (%)	开度差 (%)	有效频差 (Hz)	开度响应滞后时间(s)	开度调整幅度达 90% 时间(s)	开度调整稳定时间(s)
0.15	68.24	64.13	64.54	-4.11	0.10	1	12	15
-0.15	68.23	72.24	71.84	4.01	-0.10	1	12	17
0.25	68.21	63.22	63.72	-4.99	0.20	1	13	15
-0.25	68.22	73.14	72.65	4.92	-0.20	1	11	16
最大值	68.24	73.14	72.65	4.99	0.20	1	13	17

表 7-5 90%额定功率频率阶跃响应

扰动频率 (Hz)	起始开度 (%)	扰动稳定开度 (%)	90%稳定开度 (%)	开度差 (%)	有效频差 (Hz)	开度响应滞后时间(s)	开度调整幅度达 90% 时间(s)	开度调整稳定时间(s)
0.15	77.10	73.25	73.64	-3.85	0.10	1	9	15
-0.15	77.11	80.93	80.55	3.82	-0.10	1	9	19
0.25	77.10	72.52	72.98	-4.58	0.20	1	11	16
-0.25	77.10	81.64	81.19	4.54	-0.20	1	8	17
最大值	77.11	81.64	81.19	4.58	0.20	1	11	19

表 7-6 不同工况下一次调频响应行为试验数据汇总分析表

试验工况	开度响应滞后时间(s)	开度调整幅度达 90%时间(s)	开度调整稳定时间(s)
60%额定功率	1	9	18
75%额定功率	1	13	17
90%额定功率	1	11	19
最大值	1	13	19

7.7 机组并网模式下模拟频率动态变化试验

调速器一次调频功能投入，在额定频率 50Hz 基础上模拟电网频率动态变化过程，检验机组一次调频的响应行为。

正动态变化过程：在负荷为 60%额定功率下，电网频率 25s 内从 50Hz 升至 50.15Hz，稳定 8s，再在 25s 内从 50.15Hz 降至 50Hz。模拟频率正动态变化时一次调频响应正常，以下为试验图形记录如图 7-16。

负动态变化过程：在负荷为 60%额定功率下，电网频率 15s 内从 50Hz 降至 49.85Hz，

稳定 8s, 再在 14s 内从 49.85Hz 升至 50Hz。模拟频率负动态变化时一次调频响应正常, 以下为试验图形记录如图 7-17。

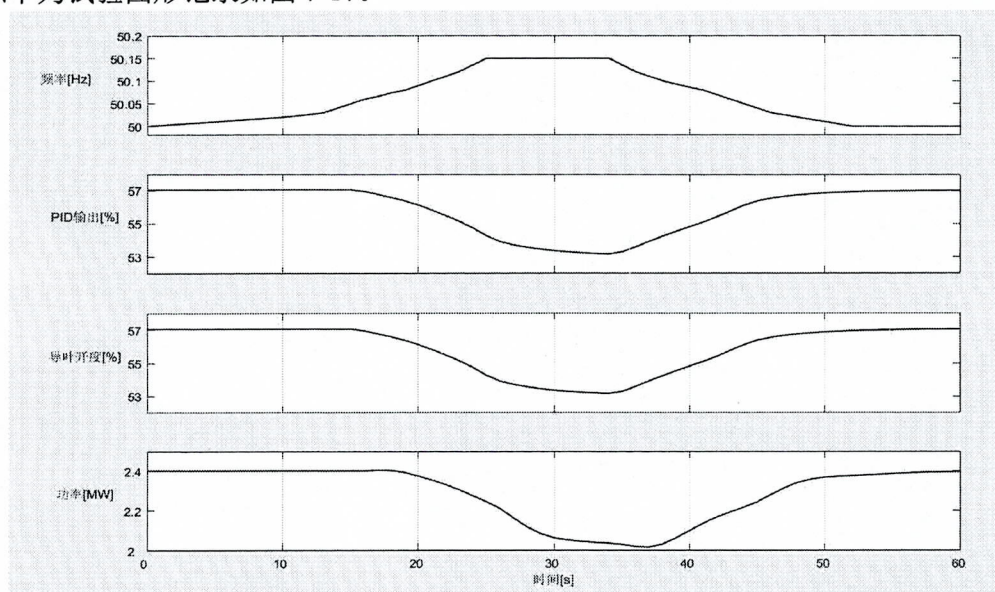


图 7-16 60%额定功率, 正向动态扰动

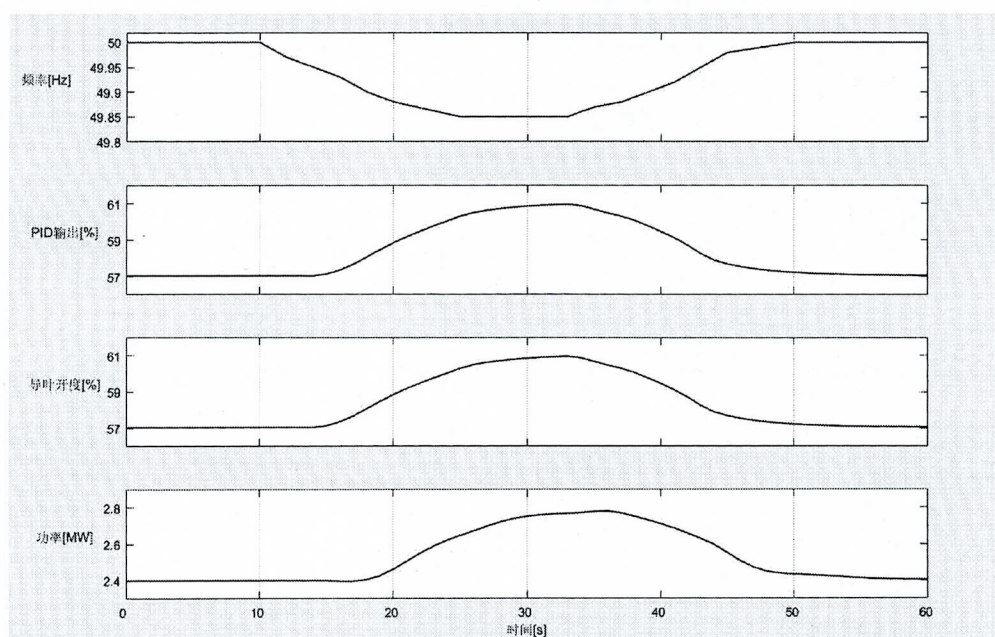


图 7-17 60%额定功率, 负向动态扰动

7.9 机组并网模式下跟踪电网频率试验

调速器切手动, 恢复机频测量接线, 再将调速器投入自动, 投入一次调频功能, 在 90%额定功率下, 对电网频率、有功功率和导叶开度信号进行实时录波, 记录电网频率越过机组一次调频频率死区时调速系统动作情况。跟踪电网频率时一次调频响应正常, 以下为试验图形记录:

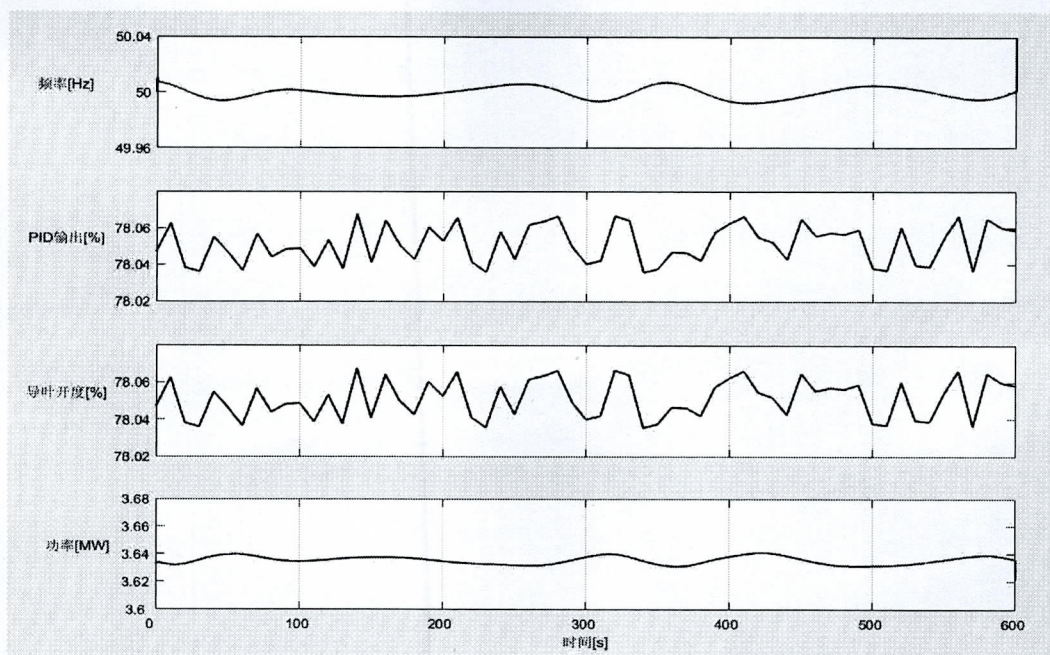


图 7-18 跟踪电网频率试验

8 结论和建议

对各次试验图形数据记录等现场试验结果进行分析后,可对电站 2 号机组一次调频性能得出如下结论:

- a) 调速系统测频回路测频误差小于 $\pm 0.003\text{Hz}$, 满足测频精度要求。
- b) 测得调速系统一次调频综合固有死区 $+0.04/-0.04\text{Hz}$, 一次调频转速死区 $\leq 0.009\%$ 。
- c) 测得永态转差系数 3.951%。
- d) 一次调频投退功能需要增加, 一次调频动作信号正确。
- e) 调速器功率大网模式下一次调频参数设置为 $K_p=12$ 、 $K_i=8$ 、 $K_d=0.8$, $b_p=4\%$, 人工频率死区 $E_f=\pm 0.04\text{Hz}$, 开度限幅 10% 时, 机组一次调频性能满足一次调频技术指标要求。
 - 1) 机组一次调频开度/功率响应滞后时间最大为 1 秒, 符合不大于 2 秒的要求。
 - 2) 机组一次调频开度/功率调整幅度达 90% 的最大时间为 13 秒, 符合不大于 15 秒的要求。
 - 3) 机组一次调频开度/功率稳定时间最大为 19 秒, 符合不大于 30 秒的要求。
- f) 模拟电网频率动态变化试验: 响应正常。
- g) 跟踪电网频率试验: 响应正常。
- h) 试验时对调速器一次调频限幅功能进行了检查和校核: 是否设置限幅由调度根据电网系统要求确定。