

Analysis of the Isolated Network Operation of One Frequency Modulation Test of Domestic Subcritical 350MW Unit

Ji Xia

Xinjiang Dongfang Hope Non-ferrous Metals Co., Ltd. Zhundong Thermal Power Plant, Changji, Xinjiang, 831700, China

Abstract

With the rapid development of energy and the continuous growth of demand, the importance of the proportion of 350MW subcritical units in isolated power systems is increasingly prominent. This paper takes the domestic subcritical 350MW unit as the research object, conducts a frequency regulation test on it, and conducts in-depth research on the frequency regulation response characteristics of the unit through the analysis and processing of test data. The results indicate that the unit has good frequency regulation characteristics under isolated network operation conditions, can quickly respond to load changes, and maintain good frequency stability and power balance.

Keywords

subcritical unit; frequency modulation test; isolated network operation; frequency modulation characteristics; frequency stability

国产亚临界 350MW 机组孤网运行一次调频试验分析

夏季

新疆东方希望有色金属有限公司准东热电厂，中国·新疆 昌吉 831700

摘要

随着能源快速发展和需求不断增长，孤立电网运行的电力系统中350MW亚临界机组占比重要性日益凸显。论文以国产亚临界350MW机组为研究对象，对其进行一次调频试验，并通过对试验数据分析和处理，对机组调频响应特性进行深入研究。结果表明，该机组在孤网运行条件下具备良好调频特性，能够快速响应负荷变化，并保持较好频率稳定性和功率平衡。

关键词

亚临界机组；调频试验；孤网运行；调频特性；频率稳定性

1 引言

随着能源消费快速增长，电力系统中亚临界机组装机容量也在不断扩大。亚临界机组以其高效节能、排放低、运行灵活等优势，受到越来越多关注。越来越多的工业园区选择以 350MW 亚临界机组作为构建孤立电网的主力机组。然而，在实际运行中，孤立电网与亚临界机组也面临着许多挑战，如负荷波动、电网故障等。为保证电网系统安全、机组运行稳定，需要对其进行调频试验来评估其在孤网运行条件下性能。

2 亚临界机组调频试验原理与方法

2.1 亚临界机组调频试验原理

亚临界机组调频试验是指在孤网运行条件下，通过改

变负荷大小，观察机组调频特性，包括频率变化情况、功率平衡等。调频试验可以评估机组响应负荷变化能力，判断其调频性能（如图 1 所示）。

2.2 亚临界机组调频试验方法

亚临界机组调频试验一般分为两种方法，即单机组试验和多机组试验。单机组试验只涉及一个机组调频响应特性，而多机组试验则涉及多个机组之间协调运行。论文主要关注单机组试验，通过对一台国产亚临界 350MW 机组试验数据进行分析 and 处理，来评估其调频特性^[1]。

3 国产亚临界 350MW 机组调频试验数据分析

某电厂汽轮机设备为东方电气集团东方汽轮机有限公司生产的 D350AM-B00001AZM 亚临界直接空冷机组，机组额定功率 350MW，锅炉主设备为东方电气集团东方锅炉股份有限公司生产的 DG-1211/17.4- II 22 型锅炉，该锅炉为亚临界参数、一次中间再热、单炉膛自然循环汽包锅炉。

3.1 一次调频试验情况分析

孤网运行 350MW 亚临界机组一次调频主参数设置为

【作者简介】夏季（1987-），男，中国山东济宁人，本科，主管，从事孤网运行与控制、自动控制优化、智能电网研究。

机组转速不等率 4.5%，死区值 $\pm 2r/min$ ，一次调频正向补偿量限额 10% P_e ，一次调频负向补偿量不设下限，发电机组一次调频时功率实际补偿量占规定的功率补偿量 (ΔP) 理论值的 80% 及以上时，则机组一次调频性能合格。

调频品质判断依据为一次调频负荷响应滞后时间应小于 3s，机组达到 75% 目标负荷的时间应不大于 15s，机组达到 90% 目标负荷的时间应不大于 30s，机组参与一次调频的稳定时间（频率扰动开始到机组负荷偏离稳态值偏差 5% 范围之内且不在超出的时间）应小于 1min。

以单台 350MW 机组为例，分别进行 75%-260MW、85%-300MW、100%-350MW 不同负荷段工况下一次调频试验，试验数据如表 1 所示。

①机组负荷 260MW，分别进行 $\pm 2r/min$ 、 $\pm 6r/min$ 、 $\pm 10r/min$ 有效频差扰动试验。根据试验数据分析，虽然机组在负荷变化初始阶段响应较快，但随后逐渐稳定在新频率值上，这显示机组在较低负荷段工况下一次调频调节能力较强，在负荷增/减情况下能够迅速调整，在较短时间内实现频率稳定。

②机组负荷 300MW，分别进行 $\pm 2r/min$ 、 $\pm 6r/min$ 、 $\pm 10r/min$ 有效频差扰动试验。根据试验数据分析，虽然机组在负荷变化初始阶段调整迅速，但在进行正向一次调频大扰动试验时，增负荷能力受限，这显示机组在较高负荷段工况下一次调频的正向补偿能力受限，孤网运行中参与调频的机组应预留出足够的调整量。

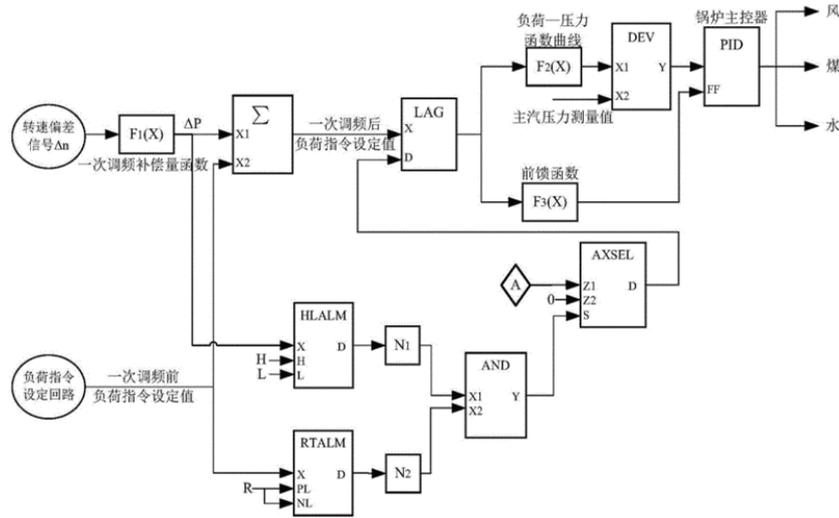


图 1 亚临界机组调频试验原理

表 1 不同负荷段下机组一次调频试验数据表

负荷段	初始负荷	有效频差	转速不等率	理论变量	15s 实际变量	15s 变量百分比	30s 实际变量	30s 变量百分比	60s 实际变量	30s 变量百分比
260MW (75%)	260.90	+2	4.5%	5.19	265.04	79.84%	265.82	94.89%	266.17	101.64%
	259.56	-2	4.5%	-5.19	255.28	82.54%	254.69	93.92%	254.28	101.83%
	260.12	+6	4.5%	15.56	274.08	89.74%	275.05	95.98%	275.61	99.58%
	262.19	-6	4.5%	-15.56	249.53	81.39%	247.67	93.34%	246.93	98.10%
	260.33	+10	4.5%	25.93	283.69	90.10%	284.86	94.62%	286.38	100.48%
	250.81	-10	4.5%	-25.93	226.79	92.65%	225.88	96.16%	223.83	104.07%
300MW (85%)	302.69	+2	4.5%	5.19	306.77	78.69%	307.93	101.06%	308.41	110.31%
	300.90	-2	4.5%	-5.19	296.4	86.79%	295.17	110.51%	295.25	108.96%
	301.35	+6	4.5%	15.56	314.66	85.56%	315.85	93.21%	316.35	96.43%
	301.03	-6	4.5%	-15.56	288.74	79.01%	286.30	94.69%	285.91	97.20%
	300.38	+10	4.5%	25.93	321.05	79.73%	323.84	90.49%	325.43	96.62%
	299.08	-10	4.5%	-25.93	275.93	89.29%	272.80	101.37%	270.56	110.01%
350MW (100%)	348.07	+2	4.5%	5.19	352.11	77.91%	353.07	96.43%	353.50	104.72%
	348.14	-2	4.5%	-5.19	343.4	91.41%	343.36	92.19%	343.09	97.39%
	349.78	+6	4.5%	15.56	363.52	88.33%	365.53	101.25%	366.11	104.98%
	350.33	-6	4.5%	-15.56	335.99	92.19%	333.73	106.71%	333.48	108.32%
	352.01	+10	4.5%	25.93	372.99	80.92%	375.92	92.22%	376.84	95.77%
	351.04	-10	4.5%	-25.93	328.85	85.59%	326.48	94.73%	325.38	98.97%

③机组负荷 350MW，分别进行 $\pm 2\text{r}/\text{min}$ 、 $\pm 6\text{r}/\text{min}$ 、 $\pm 10\text{r}/\text{min}$ 有效频差扰动试验。根据试验数据分析，在极端工况下，350MW 机组满负荷运行时（因孤网运行原因已提前优化 CCS 强制切手动限制条件），出现危及电网运行安全事件后，一次调频具备短期内超发能力，负向调节作用明显优于正向调节作用，一次调频动作后有显著抑制电网波动效果。

以上试验数据分析中，均满足 GB/T40595—2021《并网电源一次调频技术规定及试验导则》要求。国产亚临界 350MW 机组调频试验数据分析是评估该机组调频特性及性能的过程。通过分析试验数据，可以了解机组在负荷变化情况下频率变化、功率平衡和响应时间等关键指标，以判断该机组调频性能是否达到要求^[2]。

结合孤立电网实际运行经验进一步分析，根据孤网运行 9.5 年的结果，通过一次调频能够在网机组在负荷变化时能够稳定地调整频率和功率平衡，同时具备较快的响应时间。可以得出一次调频可以抵消网频波动，并且能够有效抑制电网事故的扩大。机组一次调频性能是电力系统稳定运行的基础保障，合理应用机组调频性能对于孤网运行的安全至关重要。

3.2 响应时间分析

响应时间是指机组在负荷变化时从开始响应达到新的稳定状态所需时间。通过对响应时间分析，可以评估机组调频响应能力，并判断机组是否能够迅速调整输出功率，保持电网频率稳定。例如，假设有一台发电机组，该发电机组所连接电网频率突然发生变化，为使电网频率恢复到稳定状态，机组需要调整自身输出功率。若该发电机组响应时间很短，那么就能够快速调整输出功率，使电网频率尽快恢复到稳定。相反，若响应时间较长，机组就需要更长的时间来调整输出功率，电网频率就会在此期间保持不稳定。

以某孤网运行单位 2022 年 5 月 12 日一起典型电网事故为例，分析机组一次调频在电网异常扰动情况下响应时间与重要作用。

事故前运方：孤网运行方式情况下，电网实时总发有功 2605MW、实时总供有功 2372MW（如图 2 所示），开机方式为 $8 \times 350\text{MW} + 1 \times 135\text{MW} + 1 \times 220\text{MW}$ ，其中 #1 机组进行 107% 超负荷试验。

21:03:43:91#1 发变组出口开关跳闸甩负荷 373MW，电网频率最低至 49.24Hz。

21:03:44:151 稳控主站动作，发出切负荷指令。

21:03:44:623 稳控子站执行切工业硅 15 台电炉（合计负荷：341.4MW），电网频率恢复至 50.04Hz。

21:03:50 在各机组一次调频动作调整后，电网恢复发供平衡，电网频率恢复至 50.00Hz（如图 3 所示）。

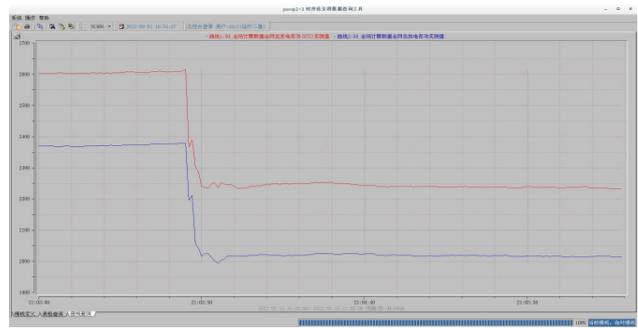


图 2 电网运行发供电情况

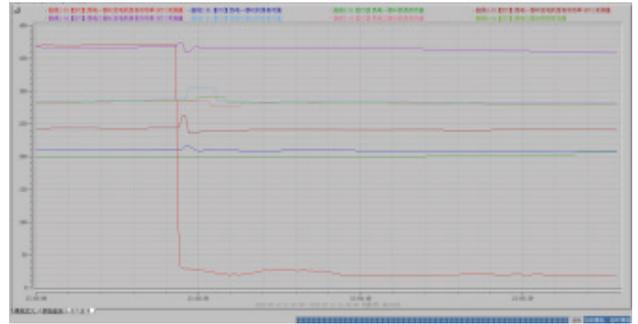


图 3 在网 350MW 机组一次调频动作趋势图

通过本次事故案例分析，在电网事故扰动较大情况下，稳控系统优先动作进行一次电网负荷平衡后，剩余调整量无需人为干预，一次调频功能迅速响应，自动调节发电机出力平衡发供关系，在网机组配合动作用时 6s 左右将电网频率恢复至标准运行状态，调整及时性及准确性远远高于人为操作。

通过对机组响应时间分析，机组调频响应时间越短，机组调频响应能力就越强，这意味着机组能够迅速调整输出功率，使电网频率保持稳定；同理若机组的响应时间较长，那么可能无法在短时间内调整输出功率，从而导致电网频率不稳定。调频性能的不稳定性可能会给电网带来新的问题，比如次生灾害的电压波动、负载损失，甚至电网失稳等。

综合分析以上一次调频试验数据与典型电网事故案例实际数据，评估机组调频性能。通过对不同负荷阶段一次调频试验数据进行对比，可以判断机组在不同负荷变化条件下调频性能表现。另外，还可以通过对典型电网事故情况下一次调频实际动作情况进行分析，如当负荷快速变化时，是否出现频率迅速偏离后难以恢复情况。还可以分析机组在负荷变化过程中是否出现过调频和欠调等问题，以及机组频率恢复性能等。

4 结果分析与讨论

4.1 机组的调频响应特性

该机组在负荷变化的条件下表现出快速响应和较高稳定性，具体而言，当负荷增加时，机组能够快速增加输出功率以保持频率稳定。相反，当负荷减少时，机组能够快速降

低输出功率以保持频率稳定。这表明机组具备优秀调频响应特性，能够迅速调整输出功率以响应负荷变化。这对于保持电网频率稳定非常重要，尤其是在面临瞬时大规模负荷波动或其他干扰的情况下。

4.2 机组的频率稳定性

通过计算机组频率变化情况，可以评估其频率稳定性，结果表明，该机组频率变化速率较小，频率波动范围也较小，具备较好频率稳定性。这意味着机组能够在负荷变化时保持较为稳定频率。频率变化速率小和频率波动范围的小，反映出机组对负荷变化的敏感程度较低，能够有效地维持电网频率的稳定。

4.3 抵消波动，保护安全。

一次调频抵消网频波动，可以有效地降低电网的振荡幅度，使得系统能够更加稳定地运行。这有助于降低电网事故的发生概率，并防止事故扩大。当电网发生故障或出现异常情况时，一次调频可以迅速感知并作出响应，通过调整发电机的机械功率来平衡电力供需，以避免系统失衡。这有助于防止事故发展为更严重的情况，减少电力设备的损坏和维修成本。

在孤网运行时，由于电力供应和负荷之间的匹配存在

困难，系统稳定性容易受到影响。一次调频可以迅速调整发电机输出功率，以保持电网的稳定运行，这有助于减少孤网运行中的电力波动和电压不稳定等问题，提高供电质量和可靠性。

5 结语

综上所述，通过对国产亚临界 350MW 机组孤网运行一次调频试验的深入分析以及对该机组调频特性进行全面评估，结果表明该机组在孤网运行条件下具备良好调频能力，能够快速响应负荷变化，并保持频率稳定和功率平衡，这为亚临界机组可靠运行和经济性提供有力支持。在未来研究中，可以进一步探索多机组试验调频性能，并寻求提高机组调频响应能力的方法。相信这项研究结果对孤立电网运行稳定及电力行业发展具有重要指导意义。通过持续的研究和创新，进一步提高亚临界机组性能，促进电力系统稳定运行与发展。

参考文献

- [1] 孙超.350MW机组一次调频研究与应用[J].黑龙江科技信息, 2021(2):189-190.
- [2] 焦微微.350MW亚临界机组汽轮机阀门流量特性优化试验研究[J].黑龙江电力,2021,43(6):6-8.