

燃机电厂黑启动与保安柴油发电机组配置方案及启动方式研究

徐晓燕[✉], 毛建锋, 沈云

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 为了降低燃机电厂初期投资, 在保证机组安全的同时, 通过黑启动功能获取广东辅助服务经济补贴, 提出了扩建燃机时采用多台柴油发电机组的配置方案, 用于9F机组事故停机保安电源, 同时又作为原9E机组黑启动电源。[方法] 为了实现技术经济最优化, 通过柴油发电机组配置及厂用电接线的多方案比选论证, 给出了合理配置方案。并对推荐方案的事故停机控制逻辑以及黑启动控制逻辑进行论述。[结果] 通过黑启动试验结果表明, 各电气量均满足规范要求, 推荐方案能满足黑启动功能并通过电网公司验证。[结论] 多台柴油机同时用于黑启动及保安功能的方案, 为今后燃机电厂黑启动及保安电源工程设计提供参考及借鉴。

关键词: 保安电源; 黑启动; 柴油发电机组; 控制逻辑; 厂用电

中图分类号: TM611; TK288 文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)02-0092-09

开放科学(资源服务)二维码:



Research on the Configuration Scheme and Starting Method of Black Start and Emergency Diesel Generator Unit in Gas Turbine Power Plant

XU Xiaoyan[✉], MAO Jianfeng, SHEN Yun

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] In order to reduce the initial investment in the gas turbine power plant and ensure the safety of the unit, and obtain the economic subsidy of Guangdong auxiliary services through the black start function, the configuration scheme of using multiple diesel generator units is proposed when expanding the gas turbine, which are used as both the emergency shutdown power supply of 9F unit, and the black start power supply of the original 9E unit. [Method] In order to achieve technical and economic optimization, a reasonable configuration scheme was given through multi-scheme comparison and demonstration on the configuration of diesel generator units and the auxiliary power wiring. The emergency shutdown control logic and black start control logic of the recommended scheme were also explained. [Result] The results of the black start test show that all electrical quantities meet the requirements of the specification, and the recommended scheme can meet the black start function and pass the verification of the Grid Company. [Conclusion] Multiple diesel generator units are used for both black start and emergency functions in the scheme, which provides reference for the future engineering design of black start and emergency power supply in gas turbine power plants.

Key words: emergency power supply; black start; diesel generator units; control logic; auxiliary power

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

国内电网因其结构和调度模式特征, 一般不可发生大面积停电事故, 但在, 2005年9月26日, 海南省全省停电; 2017年8月23日, 第13号超强台风“天鸽”正面袭击广东珠三角地区导致珠海地区电

网大面积停电, 这些足以证明大面积停电事故并非遥不可及。这些大面积停电事故往往是由于电网内存在潜在的危险因素, 在某种诱发因素的作用下会引起电网的瓦解或崩溃。

黑启动是在整个电网或者系统因故障停运后,

收稿日期: 2022-05-05 修回日期: 2022-09-27

基金项目: 中国能建广东院科技项目“H级重型燃机联合循环技术研究”(EV04351W)

不依赖别的网络的帮助,通过系统中具有自启动能力的机组的启动,带动无自启动能力的机组,逐步扩大电力系统的恢复范围,最终实现整个电力系统的恢复^[1]。黑启动的关键是电源点的启动,与火电、核发电机组相比,燃机具有辅助设备简单^[2]、厂用电少^[3]、启动速度快等优点^[4-5],成为黑启动电源的重要手段之一。而电厂交流保安电源是在发生全厂停电或在单元机组失去厂用电时,为了保证机组的安全停运,或者为了防止危及人身安全等原因,应在停电时继

续由交流保安电源供电。

本文基于东莞深圳市能源集团有限公司樟洋电厂一期9E机组以及二期9F机组工程的特点及需求,考虑柴油发电机组配置方案,以实现二期9F机组的事故保安电源以及原一期9E机组黑启动电源功能。

1 二期9F机组保安电源

根据9F机组各工艺专业设备选型及负荷性质,9F机组保安电源负荷统计如表1所示。

表1 9F机组保安电源负荷计算
Tab. 1 Load calculation of the emergency power supply of unit 9F

名称	额定容量/kW	数量及运行方式	计算功率/kW
主润滑油泵	132	1,连续	132
余热锅炉电梯	8.5	1,连续	8.5
SCR入口及出口CEMS分析柜	10	1,连续	10
高压给水泵滑油站	15	2,连续	30
锅炉应急照明配电箱	3	1,连续	3
锅炉热力配电箱	55	1,连续	55
汽水系统热力配电箱	35	1,连续	35
主厂房机组DCS电源分配柜	25	1,连续	25
热控UPS电源盘	10	1,连续	10
热控APS电源盘	10	1,连续	10
循环水泵房热力配电箱	10	1,连续	10
大屏电源	14	1,连续	14
SIS电源柜	12	1,连续	12
主厂房事故照明MCC	47.56	1,连续	47.56
机组UPS电源(主输入)	120	1,连续	120
升压站UPS电源(主输入)	10	1,连续	10
机组控制用直流系统备用电源	35	1,连续	70
升压站控制用直流系统备用电源	20	1,连续	20
机组动力用直流系统备用电源	70	2,连续	70
机组交流电源屏备用电源	20	1,连续	20
9E变频主控电源	14	1,连续	14
高压给水泵变频主控电源	20	1,连续	20
凝泵变频主控电源	7	1,连续	7
励磁系统交流辅助电源	2	1,连续	2
通信机房电源	25	1,连续	25
柴油发电机交流辅助电源供油泵	3	1,连续	3
5号机主厂房电梯	13	1,连续	13
6号机主厂房电梯	13	1,连续	13
机组保安段EMCC	214.55	1,连续	从柴油机工作段直接供电

注:9F机组保安电源计算负荷为818.88 kVA($k=0.8$);9F机组保安电源计算功率704.23 kW($k=0.86$);配套柴油发电机组选型1 MW。

根据计算结果,为了保证 9F 机组在发生交流厂用配电失电事故时,能安全停机,需装设快速启动柴油发电机组作为交流事故保安电源,每台机组容量为 1 MW^[6]。

9F 机组停机后保安电源负荷计算如表 2 所示。9F 机组停机后必需工作的保安负荷总容量每台机组为 340 kW,2 台机组约 600 kW。

2 一期 9E 机组黑启动电源

启动燃气轮机至并网运行需要启动系统来完成,启动装置包括启动电机等,燃气轮机的启动装置负荷是电站主要的、也是最大的电负荷,是黑启动系统的考虑重点和选型计算关键。

在外部电网失电情况下,由于一期 9E 机组没有保安电源,当外部电网失电后 12 min 内若不能向 9E 机组供电,9E 机组会由于燃机动静部件卡涩导致短期无法再次启动发生,也就无法实现黑启动了。因此,要求黑启动电源需具备当外部电网失电后 12 min 内向 9E 机组供电的能力。黑启动的电源需考虑在 9E 燃机黑启动时同时给 9F 机组盘车等不能停运的事故保安负荷供电。

如表 3 所示,9E 机组黑启动时每台机组低压负荷为 550 kW,首次加载负荷为 238 kW,另外 9E 燃机启动电机容量为 1.45 MW^[4]。根据主机厂经验反馈,黑启动初期的燃机启动马达功率 1 MW,加装了变频装置之后,燃机启动马达的启动电流倍数约为额定电流的 2 倍^[7]。

3 柴油发电机组配置方案比选

基于上述 9E 黑启动、9F 保安电源的需求,考虑采用柴油发电机组作为启动电源。9E 机组黑启动时,结合其他电厂经验,为高压启动电机设置变频启动装置,以防止黑启动阶段最大 1 台电机启动时母线上的电压降、电动机端电压降超过规定值。

根据上述黑启动、保安电源的计算结果,9F 机组停机交流事故保安电源为 704 kW;9E 机组黑启动每台机组低压负荷为 550 kW,9E 高压启动电机 1.45 MW(考虑配置变频器,一拖二);9E 机组黑启动时,9F 机组 2 台机组停机后同时必须工作的保安负荷为 680 kW。

目前常用的黑启动电源配置为储能和柴发两种方案,由于储能投资造价远高于柴油机,且本工程不考虑参与调频市场,因此结合 9E 黑启动、9F 保安需求,推荐采用柴油发电机组作为电源,柴油机设置考虑以下 3 个方案:

方案一^[8-10]:配置 3 台 1.2 MW 柴油发电机组,其中 1 台用于 9E 机组保安电源,另外两台用于 9F 机组保安电源。3 台 1.2 MW 柴油发电机组联合作为 9E 黑启动电源。

方案二^[11-13]:9E 机组单独设置 1 台额定容量 2.6 MW,出口电压为 6 kV 的柴油发电机组。9F 机组每台机组单独设 1 台 1 MW 的柴油机为事故保安电源供电,9E 机组和 9F 机组的黑启动电源、保安电源完全分厂运行。

方案三^[14-16]:9F 机组其中 1 台机组设置 1 台额定容量 2.6 MW,出口电压为 6 kV 的快速启动柴油发电机组,柴油机段为 6 kV 段,同时设置 1 台保安干式变为事故保安 PC 段降压供电,另 1 台机组设 1 台额定容量 1 MW,出口电压为 380 V 的柴油发电机组作为事故保安电源。如一期 9E 机组需要黑启动,由本期设置的 2.6 MW 柴油发电机作为启动电源。

3 个方案的柴油机选型对照表如表 4 所示:经分析,3 个方案柴油机选型均满足要求。3 种方案技术经济比较如表 5、表 6 所示:综合技术经济比较,方案一安全可靠,运维方便,且整体投资最少,因此推荐该方案。具体方案如下:配置 3 台 1.2 MW 柴油发电机组,其中 1 台用于 9E 机组保安电源,另外两台用于 9F 机组保安电源。3 台 1.2 MW 柴油发电机组接至 9E 机组黑启动段,经黑启动变给 9E 机组备用段供电,联合作为 9E 黑启动电源,用于 9E 机组的启动马达及其他启动负荷,如图 1 所示。

4 柴油发电机组运行及相关电气控制逻辑

4.1 事故停机时保安电源功能的控制逻辑

以下为#5 机组保安段控制逻辑,燃机#6 机组控制类同。如图 1 所示,假设 5K3 为工作电源,5K4 为备用电源,反之亦可。

1) 正常工况

#5 机保安段由#5 机组 400/230 V 工作 A 段(B 段)供电,即:5K3(5K4)、K53、K54 处于合闸状态,5K4(5K3)处于分闸状态;#6 机同理。#5K1/6K1 开

表2 9F机组停机后保安电源负荷计算

Tab. 2 Load calculation of the emergency power supply after unit 9F shutdown

名称	额定容量/kW	数量及运行方式	计算功率/kW
主润滑油泵	132	1,连续	132
主厂房事故照明MCC	47.56	1,连续	47.56
升压站控制用直流系统备用电源	20	1,连续	20
机组保安段EMCC	140	1,连续	140
9F机组停机后保安电源计算负荷	—	—	339.56

表3 9E机组黑启动负荷计算

Tab. 3 Load calculation of black start of unit 9E

名称	额定容量/kW	数量及运行方式	计算功率/kW
冷水泵	75	1,连续	75
框架风机	45	2,连续	90
顶轴油泵(首次加载)	15	1,连续	15
透平风机	15	1,连续	15
滑油泵(首次加载)	90	1,连续	90
油雾分离机	18.5	1,连续	18.5
液压油泵(首次加载)	15	1,连续	15
盘车马达(首次加载)	30	1,连续	30
空压机	30	1,连续	30
负荷间风机	18.5	1,连续	18.5
辅助循环水泵	45	1,连续	45
其他低压负荷(首次加载)	108	1,连续	108
黑启动9E机组低压负荷	—	—	550
高压启动电机	1 450	1,连续	1 450
黑启动9E机组中压负荷	—	—	1 450

关处于常闭状态,5K2/6K2开关处于分闸状态,5K0/6K0处于分闸状态。

2)事故切换

当#5机保安段备自投装置检测到母线失压,即进线一(5K3)回路失电,备自投装置检测到进线二(5K4)有电压,则备自投装置动作出口跳5K3,然后合闸5K4,同时向柴油发电机组控制屏发出起柴油发电机组指令。当5K3、5K4进线回路均失电,则备自投装置发5K3、5K4跳闸指令,待收到开关位置信号反馈后,发出5K2合闸指令。柴油发电机组收到起机指令启动完成具备条件后,柴油发电机组控制柜自动发出5K0合闸指令,5K0合闸后向#5机组保安段负荷供电。#6机保安段失压同理。

3)市电恢复

当#5机保安段厂用电恢复需要退出柴油发电机组供电时,采取并联切换(经柴发控制器)的方式,先由DCS或人工依次发出合K53(K54)指令,备自投检同期满足条件后,合5K3(5K4)指令,分5K2指令,柴油发电机组断开5K0开关,再经可调延时停机。#6机同理。

4)紧急启动和停止柴油发电机组

柴油发电机组有传送至远方主控制室的报警信号及事故信号,运行人员根据运行工况的需要,可在就地操作紧急启动和停机按钮。

4.2 机组黑启动时黑启动电源功能的控制逻辑

1)9E机组黑启动前保安负荷

当9E机组厂用电系统失电,运行人员手动合SK7以及SK8,DCS向#1柴油发电机组发起柴油发

表 4 柴油机选型校验计算

Tab. 4 Check calculation for type selection of diesel generator units

名称	方案一	方案二	方案三
变频启动电流倍数	2	2	2
黑启动柴油机数量	3	1	1
黑启动柴油机容量/kW	3 600	2 600	2 600
柴油机额定容量选择 S_c /kVA	4 500	3 250	3 250
黑启动合计容量/kVA, $S_c=0.8*\Sigma P$	1 920	1 440	1 440
黑启动合计负荷/kW, $P_c=0.86S_c$	1 651	1 238	1 238
启动最大一台电动机时, 柴油发电机过负荷能力校验 $[S_c+(1.25K_q-K)P_{dm}]/K_{ol}$, $K_q=2$, $K=0.8$, $K_{ol}=1.5$	2 413	2 093	2 093
实际使用地点的环境条件不同于标准使用条件时, 对柴油机输出功率的修正: $P_x=aP_i$ ($a=0.92$)	3 312	2 392	2 392
柴油机的首次加载能力校验要求柴油机的实际输出功率不小于2倍初始投入的起动功率 $P_x > 2.5K_q P_{db} \cos\theta$ ($k_q=5$, $\cos\theta=0.4$) $P_{db}=258$ kW	1 290	1 290	1 290
柴油发电机母线段电压降	9.1%	12.2%	12.2%
6 kV 电缆压降	1.06%	1.25%	1.25%
最大电动机(高压启动电机)启动时电动机端电压	83%	86.5%	86.5%

表 5 技术比较

Tab. 5 Technical comparison

名称	方案一	方案二	方案三
可靠安全性	(1) 停机: 当9F/9E燃机停机时, 可快速启动柴油发电机组为9F/9E机组安全停机等重要负荷供电。提高了9E机组停机的安全可靠; (2) 黑启动: 保证9F/9E机组安全停机后, 根据调度要求3台低压柴油机联合运行作为黑启动电源, 能同时保证黑启动及9F机组停机后保安负荷供电, 可靠性高; (3) 9E及9F机组控制逻辑较简单, 可靠性较高。	(1) 停机: 当9F燃机停机时, 可快速启动柴油发电机组为9F机组安全停机等重要负荷供电, 可靠性高; (2) 黑启动: 根据调度要求9E机组中压柴油机运行作为黑启动电源。9E与9F机组完全独立; (3) 9E机组控制逻辑简单, 可靠性高。	(1) 停机: 当9F燃机停机时, 可快速启动柴油发电机组为机组安全停机等重要负荷供电, 可靠性较高。但高压柴油机需快速启动功能, 设备要求较高; (2) 黑启动: 根据调度要求9F机组中压柴油机运行作为黑启动电源。但如对应9F机组故障事故停机时, 容量无法同时满足两者要求, 需采取应急措施优先保证9F机组停机后, 再实现9E黑启动; (3) 机组保安段设置未保持一致性, 控制逻辑复杂, 可靠性低。
运维管理	(1) 机组相对独立, 只在黑启动时需要联合3台运行管理; (2) 柴油发电机组机型完全一致, 方便维护检修; (3) 柴油发电机组备用容量较小, 维护成本低。	(1) 机组完全独立, 运行管理方便; (2) 柴油发电机组机型不一致, 维护检修困难; (3) 柴油发电机组备用容量较大, 维护成本高。	(1) 9F机组的1台高压柴油发电机组, 同时兼做黑启动使用, 独立性较差; (2) 柴油发电机组机型不一致, 维护检修困难; (3) 柴油发电机组备用容量较小, 维护成本低。

电机组指令, 柴油发电机组收到启动指令启动完成具备条件后, 柴油发电机组控制柜自动发出 1K0 合闸指令, 柴油发电机组通过 9E 机组备用段为 9E 机组 400 V 厂用段等重要保安负荷供电。

2) 9E 机组黑启动过程(以第 1 套机组为例, 含#1、/#2 机组, #3、/#4 同理)

当电网故障出现大面积停电, 9F/9E 燃机停机, 正常自动模式启动#5、#6、#1 机组柴油机分别为各自保安段等重要负荷供电。110 kV 母线电压为零, 101、102 开关以及 6 kV 厂用电 61A01、61B01 开关均处于分闸位置。DCS 或手动合#5K6 及#6K6 开关, DCS 发送黑启动开机指令至#1 柴油发电机组, 收到

表 6 经济比较

Tab. 6 Economic comparison

设备名称	万元		
	方案一	方案二	方案三
低压快速启动柴油发电机(1 MW)	—	140×2	150
低压快速启动柴油发电机(1.2 MW)	160×3	—	—
高压快速启动柴油发电机(2.6 MW)	—	—	550
高压普通型柴油发电机(2.6 MW)	—	450	—
黑启动升压干式变(3.15 MVA)(台)	28	—	—
保安变(1.250 MVA)	—	—	12.5
中低压开关柜	30	12	12
变频启动装置(一拖二)	100	100	100
投资	638	842	824.5
投资差	—	+204	+186.5

表 7 黑启动时电气量数据

Tab. 7 Black start electrical data

测试内容	1 燃机黑启动	3 燃机黑启动
电压/kV	最高6.53	最高6.52
	最低5.98	最低5.97
电流/A	最大349.66	最大364.74
	有功功率/kW	最大1 997
无功功率/kvar	最大1 743.9	最大1 908.6
	频率/Hz	最高50.46
	最低48.73	最低48.81

指令后, 柴油发电机组依次启动并入 9E 机组黑启动 380/220 V 段完成 3 台柴油发电机组并网控制。

通过 9E 机组备用段以及变频器启动#1 燃机启

动电机, #1 机组启动后合上对应变高侧断路器, 实现 110 kV 母线带电。合上#1 机组变高侧 101 开关, 确认 110 kV 母线带电。向#2 主变以及#1 高厂变充电, 确认#1 高厂变运行正常后, 选择“并联切换”方式, 切换 6 kV IA、IB 段电源, 确认 61A01、61B01 在

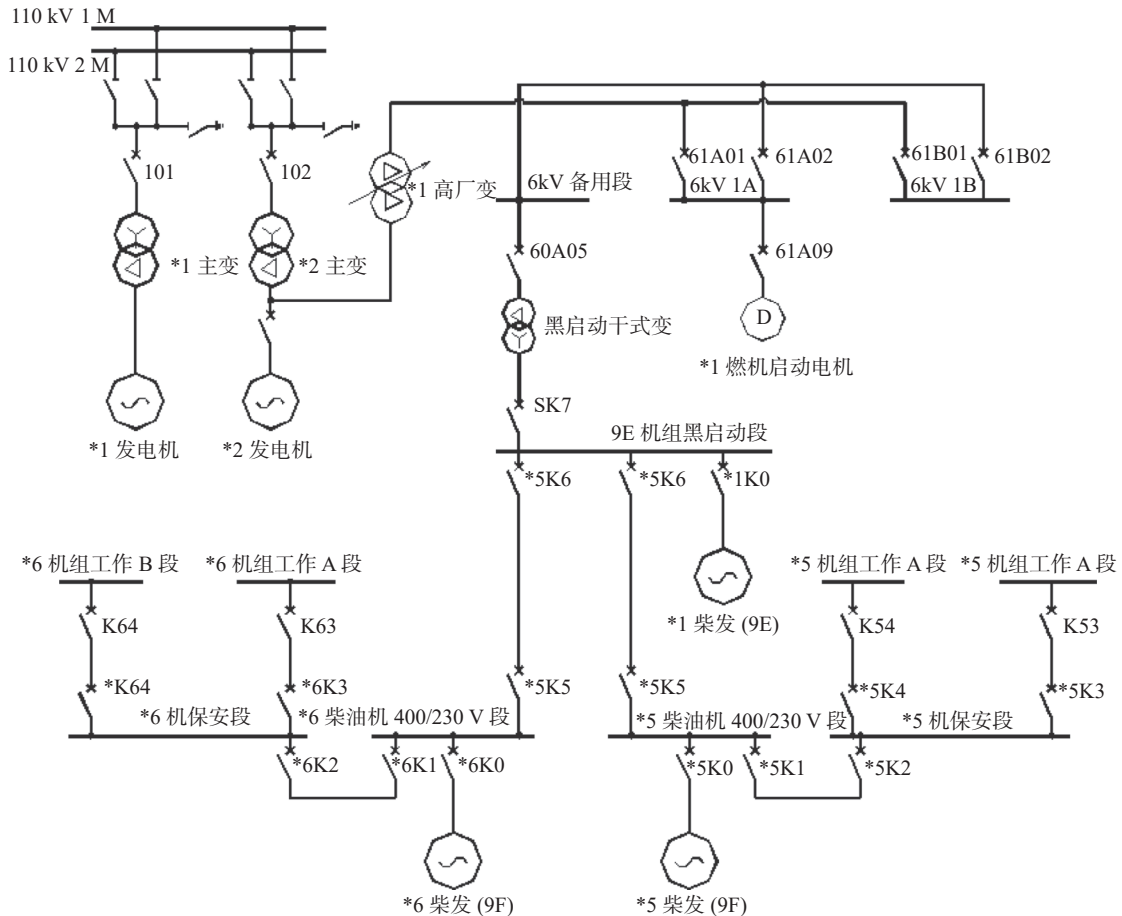


图 1 黑启动原理接线图

Fig. 1 Elementary wiring diagram of black start

合闸位,且 61A02、61B02 在分闸位后,断开 60A05 开关。至此,#1 机组带厂用电孤岛运行,实现#1 机组黑启动。

3)跳机过程

黑启动完成后,运行人员根据运行工况的需要,由并机控制屏完成 3 台柴发解列(依次分闸#5K5、#6K5 开关),再由 DCS 或人工跳#5K6、#6K6 开关。最后跳开#1K0 开关。

4.3 黑启动试验

从全厂失电开始到燃机启动成功带厂用电运行,是衡量樟洋 9E 机组黑启动水平的重要指标。图 2、图 3 为南网电力科技黑启动试验过程中对柴油发电机组录波图。

由下图可知,在全厂失电后柴油发电机组成功启动并供厂用电运行的情况下,有功从 0 kW 加到 524.4 kW,期间逐步恢复 6 kV 主要厂用负荷,最大负荷瞬间达到 781.9 kW。用变频方式启高压启动电机,柴油机组最大有功功率达到 1.997 MW。

从表 7 测试数据看,黑启动过程中,电压及频率均在标准 $\pm 15\%$ 范围内,最大电流及最大有功在 3 台柴

油机组额定电流、功率范围内^[17-18],配置满足要求^[19-20]。

5 结论

本文通过多方案比选后推荐配置 3 台 1.2 MW 柴油机发电机组,其中 1 台用于 9E 机组保安电源,另外两台用于 9F 机组保安电源,黑启动过程中 3 台柴油机发电机组并联作为 9E 机组黑启动电源方案,并就控制策略进行详细阐述。

本方案保证本厂 9F 事故停机保安电源的同时,又可作为原 9E 机组黑启动电源和保安电源,为工程节约了大量成本,同时通过黑启动广东辅助服务经济补贴(30 万/台套月),1~2 a 内即可收回 9E 机组增设黑启动功能所增设柴油发电机组以及变频器设备投资。整个方案系统清晰,可靠性高,控制灵活,投资少。经南网电科院黑启动试验,2 台机组实际启动时间为 46 min 和 54 min,启动时间短,孤岛运行稳定,满足调度 3 h 内完成 1 台机组黑启动要求。结果表明电厂具备黑启动能力,可作为广东电网黑启动电源点。

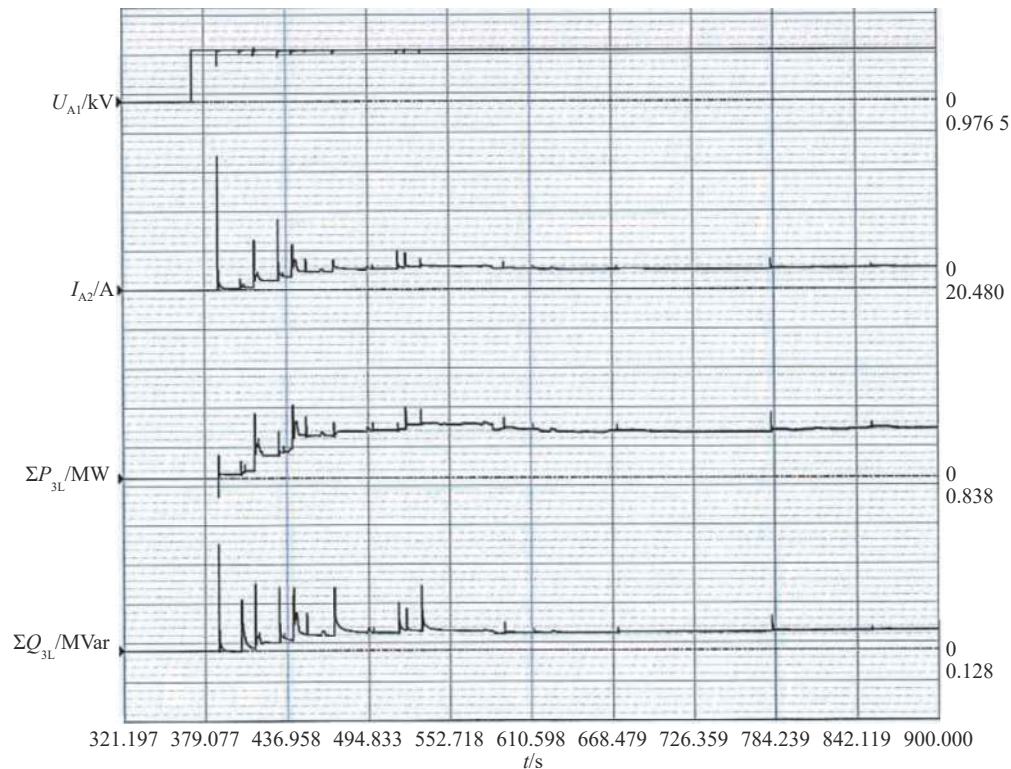


图 2 黑启动柴油发电机组带 6 kV 厂用电运行录波图

Fig. 2 Recorded diagram of black start diesel generator units operating under 6 kV auxiliary power

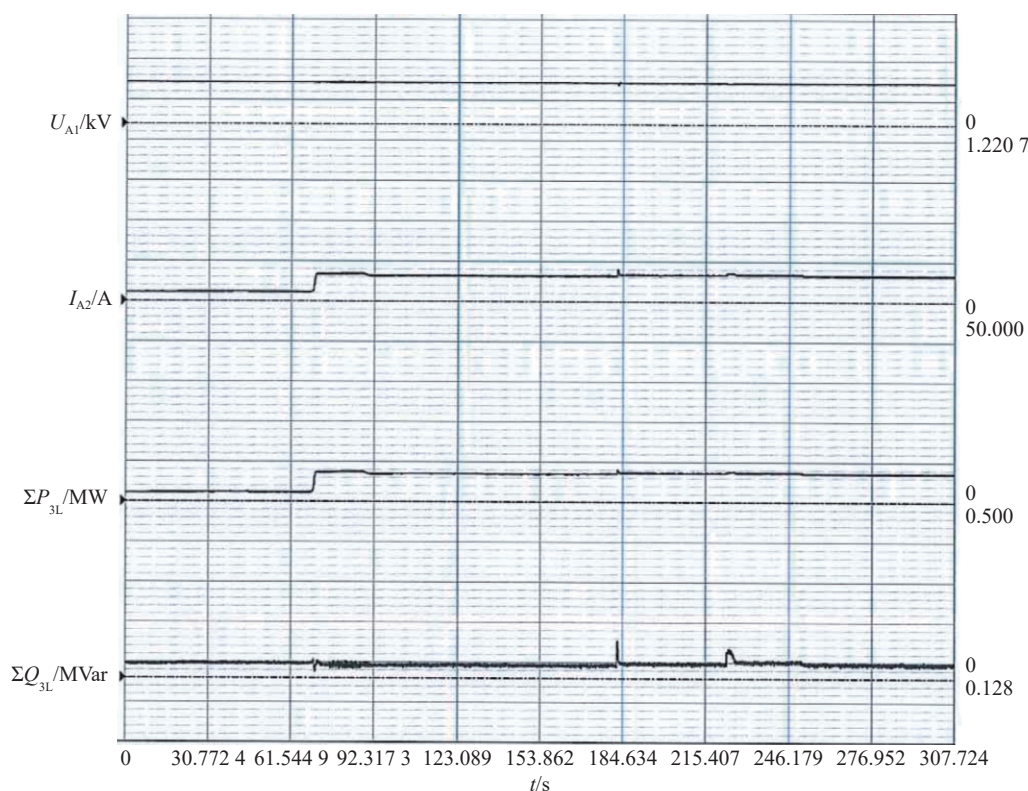


图3 黑启动柴油发电机组带高压启动电机运行录波图

Fig. 3 Recorded diagram of black start diesel generator units operating with HV starter motor

参考文献:

- [1] 张继泉. 电厂黑启动电源的设计 [J]. 电工技术, 2010(4): 16-18. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1388.2010.04.006.
ZHANG J Q. Power plant black start power supply design [J]. *Electric Engineering*, 2010(4): 16-18. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1388.2010.04.006.
- [2] 林敏, 李汉峰, 姜凤阳. 电厂黑启动电源的选择探讨 [J]. 电站系统工程, 2017, 33(2): 29-32.
LIN M, LI H F, JIANG F Y. Discussion on selection of black-start power source of power [J]. *Plant Power System Engineering*, 2017, 33(2): 29-32.
- [3] 余旭翔, DENICOURT F. 燃气轮机发电机组黑启动方案探讨 [J]. 燃气轮机技术, 2012, 25(1): 56-62. DOI: 10.16120/j.cnki.issn1009-2889.2012.01.014.
YU X X, DENICOURT F. Discussion on the black start scheme of gas turbine generator set [J]. *Gas Turbine Technology*, 2012, 25(1): 56-62. DOI: 10.16120/j.cnki.issn1009-2889.2012.01.014.
- [4] 俞立凡, 李彩玲, 彭竹君. 9F单轴燃机作为电网黑启动电源点的探讨 [J]. 浙江电力, 2006, 6: 53-56. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1881.2006.06.017.
YU L F, LI C L, PENG Z J. Discussion of 9F single shaft gas turbine as power of black-start [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2006, 6: 53-56. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1881.2006.06.017.
- [5] 杜丰, 杜才明, 熊彬, 等. 孤网全过程黑启动探索与实践 [J]. 江西电力, 2022, 46(7): 10-13.
DU F, DU C M, XIONG B, et al. Exploration and practice of black start in the whole process of isolated network [J]. *Jiangxi Electric Power*, 2022, 46(7): 10-13.
- [6] 国家能源局. 火力发电厂厂用电设计技术规程: DL/T 5153—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
National Energy Administration of the People's Republic of China. Technical code for the design of auxiliary power system of fossil-fired power plant: DL/T 5153 —2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [7] 包珺, 彭佩怡. 高压柴油发电机组用于电厂黑启动的实现 [J]. 船电技术, 2011, 31(4): 51-54. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4862.2011.04.014.
BAO J, PENG P Y. The realization of high voltage diesel generator set for power plant blackstart [J]. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 2011, 31(4): 51-54. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4862.2011.04.014.
- [8] 陈海华, 李新成, 胡旦华, 等. 具有黑启动功能的液化天然气一体化厂用电方案 [J]. 现代电力, 2020, 37(5): 456-462. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.1109.
CHEN H H, LI X C, HU D H, et al. An liquefied natural gas-integrative auxiliary power scheme with black start function [J]. *Modern Electric Power*, 2020, 37(5): 456-462. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.1109.
- [9] 童伟林, 邵臻卫, 张文程. 火电厂黑启动柴油发电机组容量计

- 算和仿真 [J]. *电力安全技术*, 2020, 22(10): 75-78.
- TONG W L, SHAO Z W, ZHANG W C. Capacity calculation and simulation of black-start diesel generator set in thermal power plant [J]. *Electric Safety Technology*, 2020, 22(10): 75-78.
- [10] 袁振邦, 秦鹏, 李汉峰, 等. 4×150 MW 燃煤发电厂黑启动柴油发电机组选型研究 [J]. *广东电力*, 2012, 25(3): 44-47. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2012.03.010.
- YUAN Z B, QIN P, LI H F, et al. Research on type selection of black start-up diesel generator unit for 4 × 150 MW coal-fired power plant [J]. *GuangDong Electric Power*, 2012, 25(3): 44-47. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2012.03.010.
- [11] 李世光, 李梓萌, 高正中, 等. 火电厂黑启动柴油发电机组容量计算与选型 [J]. *山东电力技术*, 2016, 43(3): 64-67. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9904.2016.03.017.
- LI S G, LI Z M, GAO Z Z, et al. Capacity calculation and selection of black start-up diesel generator unit for coal-fired power plant [J]. *Shandong Electric Power*, 2016, 43(3): 64-67. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9904.2016.03.017.
- [12] 陈大宣, 翁海峰, 郑陆松. 燃气轮机黑启动过程及柴油发电机组容量选择研究 [J]. *勘测设计电力*, 2020, 47(5): 35-40. DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2020.10.008.
- CHEN D X, WENG H F, ZHENG L S. Study of gas turbines black start and diesel generator capacity computing [J]. *Electric Power Survey Design*, 2020, 47(5): 35-40. DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2020.10.008.
- [13] 甘景纯. 燃气-蒸汽联合循环自备电厂黑启动柴油发电机容量选择 [J]. *电力勘测设计*, 2021, 8: 6-10. DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2021.08.002.
- GAN J C. Capacity Selection of Black Start Diesel Generator in Gas Steam Combined Cycle Captive Power Plant [J]. *Electric Power Survey Design*, 2021, 8: 6-10. DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2021.08.002.
- [14] 梁青, 刘世鑫, 周亮. 9E燃气轮机黑启动方案及实战 [J]. *燃气轮机技术*, 2018, 3: 46-50. DOI: 10.16120/j.cnki.issn1009-2889.2018.01.008.
- LIANG Q, LIU S X, ZHOU L. 9E gas turbine black start scheme and practice [J]. *GAS Turbine Technology*, 2018, 3: 46-50. DOI: 10.16120/j.cnki.issn1009-2889.2018.01.008.
- [15] 郭馨, 张生龙, 惠兆森. 燃气轮机作为自启动电源的电网黑启动案例 [J]. *应用能源技术*, 2014, 4: 36-40. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3230.2014.04.010.
- GUO X, ZHANG S L, HUI Z S. Gas turbine as the black start power supply case since the start [J]. *Applied Energy Technology*, 2014, 4: 36-40. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3230.2014.04.010.
- [16] 刘艳, 顾雪平, 张丹. 基于数据包络分析模型的电力系统黑启动方案相对有效性评估 [J]. *中国电机工程学报*, 2006(5): 32-37+94. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2006.05.006.
- LIU Y, GU X P, ZHANG D. Data envelopment analysis based relative effectiveness assessment of power system black-start plans [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006(5): 32-37+94. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2006.05.006.
- [17] 徐天乐, 白茹, 王光, 等. 基于模式自动识别的一键黑启动控制策略 [J]. *山东电力技术*, 2020, 47(5): 35-40. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9904.2020.02.008.
- XU T L, BAI R, WANG G, et al. The control strategy of one-button black-start based on pattern recognition [J]. *Shandong Electric Power*, 2020, 47(5): 35-40. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9904.2020.02.008.
- [18] 梁青, 刘世鑫, 周亮. 9E燃气轮机黑启动方案及实战 [J]. *燃气轮机技术*, 2018, 31(1): 46-50. DOI: 10.3969/j.issn.1009-2889.2012.01.012.
- LIANG Q, LIU S X, ZHOU L. 9E gas turbine black-start scheme and actual combat [J]. *Gas Turbine Technology*, 2018, 31(1): 46-50. DOI: 10.3969/j.issn.1009-2889.2012.01.012.
- [19] 薛青童, 金丽华. 浅析9E级燃机黑启动过程 [J]. *机电信息*, 2019(27): 12-13. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0797.2019.27.006.
- XUE Q T, JIN L H. A brief analysis of the black start process of the 9E class gas turbine [J]. *Electromechanical Information*, 2019(27): 12-13. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0797.2019.27.006.
- [20] 王伟红, 刘蓓, 祝瑞金, 等. 燃机启动电源配置方案的研究 [J]. *华东电力*, 2007, 35(5): 44-47. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9529.2007.05.010.
- WANG W H, LIU P, ZHU R J, et al. Configuration schemes of starting power sources for gas turbines [J]. *East China Electric Power*, 2007, 35(5): 44-47. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9529.2007.05.010.

作者简介:



徐晓燕

徐晓燕 (第一作者, 通信作者)

1980-, 女, 贵州贵定人, 高级工程师, 重庆大学电气工程硕士, 主要从事发电电气一次相关设计及技术研究工作(e-mail)xuxiaoyan2@gedi.com.cn。

毛建锋

1978-, 男, 广东广州人, 高级工程师, 华中科技大学电气自动化学士, 主要从事火力发电厂电气设计(e-mail)maojianfeng@gedi.com.cn。

沈云

1962-, 男, 广东兴宁人, 学士, 主要从事电源设计及研究工作(e-mail)shenyun@gedi.com.cn。

(编辑 孙舒)