

# 核电站应急柴油发电机组选型

华君,马翼,郑添,张智禄

中国船舶集团有限公司第七〇三研究所无锡分部,江苏 无锡 214151

**摘要:**对核电站柴油发电机组进行选型设计以确保核电站运行安全。明确应急发电机组选型要求,根据 2 套柴油发电机组加载负荷的顺序和容量,按负荷计算、分步加载计算、核电站设计推荐的发电容量中的最大者为依据选择发电机型号,以电压降为指标对发电机进行校核;以 ISO 3046 推荐的方法确定柴油机的额定功率及核电站设计要求功率的较大者为依据选择柴油机型号,并以首次可加载功率为指标进行校核。计算结果表明:发电机组的电压降为 18.32%,满足电压降不大于 20%的要求,柴油发电机组的首次加载功率大于发电机组的首次加载功率,满足选型要求。

**关键词:**核电厂;应急;柴油发电机组;选型;加载;电压降

**中图分类号:**TM623;TM314

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2023)05-0031-06

**引用格式:**华君,马翼,郑添,等.核电站应急柴油发电机组选型[J].内燃机与动力装置,2023,40(5):31-36.

HUA Jun, MA Yi, ZHENG Tian, et al. Capacity selection of the emergency diesel generator set for nuclear power plant[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(5):31-36.

## 0 引言

为确保核电站的安全运行,要求核电站具备非常可靠的供电系统。在国内核电站中,除了以 500 kV 和 220 kV 开关站作为核电站的外部主备用电源外,还以柴油发电机组作为后备电源在应急情况下向设备供电。应急柴油发电机组对于核电站的安全意义重大,在失去电厂外部交流电源时,应急柴油发电机组能够满足应急厂用设备用电要求,确保反应堆安全停堆,并防止由于失电而导致重要设备损坏<sup>[1]</sup>。

应急柴油发电机组成套设计的首步工作为设备选型计算,设备选型直接影响机组是否满足核电厂的运行需求。本文中以某核电站应急柴油发电机组的选型设计为例,研究柴油发电机组的选型和校核方法。

## 1 机组选型要求与方法

某核电站配置 2 套应急柴油发电机组(记为 A 序列、B 序列),分别为带有应急厂用设备的 2 个交流应急配电系统 EMA、EMB 供电,2 套柴油发电机组均采用冗余设计。该核电站的应急柴油发电机组的额定功率为 8.30 MW,瞬时功率为 9.13 MW,额定电压为 10.5 kV,额定功率因数为 0.8。

### 1.1 机组选型要求

柴油发电机组的容量应有一定裕度,一般为机组基本设计容量的 10%,以确保柴油发电机组在 12 h 运行期间内有 1 h 过载运行的能力。

在顺序加载负荷时,对于每个加载步骤,均应确保转速不低于额定转速的 95%,电压不低于额定电压的 80%。

收稿日期:2023-06-05

第一作者简介:华君(1978—),男,江苏无锡人,高级工程师,主要研究方向为核电厂用应急柴油发电机组成套设计及研究,E-mail:dmuzhangfeng@163.com。

## 1.2 机组选型方法

依据核电厂应急柴油发电机组确定的加载程序计算机组容量,并根据发电机效率计算相应柴油机的所需功率<sup>[2]</sup>;参照发电机和柴油机型号规格选择相应的发电机和柴油机,组成应急柴油发电机组,并根据所选机型的参数以及核电厂现场环境条件,进行负载启动时发电机电压降的校核和柴油机加载能力的校核<sup>[3]</sup>,确保选型的柴油发电机组满足要求。

## 2 负荷分析

2 套柴油发电机组的运行负荷、加载负荷曲线如图 1~4 所示。

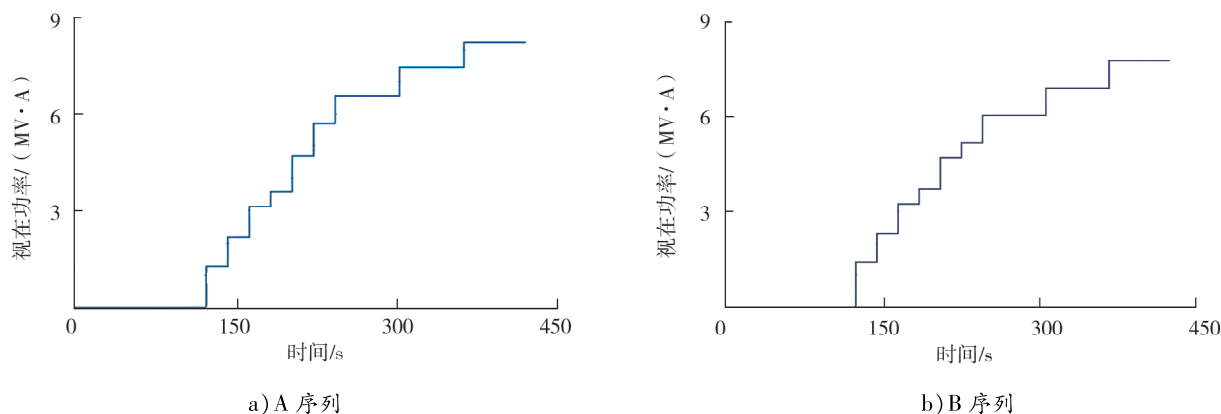


图 1 2 套发电机组运行视在负荷曲线

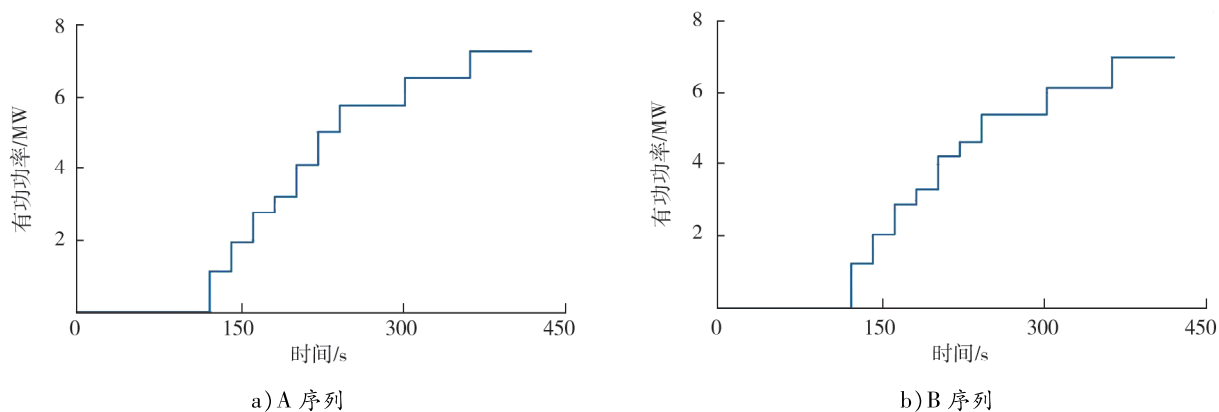


图 2 2 套发电机组运行有功负荷曲线

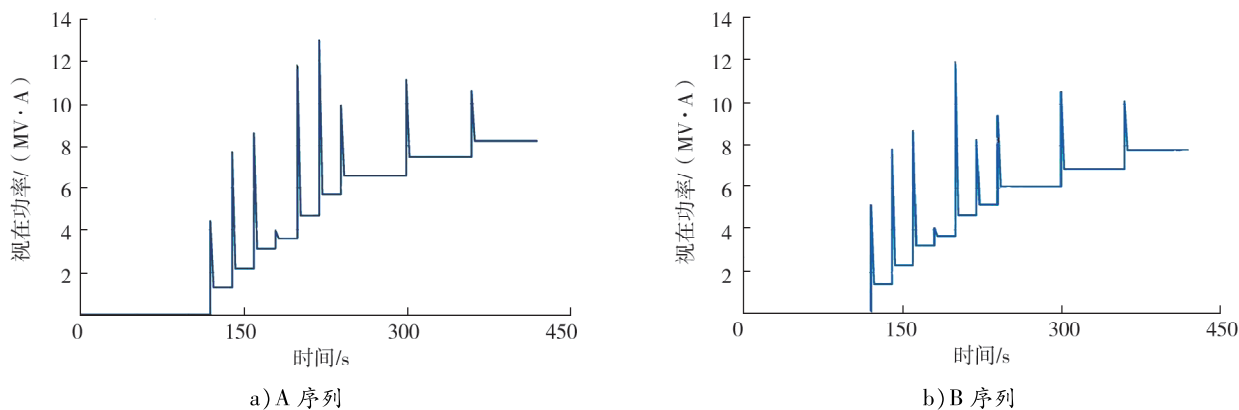


图 3 2 套发电机组加载视在负荷曲线

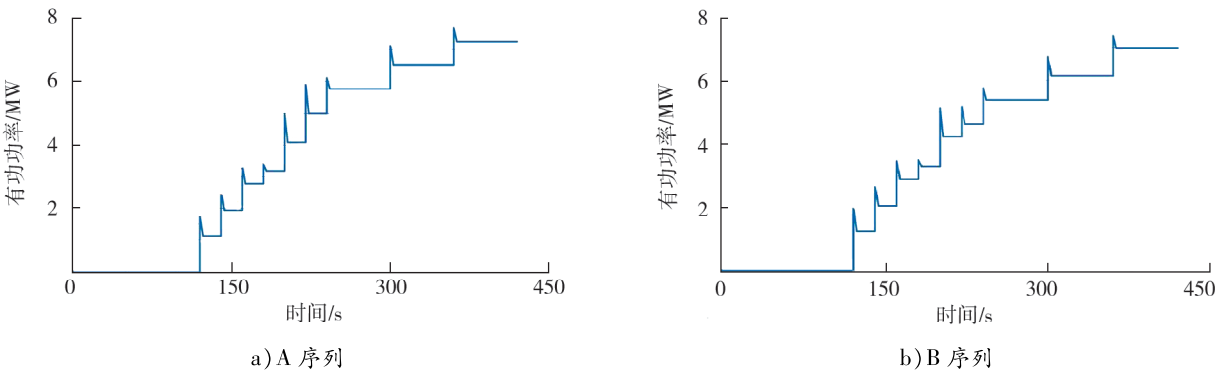


图 4 2 套发电机组加载有功负荷曲线

经分析统计,各加载工步负荷如表 1、2 所示。

表 1 A 序列负荷汇总

| 加载工步 | 分步加载功率/MW | 分步加载容量/(MV·A) | 运行总有功/MW | 运行总容量/(MV·A) | 分步起动容量/(MV·A) | 分步起动功率/MW |
|------|-----------|---------------|----------|--------------|---------------|-----------|
| 1    | 1.135     | 1.285         | 1.135    | 1.285        | 4.395         | 1.736     |
| 2    | 0.812     | 0.901         | 1.947    | 2.186        | 6.419         | 1.413     |
| 3    | 0.833     | 0.926         | 2.780    | 3.112        | 6.426         | 1.417     |
| 4    | 0.413     | 0.461         | 3.193    | 3.573        | 0.843         | 0.685     |
| 5    | 0.896     | 1.120         | 4.089    | 4.693        | 8.170         | 1.797     |
| 6    | 0.911     | 1.012         | 5.000    | 5.705        | 8.283         | 1.822     |
| 7    | 0.758     | 0.864         | 5.758    | 6.569        | 4.227         | 1.104     |
| 8    | 0.768     | 0.886         | 6.526    | 7.455        | 4.540         | 1.368     |
| 9    | 0.738     | 0.768         | 7.264    | 8.223        | 3.169         | 1.150     |

表 2 B 序列负荷汇总

| 加载工步 | 分步加载功率/MW | 分步加载容量/(MV·A) | 运行总有功/MW | 运行总容量/(MV·A) | 分步起动容量/(MV·A) | 分步起动功率/MW |
|------|-----------|---------------|----------|--------------|---------------|-----------|
| 1    | 1.250     | 1.415         | 1.250    | 1.415        | 5.174         | 1.975     |
| 2    | 0.812     | 0.901         | 2.062    | 2.316        | 6.419         | 1.413     |
| 3    | 0.833     | 0.926         | 2.895    | 3.242        | 6.426         | 1.417     |
| 4    | 0.413     | 0.461         | 3.308    | 3.703        | 0.843         | 0.613     |
| 5    | 0.911     | 1.012         | 4.219    | 4.715        | 8.283         | 1.822     |
| 6    | 0.407     | 0.487         | 4.626    | 5.202        | 3.563         | 0.979     |
| 7    | 0.795     | 0.864         | 5.385    | 6.066        | 4.228         | 1.104     |
| 8    | 0.742     | 0.856         | 6.127    | 6.922        | 4.517         | 1.342     |
| 9    | 0.862     | 0.889         | 6.989    | 7.811        | 3.215         | 1.271     |

分步最大加载容量为每分步起动容量与已连续稳定运行的容量(即上一步运行总容量)的和,其中,每步起动容量以成组电机同时起动进行计算<sup>[4-5]</sup>。

根据图 1~4 和表 1、2 可知:A、B 序列中,最大运行总有功和最大运行总容量为 A 序列的加载工步 9,分别为 7.264 MW、8.223 MV·A;A 序列加载步 6 的加载容量最大,为 12.976 MV·A;最大加载功率为 A 序列工步 9,运行和加载总有功为 7.676 MW。

### 3 发电机选型及校核

#### 3.1 发电机选型

机组容量首先要满足运行和加载总容量及运行和加载总有功的要求、满足核电站设计对机组容量的要求。即以按负荷计算的发电机容量、按分步加载计算的发电机容量、核电站设计推荐发电机容量中的最大者为依据,选择发电机型号。

##### 3.1.1 按负荷计算的发电机容量

发电机负荷包括运行和加载总容量,并应有一定过载能力。按负荷计算的发电机容量<sup>[6-7]</sup>

$$S_{G1} \geq S/K_G, \quad (1)$$

式中: $S$  为最大加载容量; $K_G$  为发电机允许短时过载因数,一般取 1.4~1.6,本文中  $K_G = 1.5$ 。

发电机功率

$$P_{G1} \geq \lambda S_{G1}, \quad (2)$$

式中: $\lambda$  为发电机额定功率因数, $\lambda = 0.8$ 。

由表 1、2 和式(1)(2)可知:最小  $S_{G1}$  为 8.651 MV·A, 最小  $P_{G1}$  为 6.921 MW。

##### 3.1.2 按分步加载计算的发电机容量

按分步加载计算的发电机容量<sup>[8-10]</sup>

$$S_{G2} \geq S_{\max}/\lambda,$$

式中: $S_{\max}$  为运行与加载总容量的和、运行与加载总有功的的最大者。

本文中: $S_{\max} = 7.676$  MV·A, 最小  $S_{G2}$  为 9.595 MV·A。

##### 3.1.3 选型

核电站设计推荐的应急柴油发电机组的额定功率为 8.3 MW, 对应总容量为 10.375 MV·A, 为按负荷计算的发电机容量、按分步加载计算的发电机容量、核电站设计推荐发电站容量中的最大者, 因此以核电站设计推荐的发电机组参数为发电机选型依据。据此选择的某型号发电机的主要参数如表 3 所示。

表 3 某型号发电机的主要参数

| 额定容量/(MV·A)                 | 额定功率/MW | 额定电压/kV | 额定电流/A | 额定频率/Hz             |
|-----------------------------|---------|---------|--------|---------------------|
| 10.375                      | 8.3     | 10.5    | 570    | 50                  |
| 额定转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 发电机效率/% | 功率因数    | 绝缘等级   | 温升等级                |
| 750                         | 97.3    | 0.8     | F      | B                   |
|                             |         |         |        | 发电机暂态不饱阻抗/ $\Omega$ |
|                             |         |         |        | 0.281               |

注:发电机按环境温度 50 ℃ 设计,故计算时无需进行功率修正<sup>[11]</sup>。

#### 3.2 发电机电压降校核

根据文献[4],电压降

$$\Delta_U = Z_d / (S_G / S_{st} + Z_d) \times 100\%,$$

式中: $Z_d$  为发电机暂态不饱阻抗, $\Omega$ ;  $S_G$  为发电机容量,  $kV \cdot A$ ;  $S_{st}$  为最大起动容量,  $kV \cdot A$ 。

由表 1、2 可知: A 序列第 6 步和 B 序列第 5 步的起动容量最大,均为 8.283 MV·A,  $\Delta_U = 18.32\%$ , 满足应急柴油发电机电压降不大于额定电压 20% 的要求。

### 4 柴油机选型及校核

#### 4.1 柴油机选型

柴油机的功率应满足所有负荷稳定运行工况功率需求,还应满足最大起动负荷要求,此外还需考虑

发电机的效率以及环境条件<sup>[12-13]</sup>。根据文献[2]推荐的方法确定柴油机修正功率,并与核电站设计要求的应急发电机组功率相比较,取其大者为依据选择柴油机型号。

柴油机额定输出功率

$$P_r = P_x / \alpha,$$

式中: $\alpha$ 为功率修正因数, $\alpha=0.9629$ ;  $P_x$ 为柴油机实际输出功率,kW。

由第2章分析可知:柴油发电机组最大运行功率为7.264 MW,运行加起动最大功率为7.676 MW,考虑发电机效率,则柴油机最小功率需求为7.889 MW,修正后的柴油机最小功率为8.193 MW。

核电站设计要求发电机组额定功率为8.3 MW,大于修正后的柴油机最小功率,因此按核电站设计要求功率选择型号柴油机,该柴油机的额定功率为10 MW,额定转速为750 r/min,额定功率下的平均有效压力为2.26 MPa。

考虑柴油机功率修正因数和发电机效率,在现场条件下,该发电机组可输出的功率为9.369 MW,大于核电站设计要求,同时保留一定的加载裕量。

## 4.2 柴油机负载能力校核

柴油机首次可加载功率应大于应急发电机组首次加载功率<sup>[14-15]</sup>。文献[3]推荐的柴油机首次加载指导功率与平均有效压力的对应关系如图5所示,图中 $\Delta_p$ 为现场条件下相对于额定功率的功率增加百分比。所选柴油机的平均有效压力为2.26 MPa,根据图5可得柴油机首次可加载功率约为额定功率的35%,因此,在现场条件下,柴油机首次可加载功率为3.370 MW,结合发电机效率可知:机组现场可首次加载的功率约为3.279 MW。

由表1、2可知:B序列1工步最大起动功率为1 975 kW,小于所选柴油发电机组的首次加载功率,所选柴油机通过负载能力校核。

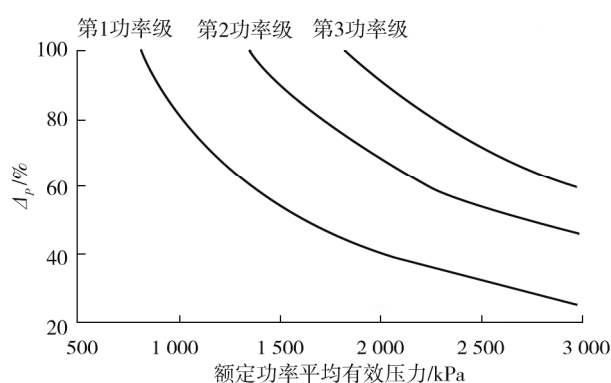


图5 柴油机首次加载指导功率与平均有效压力的对应关系

## 5 结束语

以某核电站应急柴油发电机组为例研究柴油发电机组的选型和校核方法。机组容量首先应满足运行和加载总容量及运行和加载总有功的要求,其次应满足核电站设计对机组容量的要求,再对发电机选型进行校核,确保在负荷加载时电压不应下降到额定电压的80%以下;对柴油机进行校核,确保柴油机的首次可加载负荷满足加载程序的要求。通过理论方法与实际选型案例相结合,研究了核级应急柴油发电机组的选型方法,可为核电应急柴油发电机组成套设计提供参考。

### 参考文献:

- [1] 刘海良. 核电站应急柴油发电机组的特点分析及调试方法[J]. 通讯世界, 2017(8): 140-141.
- [2] ISO. Reciprocating internal combustion engine; performance: part 1: declarations of power, fuel and lubricating oil consumptions, and test methods; additional requirements for engines for general use; ISO 3046-1: 2002 (E) [S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2002.
- [3] 中国电器工业协会. 往复式内燃机驱动的交流发电机组: 第五部分: 发电机组; GB/T 2820.5—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [4] National Electrical Manufacturers Association. Motors and Generators: NEMA MG1—2016[S]. Rosslyn, USA: National Electrical Manufacturers Association, 2016.

- [5] 中国航空工业规划设计研究院. 工业与民用配电设计手册[M]. 3版. 北京:中国电力出版社,2005.
- [6] 李友峰. 3000 kW 核电站 AAC 级应急柴油发电机组的研制[J]. 内燃机车,2009(7):33-35.
- [7] 郭桂林,王成国. 对核电站应急柴油发电机组容量选择的探讨[J]. 内燃机与动力装置,2013,30(3):52-55.
- [8] 张淑兴. 应急柴油发电机组仿真研究[D]. 大连:大连理工大学,2009.
- [9] 张东福,崔建华. 基于 Matlab 的核电站应急柴油发电机组的建模与仿真[J]. 发电设备,2015(2):22-24.
- [10] 张明佳. 核电站应急柴油发电机组可靠性数据的建立与应用[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [11] 刘晓宇. 核电站应急柴油发电机组自动控制系统[J]. 科技创新与应用,2014(13):84-85.
- [12] 李嘉敏,赵百荒. 核电站应急柴油发电机组调试系统分析[J]. 电站系统工程,2012(6):71-73.
- [13] 郜秋凯,屈天佑. 某海外核电站应急柴油机组逆功率问题处理[J]. 电工技术,2017(5):75-77.
- [14] 张峰,颜鹏,黄鹏. 核电站应急柴油发电机组调速系统技术研究[J]. 电工技术,2019(11):53-55.
- [15] 李友峰. 3000 kW 核电站 AAC 级应急柴油发电机组的研制[J]. 内燃机车,2009(7):33-35.

## Capacity selection of the emergency diesel generator set for nuclear power plant

HUA Jun, MA Yi, ZHENG Tian, ZHANG Zhilu

Wuxi Division of No. 703 Research Institute of CSSC, Wuxi 214151, China

**Abstract:** To ensure the safe operation of nuclear power plants, diesel generator sets are designed for nuclear power plants. Clarify the requirements for emergency generator sets, the generator model is selected based on the order and capacity, calculating according to load, step by step load, and the maximum recommended generation capacity for nuclear power plant design, and the engine is verified by voltage drop. A diesel engine model is chosen based on the method recommended by ISO 3046 to determine the rated power of the diesel engine and the power required for nuclear power plant design, and verified with the first loadable power as the indicator. The calculation results show that the voltage drop of the generator set is 18.32%, which meets the requirement of no more than 20% voltage drop. The first load power of the diesel generator set is greater than the first load power of the generator set, which meets the selection requirements.

**Keywords:** nuclear power plant; emergency; diesel generator set; capacity selection calculation; load; voltage drop

(责任编辑:郎伟锋)