

# 波波里水电站励磁系统选型设计

邓丛林, 陈鹏

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

**摘要:** 本文通过分析直流侧短路电流特点, 提出快速熔断器分断容量应按空载误强励状态下励磁变低压侧三相短路电流来计算的思路; 理论上推导了快速熔断器的  $I_2t$  值和灭磁电阻容量值的计算公式。通过这些理论上的分析和推导, 使励磁系统元器件选型计算公式更易懂、更科学、更实用, 进一步提高了励磁系统运行的可靠性。可为类似水电站励磁系统设计提供参考。

**关键词:** 励磁变压器; 可控硅; 快速熔断器; 灭磁电阻; 灭磁开关

**中图分类号:** [TM622]; TM331; N945.17

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-2184(2022)05-0101-05

## Type Selection Design of Excitation System for Gribo-Popoli Hydropower Station

DENG Conglin, CHEN Peng

(PowerChina Chengdu Engineering Co. Ltd., Chengdu Sichuan 610072)

**Abstract:** By analyzing the characteristics of short circuit current at DC side, this paper proposes that the breaking capacity of fast fuse should be calculated according to the three-phase short circuit current at low voltage side of excitation transformer under no-load false forced excitation. The calculation formulas of  $I_2t$  value and de-excitation resistance energy capacity value of fast fuse are deduced theoretically. Through these theoretical analysis and derivation, the calculation formula of excitation system component selection is more understandable, scientific and practical, and the reliability of excitation system operation is further improved. It can provide reference for excitation system design of similar hydropower stations.

**Key words:** excitation transformer; thyristor; fast fuse; de-excitation resistance; field breaker

### 1 概述

波波里水电站地处西非科特迪瓦共和国萨桑德拉河上, 位于纳瓦(Nawa)瀑布下游约 14 km 处, 属热带雨林气候, 最高气温可达 45 °C, 月平均温度 35 °C。

电站采用河床式开发, 总装机  $3 \times 37.63$  MW 灯泡贯流式水轮发电机组, 发电机额定电压为 10.5 kV。采用发变组单元接线经 50 MVA 双绕组油浸式变压器升压后, 分别通过 235 kV 架空输电线路接入波波里 235 kV 变电站。

电站采用自并励可控硅励磁系统, 励磁变采用户内、自冷环氧树脂浇注三相干式励磁变。励磁系统设置 4 组柜子, 包括 1 组调节器柜、2 组功率柜和 1 组灭磁柜; 励磁调节器设有 A、B 两个自动通道, 每个自动调节通道均由自动电

压调节(AVR)+手动励磁调节(FCR)组成, 配置具有角加速度信号输入的电力系统稳定器 PSS, PSS 模型采用 IEEE 2B 模型; 功率柜采用冗余强制通风冷却; 转子灭磁采用 SiC 非线性灭磁电阻。

励磁系统主要元器件选型设计是励磁系统设计的重要组成部分, 针对该电站励磁系统主要元器件选型, 给出了一些关键参数的详细计算方法, 可供类似项目参考。

### 2 励磁变压器选型

#### 2.1 二次侧额定线电压的计算

励磁系统顶值电压为发电机额定励磁电压的 2 倍, 当发电机端正序电压为额定值时, 励磁顶值电压予以保证。根据文献<sup>[1]</sup>, 励磁变压器二次侧电压的计算公式如下:

$$K \times (3 \sqrt{2} / \pi \times U_{2N} \times \cos \alpha_{\min} = K_u U_{fn} + K_i I_{fn} [(3/\pi)(X_T + X_L) + 2R_T + R_L] + \Delta U_{scr}$$

收稿日期: 2022-04-28

$$+\Delta U \quad (1)$$

$$X_T = U_k \times (U_{2N}^2 / S_N) \quad (2)$$

考虑到实际使用中交直流电缆均采用铜缆,电阻率很小,且长度均较短,故可忽略  $X_L$ 、 $R_T$  和  $R_L$ ,则公式(1)简化为:

$$U_{2N} = \frac{K_u U_{fn} + \Delta U_c}{1.35 \times (K \cos \alpha_{\min} - 0.5 X_T K_i)} \quad (3)$$

式中  $U_{2N}$  为励磁变额定二次线电压,单位为伏(V); $K_u$  为励磁系统电压强励倍数; $U_{fn}$  为发电机额定励磁电压,单位为伏(V), $\Delta U_c$  为晶闸管元件、碳刷、滑环、线路等部分附加压降,单位为伏(V);一般取  $5 \sim 10 \text{ V}^{[2]}$ ;  $K$  为整流桥阳极电压下降系数, $\alpha_{\min}$  为励磁系统允许输出的晶闸管最小触发角,取  $10^\circ$ ;  $X_T$  为由励磁变至整流桥交流输入端之间的每相换向电抗,单位为欧( $\Omega$ ); $K_i$  为励磁系统电流强励倍数,一般取 2。则根据公式(3),励磁变二次侧额定电压  $U_{2N}$ :

$$U_{2N} = \frac{2 \times 355 + 10}{1.35 \times (\cos 10^\circ - 0.5 \times 0.06 \times 2)} = 576.7 \text{ V} \quad (4)$$

考虑到当地电网薄弱,电压支撑需求迫切,实际选型励磁变二次侧额定电压  $U_{2N}$  取 710 V,基本可满足 2.5 倍强励磁电压需求。因而,公式(3)更简单,更具有操作性。

## 2.2 励磁变容量计算

根据文献中励磁变额定容量计算方法,励磁变额定容量  $S_{th}$  为:

$$\begin{aligned} S_{th} &= 1.15 \times \sqrt{3} U_{2N} \times I_{fn} \times 0.816 \\ &= 1.15 \times \sqrt{3} \times 710 \times 1135 \times 0.816 \\ &= 1310 \text{ kVA} \end{aligned} \quad (5)$$

实际选型励磁变容量取 1400 kVA。

## 3 可控硅选型

### 3.1 可控硅峰值电压选择计算

根据文献,晶闸管单管所承受的正反向重复峰值电压  $U_{RRM}$  应满足如下公式<sup>[3]</sup>:

$$U_{RRM} \geq \sqrt{2} K_u K_b U_{2N} \quad (6)$$

式中  $U_{RRM}$  为晶闸管单管所承受的正反向重复峰值电压,单位伏(V); $K_u$  为电压裕度系数,取  $1.05 \sim 1.1$ ;  $K_b$  为过电压倍数,取  $2.4 \sim 2.7$ 。

按照在 1.1 倍额定负荷运行温度下,晶闸管整流器所能承受的反向峰值电压不小于 2.75 倍励磁变压器二次侧最大峰值电压考虑,则该电站

可控硅峰值电压需满足:

$$\begin{aligned} U_{RRM} &\geq 2.75 \times \sqrt{2} U_{2N} = 2.75 \times \sqrt{2} \times 710 \\ &= 2760 \text{ V} \end{aligned} \quad (7)$$

实际选型晶闸管正反向重复峰值电压  $U_{RRM}$  取 4200 V。

### 3.2 常温下可控硅平均通态电流的选择计算

晶闸管整流桥并联支路数  $N$  为 2,采用  $N-1$  冗余,即一桥故障时能满足包括强励在内的所有功能,在任何工况下,可控硅的温度不超过设计允许值  $110^\circ\text{C}$ 。

$$I_{R,MAX} \geq \frac{K_i I_{fn}}{K_1 (N-1)} \quad (8)$$

式中  $I_{R,MAX}$  为单个整流桥最大输出电流(持续时间不小于 1 min)A; $K_1$  为均流系数,按自然均流考虑取 0.9,单柜运行时取 1。

则根据公式(8),电站单个功率柜最大输出电流  $I_{R,MAX}$  应满足:

$$I_{R,MAX} \geq \frac{2 \times 1135}{1 \times (2-1)} = 2270 \text{ A} \quad (9)$$

为了提高选型设备运行的可靠性,所选择的单个晶闸管元件的额定正向平均通态电流应大于单柜可能出现的最大输出工况下的柜内桥臂的正向平均电流值。

$$I_{T,AV(SC)} \geq K_2 \frac{I_{R,MAX}}{1.57 \times \sqrt{3}} \quad (10)$$

式中  $I_{T,AV(SC)}$  为单个晶闸管元件的额定正向平均通态电流,单位安(A); $K_2$  为裕度系数,综合考虑海拔高度、冷却风速和环境温度等因素影响,一般取  $1.1 \sim 1.2$ 。则根据公式(10),电站单个晶闸管元件的额定正向平均通态电流  $I_{T,AV(SC)}$  应满足:

$$I_{T,AV(SC)} \geq 1.2 \times \frac{2270}{1.57 \times \sqrt{3}} = 1002 \text{ A} \quad (11)$$

实际选型晶闸管额定正向平均通态电流  $I_{T,AV(SC)}$  取 2040 A。

### 4 快速熔断器选型

在整流桥支臂上串联快速熔断器是必要的,在整流回路过载、可控硅误导通或被击穿短路等情况下,可以在极短时间内把电源断开以切除故障,保护晶闸管元件,保障整套励磁系统装置持续运行。

#### 4.1 额定电压选择计算

快速熔断器的额定电压应大于整流桥交流侧额定电压。

$$U_{rN} \geq K_{ru} U_{2N} \quad (12)$$

式中  $U_{rN}$  为快速熔断器额定电压, 单位伏(V);  $K_{ru}$  为裕度系数, 取 1.2~1.3;  $U_{2N}$  为励磁变二次侧额定电压, 单位伏(V); 则根据公式(12), 整流桥支臂上快速熔断器额定电压满足:

$$U_{rN} \geq 1.2 \times 710 = 852 \text{ V} \quad (13)$$

实际选型快速熔断器额定电压取值为 1 000 V。

#### 4.2 额定电流选择计算

快速熔断器的额定电流应大于整流桥额定送出时的支臂电流, 同时小于晶闸管有效电流, 即快速熔断器的额定电流应满足如下公式:

$$1.57 \times I_{T,AV(SC)} > I_{rN} > \frac{I_{R,N}}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

式中  $I_{rN}$  为快速熔断器额定电流, 单位安(A);  $I_{R,N}$  为单个整流桥额定输出电流, 单位安(A)。

单个整流桥额定输出电流应大于 N-1 柜时额定工况下单柜输出电流, 即满足如下公式要求:

$$I_{R,N} \geq \frac{K_3 I_{fn}}{K_1(N-1)} = \frac{1.1 \times 1\,135}{1 \times (2-1)} = 1\,248.5 \text{ A} \quad (15)$$

式中  $K_3$  为裕度系数, 一般取 1.1;  $K_1$  为均流系数, 单柜运行时取 1。则快速熔断器额定电流需满足:

$$1.57 \times 2\,040 = 3\,202.8 > I_{rN} > \frac{1\,248.5}{\sqrt{3}} = 720.9 \text{ A} \quad (16)$$

为了保证晶闸管元件故障时快速熔断器能够可靠熔断, 快速熔断器额定电流值宜选择较小值, 实际熔断器额定电流取值为 1 400 A。

#### 4.3 分断容量选择计算

考虑整流柜单臂晶闸管击穿短路, 极端情况下此短路电流相当于交流侧三相短路电流<sup>[4]</sup>, 考虑到空载误强励时发生可控硅被击穿, 则最大短路电流  $I_{dl,max}$  为:

$$I_{dl,max} = 1.4 \frac{1}{X_T} \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}} \quad (17)$$

快速熔断器分断容量应大于最大短路电流, 需满足:

$$I_s \geq 1.4 \times \frac{1}{6\%} \times \left( \frac{1\,400}{\sqrt{3} \times 0.71} \right) = 26.56 \text{ kA} \quad (18)$$

实际选型快速熔断器分断容量选取为 100 kA。

#### 4.4 $I^2t$ 值的确认

快速熔断器的弧前  $I^2t$  值和熔断  $I^2t$  值分别是指在弧前时间和熔断时间内被保护电路中电流释放的能量。熔断器的熔断  $I^2t$  值应小于晶闸管的  $I^2t$  值, 为了可靠地保护晶闸管, 还需留一定的裕量, 同时应保证强励运行工况下不熔断。

所选择的快熔型号为 RS8-1000V/1400 A-P2m105NK, 其额定电压下的弧前焦耳积分值为  $I^2t_p = 0.762 \text{ MA}^2\text{s}$ , 熔断焦耳积分值为  $I^2t_a = 4.137 \text{ MA}^2\text{s}$ , 再根据修正系数修正燃弧  $I^2t$  值, 燃弧  $I^2t$  值找出熔断  $I^2t$  与弧前  $I^2t$  的差。

励磁变二次侧额定电压  $U_{2N} = 710 \text{ V}$ , 由  $I^2t$  校正曲线, 可得在此电压下的校正系数为 0.66, 则此电压下的熔断器  $I^2t$  值为:

$$I^2t = 0.762 + (4.137 - 0.762) \times 0.66 = 2.990 \text{ MA}^2\text{s} \quad (19)$$

根据所选 DCR2040L42 可控硅参数, 当  $t_p = 10 \text{ ms}$  时,  $I^2t = 4.50 \text{ MA}^2\text{s}$ 。

比较两个元件的  $I^2t$  值, 快速熔断器  $I^2t$  值 2.990  $\text{MA}^2\text{s}$  小于可控硅  $I^2t$  值 4.50  $\text{MA}^2\text{s}$ , 快速熔断器可以有效保护可控硅。

考虑一组柜退出且强励时, 流过快速熔断器的电流为熔断器额定电流的倍数为:

$$\frac{2 \times 1\,135}{1\,400} = 1.62 \quad (20)$$

查询快速熔断器的熔断电流与熔断时间关系曲线, 当 1.62 IN 时, 熔断时间大于 40 s, 大于强励时间, 能保证 N-1 工况下强励运行不熔断。

### 5 灭磁电阻选型及过电压设置

#### 5.1 灭磁电阻容量计算

(1) 空载误强励下发电机灭磁电阻能容量。根据文献<sup>[5]</sup>, 空载误强励可采用两段线性化方式计算, 结合发电机空载特性曲线(图 1), 当励磁电流位于  $0 \sim I_{f0}$  区间时为线性段, 以  $T'_{do}$  计算转子电感; 当励磁电流为  $I_{f0} \sim 2I_{fN}$  区间时, 近似为线性段,  $T'_{d1} = T'_{do} \times 0.155$ , 则空载误强励转子能量可由以下公式计算得出:

$$W_f = 0.5 \times R_{75\text{℃}} \times T'_{do} \times I_{f0}^2 + 0.5 \times R_{75\text{℃}} \times T'_{d01} \times [(2I_{fN})^2 - I_{f0}^2] = 0.5 \times 0.257 \times 4.16 \times 530^2 + 0.5 \times 0.257 \times 4.16 \times 0.155 \times [(2 \times 1\,135)^2 - 530^2] = 0.15 +$$

$$0.404 = 0.554 \text{ MJ} \quad (21)$$

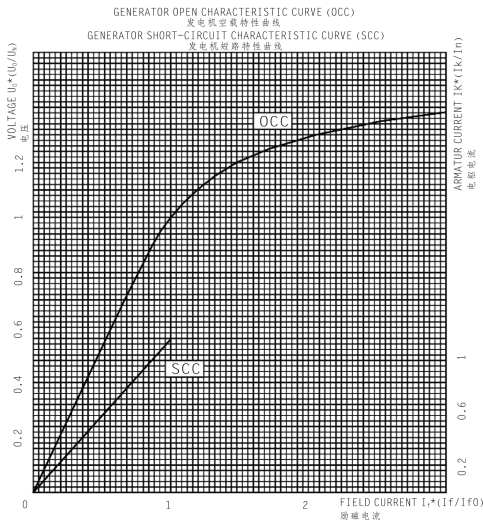


图1 发电机空载特性曲线图

灭磁电阻的额定容量在上式计算结果的基础上考虑耗能系数,并留有20%的裕度,即

$$W_{fN} = W_f \times K_4 \times K_5 = 0.554 \times 2/3 \times 1.2 = 0.443 \text{ MJ} \quad (22)$$

式中  $W_{fN}$  为灭磁电阻耗能,单位兆焦(MJ); $K_4$  为耗能系数,考虑定子漏抗、磁场饱和、电枢反应、转子绕组本身电阻的耗能、阻尼绕组耗能等因素,一般取2/3; $K_5$  为裕度系数,一般取1.2。

(2)机端三相短路下发电机灭磁电阻能容量。发电机出口三相短路时,励磁电流值(短路发生0.1s后,也称为非周期分量)  $I_{f3D}$  约为3倍额定励磁电流<sup>[6]</sup>。

$$I_{f3D} \approx 3 \times I_{fn} \approx 3 \times 1135 = 3405 \text{ (A)} \quad (23)$$

机端三相短路时定子短路电流的去磁作用使转子处于非饱和状态,可以认为发电机转子的电感是常数。则机端三相短路时的转子能量为:

$$W_{f3D} = 0.5 \times I_{f3D}^2 \times T'_d \times Rf_{(115^\circ\text{C})} = 0.5 \times 3405^2 \times 1.5 \times 0.29 = 2.52 \text{ (MJ)} \quad (24)$$

此时需要根据温度修正转子绕组电阻:

$$Rf_{(115^\circ\text{C})} = \frac{115 + 235}{75 + 235} \times Rf_{(75^\circ\text{C})} = \frac{350}{310} \times 0.257 = 0.29 \Omega \quad (25)$$

水电机组在机端三相短路情况下,在故障切除瞬时,短路持续时间通常在0.1s内,转子电流非周期分量已经衰减到接近于其初始电流值的

60%~70%<sup>[7]</sup>,因此,在计算灭磁电阻所承受的灭磁容量时需要考虑衰减因素。灭磁电阻的额定容量在上述基础上还需考虑耗能系数,并留有20%的裕度,即:

$$W_{fN} = W_f \times K_6 \times K_4 \times K_5 = 2.52 \times 0.4 \times \frac{2}{3} \times 1.2 = 0.81 \text{ MJ} \quad (26)$$

式中  $K_6$  为衰减系数,取0.4。

实际选型 SiC 灭磁电阻容量选取为1MJ,满足设备灭磁要求。

### 5.2 转子过电压保护设定值的选择

根据规定,转子过电压保护的设定值应该高于整流桥换相过电压,且小于转子绕组对地耐压水平的70%<sup>[8]</sup>。

整流桥的换相过电压可以达到励磁变压器二次侧电压峰值的2.5倍,则整流桥换相过电压值为:

$$2.5 \times \sqrt{2} \times U_{1N} = 2.5 \times \sqrt{2} \times 710 \text{ V} = 2510 \text{ V} \quad (27)$$

转子过电压保护的设定值应高于上述值。

根据标准规定,当额定励磁电压小于或等于500V时,发电机转子绝缘电压为10倍额定励磁电压,但最低不得低于1500V<sup>[9]</sup>。额定励磁电压为355V,则转子绕组对地耐压水平为3550V,转子过电压保护的设定值应小于下述值:

$$70\% \times \sqrt{2} \times 3550 \text{ V} = 3513.8 \text{ V} \quad (28)$$

因此,转子过电压保护设定值实际选取2800V。

## 6 灭磁开关选型

### 6.1 额定电压选择计算

磁场断路器额定电压应大于励磁电路长期工作电压的最大值,可按整流电压的峰值考虑:

$$U_{FB.N} > \sqrt{2} \times U_{2N} = 1.4 \times 710 \text{ V} = 994 \text{ V} \quad (29)$$

所选开关的额定电压值为1000V。

### 6.2 额定电流选择计算

额定电流应不低于1.3倍额定励磁电流考虑。

$$I_{FB.N} \geq 1.3 \times I_{fN} = 1.3 \times 1135 = 1475.5 \text{ A} \quad (30)$$

所选开关的额定电流值为1600A。

### 6.3 灭磁弧压选择计算



(1) 灭磁开关弧压参数应与灭磁电阻参数配合, 并满足下列关系:

$$U_{FB, arc} \geq U_R + U_E \quad (31)$$

式中:  $U_{FB, arc}$  为灭磁开关断口弧压, 单位伏(V);  $U_R$  为灭磁开关断开时的灭磁电阻上出现的最高灭磁电压, 单位伏(V);  $U_E$  为灭磁开关断开时的电源电压, 单位伏(V)。

灭磁电阻采用 1 串 SiC 非线性电阻, 其灭磁电阻 VA 特性曲线为:

$$U_R = 35(I)^{0.4} \quad (32)$$

(2) 机端三相短路灭磁时磁场断路器所需弧压。此时电源电压为 0, 励磁电流按 3 倍额定励磁电流考虑。磁场断路器弧压满足:

$$U_{FB, arc} \geq U_R + U_E = 0 + 35 \times (3 \ 405)^{0.4} = 906 \text{ V} \quad (33)$$

(3) 空载误强励时磁场断路器所需弧压。假设此时机组过压保护动作电压为 1.2 倍机端额定电压, 延时 0.1 s 动作, 此时的励磁电流近似达到 2 倍额定励磁电流。灭磁时刻考虑机端电压达到 1.3 倍额定电压, 则此时的电源电压  $U_E$  为。

$$U_E = 1.35 \times U_{2N} \times 1.3 \times \cos 10^\circ - \frac{3}{\pi} \times x_T \times I \times \frac{U_{2N}^2}{S_n} - \Sigma \Delta U = 1.35 \times 710 \times 1.3 \times \cos 10^\circ - \frac{3}{\pi} \times 6\% \times (2 \times 1 \ 135) \times \frac{0.71^2}{1.4} - 10 = 1 \ 170 \text{ V} \quad (34)$$

(4) 灭磁电阻上的电压:

$$U_R = 35(I)^{0.4} = 35 \times (2 \times 1 \ 135)^{0.4} = 770 \text{ V} \quad (35)$$

$$U_{FB, arc} \geq U_R + U_E = 1 \ 170 + 770 = 1 \ 940 \text{ V} \quad (36)$$

实选灭磁开关的弧压为 2 000 V, 满足要求。

## 7 结 语

本文通过波波里水电站, 对励磁系统中的励磁变、晶闸管、快速熔断器、灭磁电阻和灭磁开关等主要元器件参数进行了详细的选型计算, 完整

呈现了水电站励磁系统关键元器件参数的选型计算过程全貌, 可供类似项目参考和借鉴。目前, 针对励磁系统关键元件参数选型计算还没有相关的规程规范, 只有一些书籍和设备厂家资料供参考, 造成了相关参数选择计算公式不统一, 各家自成一体。本文以波波里水电站为例, 从理论上详细推导了相关参数计算公式的来源和构成, 对一些比较主观的系数尽量客观地去解析其取值过程和范围, 如理论推导了励磁变低压侧额定电压简化计算公式, 通过分析直流侧短路电流特点提出快速熔断器分断容量应按空载误强励下励磁变低压侧三相短路电流来计算的思路, 详细解析了快速熔断器的  $I^2t$  值构成和灭磁电阻容量值的计算系数, 以期做到公式的应用更易懂, 更科学、客观, 更标准实用。

## 参考文献:

- [1] DL/T1628-2016. 水轮发电机励磁变压器技术条件[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [2] 孔维义. 灯泡贯流水轮发电机组励磁系统改造计算[J]. 水电站机电设计, 2016, (2): 25-26+43.
- [3] DL/T1627-2016. 水轮发电机励磁系统晶闸管整流桥技术条件[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [4] 董明. 三相桥式可控整流器内部故障电流计算[J]. 电力电子技术, 1990, (4): 45-48.
- [5] 梁建行. 发电机灭磁系统的分析与计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 54-59.
- [6] IEEE C37. 18-1979. 用于旋转电机的封闭式磁场放电断路器[S]. 美国国家标准委员会公司, 1980.
- [7] 李基成. 现代同步发电机励磁系统设计及应用(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 369.
- [8] DL/T583-2018. 大中型水轮发电机静止整流励磁系统技术条件[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [9] DL/T730-2000. 进口水轮发电机(发电电动机)设备技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

## 作者简介:

邓丛林(1982-), 男, 四川眉山人, 高级工程师, 硕士, 从事水电站保护控制系统设计;

陈 鹏(1981-), 男, 四川荣县人, 高级工程师, 硕士, 从事水电站保护控制系统设计。

(责任编辑: 卓政昌)

## 川投泸州天然气发电项目获核准

2022 年 9 月 30 日, 记者吴忧从川投集团获悉, 川投泸州天然气发电项目日前取得四川省发展改革委核准批复。川投(泸州)燃气发电有限公司负责该项目实施, 建设规模为 2 套 70 万千瓦级燃气—蒸汽联合循环发电机组, 总投资约 35 亿元, 项目计划 2022 年 11 月开工建设, 2025 年 1 月实现首台机组投运。年发电量约 35 亿千瓦时。(摘自《四川在线》)