

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.04.006

# 太阳能热发电厂厂用电率计算方法分析

毛启静, 白永军, 张玮, 张伶俐, 潘耘峰, 曹烜军

(中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120)

**摘要:** 文章主要解决了太阳能热发电设计领域的厂用电计算思路及方法的问题。太阳能热发电已成为我国新能源发电的重要发展方向, 太阳能热发电厂用电率的计算目前还没有相关的规程规范。在研究过程中, 采用对太阳能热发电厂的运行模式与火力发电厂运行模式进行对比分析的方法, 得出火力发电厂厂用电率的计算方法不适用于太阳能热发电厂的研究结果。通过对槽式太阳能热发电厂集热场系统、吸热传热系统、储热系统、常规岛系统分别进行分析, 提出了槽式太阳能热发电厂厂用电量的计算方法, 得出了太阳能热发电厂应采用长序列代表年辐照值, 逐时计算代表年的发电量和厂用电量, 以其比值来计算厂用电率的结论; 提出了槽式太阳能热发电厂厂用电率的计算思路和方法, 可供塔式太阳能热发电厂参考, 对我国太阳能热发电厂的设计发展起到推动作用。

**关键词:** 厂用电率; 太阳能热发电厂; 耗电量; 太阳辐照值

中图分类号: TM615

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)04-0029-06

## Analysis of Calculation Method for Solar Thermal Power Plant Auxiliary Power Rate

MAO Qijing, BAI Yongjun, ZHANG Wei, ZHANG Lingli, PAN Yunfeng, CAO Dajun

(North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

**Abstract:** The article mainly solves the problem of the idea and method of the calculation of the auxiliary power in the field of solar thermal power plant design. Solar thermal power generation has become an important development direction of China's new energy power generation, and now there is no relevant procedure about the calculation method of solar thermal power plant auxiliary power rate. In the course of the study, we compared and analyzed the running mode of solar thermal power plant and fossil-fired power plant. Then we found the research result that the calculation method of fossil-fired power plant auxiliary power rate was not applicable to the solar thermal power plant. Based on the analysis respectively of collection field system, heat absorption and transfer system, heat storage system and conventional island system of parabolic trough solar power plant, this paper put forward a calculation method for auxiliary power consumption of parabolic trough power plant. In this paper, a conclusion is drawn that the solar thermal power plant should use long sequence typical year solar radiation value to hourly calculate the typical year's power generation and auxiliary power consumption, and auxiliary power rate is the ration of auxiliary power consumption and power generation. The calculation idea and method of auxiliary power rate of parabolic trough solar power plant can be used as an reference for the tower solar power plant, and it promotes the devolpment of solar thermal power plant design in China.

**Key words:** auxiliary power rate; solar thermal power plant; power consumption; solar radiation value

能源问题与全球气候变化使得加快构建清洁、  
高效、安全、可持续的现代能源体系成为我国十三

五能源发展的主要目标。太阳能热发电作为太阳能  
利用的一种新技术, 可以通过储热实现可调节发电,  
克服了风电、光伏发电不可调节的缺点, 能够  
向电网提供可调的清洁、稳定的优质电力<sup>[1]</sup>。2016  
年12月国家能源局相继出台《可再生能源发展“十  
三五”规划》和《太阳能发展“十三五”规划》, 确定

收稿日期: 2017-05-09

作者简介: 毛启静(1971), 女, 北京市人, 高级工程师, 硕士, 主  
要从事新能源发电设计工作(e-mail)maoqj@ncpe.com.cn。

了到2020年太阳能热发电装机容量达到5 GW的目标,为发展太阳能热产业奠定了政策基础。随着太阳能热发电厂技术的发展,很多设计院对太阳能热发电厂的设计开展了深入研究。厂用电率是衡量发电厂自身用电量的一个重要指标,通常情况下相同配置的机组,如果厂用电量越高就意味着向外净输出电量越少,发电厂的经济效益越差。太阳能热发电属于新型技术,太阳能光热电站厂用电率的计算方法还没有相关规程规范<sup>[2]</sup>,目前各设计单位对太阳能热发电厂厂用电率多采用火力发电厂的厂用电率的计算方法。

本文首先对太阳能热发电厂系统进行了简要介绍,然后通过对太阳能热发电厂与火力发电厂的运行特点和系统配置进行对比分析,得出火力发电厂厂用电率的计算方法不能适用于太阳能热发电厂,太阳能热发电厂厂用电率应以代表年太阳辐照值为输入,通过逐时计算全年发电量和耗电量来计算的结论。本文以槽式太阳能发电厂为例,给出了各子系统的厂用耗电量的计算关联式,为太阳能热厂用电率计算提供参考。

## 1 太阳能热发电厂系统简介

太阳能热发电是通过聚集太阳辐射获得热能,将热能转化成高温蒸汽驱动蒸汽轮机来发电的。当前太阳能热发电按照太阳能采集方式可划分为太阳能槽式发电、太阳能塔式热发电、太阳能碟式热发电和线性菲涅尔式热发电。本文主要以太阳能槽式发电为例来对太阳能热发电厂厂用电率的计算方法进行分析。该方法可供其它型式的太阳能热发电厂参考。

槽式太阳能热发电系统是利用抛物面槽式反射镜将阳光聚焦到位于焦线上的集热管上,管内的传热工质被加热后,通过换热器换热产生蒸汽,推动常规汽轮机发电。其系统主要包括集热系统、吸热传热系统、储热系统、常规岛系统。

## 2 厂用电率计算思路

目前,太阳能热发电厂的厂用电率计算方法还没有相关导则或规范。在工程设计中,通常采用火力发电纯凝电厂计算厂用电率的方法。此计算方法并不能够反映太阳能热发电厂的厂用电情况,具体分析如下:

纯凝火力发电厂厂用电率计算公式:

$$e = \frac{S_c \cos \varphi}{P_g} \times 100\% \quad [3] \quad (1)$$

$$S_c = \sum (KP_a) \quad (2)$$

式中: $e$ 为电厂厂用电率; $S_c$ 为汽轮发电机组在100%额定出力(夏季)的厂用电计算负荷(kVA); $K$ 为换算系数; $P_a$ 为汽轮发电机组100%额定出力(夏季)工况确定的厂用电动机功率; $P_g$ 为发电机的额定功率,即100%出力时的功率; $\cos\varphi$ 为电动机在运行时的平均功率因数。

由纯凝火力发电厂厂用电率计算公式可以看出,纯凝火力发电厂厂用电率是定义在汽轮发电机组100%额定出力(夏季)工况下对厂用负荷的电功率进行计算,没有引入时间量来计算厂用耗电量。由于火电机组可控性强且运行稳定,采用此方法作为衡量标准,一定程度上能够反映火力发电厂厂用电情况,同容量机组厂用电率的大小按此方法是具有可比性的。

对于太阳能热电厂,太阳能辐照值直接决定机组发电量和运行模式,这取决于天气是不可控的,即使相同配置的机组在不同地区(辐照值不同)其运行模式和发、耗电量也是不同的,式(1)不能够体现太阳辐照值对厂用电的影响。另外,发电机额定功率相同的太阳能热发电厂,如果储热系统配置不同,其发电量和厂用电量也不相同,式(1)不能体现储热系统的配置情况。

综上所述,火力发电厂是以电功率来计算厂用电率,而太阳能热发电厂的厂用电率是由太阳辐照值、发电机装机容量及集热储热系统配置决定的。太阳能热发电厂厂用电率应采用电量计算的方法,即以长序列代表年的光资源辐照值计算代表年的厂用耗电量和厂用发电量,其比值为太阳能热发电厂的厂用电率。

## 3 厂用电率计算方法

### 3.1 总体计算原则

如上节所述,太阳能热发电系统的厂用电率是由太阳辐照值及系统配置决定的,所以厂用电率的计算原则是由长序列太阳辐照数据推算出代表年太阳辐照值来计算代表年太阳能热电厂的发电量和厂用耗电量如式(3)和式(4)所示。

$$e = \frac{Q_{耗}}{Q_{发}} \times 100\% \quad (3)$$

$$Q_{耗} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (4)$$

式中:  $e$  为太阳能热发电厂代表年的厂用电率;  $Q_{耗}$  为厂用电负荷总耗电量(kVA);  $Q_{发}$  为太阳能热发电厂的发电量(kVA);  $Q_i$  为第  $i$  个厂用电负荷耗电量(kVA)。

以下将对槽式太阳能热发电厂集热场系统、吸热传热系统、储热系统、常规岛系统的厂用电负荷耗电量及太阳能热发电厂的发电量的计算方法做具体介绍。

### 3.2 太阳能热发电厂厂用电量计算

#### 3.2.1 集热场系统厂用电负荷耗电量计算

集热系统的作用是通过反射镜跟踪太阳,聚集太阳能至集热管以加热传热介质。集热系统由多回路并联,每个回路由反射镜、集热管、支架、旋转接头和驱动等构成。其中集热器的驱动系统是集热系统中唯一的电负荷<sup>[4]</sup>,其耗电量如式(5)所示:

$$Q = NPt/3\ 600 \quad (5)$$

式中:  $Q$  为驱动器耗电量, kWh;  $P$  为单个驱动装置功率, kW;  $t$  为驱动器运行时间, s;  $N$  为集热场驱动装置个数, 个。

根据集热器一天内的运行状态,驱动装置可以简化为三个运行阶段<sup>[5]</sup>:启动预备阶段、运行阶段和停机保护阶段,其中启动预备阶段时间  $t$  为集热器校正跟踪角度的时间;运行阶段时间  $t$  为集热器单次运行时长与动作次数的乘积;停机保护阶段时间  $t$  为停机保护阶段驱动器运行时间。

#### 3.2.2 吸热传热系统厂用电负荷耗电量计算

槽式太阳能热发电吸热传热系统由油水换热系统、导热油驱动系统、导热油防凝系统、导热油净化系统、导热油膨胀系统、导热油管道及相关附件组成。其主要作用是导热油吸收反射镜聚集的太阳辐射能,在导热油管道内循环实现油水、油盐换热。吸热传热系统厂用电负荷主要有主油泵和防凝泵等。下面通过主油泵说明计算吸热传热系统厂用电量的思路。镜场中吸收的太阳辐射能与导热油的热能存在如下关系:

$$\int_{t_1}^{t_2} qnS_1\eta_1\eta_2 \cos \theta dt = \int_{t_1}^{t_2} Cq_m\Delta T dt \quad (6)$$

式中:  $q$  为太阳直接辐照值, kW/m<sup>2</sup>;  $n$  为镜场回

路数, 个;  $S_1$  为一个回路集热器开口面积, m<sup>2</sup>;  $\eta_1$  为光学效率;  $\eta_2$  为热学效率;  $\cos \theta$  为余弦效率;  $t$  为时间, h;  $q_m$  为质量流量, kg/h;  $C$  为导热油平均比热容, kJ/(kg · °C);  $\Delta T$  为工质出口与进口温度差, °C。

式(6)反映了镜场中辐射能转化为热能的过程,  $\int_{t_1}^{t_2} q dt$  为  $t_1 \sim t_2$  时段中 DNI 曲线与横轴所围成的面积,如图1所示。通过(6)式可以求出不同时段即不同运行工况下导热油的质量流量  $q_m$ ,从而求得泵的功率如(7)式:

$$P_m = P/\eta = q_m g H / 1\ 000 \eta \quad (7)$$

式中:  $P_m$  为泵消耗的功率, kW;  $P$  为泵的有效功率, kW;  $q_m$  为质量流量, kg/s;  $g$  为重力加速度, N/kg;  $H$  为扬程, m;  $\eta$  为泵的效率。

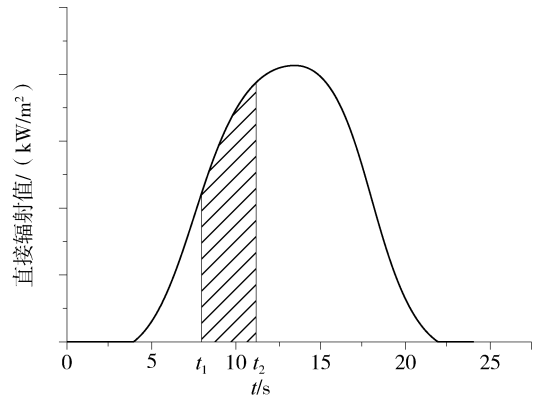


图1 DNI 曲线图

Fig. 1 DNI curve graph

则主油泵的耗电量如(8)式:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} P_m dt \quad (8)$$

式中:  $Q$  为主油泵在  $t_1 \sim t_2$  时段的耗电量, kWh, 其他时间段也可采用该方法求解。

吸热传热系统除主油泵外还包括夜间循环泵、防凝泵及溢流返回泵等,可参照主油泵思路进行计算,本文不作详细分析。

#### 3.2.3 储热系统厂用电负荷耗电量计算

储热系统主要由冷罐、热罐、油-盐换热器、熔盐泵等设备组成。储热系统的作用是通过熔融盐与导热油换热,在阳光充足时利用熔融盐储存太阳能热量,在阳光不足时放热来供给汽轮机运转发电,起到削峰填谷的作用<sup>[6]</sup>。储热系统的电负荷主要有冷熔盐泵和热熔盐泵和电加热器等。下面通过

熔盐泵说明求解储热系统厂用耗电量的思路。本文假设电厂运行模式为优先满足汽轮机满发, 剩余的能量用于储能。当镜场中吸收的太阳辐射能量除满足汽轮机满发外仍有能量供给储能系统, 则熔盐吸收的热量如(9)式:

$$Q_{\text{储}} = \int_{t_1}^{t_2} qnS_1\eta_1\eta_2 \cos \theta dt - \int_{t_1}^{t_2} Cq_{\text{me}}\Delta T dt \quad (9)$$

式中:  $q_{\text{me}}$ 为汽轮机满发对应的导热油质量流量, kg/h。

同时, 熔盐吸收的热量与熔盐质量流量  $q_{\text{m1}}$  (kg/h)、比热  $C_1$  (kJ/(kg·°C))、熔盐温升  $\Delta T_{\text{盐}}$  (°C)的关系如(10)式:

$$Q_{\text{储}} = \int_{t_1}^{t_2} C_1 q_{\text{m1}} \Delta T_{\text{盐}} dt \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可求得熔盐质量流量, 进而采用式(7)求得泵消耗的功率。

冷熔盐泵耗电量:

$$Q_{\text{冷}} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\text{冷}} dt \quad (11)$$

式中:  $Q_{\text{储}}$ 为熔盐吸收的热量, kWh;  $Q_{\text{冷}}$ 为冷盐泵的耗电量, kWh;  $P_{\text{冷}}$ 为冷盐泵消耗的电功率, kW。

当储能放热发电时, 热熔盐泵启动, 将储存的热熔盐量折算至储热发电汽轮机满发时长  $t$ , 热熔盐泵耗电量如(12)式:

$$Q_{\text{热}} = P_{\text{热}} t \quad (12)$$

式中:  $P_{\text{热}}$ 为热熔盐泵额定消耗功率, kW;  $Q_{\text{热}}$ 为热熔盐泵耗电量, kWh;  $t$ 为储热发电汽轮机满发时长, h。

### 3.2.4 常规岛厂用电负荷耗电量计算

常规岛辅机运行模式与汽轮发电机组运行模式密切相关, 汽轮发电机组负荷变化时, 辅机设备运行功率随之调整, 厂用电耗量为变化量。为简化厂用电计算, 可根据汽轮发电机组全年发电量折算出机组按额定功率运行的年发电等效利用小时, 此时对应的厂用电负荷可按额定功率考虑, 二者相乘即为全年厂用电耗量<sup>[7]</sup>。

常规岛厂用电负荷耗电量:

$$Q = S_c \times T \quad (13)$$

$$S_c = \Sigma(KP) \quad (14)$$

式中:  $S_c$ 为计算负荷, kVA;  $T$ 为机组等效年利用小时数, h;  $K$ 为负荷率;  $P$ 为负荷的计算功率, kW。

经常连续运行负荷的  $K$  值可参考《火力发电厂

厂用电设计规程》(DL/T 5153), 如表 1 所示。

表 1 换算系数表

Tab. 1 Conversion factor table

电负荷	换算系数
给水泵电动机	1.0
循环水泵电动机	0.8
凝结水泵电动机	0.8
其他高压电动机	0.8
其他低压电动机	0.8
加热器	1.0
电子设备	0.9

经常短时及经常断续运行的负荷  $K$  值取 0.5, 不经常连续运行的负荷取  $K = T_i/T$ , 其中:  $T_i$  为该负荷在代表年内的满负荷运行时间。

不经常短时、不经常断续以及事故停机阶段保安负荷的电动机则不考虑厂用电耗量。

### 3.3 太阳能热发电厂年发电量计算

太阳能热发电厂的代表年年发电量计算如式(15)所示:

$$Q_{\text{发}} = \sum_{i=1}^n G_{\text{h}i} \times S \times \eta \times \cos \theta \times 100\% \quad (15)$$

式中:  $G_{\text{h}i}$ 为代表年第  $i$  小时太阳辐照量, kWh/m<sup>2</sup>;  $S$ 为集热器开口总面积, m<sup>2</sup>;  $\eta$ 为光电转换总效率, 即光学效率和热学效率的乘积。

由式(15)可以看出, 太阳能热发电厂的代表年年发电量需要用代表年辐射数据进行逐小时计算, 计算量很大, 所以目前太阳能热发电厂的代表年年发电量均采用专用软件进行计算。

## 4 结论

通过分析得到以下结论:

1) 火力发电厂厂用电率的计算方法不适合用于计算太阳能热发电厂的厂用电率。

2) 由于太阳能热发电厂的发电量是由太阳辐射量决定的, 即太阳辐射量决定太阳能热发电厂的运行状态, 所以太阳能热发电厂的厂用电耗量也是由太阳能辐射量决定的。

3) 太阳能热发电厂厂用电率只能采用计算电量的方法, 即采用长序列代表年辐照值, 逐时计算代表年的厂用发电量和厂用电耗量。

4) 本文提出了槽式太阳能热发电各系统的主要厂用电负荷耗电量的计算思路和方法, 可供塔式太

太阳能热发电厂参考<sup>[8]</sup>。

5)由以上计算方法可见,太阳能热发电厂的厂用电率需要以代表年太阳辐照值为输入量逐时计算,计算量很大,应编制相应计算机软件以简化计算过程。

#### 参考文献:

- [1] 杨圣春,项棵林,杨帆.我国太阳能热发电产业现状与展望[J].中外能源,2017,22(6):19-22.  
YANG S C, XIANG K L, YANG F. Current situation and prospect of solar thermal power generation industry in China [J]. Sino-Global Energy, 2017, 22(6): 19-22.
- [2] 杨静.光热发电技术标准的发展动态研究[J].机械制造,2016,54(12):70-72.  
YANG J. Development trends of technical standards for solar thermal power generation [J]. Machinery, 2016, 54(12): 70-72.
- [3] 电力规划设计总院.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.  
Electrical Planning and Design Institute. Technical code for the design of auxiliary power system of fossil-fired power plant: DL/T 5153—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [4] 吴仕宏,陈泽,吴佳文.太阳能光热集热系统的研究与分析[J].中国农机化学报,2016,37(1):223-226.  
WU S H, CHEN Z, WU J W. Research and analysis of solar

- thermal energy heat collection system [J]. China Agricultural Chemical Journal, 2016, 37(1): 223-226.
- [5] 王金平,王军,冯炜,等.槽式太阳能跟踪控制系统的研制及应用[J].农业工程学报,2015,31(2):45-51.  
WANG J P, WANG J, FENG W, et al. Development and application of sun-tracking control system for parabolic trough solar collector [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 45-51.
- [6] 汪奇,俞红啸,张慧芬.熔盐和导热油蓄热储能技术在光热发电中的应用研究[J].工业炉,2016,38(3):34-38.  
WANG Q, YU H X, ZHANG H F. Application research of molten salt and heat conduction oil regenerative energy storage technology in solar-thermal power generation [J]. Industrial Furnace, 2016, 38(3): 34-38.
- [7] 林幼晖.浅析海外电力总承包项目的厂用电量计算方法[J].南方能源建设,2015,2(3):131-135.  
LIN Y H. Analysis of calculation method of auxiliary power consumption for oversea power plant project [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 131-135.
- [8] 徐二树,胡忠良,翟融融,等.塔式太阳能热电站系统仿真与焓分析[J].中国电机工程学报,2014,34(11):1879-1806.  
XU E S, HU Z L, ZHAI R R, et al. Simulation and exergy analysis of solar thermal tower plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(11): 1879-1806.

(责任编辑 张春文)

(上接第22页 Continued from Page 22)

- CHEN M H. Research on problems of the exterior power connection design of high-speed railway traction substation [J]. Enterprise Science and Technology & Development, 2012(5): 14-16.
- [3] 张华,熊继锋,王虎,等.浙赣铁路电气化牵引站负序电流及谐波对江西电网的影响[J].江西能源,2005(2):2-5+8.  
ZHANG H, XIONG J F, WANG H, et al. Influence of Zhejiang-Jiangxi electric railroad traction station's negative sequence current and harmonic wave on Jiangxi power system [J]. Jiangxi Energy, 2005(2): 2-5+8.
- [4] 黄石柱,李建华,赵娟,等.电气化铁路牵引变电所概率谐波电流的仿真计算[J].电力系统自动化,2002,26(5):26-31.  
HUANG S Z, LI J H, ZHAO J, et al. Simulation for probabilistic harmonic currents of electrical railway traction substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(5): 26-31.
- [5] 肖湘宁,徐永海.电力系统谐波及其综合治理[J].中国电力,1998(4):59-61.  
XIAO X N, XU Y H. Problems and comprehensive control of power system harmonics [J]. Electric Power, 1998(4): 59-61.
- [6] 韩柳,谈顺涛.电气化铁路对电网的影响及对策[J].江苏电机工程,2005,24(3):8-11.

- HAN L, TAN S T. Power system operation affected by electrification railway and its improvement [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2005, 24(3): 8-11.
- [7] 贾善杰,赵义术,官兵,等.胶济线电气化铁路对山东电网电能质量的影响[J].电网技术,2006(增刊1):17-22.  
JIA S J, ZHAO Y S, GONG B, et al. Influence of Jiaoji electric railway to power quality of Shandong grid [J]. Power System Technology, 2006(Supp. 1): 17-22.
- [8] 陈薇.牵引变电所的外特性及其在继电保护中的应用[J].继电器,2000,28(2):28-32.  
CHEN W. The theory of external performance of traction substation and its appliance in relay protection [J]. Relay, 2000, 28(2): 28-32.
- [9] 薛艳霞,任社宜.电气化铁路牵引站供电线路保护定值整定问题探讨[J].电力技术,2010,19(3):67-72.  
XUE Y X, REN S Y. Discussion of protection setting adjustment for power supply line of electrified railway traction station [J]. Electric Power Technology, 2010, 19(3): 67-72.
- [10] 陈星.浅谈电气化铁路牵引站对继电保护的影响[J].华东交通大学学报,2008,25(1):53-56.  
CHEN X. Relay Protection Affected by Traction Substation [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2008, 25(1): 53-56.

(责任编辑 黄肇和)