

发电厂备用柴油发电机组负荷分析及容量计算

柴油发电机组容量计算是交流电源系统设计和柴油机组设备选型的基础。首先对某电厂备用电源系统作了简要描述；然后从负荷的选取原则、负荷数据的分析与负荷计算的方法等多个方面介绍了负荷统计的优化方法；并结合标准规范要求以SP系统为例，阐述了备用柴油发电机组容量计算方法及选型校验的详细过程，从而充分验证了容量计算结果的准确性。

李保柱 王 慈/中国核电工程有限公司



李保柱/工程师

国内某发电厂每个机组的备用电源系统由两套完全相同的柴油发电机组组成，每套柴油发电机组均应能够独立启动并具备向其设计负载供电的能力，其额定功率可满足汽轮机脱扣、主发电机跳闸厂外主电源和厂外辅助电源丧失时，向发电厂永久厂用负载供电，且不需要执行任何安全功能。这些由柴油发电机组提供后备电源的永久厂用设备，具有非安全相关“纵深防御”功能，可以降低非能动安全系统启动的风险和保证主设备安全。

电源系统构成、负荷数据分析和系统运行工况等都应根据备用柴油发电机组的供电特性来确定。交流系统负荷容量计算结果可为系统构成和电源设备选型提供直接有力的证据，计算过程包括稳态运行负荷计算、启动运行负荷计算和各带载工步容量计算等，准确的计算结果是确定柴油发电机组加载程序的必要条件。

在对负荷数据进行准确的归纳分析后，即可进行柴油发电机组容量选型。根据柴油发电机组选型参数分别校验发

电机容量和柴油机功率，并考虑环境因素对机组出力的影响，进而核实机组选型参数是否满足运行要求，以期满足交流电源系统对柴油发电机组各项稳态参数和暂态参数的考量要求。

备用柴油发电机组设备组成及技术要求

1. 柴油发电机组设备组成

柴油发电机组是单柴油机型，即发电机由一台柴油机来驱动。每台柴油发电机组安装在互相分隔的厂房里；整个机组装置应设有完全独立的燃油系统、润滑油系统、冷却水系统、空气起动系统、进排气系统和电气系统。发电机为水平放置开启式，可采用自带风扇的风冷方式，其转子和定子绝缘等级为F级，中性点采用不接地形式。

2. 柴油发电机组技术要求

柴油发电机组必须具有启动和运行的高度可靠性，故设备设计应考虑下列技术要求：

- 1) 发电机应有防冷凝设施，其励磁装置应有启动初充磁环节。
- 2) 单一控制电源失效不影响机组启动和运行。
- 3) 电压调整器具有手动和自动调整功能。
- 4) 机组具有手动和自动两种启动方式。

从接到启动信号起15 s内柴油发电机组应达到额定转速和额定电压，并按加载程序自动带载负载，永久厂用母线电

关键词/Keywords

柴油发电机组 ·
加载负荷分析 ·
容量计算 ·

压恢复供电时间为20 s,且加载期间要求频率不得降低到额定值的95%以下,电压不得降低到额定值的75%以下。

柴油发电机加载程序负荷容量计算

1. 柴油发电机加载程序负荷分析

柴油发电机组的额定功率是基于失电事故工况,柴油发电机加载程序则用于估算失电工况下的永久厂用设备容量,确定自动及手动加载各时序工步的功率值,包括各工步负荷运行功率和起动功率,进而确认由负荷加载程序决定的柴油发电机组额定功率,其主要负荷分类如下。

- 1) 降低非能动安全系统起动风险负荷。
- 2) 与主汽轮机设备安全相关负荷。
- 3) 备有柴油发电机组辅机负荷。
- 4) 直流及UPS电源系统负荷。
- 5) 人员可达性类负荷及消防相关负荷。

加载程序中各工步时间间隔为10 s,加载设备应合理分配在各工步上,尽量避免某一工步上加载负荷过大而引起备用柴油发电机容量的额外增加,其负荷接受原则如下。

- 1) 中/低压电动机功率因数和效率参照中/低压电动机技术条件的相关能源行业标准。
- 2) 非电动机类负荷参数以工艺输入资料为准。
- 3) 照明负荷按占整个照明系统负荷的30%考虑。
- 4) 需考虑6 kV/400 V变压器电能损耗。
- 5) 需考虑永久厂用母线带载设备负荷率。
- 6) 不需单独考虑电动阀门和电梯负荷。

2. 加载程序各工步负荷计算

下列公式用于各加载负荷容量的计算,其中分析柴油机组运行的失电事故工况下所带载的负荷种类,主要包括电动机类负荷和非电动机类静态负荷,从两种不同性质负荷的固有特性出发,分别计算其稳态功率和起动功率,其相关计算参数的选取在考虑了负荷接受原则的前提下均以实际负荷为准,减少了国内行业设计手册中采用估值带来的偏差,优化了计算过程。

公式组1(适用于非电动机类负荷统计,式

中,Rat为设备额定功率,kW),即

$$\begin{aligned} P_j &= \text{Rat} \quad P_{jQ} = P_j \\ S_j &= P_j / \cos \varphi \quad S_{jQ} = S_j \\ Q_j &= \sqrt{S_j^2 - P_j^2} \quad Q_{jQ} = \sqrt{S_{jQ}^2 - P_{jQ}^2} \end{aligned} \quad (1)$$

公式组2(适用于电动机类负荷统计,式中,

Rat为电动机轴功率,kW),即

$$\begin{aligned} P_D &= \text{Rat} / \eta \quad P_{DQ} = S_{DQ} \cos \varphi_Q \\ S_D &= P_D \cos \varphi \quad S_{DQ} = K_Q \text{Rat} / (\eta_j \cos \varphi) \\ Q_D &= \sqrt{S_D^2 - P_D^2} \quad Q_{DQ} = \sqrt{S_{DQ}^2 - P_{DQ}^2} \end{aligned} \quad (2)$$

公式组3(按稳定运行负荷计算发电机容量,kW/kV·A),即

$$\begin{aligned} P_{G1} &= \sum_{k=1}^n P_{jk} + \sum_{k=1}^n P_{Dk} \quad Q_{G1} = \sum_{k=1}^n Q_{jk} + \sum_{k=1}^n Q_{Dk} \\ S_{G1} &= \sqrt{P_{G1}^2 + Q_{G1}^2} \end{aligned} \quad (3)$$

公式组4(按起动运行负荷计算发电机容量,kW/kV·A),即

$$\begin{aligned} P_{G2} &= \sum_{k=1}^n P_{jQk} + \sum_{k=1}^n P_{DQk} \quad Q_{G2} = \sum_{k=1}^n Q_{jQk} + \sum_{k=1}^n Q_{DQk} \\ S_{G2} &= \sqrt{P_{G2}^2 + Q_{G2}^2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, P_j 、 Q_j 和 S_j 为非电动机类负荷稳态运行时的有功功率、无功功率和视在功率; P_{jQ} 、 Q_{jQ} 和 S_{jQ} 为非电动机类负荷起动时的有功功率、无功功率和视在功率; P_D 、 Q_D 和 S_D 为电动机类负荷稳态运行时的有功功率、无功功率和视在功率; P_{DQ} 、 Q_{DQ} 和 S_{DQ} 为电动机类负荷起动时的有功功率、无功功率和视在功率; P_{G1} 、 P_{G2} 为各负荷稳态运行时的有功功率之和、各负荷起动时的有功功率之和; Q_{G1} 、 Q_{G2} 为各负荷稳态运行时的无功功率之和、各负荷起动时的无功功率之和; S_{G1} 、 S_{G2} 为各负荷稳态运行时的视在功率之和、各负荷起动时的视在功率之和; $\cos \varphi$ 、 $\cos \varphi_Q$ 为负荷功率因数、起动功率因数; K_Q 为电动机起动电流倍数; η 为负荷效率。

在综合考虑负荷的起动功率因数、起动电流倍数及负荷效率的前提下,根据上述公式及柴油机加载负荷资料,计算系统加载程序负荷容量,详细数据如表1所示(表1括号中数据为手动加载负荷中最大容量单个电动机负荷参数)。

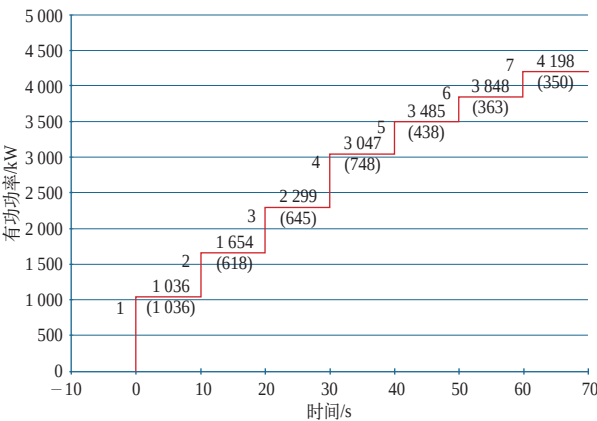
根据加载程序统计表,得到自动加载各工步稳定运行有功功率曲线图和起动运行视在功率曲

表1 备用柴油发电机组SP系统各工步加载负荷统计表

工步	时间/s	P_{Gi}/kW	$S_{Gi}/kV\cdot A$	P_{G2}/kW	$S_{G2}/kV\cdot A$
1	0	1 036	1 195	2 009	3 830
2	10	618	729	1 160	4 562
3	20	645	733	1 150	4 409
4	30	748	787	1 274	3 489
5	40	438	493	1 157	2 835
6	50	363	410	880	2 540
7	60	350	411	682	2 666
手动	—	457 (390)	512 (434)	859 (668)	3 537 (3 034)
功率总计		4 656	5 270	5 057	8 295

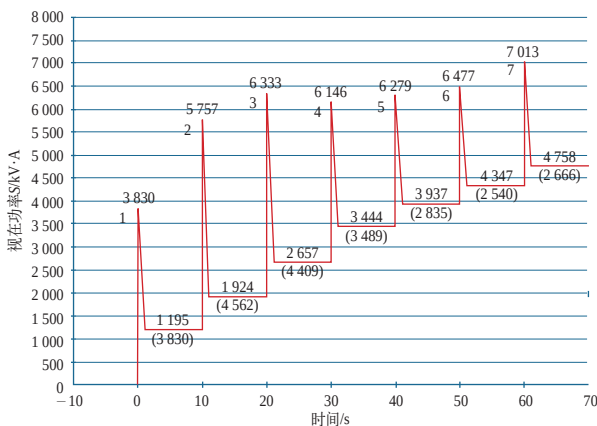
线图，如图1、图2所示。

由图1可知，柴油发电机组稳态运行每个带载



注：各工步上方数字，表示累计加载的负荷运行功率；各工步左侧的个位数字，表示该工步的工步数；各工步下方数字（括号内），表示此工步区间内加载的负荷运行功率。

图1 各工步稳定运行有功功率曲线



注：各工步波峰上方数字表示累计加载的负荷视在功率与该工步启动视在功率之和；各工步上方数字表示累计加载的负荷运行视在功率；各工步左侧的个位数字表示该工步的工步数；各工步下方数字（括号内）表示此工步区间内加载的负荷启动视在功率。

图2 各工步启动运行视在功率曲线

工步加载的负荷容量以及总有功功率之和的变化情况，此数据作为计算发电机容量以及校验发电机短时过载能力的基础数据源。

由图2可知，柴油发电机组在各带载工步的负荷功率突加值以及稳定运行时的视在功率累积情况，作为检验柴油发电机在负荷峰值电流冲击下的电压降水平，以及在负荷峰值功率冲击下柴油发电机出力水平的重要依据。

柴油发电机组选型

1. 发电机选型及校核

(1) 发电机额定容量选择

发电机连续输出容量应大于最大稳定运行负荷容量^[1]，根据加载负荷统计表可得

$$S_e = S_{Gj} = 5\,270\text{ kV}\cdot\text{A} \tag{5}$$

(2) 发电机短时过载能力校验

发电机短时过载能力主要是考验发电机带负荷起动最大容量电动机时短时的过负荷能力。根据负荷数据表，在不考虑手动负荷同时加载的情况下，除手动加载工步中最大容量负荷未加载外，其他负荷均在相应工步加载并达到稳定运行状态，此时接入最大容量手动加载负荷后的总加载容量，即为考量发电机过载能力时所依据的最大加载容量，即

$$S_e > S_1 = \frac{S_M}{K_{GF}} = \frac{(5\,270 - 434 + 3\,034)}{1.5}\text{ kV}\cdot\text{A} \\ = \frac{7\,870}{1.5}\text{ kV}\cdot\text{A} = 5\,247\text{ kV}\cdot\text{A} \tag{6}$$

$$P_e > S_1 \cos \varphi_Q = 5\,247\text{ kV}\cdot\text{A} \times 0.8 = 4\,198\text{ kW} \tag{7}$$

式中， P_e 为发电机额定功率，kW； S_e 为发电机额定容量，kV·A； S_M 为成组起动负荷的最大容量，kV·A； K_{GF} 为发电机短时过负荷系数，取1.5。

根据负荷稳态运行容量和分步加载计算容量较大者（5 270 kV·A）确定的发电机推荐选型参数，如表2所示。

(3) 发电机电压降校验

电动机起动瞬间，母线电压会因发电机暂态电抗产生的损失而降低。为了减少对母线上运行设备的影响，以保持母线电压不能低于额定电压

表2 发电机推荐选型参数

发电机型号	LSA5870/6P	效率 (%)	97.2
额定容量/kV·A	6 250	功率因数	0.8 (滞后)
额定功率/kW	5 000	直轴瞬变电抗 X'_d (%)	26.4
额定电压/V	6 300	直轴超瞬变电抗 X''_d (%)	16.2
额定电流/A	573	交轴瞬变电抗 X'_q (%)	77
额定频率/Hz	50	交轴超瞬变电抗 X''_q (%)	20.3

的75%为宜。采用近似算法^[2]求得自起动电压降的近似值,即^[3]

$$\begin{aligned}\Delta U\% &= \frac{50(X'_d + X''_d)}{\frac{1}{2}(X'_d + X''_d) + \frac{S_e}{S'_M}}\% \\ &= \frac{50(0.264 + 0.162)}{\frac{1}{2} \times (0.264 + 0.162) + \frac{6\,250}{4\,562}}\% \\ &= 13.46\% \leq 25\%\end{aligned}\quad (8)$$

式中, S_e 为发电机额定容量,kV·A; S'_M 为单组起动负荷容量最大值,kV·A。

2. 柴油机选型及校核

(1) 柴油机额定容量选择

柴油机选型及额定功率的确定,除应满足所有负荷稳定运行的功率要求外,还应满足起动最大负荷时的柴油机负载接受能力,在不考虑手动负荷同时加载的情况下,除手动加载工步中最大功率负荷未加载外,其他负荷均在相应工步加载并达到稳定运行状态,此时接入最大功率手动加载负荷后的总负荷功率即为考虑柴油机额定功率时所依据的最大加载功率,即

$$\begin{aligned}P_{ce} &> P_M \frac{1}{K_{gy}} \frac{1}{\eta_{cy}} \frac{1}{K_q} \\ &= 4\,939\text{ kW} \times \frac{1}{1.1} \times \frac{1}{0.95} \times 1 = 4\,722\text{ kW}\end{aligned}\quad (9)$$

式中, P_{ce} 为柴油机的额定计算功率,kW; P_M 为成组起动负荷的最大功率,kW; K_{gy} 为柴油机1 h过负荷能力,取1.1; η_{cy} 为柴油机的机械效率,取0.95; K_q 为非标准大气压状况下柴油机的功率修正系数,取1。

根据IEEE-387规范要求^[3],为保证柴油发电机组承受最严重阶跃负荷的能力,应进行裕度试验,即考量最严酷单步负载的110%带载能力。考

虑加载程序中最后一步的加载情况,柴油机的有功输出不应低于实际负载消耗功率的1.1倍,即

$$P_{ce} > 1.1 \times P_{G1}/\eta_g = 1.1 \times 4\,656\text{ kW}/0.972 = 5\,268\text{ kW}\quad (10)$$

故柴油机推荐选型参数如表3所示。

表3 柴油机推荐选型参数

柴油机型号	16PA6B	平均有效压力/bar	21.85
额定功率/kW	5 920	额定扭矩/kN·m	65
额定转速/r/min	1 000	单缸容量/kW	370

(2) 柴油机负载能力校验

柴油发电机组投运时,为了减少突加负荷的机械、电流冲击,在满足供电要求的情况下,加载负荷最好按一定的时间间隔分级增加。鉴于不可能量化发电机组响应动态负载的所有影响因素,为了确定因负载变化引起的发电机组的频率和电压特性变化,应以允许的电压降和频率降为基础确定突变负荷的接入时间、功率分配等状态参数,同时考虑柴油机在标定功率下其平均有效压力与机组突加负荷功率的关系。

柴油机平均有效压力是单位气缸工作容积每循环一次所发出的有效功。平均有效压力是衡量柴油机动力性能的重要参数,其值越高说明柴油机气缸工作容积的利用率越高。根据GB/T 2820-7关于负荷接受的规定^[4],标定功率下的平均有效压力与发电机组分级突加负荷值有关。但是针对一台型号确定的机组,应以供货商给定的平均有效压力为准,以免超过柴油机的突加能力而导致机组停机。本工程按照推荐数据中的平均有效压力(2 185 kPa)确认各工步突加功率值,如图3所示。

在机组分步加载时,前三步中每一步的最大突加负荷分别为标定功率值的37%、62%和84%。而根据曲线的发展趋势,后续加载工步的负荷带载率已接近100%额定功率,对比表2中后续加载工步的负荷变化情况,故不需重复校验机组加载突加负荷能力。根据表2的负荷起动有功功率,前三步的最大起动有功分别为2 009 kW、2 196 kW和2 804 kW;根据图3给出的加载指导值,给合所选柴油机的平均有效压力得出,按标定功率时

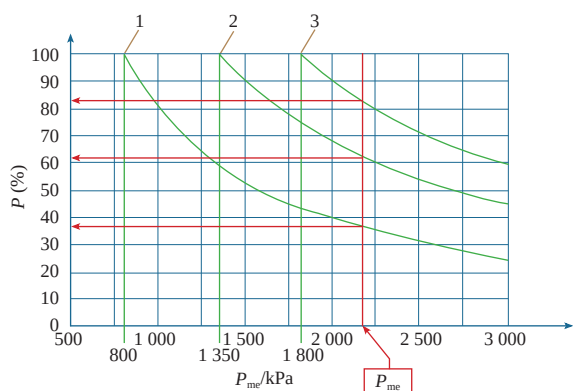


图3 作为标定功率下平均有效压力 P_{me} 函数的最大可能突加功率的指导值

P_{me} —标定功率平均有效压力 P —现场条件下相对于标定功率的功率增加

1—第1功率级 2—第2功率级 3—第3功率级

16PA6B型柴油机各工步可允许加载功率指导值,即最大带载功率值应分别满足(需同时考虑发电机电效率):

$$\text{第一工步: } P_{cn} p > P_{G21}/\eta_g \rightarrow 5\,920\text{ kW} \times 0.37 = 2\,190.4\text{ kW} > 2\,009\text{ kW}/0.972 = 2\,067\text{ kW} \quad (11)$$

$$\text{第二工步: } P_{cn} p > P_{G22}/\eta_g \rightarrow 5\,920\text{ kW} \times 0.62 = 3\,670.4\text{ kW} > 2\,196\text{ kW}/0.972 = 2\,260\text{ kW} \quad (12)$$

$$\text{第三工步: } P_{cn} p > P_{G23}/\eta_g \rightarrow 5\,920\text{ kW} \times 0.84 = 4\,972.8\text{ kW} > 2\,804\text{ kW}/0.972 = 2\,885\text{ kW} \quad (13)$$

式中, P_{cn} 为柴油机额定功率, kW; P_{G21} 、 P_{G22} 和 P_{G23} 为前三工步各步负荷起动有功功率之和, kW; η_g 为发电机电效率,取0.972。故由上述可知,所选柴油机的出力水平覆盖了最严酷运行工况下所带载负荷功率的需求。

(3) 柴油发电机组环境条件的功率修正

柴油发电机组的标定功率是指在标准大气状况下能以额定方式连续运行12 h的功率。国标GB/T 21404—2008中规定:标准大气状况指外界大气压为100 kPa,环境温度为25 ℃,空气相对湿度为30%。依据本工程厂址设计参数,应对柴油机的额定功率进行修正,以期验证其现场运行输出能力。16PA6B型柴油机标况下最大功率输出为5 920 kW,室外极端最高温度为环境温度(39.6 ℃),其温度环境修正系数为

$$\alpha = 1 - 0.38 \times 0.01 \times (T_1 - 35) - 0.33 \times 0.01 (T_w - 40) - 0.74 \times 0.01 (100 - P_0)$$

$$\begin{aligned} &= 1 - 0.38 \times 0.01 \times (39.6 - 35) - 0.33 \times 0.01 (45.6 - 40) - \\ &\quad 0.74 \times 0.01 (100 - 100) \\ &= 96.404\% \end{aligned} \quad (14)$$

式中, T_1 为现场室外极端最高环境温度, ℃; T_w 为现场柴油机低温水进机温度, ℃; P_0 为现场大气压力值, kPa (如果 $P_0 > 100$ kPa, 则取 $P_0 = 100$ kPa)。

上述按1.1倍裕量考虑的柴油发电机组所带载负荷需求为5 268 kW, 根据环境修正系数考量现场柴油机的实际出力。

$$P = P_{cn} \alpha = 5\,920\text{ kW} \times 0.964\,04 = 5\,707\text{ kW} > 5\,268\text{ kW} \quad (15)$$

综上所述,柴油发电机组容量选型的计算结果满足设计要求,充分验证了其作为发电厂后备电源的可靠性。

结束语

结合国内某发电厂实际工况,阐述了柴油发电机组交流电源系统负荷分析及容量选择计算的实用方法。其中,在负荷统计方面采用了有别于相关手册的优化分析方法,并结合柴油机设备输出能力及突加功率指导值的要求进行了多步负载校验计算,增强了在短时过载能力、首次带载能力和稳态运行能力等方面设备容量校验的可靠性,对于提高设计计算的效率、提高系统可靠性及准确性有很大帮助,可作为厂用柴油发电机组容量计算的依据。

参考文献

- [1] 电力工程电气设计手册—电气一次部分 [M]. 1版. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [2] NEMA MG1—2011 Motors and Generators [S]. USA: NEMA, 2011.
- [3] IEEE—387 Standard criteria for diesel generator units applied as standby power supplies for nuclear power generating stations [S]. New York: IEEE, 1995.
- [4] GB/T 2820.5 往复式内燃机驱动的交流发电机组 (第5部分): 发电机组 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

(收稿日期: 2014-09-19) EA