核电站厂用配电设备发热量实用计算方法

核电站厂用配电设备有干式变压器、中压开关柜、低压开关柜以及进出配电室的电缆等，这些电气设备发热量大小是配电室的暖通关键设计输入参数。厂用配电设备发热量计算需根据电气设备工作效率和核电站运行工况进行计算，可采用估算法或精确计算法两种发热量工程实用计算方法，满足核电站厂用配电设备在不同设计阶段下的发热量计算需求。

宋鹏飞　阮　阳/中广核工程有限公司设计院

宋鹏飞/高级工程师

关键词/Keywords
厂用配电室·
电气设备·
发热量·
实用计算·

0　引言

核电站厂用配电室是核电站全厂用电设备的动力配电中心，厂用配电室布置有大量的厂用电气设备。为了保证厂用配电设备在电站寿期内可靠持续运行，就需要对配电室暖通环境提出相应的温度和湿度要求。厂用配电设备的发热量作为厂用配电室暖通设计输入关键参数，其计算显得十分必要。

1　电气设备发热量

核电站厂用配电室布置的配电设备有低压厂用变压器、中压开关柜、低压开关柜和相应的进出线电缆等。厂用配电设备正常工作期间的自身发热和功率损耗转化为热能，散发到厂用配电室中。

通用的电气设备发热量可以按照电气设备工作电流在电气设备自身阻抗上产生的热能损耗计算，即按照$P=I^2R$计算。厂用配电设备发热量也可按照电气设备的工作效率进行核算，电气设备效率损失功率即为电气设备发热量。

电气设备发热量带来的电能损耗，可折算到设备运行成本之中，通过对比电气设备损耗带来的成本和设备本身造价，采用技术经济比较方式优化设备选型。核电站厂用配电设备发热量计算用于设备选型的流程图如下图所示。

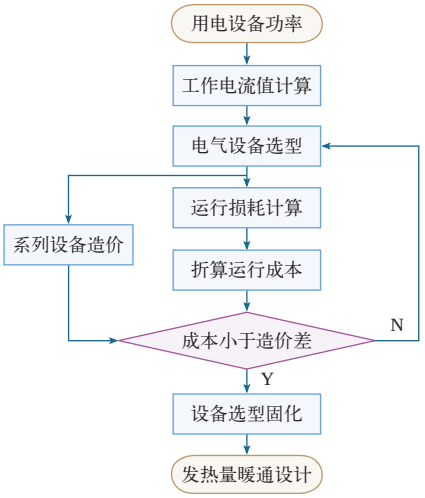

图　用于设备选型发热量计算流程图

不同的电气设备发热量特性不同，其计算方法也有一定的区别。核电站厂用配电设备发热量计算需要结合电气设备特性和设备运行参数进行分析和计算。

2　影响因素

核电站厂用配电室内电气设备发热量大小直接决定了厂用配电室暖通系统设计，而影响电气设备发热量的因素主要有以下几个方面。

1）核电站运行工况。核电站标准运行工况分为冷停堆、中间停堆、热停堆、热备用及功率运行。不同运行工况下厂用配电室内电气设备发热量不同。

2）用电设备是否工作。同一个配电系统向不同的用电设备供电，在特定计算工况下用电设备是否工作，直接影响

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

中压开关柜、低压开关柜、干式变压器和进出线电缆的发热量。

3）电气设备效率值。不同电气设备的效率值不同，其工作期间产生的设备发热量也不同。效率越高，其发热量越小；效率越低，其发热量越大。

4）用电设备工作电流值。在特定发热量计算工况中，配电设备的工作电流并不一定等于配电设备的额定电流，该回路的发热量计算应按实际工作电流值计算。

5）工作同时性系数。同一个配电系统供电的用电设备，在特定工况下不一定全部同时投入运行，发热量计算时需要考虑一定的同时性系数。

根据核电站运行工况、用电设备投切情况、电气设备效率、工作电流值及同时性系数等因素，结合干式变压器、中压开关柜、低压开关柜和电缆等电气设备的固有发热量特性，根据设计深度和设计需求的不同，采用估算法或精确计算法分别计算出厂用配电设备发热量，配电室内所有配电设备的发热量则可以用于开展厂用配电室暖通设计。

3 实用计算方法

核电站主要的厂用配电设备有干式变压器、中压开关柜、低压开关柜和电缆。分别针对这几类典型的电气设备进行发热量实用计算分析。

3.1 干式变压器

3.1.1 估算法

核电站厂用配电室布置的变压器均为低压干式变压器。当低压厂用干式变压器未订货，或者初步设计阶段不具备精确计算发热量的条件时，可以采用变压器平均发热量作为参考。典型的SCB10型环氧树脂浇注变压器损耗如表1所示[1]。

3.1.2 精确计算法

当干式变压器已经订货或者施工图设计阶段需要详细干式变压器设备发热量时，则对干式变压器的发热量进行精确计算。

变压器散热主要指变压器内部的能量损耗，由铜损（电阻损耗）和铁损（铁磁损耗）两部分组成，其中铜损是随负荷大小而变化，而铁损与负荷大小无关，可以看成一定值。通常将额定负荷时的铜损定为短路损耗，额定电压下的铁损定为空载损耗。低压干式变压器的发热量可以按式（1）计算，即

表1 干式变压器损耗

SCB10型变压器/kV·A	短路阻抗 U_k(%)	空载损耗 P_0/W	负载损耗 P_k/W	变压器总损耗 P/W	变压器造价/万元
630	4	1 180	5 120	6 300	1.0
800	6	1 330	6 060	7 390	1.3
1 000	6	1 550	7 090	8 640	1.5
1 250	6	1 830	8 460	10 290	1.7
1 600	6	2 140	10 200	12 340	2.0
2 000	6	2 400	12 600	15 000	2.4
2 500	6	2 850	15 000	17 850	3.0

$$P = P_0 + P_k \quad (1)$$

式中，P为变压器总损耗，W；P_0为变压器空载损耗，W；P_k为变压器在特定负载下的负载损耗，W。

以某核电站核岛低压干式变压器（1LLC001TR）为分析对象，该干式变压器容量为630 kV·A，变压器负荷统计的计算容量为495 kV·A，变压器计算负载率为495/630×100%=78.57%。核电站核岛低压干式变压器的额定电压比6 600/390 V，供货商提供在不同负载率下的损耗值，如表2所示。

表2 630 kV·A变压器损耗

630 kV·A变压器负载率(%)	短路阻抗 U_k(%)	空载损耗 P_0/W	负载损耗 P_k/W	变压器总损耗 P/W
25	4.5	1 270	380	1 650
50	4.5	1 270	1 540	2 800
75	4.5	1 270	3 450	4 720
100	4.5	1 270	6 150	7 420

630 kV·A变压器在75%负载率下的负载损耗为3 450 W，折算的变压器绕组电阻值7.05 mΩ；在100%负载率下负载损耗为6 150 W，折算绕组电阻值为7.07 mΩ；采用插值法计算变压器的78.57%负载率下的绕组电阻值为7.053 mΩ。该干式变压器在78.57%负载率下计算电流值732.74 A，负载损耗为3 787 W；空载损耗为1 270 W。按照式（1）计算该变压器在78.57%负载率下，总损耗为P=

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 270 W＋3 787 W＝5 057 W。

变压器损耗值，按照单位电价和运行小时数，可以折算出设备损耗带来的电能损失和运行成本。对比分析变压器运行成本和设备造价，开展技术经济比选。

3.2 中压开关柜

3.2.1 估算法

核电站厂用配电室内布置的中压开关柜电压等级为6.6 kV或10 kV。当中压开关柜尚未订货，或者设计深度尚未具备特别精确计算条件的情况下，中压开关柜发热量可以按照柜子数量进行估算，平均每台中压开关柜的设备散热量为200 W[1]。

3.2.2 精确计算法

当中压电气系统设计完成，中压柜配电的用电负荷已经确定，或者开展施工图设计阶段需要对中压开关柜发热量进行精确计算时，可按照式（2）计算中压开关柜散热量，即

$$P=\left(\frac{I_g}{I_e}\right)^2 P_e \qquad (2)$$

式中，P为中压柜实际发热量，W；I_g为中压开关工作电流，A；I_e为中压开关额定电流，A；P_e为中压开关额定电流时的散热量，W。

以某核电站6.6 kV中压开关柜（1LGA001TB）为分析对象，供货商提供的中压柜设备散热量如表3所示。该中压配电柜有4台中压接触器柜和6台中压断路器柜。

表3 中压开关柜损耗

中压柜型号	中压柜类型	额定电流I_g/A	发热量P_g/W
ZVC	接触器柜	250	200
ZS1	断路器柜	1 250	610
ZS1	断路器柜	2 000	840
ZS1	断路器柜	2 500	1 190
ZS1	断路器柜	3 150	200

中压接触器柜以低压厂用变压器回路（1LKR001TR）为例，变压器容量为630 kV·A，额定工作电流56 A，选用熔断器400 A，最大工作电流250 A，按照式（2）计算出该中压接触器柜发热量$P=[(56/250)^2\times 200]$ W＝10 W。

中压断路器柜以循环水泵电动机回路（1CRF001PO）为例，额定功率6 800 kW，额定电流711 A，选用1 250 A断路器，按照式（2）计算出该中压断路器柜发热量为$P=[(711/1\ 250)^2\times 610]$ W＝197.4 W。

按照上述方法计算出该中压开关柜（1LGA001TB）发热量如表4所示。从表4中看出每台中压柜平均最大发热量为447 W，核电站机组正常工作期间，平均每台柜发热量为166.3 W。

3.3 低压开关柜

3.3.1 估算法

核电站厂用配电室布置有大量的低压开关柜，其额定电压为380 V。因低压开关柜配出回路

表4 中压开关柜1LGA001TB发热量

设备编码	用电设备名称	柜子类型	额定电流/A	额定发热量/W	工作电流/A	实际散热量/W
1LGA001JA	进线单元	断路器柜	3 150	1 230	2 846	1 004.0
1LGA002TU	电压监测单元	TV柜	–	0	–	0
1RCP002PO	主泵2#电动机	断路器柜	1 250	610	711	197.4
1RCP001PO	主泵1#电动机	断路器柜	1 250	610	711	197.4
1CRF001PO	循环水泵电动机	断路器柜	1 250	610	711	197.4
1CEX001PO	凝结水泵电动机	断路器柜	1 250	610	185	13.4
1LKA001TR	低压厂用变压器1LKA	接触器柜	250	200	56	10.0
1ATE001PO	精处理泵电动机	接触器柜	250	200	68	23.1
1LKQ001TR	低压厂用变压器1LKQ	接触器柜	250	200	56	10.0
1LKR001TR	低压厂用变压器1LKR	接触器柜	250	200	56	10.0
	总计发热量			4 470		1 662.7
	平均发热量			447		166.3

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

较多，其发热量计算也相对比较复杂。

当低压开关柜尚未订货，或者设计深度并不需要特别精确的设备发热量值，或者不具备精确计算条件时，可以根据工程经验值，按照每台低压开关柜的平均发热量300 W[1]计算。厂用配电室布置的低压开关柜台数越多，发热量越大。

3.3.2 精确计算法

当低压电气系统设计完成，低压开关柜的用电负荷已经确定，或者开展施工图设计阶段需要对中压柜发热量进行精确计算时，可以按照式（3）计算，即

$$P = P_1 + P_2 = \sum I_B^2 R_B + P_{Hold} + P_{Relay} \quad (3)$$

式中，P为低压开关柜发热量，W；P_1为一次回路消耗功率，W；P_2为二次回路消耗功率，W；I_B为抽屉回路工作电流值，A；R_B为抽屉回路电阻值（包括元器件电阻和接触电阻），Ω；P_{Hold}为接触器保持功率，W；P_{Relay}为继电器消耗功率，W。

低压开关柜回路发热量精确计算主要分为两大部分：第一部分为一次主回路各个元器件产生的发热量；第二部分为二次辅助回路发热量，包括接触器保持功耗和二次继电器工作功耗。

以某核电站低压开关柜（3LLI001TB）为分析对象。按照式（3）进行发热量计算。该低压开关柜主要包括接触器回路和断路器回路。

低压接触器回路以乏燃料水池净化泵电动机回路（3PTR001PO）为例，一次主回路发热量包括断路器、接触器和热继电器的发热量。断路器单极电阻0.3 mΩ，单极损耗$(220^2 \times 0.3 \times 10^{-3})$ W＝14.52 W，单极插入式断路器附加损耗4.89 W，接触器单极电阻为0.33 mΩ，单极损耗为$(185^2 \times 0.33 \times 10^{-3})$ W＝12 W，热继电器平均损耗2.2 W，故以此主回路发热量为P_1＝[3×(14.52＋4.89)＋3×12＋2.2] W＝(58.23＋36＋2.2)W＝96.43 W；二次辅助回路发热量由接触器保持功率，继电器功耗和指示灯功耗组成，P_2＝(9.5＋1.5＋2.2) W＝13.2 W；该低压接触器回路总发热量为P_H＝(96.43＋13.2) W＝109.63 W。

低压断路器回路以低压配电箱（3LLS001AR）为例，一次主回路发热量为主断路器的发热量，断路器TMD40的单极电阻值为3.42 mΩ，单极插入式断路器附加损耗0.2 W，断路器漏电模块L1和L3线为0.05 W，L3相为0.1 W。计算功率为P_1＝[3×(402×3.42×10^{-3}＋0.2)＋(0.05＋0.05＋0.1)] W＝17.21 W；二次辅助回路发热量在正常工作期间不考虑断路器分励脱扣器动作，仅计算非故障继电器和指示灯功耗，故二次辅助回路发热量为P_2＝(1.5＋2.2) W＝3.7 W；该低压断路器回路总发热量为：P_H＝(17.21＋3.7) W＝20.91 W。

按照上述计算方法计算出低压开关柜（3LLI001TB）发热量情况如表5所示，低压厂用负荷的换算系数按照0.7计算[2]。从表5中可以看出该低压开关柜平均每台柜子最大发热量为264.19 W，核电站机组正常运行期间发热量为211.85 W。

表5 低压开关柜3LLI001TB发热量

序号	用电设备（3LLI001TB）	断路器	接触器	功率/W	电流/A	主回路/W	辅助回路/W	最大功耗/W	系数	计算功耗/W
1	3LLI001TU	–	–	–	–	–	–	27.10	1	27.10
2	3PTR001PO	MA220	F185	90	160.1	96.43	13.2	109.63	1	109.63
3	3CFI101MO	MA150	D150	75	140	76.15	8.8	84.95	1	84.95
4	3LLS001AR	TM40D		20	30.4	17.21	3.7	20.91	0	0.00
	1#柜汇总							242.59		221.68
1	3CFI121CR	TM16D		0.6	1.63	8.76	3.7	12.46	1	12.46
2	3CFI001MO	MA6.3	D40	2.2	5	21.19	25.3	46.49	1	46.49
3	3DVK005ZV	MA12.5	D40	5.5	10.45	11.29	25.3	36.59	1	36.59
4	3DVK003RS	TM50D	D80	17	25.83	30.73	26.9	57.63	1	57.63

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（续）

序号	用电设备（3LLI001TB）	断路器	接触器	功率/W	电流/A	主回路/W	辅助回路/W	最大功耗/W	系数	计算功耗/W
5	3GCT130VV	MA6.3	D40	1.5	4.1	21.19	26.6	47.79	0.5	23.90
6	3DVC001AR	TM160D		71	107.9	53.25	3.7	56.95	1	56.95
7	3SEC011MO	MA2.5	D09	0.75	2.1	5.59	9.1	14.69	1	14.69
8	3DVC010ZV	MA2.5	D09	0.75	1.8	5.59	9.1	14.69	1	14.69
	2#柜汇总							287.29		263.40
1	3SEO201AR	TM100D	–	30	57	30.8	3.7	34.50	0.5	17.25
2	3SEO203AR	TM100D	–	30	57	30.8	3.7	34.50	0.5	17.25
3	3LLG001TB	MIC2.0	–	344	653.3	286.28	3.7	289.98	0.5	144.99
4	3DVL202ZV	MA100	D80	37	70.4	36.1	25.3	61.40	1	61.40
5	3DVC003ZV	MA150	F150	55	103	59.65	12.7	72.35	1	72.35
6	3DEG001PO	MA220	F185	90	160.1	96.43	13.2	109.63	1	109.63
	3#柜汇总							602.36		422.87
	三台柜汇总							1 132.24		907.95
	换算系数								0.7	
	总发热量							792.57		635.56
	平均发热量							264.19		211.85

3.4 电缆

3.4.1 估算法

核电站厂用配电室所在厂房配套有电缆夹层时，电缆的发热量主要集中在电缆夹层，核电站电缆夹层可以按照房间面积进行估算，计算时可以按照5 W/m^{2}估算。若厂用配电室未配套有电缆夹层时，进出线电缆布置在干式变压器、中压开关柜或低压开关柜上方时或电缆数量不多时，电缆发热量估算可以忽略不计。

3.4.2 精确计算法

电缆发热量由载流电缆的损耗求出。损耗功率是以一年最热季节可能产生的最大损耗进行计算[1]。

电缆发热量需准确计算时，一条芯线可按式（4）计算，即

$$P_R = \frac{nI_c^2\rho L}{S} \tag{4}$$

式中，P_R为一条n芯电缆发热量，W；n为电缆的芯线数量；I_c为电缆的计算负荷电流，A；ρ为电缆运行温度为50 ℃时的电缆芯电阻率，Ω·mm，对于铜芯电缆，电缆芯电阻率为0.019 3×10^{-3} Ω·mm，对于铝芯电缆为0.031 6×10^{-3} Ω·mm；S为电缆芯截面积，mm^2；L为电缆长度，m。

电缆托盘内N根电缆的发热总量P可以按照式（5）计算，即

$$P = K\sum_{1}^{N} P_R \tag{5}$$

式中，P为N根电缆发热总量，W；N为电缆根数；K为电缆参差系数，可取0.85～0.95。

核电站电缆夹层内的电缆发热量需要根据实际敷设的电缆根数、实际的电缆载流量及实际的电缆托盘层数进行精确计算。

动力低压铜芯电缆以3×35 mm^{2}为例，40 ℃下额定载流量为135 A，单位电缆长度1 m。按照式（4）计算该单根电缆发热量P_R=[(3×135^2×0.019 3×10^{-3}×1)/35] W=0.03 W。

单根电缆3×35 mm^{2}平均外径25 mm，以500 mm宽电缆托盘布置，最多可以布置20根，单层500 mm宽电缆托盘按照式（5）计算P=(0.9×0.03×20) W=0.54 W。在核电站密集电缆夹层内，总计9层电缆托盘：3层中压电缆托盘，3层低压电缆托盘，3层控制测量电缆托盘。控制测量电缆托盘发热量按照动力托盘发热量的1/3折算，实际托盘发热量按照7层动力电缆托盘计算，

(下转第40页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

正常工作。电源电压恢复正常，控制单元检测电源相位与负载相位相同后，指令晶闸管导通，将负载交还给电源，同时停止逆变器的输出，完成一次电压补偿，装置重新进入待机状态。这种方案具有很好的动态性能，当发生系统电压扰动问题时，能在不超过2 ms的时间内通常为将负荷侧供电电压恢复到正常值。

变频器的直流引出端子通常为变频器厂家预留出来用以外接直流电抗器和制动电阻用，但直流抗扰动电源的接入并不被变频器厂家认可，部分变频器如ABB ACS510系列，直流端子并未全部引出，还需拆解变频器从电路板外接，这样做必将失去变频器厂家质保。而交流抗扰动电源只需串接与原有给煤机变频调速系统电源端，不需要对变频器进行任何改造和操作，是未来抗电压扰动能力改造的优选方案。

4 结束语

电厂运行中遭遇雷击、电气设备短路、接地及重合闸等，将会引起电压的异常波动。由于给煤机变频调速系统不具备高低电压穿越能力，有造成变频器保护动作停机的事故风险。本文对火电机组给煤机变频调速系统的特性进行了研究分析，针对引起变频器保护动作的原因，提出两种增加抗电压扰动电源的解决方案。并针对方案原理逐一解析，确定了方案的应用条件和优缺点，给火电机组给煤机变频调速系统的抗电压扰动能力改造工作提供了理论支撑。

参考文献

[1] 甄晓晨，陶顺，肖湘宁，等．电压暂降的工厂级经济损失评估模型研究 [J]．电力系统保护与控制，2013，41 (12)：104-111．

[2] 孔祥雨，徐永海，陶顺．基于一种电压暂降新型描述的敏感设备免疫能力评估 [J]．电工技术学报，2015，30 (3)：165-171．

[3] 袁小平，李承宪，谢明，等．火电厂变频设备的低电压穿越能力 [J]．能源研究与管理，2014 (4)：99-100．

[4] 岳建华，毕春海，岳涛．火电厂给煤机低电压穿越探讨 [J]．中国电力，2014，47 (2)：18-22．

[5] 赵建中．350 MW机组给煤机变频器电源瞬停时维持连续运行的方法 [J]．中国电力，2010，43 (3)：51-54．

[6] 王晓宇，张涛，刘树，等．火电厂辅机变频器低电压穿越电源 [J]．电力自动化设备，2015，35 (5)：152-159．

（收稿日期：2016－01－25）EA

(上接第20页)

单位面积内的电缆托盘计算发热量为(0.54 × 7) W = 3.78 W。

电力电缆计算的损耗功率值也可以作为电力电缆选型的分析依据，按照电价折算成电能损耗的运行成本，可以对比分析不同截面积电缆的成本造价，如果运行成本过高，则需更换较大截面积较低损耗的电缆。

4 结束语

核电站厂用配电室是核电站厂用电系统的动力配电中心，厂用配电设备发热量直接决定了厂用配电室暖通系统设计和暖通设备的选用。核电站厂用配电室发热量工程实用计算时，可以采用估算法和精确计算法两种工程实用计算方法。当厂用配电设备未订货或者设计深度不需要特别精确时，可以采用估算法按照设备容量、数量或者房间面积进行估算。当电气设备订货后或者设计深度要求精确计算时，则可采用工程实际资料精确计算。

参考文献

[1] 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]．北京：中国电力出版社，2005．

[2] DL/T 5153—2014．火力发电厂厂用电设计技术规定 [S]．北京：中国电力出版社，2014．

（收稿日期：2015－12－25）EA

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net