

前 言

本标准等同采用国际电工委员会(IEC)标准IEC 60287《电缆载流量计算》(其中包括IEC 60287-1-1第1号修改件(1995)、IEC 60287-3-1第1号修改件(1999)和IEC 60287-3-2第1号修改件(1996))。本标准为国内首次制定的机械行业标准。

本标准是电线电缆的基础计算方法标准,广泛地被电缆设计、敷设和安装部门使用,因而等同采用IEC 60287标准。

JB/T 10181 在总标题《电缆载流量计算》下由下列各部分组成:

JB/T 10181.1 第1部分:载流量公式(100%负荷因数)和损耗计算

第1节:一般规定

JB/T 10181.2 第1部分:载流量公式(100%负荷因数)和损耗计算

第2节:双回路平面排列电缆金属套涡流损耗因数

JB/T 10181.3 第2部分:热阻

第1节:热阻的计算

JB/T 10181.4 第2部分:热阻

第2节:自由空气中不受到日光直接照射的电缆群载流量降低因数的计算方法

JB/T 10181.5 第3部分:有关运行条件的各节

第1节:基准运行条件和电缆选型

JB/T 10181.6 第3部分:有关运行条件的各节

第2节:电力电缆截面的经济优化选择

本标准与IEC 60287标准结构对照如下表:

本 标 准	IEC 60287
JB/T 10181.1	IEC 60287-1-1
JB/T 10181.2	IEC 60287-1-2
JB/T 10181.3	IEC 60287-2-1
JB/T 10181.4	IEC 60287-2-2
JB/T 10181.5	IEC 60287-3-1
JB/T 10181.6	IEC 60287-3-2

JB/T 10181.6-2000的附录A和附录B都是提示的附录。

本标准由全国电线电缆标准化技术委员会提出并归口。

本标准主要起草单位:上海电缆研究所。

本标准主要起草人:马国栋。

IEC 前言

1 IEC(国际电工委员会)是一个由各国家电工委员会(IEC 国家委员会)组成的国际范围的标准组织。IEC 的宗旨是针对电气和电子领域标准化的所有问题促进国际间合作。为实现这一宗旨,IEC 除组织各种活动外,还出版国际标准。并委托各技术委员会制定这些标准。对某项标准感兴趣的任何国家委员会均可参与该标准的制定。与IEC 有业务往来的国际组织、政府或非政府组织也可参与标准的制定。IEC 与国际标准化组织(ISO)按双方协议条件紧密合作。

2 技术委员会代表各国家委员会对他们特别关切的技术问题制定出的 IEC 正式决议或协议尽可能地表达出国际上对这些问题的一致意见。

3 这些文件以标准、技术报告或导则的形式出版发行,以推荐文件的形式在国际间使用,并且在此意义上取得各国家委员会的认可。

4 为促进国际间的统一,各IEC 国家委员会坦诚地以最大可能程度在各国家和地区中采用IEC 国际标准。IEC 标准与相应的国家或地区标准的任何差异应在国家或地区标准中清楚地指出。

5 国际标准 IEC 60287-1-1、IEC 60287-1-2、IEC 60287-2-1、IEC 60287-2-2、IEC 60287-3-1 和 IEC 60287-3-2由 IEC 第 20 技术委员会的第 20 A 分技术委员会:“高压电缆”制定。

5.1 IEC 60287-1-1 的第一版代替了 1982 年出版的 IEC 60287 第二版的第 1 节和第 2 节以及第 3 号修改件的相应部分,没有技术上的改动。

IEC 60287-1-1 标准文本和它的第 1 号修改件(1995)以及下列文件为基础:

六月法/DIS 文件	投票表决报告
20 A(CO)75	20 A(CO)81
20 A/262/DIS	20 A/280/RVD

投票表决批准该标准的全部资料均可在上表列出的“投票表决报告”中查找到。

5.2 IEC 60287-1-2 标准文本以下列文件为基础:

DIS	投票表决报告
20 A(CO)151	20 A(CO)161

投票表决批准该标准的全部资料均可在上表列出的“投票表决报告”中查找到。

5.3 IEC 60287-2-1 代替了 IEC 60287 第二版(1982)的第 3 节、附录 C 和附录 D,没有技术上的改动。

IEC 60287-2-1 标准文本以下列文件为基础:

六月法文件	投票表决报告
20 A(CO)75	20 A(CO)81

投票表决批准该标准的全部资料均可在上表列出的“投票表决报告”中查找到。

5.4 IEC 60287-2-2 标准文本以下列文件为基础:

六月法文件	投票表决报告
20 A(CO)125	20 A(CO)135

投票表决批准该标准的全部资料均可在上表列出的“投票表决报告”中查找到。

这一节最初作为IEC 1042 出版。

5.5 IEC 60287-3-1 代替了IEC 60287 第二版(1982)的附录A 和附录B,没有技术上的改动。

IEC 60287-3-1 标准文本和它的第1号修改件(1999)以下列文件为基础:

六月法文件/FDIS	投票表决报告
20 A(CO)75 20 A/403/FDIS	20 A(CO)81 20 A/408/RVD

投票表决批准该标准的全部资料均可在上表列出的“投票表决报告”中查找到。

5.6 IEC 60287-3-2 第一版代替了IEC 1059 第一版(1991),没有作技术上的改动。

IEC 60287-3-2 标准文本和它的第1号修改件(1996)以下列文件为基础:

DIS/FDIS	投票表决报告
20 A(CO)131 20 A/308/FDIS	20 A(CO)139 20 A/322/RVD

投票表决批准该标准的全部资料均可在上表列出的“投票表决报告”中查找到。

附录A 和B 是提示的附录。

IEC 引言¹⁾

为便于修订和采用,IEC 60287 将标准分成三部分和若干节。

每部分分为若干节作为单独标准出版。

第1部分:载流量公式(100%负荷因数)和功率损耗

第2部分:热阻公式

第3部分:有关运行条件的各节

IEC 60287-1-1

这一节包含有关 R 、 W_a 、 λ_1 和 λ_2 的公式。

这一节包括根据允许温升、导体电阻、损耗和热阻系数的详细数值计算电缆允许载流量的方法。

关于损耗的计算公式也在这一节中给出。

标准中的公式所包含的参量随着电缆设计和所用材料而变化。表中所给的数值或者是国际上认可的,例如电阻率和电阻温度系数,或者是通常实际上可接受的,例如材料热阻系数和介电常数。在后一种情况下,所给出的某些值不是新电缆的特性,而是适用于长期运行后电缆的特性。为了取得统一和便于比较的结果,载流量计算应使用本标准给出的数值。然而确实有其他更适合于这种材料和设计的值,也可以采用,并另外提出相应的载流量,只要援引此不同的数值。

电缆运行条件的各个参量各国间会有很大的差别。例如,关于环境温度和土壤热阻系数,从不同的考虑角度出发,各个国家规定相应值。如果他们不基于一个共同的基准,各个国家所采用的数值之间表面上相比可导出错误的结论,例如,对于电缆寿命可能有不同的期望,某些国家设计是基于土壤热阻系数的最大值,而另外国家则是采用平均值。特别是土壤热阻系数,对土壤的含水量非常敏感,随着时间可能有明显的变化,取决于土壤类型,地势和气象条件以及电缆负荷。

因而应采用以下各种参量的选择方法。

数字值最好根据测量结果。这些结果往往作为推荐值已经包含在国家规范中,以使在计算时所采用的为该国内常用的数值,这些测量数值在第3部分第1节中给出。

第3部分第1节给出所需的信息

IEC 60287-2-1

这一节包括电缆敷设在自由空气、排管和直埋时电缆的内部热阻和外部热阻的计算方法。

标准中的公式所包含的参量随着电缆设计和所用材料而变化。表中所给的数值或者是国际上认可的,例如电阻率和电阻温度系数,或者是通常实际上可接受的,例如材料热阻系数和介电常数。在后一种情况下,所给出的某些值不是新电缆的特性,而是适用于长期运行后电缆的特性。为了取得统一和便于比较的结果,载流量计算应使用本标准给出的数值。然而确实有其他更适合于这种材料和设计的值,也可以采用,并另外提出相应的载流量,只要援引此不同的数值。

采用说明:

1) 此IEC 引言包括IEC 60287-1-1、IEC 60287-2-1、IEC 60287-2-2、IEC 60287-3-1 及IEC 60287-3-2 各部分及各节的引言内容,以便编辑及对照参阅。

电缆运行条件的各个参量各国间会有很大的差别。例如,关于环境温度和土壤热阻系数,从不同的考虑角度出发,各个国家规定相应值。如果他们不基于一个共同的基准,各个国家所采用的数值之间表面上相比可导出错误的结论,例如,对于电缆寿命可能有不同的期望,某些国家设计是基于土壤热阻系数的最大值,而另外国家则是采用平均值。特别是土壤热阻系数,对土壤的含水量非常敏感,随着时间可能有明显的变化,取决于土壤类型,地势和气象条件以及电缆负荷。

因而应采用以下各种参量的选择方法。

数字值最好根据测量结果。这些结果往往作为推荐值已经包含在国家规范中,以使在计算时所采用的为该国常用的数值,这些测量数值在第3部分第1节中给出。

第3部分第1节给出所需的信息。

IEC 60287-2-2

这一节提供了水平敷设在自由空气中的电缆群载流量降低因数的计算方法和数据,忽略介质损耗。应与第2部分第1节一起使用。

IEC 60287-3-1

这一节包括各国土壤的热阻系数和环境温度的基准值。本节也包含了用户选择适用的电缆型式时所需的概要信息。

电缆运行条件的各个参量各国间会有很大的差别。例如,关于环境温度和土壤热阻系数,从不同的考虑角度出发,各个国家规定相应值。如果他们不基于一个共同的基准,各个国家所采用的数值之间表面上相比可导出错误的结论,例如,对于电缆寿命可能有不同的期望,某些国家设计是基于土壤热阻系数的最大值,而另外国家则是采用平均值。特别是土壤热阻系数,对土壤的含水量非常敏感,随着时间可能有明显的变化,取决于土壤类型,地势和气象条件以及电缆负荷。

数字值最好根据测量结果。这些结果往往作为推荐值已经包含在国家规范中,以使在计算时所采用的为该国常用的数值。本节征集了这些数值。

IEC 60287-3-2

本节以前是IEC 1059。

1 概述

选择电缆截面的方法通常是求出允许的最小截面,这也是使电缆投资费用为最小。此方法并不计及在电缆寿命期间发生的损耗费用。

能源费用的增加以及由于采用新型绝缘材料及可能的工作温度(如XLPE和EPR工作温度为90℃)导致高能耗,就要从较广泛的经济方面来考虑选择电缆截面,不仅使初始费用尽量减小,也要使初始费用和电缆经济寿命期间损耗费用的总和达到最低。对后一情况,选择较大的导体截面,而不是根据最少的初始费用选择导体截面,结果传输相同电流,其能耗较低,当考虑整个经济寿命时间,费用节省得多。

采用适当的估计负荷增长及能源费,可计算电缆在经济寿命期内将来的能耗费用。当将来的能耗费用与初始的购置与安装费总和为最小值时就得出导体最经济截面。

导体截面大于按热性选择的导体截面对总费用节省是由于与购置费用增加相比,焦耳损耗费用减少得多。本标准采用的财务参数和电气参数值并不特殊,购置费和运行费合计节省约50%(见附录A6)。以更短一些财务期计算得出相似的结果。

通过实例指出更重要的特点是当处于图A3所示的经济值范围内,可能的节省费用并不决定性地取决于导体截面。此包含两点含义:

a) 财务数据的误差,特别是决定将来费用的数据影响很小。虽然收集最实际、正确的数据有好处,但采用合理的估计得出的数据仍可获得可观的节省效果。

b) 对电缆线路决定其整体经济性有关的导体截面选择的其他因素,诸如故障电流、电压降及尺寸合理性等都要给予适当的重视,而不因选择经济截面而损失过多的利益。

2 经济方面

为了把电缆购置、安装费用与电缆在经济寿命期间的能耗费用结合起来,必须用可比的数值表示,此值与相同的时间点相关联。用购置电缆线路装置的日期作为时间点较方便,并把它称为“现在时”。然后将未来能耗费用换算到相当的“现值”。用折现的方法来处理,其折现率与贷款费用相联系。

本标准采用的方法是将通货膨胀忽略掉。这是因为通货膨胀对贷款费用及能源费用均有影响。假如在相同的时间段考虑这些项目,并且通货膨胀对两者的影响接近相同,则能够很好地选择经济截面而不需引入通货膨胀增加的复杂因素。

为计算能耗费用的现值,必须选用电缆经济寿命(25年或以上)期间未来负荷的增长、每年kWh价格的增加以及年贴现率的合适数值。本标准不可能在这些方面给予引导,因为这些数值取决于每个电缆线路装置的状况及财务控制。只提出了合适的公式,由设计人员与用户负责进行协商确定所采用的经济因素的数值。

本标准建议的公式是明确易懂的,但在具体应用时要假定在电缆的经济寿命期间财务参数保持不变。无论如何,上述对这些参数正确性的评价也是相对的。

根据相同的财务概念,有两种计算经济截面的方法。第一种方法考虑系列导体截面以计算预定用于特殊的装置状况的每个导体截面的经济电流范围,然后选择导体截面,其经济电流范围包含所需负荷。此方法适用于考虑几个相似的电缆装置的情况。第二种方法较适用于只考虑一个电缆装置的情况,计算要求负荷的最佳截面,然后选择最接近的标准导体截面。

3 其他判据

其他判据,例如短路电流及其持续时间,电压降和电缆截面合理化等也必须给予考虑。然而,选择具有导体经济截面的电缆也要能够很好地满足上述各点,因此选择电缆时最好按照以下顺序:

a) 计算经济截面;

b) 按照JB/T 10181.1,JB/T 10181.2和JB/T 10181.3标准中所给的方法校核a)计算的截面是否可传输预计在电缆经济寿命期末的最大负荷而不超过最高允许导体温度;

c) 校核所选择的电缆截面是否能安全地通过预料的短路电流及相应持续时间和对地故障电流;

d) 校核电缆末端的电压降是否超过允许范围;

e) 按适用于具体电缆装置的其他判据作校核。

为完成经济选择工作,应适当地对中断供电的后果予以重视。可能需要采用比正常负荷状况所需较大的导体截面,并且(或者)经济选择还需相应地对电网提出建议或与电网相适配。

还有一部分费用可能要考虑的是由于概率上原因作出错误决定而产生的财务上后果所致。但这是决策理论领域中问题,已超出本标准的范围。

因此,选择电缆经济截面只是系统总的经济问题的一部分内容,其他重要的经济内容尚待另外考虑。

中华人民共和国机械行业标准

电缆载流量计算 第1部分： 载流量公式(100%负荷因数)和损耗计算 第1节：一般规定

JB/T 10181.1—2000
idt IEC 60287-1-1:1994

Calculation of the current rating of electric cables—
Part 1: Current rating equations(100% load factor)
and calculation of losses—
Section 1: General

1 概述

1.1 范围

本标准适用于敷设在空气或土壤中的所有交流电压等级和5 kV及以下直流电压电缆稳态运行状况。土壤中包括发生或未发生局部土壤干燥的直接埋地、管道、电缆沟或钢管中敷设的电缆。术语“稳态”系指在周围环境假定不变的条件下，连续恒定电流(100%负荷因数)正好足以渐近地达到导体的最高温度。

这一节提供了额定载流量和各种损耗的计算公式。

这些公式基本上是严密的，有意对某些重要参数取值未作规定，可分为三组：

- 与电缆结构有关的参数(例如绝缘材料热阻系数)，选于公开出版物中代表性数值；
- 与环境条件有关的参数，其值可能变化范围较大，取决于使用电缆或即将使用电缆的敷设现场状况；
- 来自于制造厂和用户之间协商的参数，包括运行的安全裕度(例如最高导体温度)。

1.2 引用标准

下列标准所包含的条文，通过在本标准中引用而构成本标准的条文。本标准出版时，所示版本均为有效。所有标准都会被修订，使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB/T 3956—1997 电缆的导体

GB/T 17048—1997 架空绞线用硬铝线

JB/T 8996—1999 高压电缆选择导则

JB/T 10181.3—2000 电缆载流量计算 第2部分：热阻 第1节：热阻的计算

IEC 60028:1925 铜电阻国际标准

IEC 60141 充油电缆和压气电缆及其附件的试验

IEC 60502:1997 额定电压1 kV($U_m=1.2$ kV)至30 kV($U_m=36$ kV)挤包绝缘电力电缆及附件

1.3 符号

本标准所用的符号及其代表的参量由下列给出：

- | | | |
|----------------|------------|-----------------|
| A | 铠装横截面 | mm ² |
| B ₁ | 系数(见2.4.2) | |

B_2	系数(见 2.4.2)	
C	每个线芯的电容	F/m
D_c	电缆外径	mm
D_i	绝缘外径	mm
D_s	金属套外径	mm
D_{oc}	正好与皱纹金属套波峰相切的假想同心圆柱体的直径	mm
D_{oi}	正好与皱纹金属套波谷内表面相切的假想同心圆柱体的直径	mm
F	系数(2.3.5)	
H	日光辐射照度	W/m ²
H	磁场强度(见 2.4.2)	安匝/m
H_s	金属套电感	H/m
H_1	由钢丝引起的电感分量	H/m
H_2		
H_3		
I	一根导体的电流(有效值)	A
M, N	2.3.5 定义的系数	
P, Q	2.3.3 定义的系数	
R	导体在其最高工作温度下的交流电阻	Ω/m
R_A	铠装的交流电阻	Ω/m
R_c	金属套和铠装并联时等效交流电阻	Ω/m
R_s	金属套的交流电阻	Ω/m
R'	在最高工作温度下导体的直流电阻	Ω/m
R_0	20℃时导体的直流电阻	Ω/m
T_1	导体和金属套之间每根线芯热阻	K·m/W
T_2	金属套和铠装之间热阻	K·m/W
T_3	外护层热阻	K·m/W
T_4	周围介质热阻(高于周围环境温度的电缆表面温升与单位长度损耗之比)	K·m/W
T_4'	日光照射下自由空气中电缆修正的外部热阻	K·m/W
U_0	导体和屏蔽或铠装之间电压	V
W_A	单位长度铠装损耗	W/m
W_c	单位长度导体损耗	W/m
W_d	每相单位长度介质损耗	W/m
W_s	单位长度金属套损耗	W/m
W_{s-A}	单位长度金属套和铠装总损耗	W/m
X	金属套电抗(两芯电缆和三个单芯呈三角形排列)	Ω/m
X_1	金属套电抗(电缆呈平面排列)	Ω/m
X_m	当三根单芯电缆呈平面排列时,其中一根电缆的金属套和另外两根电缆的导体之间互抗	Ω/m
a	交叉互连时具有不等长度的电缆小段中的最短长度	
c	三芯电缆中每个导体轴线和电缆轴线之间距离 (扇形导体 = $0.55r_1 + 0.29t$)	mm
d	金属套或屏蔽的平均直径	mm

d'	金属套和加强层的平均直径	mm
d_2	加强层的平均直径	mm
d_A	铠装的平均直径	mm
d_c	导体外径	mm
d_e'	具有相同中心油道的空心导体的等效于实心导体的直径	mm
d_d	管道内径	mm
d_f	钢丝直径	mm
d_i	空心导体内径	mm
d_M	椭圆形导体的屏蔽或金属套长轴直径	mm
d_m	椭圆形导体的屏蔽或金属套短轴直径	mm
d_s	具有相同横截面和紧压程度型导体的等效圆导体直径	mm
f	系统频率	Hz
g_s	2.3.6.1中所用的系数	
k	铠装或加强带计算磁滞损耗所用的因数(见2.4.2.4)	
k_p	在计算 X_p 时所用的因数(邻近效应)	
k_s	在计算 X_s 时所用的因数(集肤效应)	
l	电缆区段长度(通用符号,见2.3和2.3.4)	m
\ln	自然对数(以e为底)	
m	$\frac{\omega}{R} \times 10^{-7}$	
n	电缆中导体芯数	
n_1	电缆中钢丝根数(见2.4.2)	
p	钢丝沿电缆的绞合节距(见2.4.2)	
p, q	2.3.6.2中所用的系数	
r_1	外切于两或三扇形导体的外接圆半径	mm
s	各导体的轴线间距	mm
s_1	在水平排列的三个不相接触的电纜组中,两个相邻电纜组之间的距离	mm
s_2	各电纜之间轴线间距(见2.4.2)	mm
t	导体之间绝缘厚度	mm
t_3	外护层厚度	mm
t_4	金属套厚度	mm
ν	干燥土壤和潮湿土壤热阻系数之比($\nu = \rho_{d1} / \rho_w$)	
x_p	计算邻近效应时所用贝塞尔函数的自变量	
x_s	计算集肤效应时所用贝塞尔函数的自变量	
y_p	邻近效应系数(见2.1)	
y_s	集肤效应系数(见2.1)	
α_{20}	20℃时电阻率温度系数	1/K
β	铠装钢丝轴线和电纜轴线之间的夹角(见2.4.2)	
β_1	2.3.6中所用系数	
γ	时间滞后角度(见2.4.2)	
Δ_1	2.3.6.1中所用的系数	
Δ_2	2.3.6.1中所用的系数	
δ	铠装或加强层的等效厚度	mm

$\tan \delta$	绝缘介质损耗因数	
ϵ	绝缘相对介电常数	
θ	导体最高运行温度	°C
θ_a	环境温度	°C
θ_x	土壤的临界温度;即干燥和潮湿区之间边界的温度	°C
$\Delta\theta$	高于环境温度的导体允许温升	°C
$\Delta\theta_x$	土壤的临界温升;即高于环境温度的土壤干燥与潮湿区之间边界的温升	K
λ_0	2.3.6.1中所用的系数	
λ_1, λ_2	金属套和铠装总损耗分别相对于导体总损耗的比率(或一个金属套或铠装中的损耗相对于一个导体损耗之比率)	
λ_1'	一个金属套中环流引起的损耗与一个导体中损耗之比率	
λ_1''	一个金属套中涡流引起的损耗与一个导体中损耗之比率。	
λ_{1m}'	三根单芯电缆平面排列,不换位,金属套两端互连时中间电缆的损耗因数	
λ_{11}'	三根单芯电缆平面排列,不换位,金属套两端互连时具有最大损耗的外侧电缆的损耗因数	
λ_{12}'	三根单芯电缆平面排列,不换位,金属套两端互连时具有最小损耗的外侧电缆的损耗因数	
μ	铠装材料的相对导磁率	
μ_z	纵向相对导磁率	
μ_h	横向相对导磁率	
ρ	20°C时导体电阻率	$\Omega \cdot m$
ρ_a	干燥土壤热阻系数	$K \cdot m/W$
ρ_w	潮湿土壤热阻系数	$K \cdot m/W$
ρ_s	20°C时金属套电阻率	$\Omega \cdot m$
σ	日光照射时电缆表面的吸收系数	
ω	电源系统角频率($2\pi f$)	

1.4 电缆允许载流量

当计算土壤局部干燥状态下允许载流量时,也需要计算未发生土壤干燥状态时额定载流量。选用两者中较小数据。

1.4.1 未发生土壤干燥的直埋电缆或空气中敷设的电缆

1.4.1.1 交流电缆

从高于环境温度的温升表达式中可导出交流电缆的允许载流量:

$$\Delta\theta = (I^2 R + 1/2 W_d) T_1 + [I^2 R (1 + \lambda_1) + W_s] n T_2 + [I^2 R (1 - \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] n (T_3 + T_4)$$

式中: I ——一根导体中流过的电流, A;

$\Delta\theta$ ——高于环境温度的导体温升, K;

注: 环境温度是指在正常状态下周围介质的温度, 在敷设或即将敷设电缆的场合下, 任何局部热源会有影响, 但不考虑由此产生的热量会使电缆周围温度升高。

R ——最高工作温度下导体单位长度的交流电阻, Ω/m ;

W_d ——导体绝缘单位长度的介质损耗, W/m ;

T_1 ——一根导体和金属套之间单位长度热阻, $K \cdot m/W$;

T_2 ——金属套和铠装之间衬垫层单位长度热阻, $K \cdot m/W$;

T_3 ——电缆外护层单位长度热阻, $K \cdot m/W$;

T_1 ——电缆表面和周围介质之间单位长度热阻,见JB/T 10181.3—2000中2.2,K·m/W;

n ——电缆中载有负荷的导体数(导体截面相等,负载相同);

λ_1 ——电缆金属套损耗相对于该电缆所有导体总损耗的比率;

λ_2 ——电缆铠装损耗相对于该电缆所有导体总损耗的比率。

从上述等式中可导出允许载流量公式如下:

$$I = \left\{ \frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

电缆直接受日光照射的场合下应采用JB/T 10181.3—2000中2.2.1.2的计算公式。

低压四芯电缆的载流量可等同于相同电压级和相同结构导体截面的三芯电缆载流量,只要电缆用于三相系统,其中第四芯导体是中性导体或者是保护导体。当它是中性导体时,此载流量适用于平衡负荷。

1.4.1.2 5 kV 及以下直流电缆

直流电缆额定允许电流从交流电缆公式简化得出:

$$I = \left\{ \frac{\Delta\theta}{R'T_1 + nR'T_2 + nR'(T_3 + T_4)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中: R' ——最高运行温度下导体单位长度的直流电阻, Ω/m 。

电缆直接受日光照射的场合下应采用见JB/T 10181.3—2000中2.2.1.2的计算公式。

1.4.2 土壤发生局部干燥场合下的埋地电缆

1.4.2.1 交流电缆

下面方法仅适用于敷设在一般深度下分离的单根电缆或单一回路。该方法从简单的两区域近似的土壤物理模型导出,而邻接电缆周围区域土壤变得干燥,另一区域维持原有的土壤热阻系数,区域之间形成等温的边界。该方法仅适合于将土壤热性能作为简单的条件考虑的场合。

注1:多于一个回路的电缆线路以及回路之间必要的间距在考虑之中。

由于对分离敷设单根电缆或回路周围形成干燥区域引起电缆外部热阻变化的计算公式应由下式求出(比较1.4.1.1公式):

$$I = \left\{ \frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + \nu T_4)] + (\nu - 1)\Delta\theta_x}{R(T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + \nu T_4))} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中: ν ——干燥和潮湿土壤区域热阻系数之比率, $\nu = \rho_d / \rho_w$;

R ——最高运行温度下导体单位长度的交流电阻, Ω/m ;

ρ_d ——干燥土壤的热阻系数,K·m/W;

ρ_w ——潮湿土壤的热阻系数,K·m/W;

θ_x ——土壤临界温度和干燥与潮湿区域边界的温度,C;

θ_a ——环境温度,C;

$\Delta\theta_x$ ——土壤临界温升。即高于环境温度的干燥与潮湿区域边界的温升 $(\theta_x - \theta_a)$,K。

注2: T_1 应采用JB/T 10181.3—2000中2.2.3.2中潮湿土壤热阻系数(ρ_w)计算。相互间热影响不能用JB/T 10181.3—2000中2.2.3.1中的修正温升的方法。

$\Delta\theta_x$ 和 ρ_d 应由土壤状况方面的知识确定。

注3:适合的土壤参数在考虑之中,同时这些数值可由制造厂和用户协商确定。

1.4.2.2 5 kV 及以下直流电缆

直流电缆允许载流量从交流电缆公式简化得出:

$$I = \left\{ \frac{\Delta\theta + (\nu - 1)\Delta\theta_x}{R'(T_1 + nT_2 + n(T_3 + \nu T_4))} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中: R' ——最高工作温度下导体单位长度的直流电阻, Ω/m 。

1.4.3 避免土壤干燥场合下的埋地电缆

1.4.3.1 交流电缆

在限制电缆表面温升不大于 $\Delta\theta_s$ 以避免水分迁移的场合下,相应载流量由下式给出:

$$I = \left\{ \frac{\Delta\theta_s - nW_d T_1}{nRT_1(1 + \lambda_1 + \lambda_2)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

然而,依据 $\Delta\theta_s$ 确定的电流值可能导致导体温度超过最大允许值,因而载流量是从上述公式或者从1.4.1.1公式中取两者中较小的数值。

用适当的可以小于最大允许导体温度计算导体电阻 R ,可以估算运行温度,必要时可随后修改。

注:对于四芯低压电缆见1.4.1.1末。

1.4.3.2 5 kV 及以下直流电缆

直流电缆允许载流量从交流电缆公式简化得出:

$$I = \left\{ \frac{\Delta\theta_s}{nR'T_1} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

导体电阻应按1.4.2.2修正。

1.4.4 直接受日光照射的电缆

允许载流量

考虑到日光照射对电缆的影响,允许载流量的计算由下式给出:

1.4.4.1 交流电缆

$$I = \left\{ \frac{\Delta\theta - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4^*) - \sigma D_c^* \cdot H \cdot T_1]}{R[T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4^*)]} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

1.4.4.2 5 kV 及以下直流电缆

$$I = \left\{ \frac{\Delta\theta - \sigma D_c^* \cdot H \cdot T_1}{R' [T_1 + nT_2 + n(T_3 + T_4^*)]} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中: σ ——日光照射下电缆表面的吸收系数(见表4);

H ——日光辐射照度,对于大多数纬度取 $1000(\text{W}/\text{m}^2)$,当可能时推荐采用当地数值;

T_4^* ——考虑日光照射时空气中电缆外部热阻修正值(见JB/T 10181.2), $\text{K} \cdot \text{m}/\text{W}$;

D_c^* ——电缆外径,m;

对于皱纹金属套 $D_c^* = (d_{oc} + 2t_3) \times 10^{-3}$,m;

t_3 ——外护层厚度,mm。

2 损耗计算

2.1 导体交流电阻

导体在其最高工作温度下单位长度的交流电阻由下式给出,钢管电缆除外(见2.1.5):

$$R = R' (1 + Y_s + Y_p)$$

式中: R ——最高工作温度下导体的交流电阻, Ω/m ;

R' ——最高工作温度下导体的直流电阻, Ω/m ;

Y_s ——集肤效应因数;

Y_p ——邻近效应因数。

2.1.1 导体直流电阻

导体在其最高工作温度下单位长度直流电阻由下式给出:

$$R' = R_0 \times [1 + \alpha_p(\theta - 20)]$$

式中: R_0 ——20℃时导体的直流电阻, Ω/m ;

R_0 数值直接引自GB/T 3956。在GB/T 3956之外导体截面, R_0 值由制造厂和用户之间通过协商选

取。导体电阻值用表1中所给的相应的电阻率计算；

α_{20} ——20℃时材料恒定质量温度系数(见表1中标准值)；

θ ——以摄氏度为单位的最高工作温度(该值取决于所使用的绝缘材料类型),由相关的国家标准确定。

2.1.2 集肤效应因数 Y_s

集肤效应因数 Y_s 由下式给出：

$$Y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8X_s^4}$$

式中： $X_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} k_s$

f ——电源频率,Hz；

k_s 值表2中给出。

只要 X_s 不超过 2.8, 上述公式是准确的, 因而适合于大多数实际情况。

对于扇形和椭圆形导体, 在无其他替换公式时推荐上述公式。

2.1.3 对于两芯或两根单芯电缆的邻近效应因数 Y_p

邻近效应因数 Y_p 由下式给出：

$$Y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \times 2.9$$

式中： $X_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} k_p$

d_c ——导体直径,mm；

s ——各导体轴线之间距离,mm；

k_p 值表2给出。

只要 X_p 不超过 2.8, 上述公式是准确的, 因而适用于大多数实际情况。

2.1.4 对于三芯或三根单芯电缆的邻近效应因数 Y_p

2.1.4.1 圆形导体电缆

邻近效应因数由下式给出：

$$Y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \times \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1.18}{\frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} + 0.27} \right]$$

式中： $X_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} \times 10^{-7} k_p$

d_c ——导体直径,mm；

s ——各导体轴线之间距离,mm。

注：对于平面排列的电缆, s 为相邻相间距, 在相邻相间距不等的场合 $s = \sqrt{s_1 \times s_2}$

k_p 值表2给出。

只要 X_p 不超过 2.8, 上述公式是准确的, 因而适用于大多数实际情况。

2.1.4.2 型导体电缆

对型导体(如扇形等)多芯电缆情况下, Y_p 值为 2.1.4.1 中计算值的 2/3, 其中：

$d_c = d_x$ ；

d_x ——表示其截面和紧压程度均等同于圆导体的直径,mm；

$s = d_x + t$ ；

t ——导体之间绝缘厚度,mm；

k_p 值表2给出。

只要 X_p 不超过 2.8, 上述公式是准确的, 因而适用于大多数实际情况。

2.1.5 钢管电缆中集肤和邻近效应

对于钢管电缆集肤和邻近效应按 2.1.2, 2.1.3 和 2.1.4 计算后再乘以 1.7, 即:

$$R = R' [1 + 1.7(Y_s + Y_p)] \quad (\Omega/m)$$

2.2 介质损耗(仅适用于交流电缆)

介质损耗与电压有关, 因此在与所用的绝缘材料相关的一定电压等级下才显得重要。表 3 给出对于三芯屏蔽电缆和单芯电缆常用的绝缘材料介质损耗应予考虑的 U_0 值。对于非屏蔽多芯电缆或直流电缆不需要计算介质损耗。

每相中单位长度的介质损耗由下式给出:

$$W_d = \omega C \cdot U_0^2 \cdot \tan \delta \quad (\text{W/m})$$

式中: $\omega = 2\pi f$;

C ——单位长度电缆电容, F/m;

U_0 ——对地电压, V;

$\tan \delta$ 为工频和工作温度下绝缘损耗因数, 其值由表 3 中给出。

圆形导体电容由下式给出:

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln \frac{D_i}{d_c}} \times 10^{-9} \quad (\text{F/m})$$

式中: ϵ ——绝缘材料的相对介电常数;

D_i ——绝缘层直径(屏蔽层除外), mm;

d_c ——导体直径, 如果有屏蔽层, 则包括屏蔽层, mm。

椭圆形导体, 如果用长轴和短轴直径的几何平均值取代 D_i 和 d_c , 则可使用相同的公式。

ϵ 值在表 3 中给出。

2.3 金属套和屏蔽的损耗因数(仅适用于工频交流电缆)

金属套或屏蔽中的功率损耗 λ_1 包括环流损耗(λ_1')和涡流损耗(λ_1''), 因此:

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1''$$

本节所给的公式表示金属套或屏蔽损耗与导体总损耗的比率, 对每个特定情况必须考虑的损耗类型。单芯电缆公式仅适用于单回路并忽略了接地回路的影响。对于光滑金属套和皱纹金属套分别给出计算方法。

对于金属套两端互连的单芯电缆带电段只需考虑由金属套中环流引起的损耗(见 2.3.1, 2.3.2 和 2.3.3)。带电段定义为电缆线路的一部分, 其两端的所有电缆金属套或屏蔽均牢固互连。

通常允许线路中某些点之间增加间距(见 2.3.4)。

对大截面分割导体电缆, 由于计及金属套中涡流损耗, 则损耗因数应增加(见 2.3.4)。

对交叉互连, 假定各小段电气上完全相同因而金属套中由环流引起的损耗可忽略是不符合实际的。考虑此电气不平衡而引起金属套中损耗增加, 2.3.6 中推荐了计算方法。

表 1 给出计算金属套电阻 R_s 所用铅和铝的电阻率及温度系数。

2.3.1 两根单芯电缆和三根单芯电缆(三角形排列)带电段金属套两端互连

对两根单芯电缆和三根单芯电缆(呈三角形排列)金属套两端互连, 损耗因数由下式给出:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

式中: R_s ——在最高工作温度下电缆单位长度金属套或屏蔽的电阻, Ω/m ;

X ——电缆单位长度金属套或屏蔽电抗, Ω/m ;

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \quad (\Omega/\text{m});$$

$$\omega = 2\pi f \quad (1/\text{s});$$

s ——所考虑的带电段内各导体轴线之间的距离, mm;

d ——金属套平均直径, mm,

——对椭圆形线芯 $d = \sqrt{d_M \cdot d_m}$;

式中 d_M 和 d_m 分别为金属套的长轴和短轴直径。

——对皱纹金属套 $d = \frac{1}{2}(D_{\text{ex}} + D_{\text{in}})$ 。

$\lambda_1'' = 0$ 即涡流损耗忽略不计。对分割结构的大截面导体的电缆按 2.3.5 计算。

2.3.2 正常换位, 带电段金属套两端互连, 平面排列的三根单芯电缆

对于平面排列的三根单芯电缆, 中间一根电缆与两侧的电抗间距相等, 电缆正常换位且在第三个换位点金属套互连时, 损耗因数由下式给出:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_1}\right)^2}$$

式中: X_1 ——金属套单位长度电抗, Ω/m ;

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln\left\{2 \times \sqrt[3]{2} \left(\frac{s}{d}\right)\right\}.$$

$\lambda_1'' = 0$ 即涡流损耗忽略不计。除对分割结构的大截面导体的电缆按 2.3.5 计算。

2.3.3 平面排列, 不换位, 带电段金属套两端互连的三根单芯电缆

三根单芯电缆平面排列, 中间一根与两侧的电抗间距相等, 不换位, 金属套两端互连时最大损耗的那根电缆(即滞后相的外侧电缆)的损耗因数由下式给出:

$$\lambda_{11}' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0.75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s \cdot P \cdot Q \cdot X_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]$$

另一外侧电缆的损耗因数为:

$$\lambda_{12}' = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0.75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2R_s \cdot P \cdot Q \cdot X_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]$$

中间一根电缆的损耗因数为:

$$\lambda_{1m}' = \frac{R_s}{R} \times \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2}$$

式中: $P = X + X_m$

$$Q = X - \frac{X_m}{3}$$

其中: X ——对于两根相邻单芯电缆单位长度金属套或屏蔽的电抗, Ω/m ,

$$X = 2\omega 10^{-7} \ln\left(\frac{2s}{d}\right) (\Omega/\text{m});$$

X_m ——电缆平面排列时, 某一外侧电缆金属套与另外两根电缆导体之间单位长度电缆的互抗, Ω/m ,

$$X_m = 2\omega 10^{-7} \ln(2) (\Omega/\text{m}).$$

$\lambda_1'' = 0$, 即涡流损耗忽略。除大截面分割导体的电缆按 2.3.5 计算 λ_1'' 。

空气中敷设的电缆应按以上给出的第一个公式, 即滞后相的外侧电缆的损耗计算载流量。

2.3.4 金属套各互连点之间单芯电缆的间距不等

由于单芯电缆回路在金属套的两端牢固互连也可能在中间某些接点牢固互连引起的环流以及由此产生的损耗随着电缆间距增大而增加, 因而互连点间距尽量靠近是合适的。考虑电缆损耗和电缆相互热

影响以求得最佳间距值。

一般情况下沿整条线路按同一间距敷设电缆往往是不可能的。当整条带电段不可能按一个相同的间距敷设时,下面推荐一个有关金属套环流损耗的计算方法。线路段定义为所有电缆金属套都牢固互连的点之间的线路部分。下面推荐的方法给出适合于该段的损耗因数计算的量值,但应注意相应的导体电阻值和外部热阻值必须按照该段电缆间距最近处来计算。

a) 沿线路段的间距不是常数,但各间距值已知,则 2.3.1, 2.3.2 和 2.3.3 中 X 值由下式求得:

$$X = \frac{l_a \cdot X_a + l_b \cdot X_b + \dots + l_n \cdot X_n}{l_a + l_b + \dots + l_n}$$

式中: l_a, l_b, \dots, l_n ——沿着带电段各个不同间距的线段长度;

X_a, X_b, \dots, X_n ——电缆单位长度电抗,其相关计算公式见 2.3.1, 2.3.2 和 2.3.3,采用适用的间距值 S_a, S_b, \dots, S_n 。

b) 任何段的电缆之间间距及沿线路变化未知且不能预料,按设计所取间距计算该段的损耗,然后任意地增加 25%,实践证明该值对铅护套高压电缆是适合的。如果对特定的电缆线路认为增加 25% 不适合,可通过协商采取不同的增加值。

c) 在段的端部散开的情况下,按 b) 增加量可能不够时,推荐先估算一个可能的间距按 a) 方法计算损耗。

注:该增值不适合于单点互连或交叉互连的电缆线路(见 2.3.6)。

2.3.5 大截面分割导体效应

当导体邻近效应减小的场合下,诸如采用绝缘分割结构的大截面导体情况下,2.3.1, 2.3.2 和 2.3.3 中金属套损耗因数 λ_1'' 就不能忽略。对于相同的电缆敷设排列情况,按 2.3.6 求得的 λ_1'' 值,再乘以下式计算的 F 因数:

$$F = \frac{4M^2N^2 + (M+N)^2}{4(M^2+1)(N^2+1)}$$

式中: $M = N = \frac{R_s}{X}$ ——三角形排列的电缆;或

$$M = \frac{R_s}{X + X_m}$$
——等间距平面排列的电缆;

$$N = \frac{R_s}{X - X_m/3}$$
——等间距平面排列的电缆。

沿段的电缆间距不等时按 2.3.4a) 计算 X 值。

2.3.6 金属套单点互连或交叉互连的单芯电缆

2.3.6.1 涡流损耗

金属套单点互连或交叉互连的单芯电缆涡流损耗 λ_1'' 由下式给出:

$$\lambda_1'' = \frac{R_s}{R} \left[g_s \lambda_0 (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 \cdot t_s)^4}{12 \times 10^{12}} \right]$$

式中: $g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_s}\right)^{1.71} (\beta_1 \cdot D_s \cdot 10^{-3} - 1.6)$

$$\beta_1 = \left[\frac{4\pi\omega}{10^7 \rho_s} \right]^{1/2}$$

ρ_s ——工作温度下金属套材料的电阻率(见表 1), Ω/m ;

D_s ——电缆金属套外径, mm;

注:对于皱纹金属套电缆,使用平均外径: $\frac{1}{2}(D_{s1} + D_{s2}) + t_s$ 。

t_s ——金属套厚度, mm;

$\omega = 2\pi f$ 。

注：对于铅护套电缆， g_s 可取 1，而 $\frac{(\beta_s t_s)^4}{12 \times 10^{17}}$ 可忽略。

对于铝套电缆，当 $D_s > 70$ mm 或金属套厚度 t_s 大于常用厚度时，这两项都需要计算。
 λ_0 、 Δ_1 和 Δ_2 计算式如下：

(其中： $m = \frac{\omega}{R_s} \times 10^{-7}$ 当 $m \leq 0.1$ 时， Δ_1 和 Δ_2 可忽略不计)

1) 三根单芯电缆呈三角形排列：

$$\lambda_0 = 3 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = (1.14 m^{2.45} + 0.33) \left(\frac{d}{2s} \right)^{(0.92m+1.65)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

2) 三根单芯电缆平面排列：

a) 中间电缆：

$$\lambda_0 = 6 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = 0.86 m^{3.08} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1.4m+0.7)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

b) 越前相的外侧电缆：

$$\lambda_0 = 1.5 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = 4.7 m^{3.7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1.16m+2)}$$

$$\Delta_2 = 21 m^{3.3} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(1.4m+3.06)}$$

c) 滞后相的外侧电缆：

$$\lambda_0 = 1.5 \left(\frac{m^2}{1+m^2} \right) \left(\frac{d}{2s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = \frac{0.74(m+2)m^{3.7}}{2+(m-0.3)^2} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+1)}$$

$$\Delta_2 = 0.92 m^{3.7} \left(\frac{d}{2s} \right)^{(m+2)}$$

2.3.6.2 环流损耗

金属套单点互连或交叉互连且每个大段都分成电气上完全相同的三个小段场合下，单芯电缆环流损耗 $\lambda_1' = 0$ 。

在交叉互连线路所含各段的不平衡不能忽略的情况下，必须计及产生剩余电压而导致线路段环流损耗。

对于已知各小段实际长度的线路，损耗因数 λ_1' 计算按每大段两端互连接地而不交叉互连的情况下计算电缆在此排列条件下的环流损耗因数后再乘以下值：

$$\left[\frac{p+q+2}{p+q+1} \right]^2$$

式中：任何大段中两个较长的小段分别为最短小段长度的 p 和 q 倍数（即这个小段长度分别为 a 、 pa 和 qa ，其中 a 为最短段）。

此公式仅涉及到各小段的长度不等的情况。

任何间距的变化也必须考虑到。

在各小段长度未知的情况下,推荐按细致地敷设线路的经验取 λ_1' 值为:

对于直接敷设的电缆 $\lambda_1' = 0.03$

对于敷设在排管中的电缆 $\lambda_1' = 0.05$

2.3.7 统包金属套非铠装两芯电缆

对于具有统包金属套非铠装两芯电缆, λ_1' 忽略不计,损耗因数由以下一个公式给出:

——圆形或椭圆形导体:

$$\lambda_1'' = \frac{16\omega^2 \times 10^{-11}}{R \cdot R_s} \left(\frac{c}{d} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{c}{d} \right)^2 \right]$$

——扇形导体:

$$\lambda_1'' = \frac{10.8\omega^2 \times 10^{-16}}{R \cdot R_s} \left(\frac{1.48r_1 + t}{d} \right)^2 \left[12.2 - \left(\frac{1.48r_1 + t}{d} \right)^2 \right]$$

式中: $\omega = 2\pi f$

f ——频率(Hz)

c ——一根导体轴线和电缆轴线之间距离,mm;

r_1 ——两个扇形导体的外接圆半径,mm;

d ——金属套平均直径,mm。

——对椭圆形导体 $d = \sqrt{d_M \cdot d_m}$,式中 d_M, d_m 分别为椭圆的长轴和短轴平均直径。

——对于皱纹金属套 $d = \frac{1}{2}(D_w + D_u)$

2.3.8 统包金属套非铠装三芯电缆

具有统包金属套非铠装三芯电缆,环流损耗 λ_1' 忽略不计,损耗因数由下式给出:

——圆形或椭圆形导体,其中金属套电阻 $R_s \leq 100 \mu\Omega/m$ 时:

$$\lambda_1'' = \frac{3R_s}{R} \left[\left(\frac{2c}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega} \times 10^7 \right)^2} + \left(\frac{2c}{d} \right)^4 \frac{1}{1 + 4 \cdot \left(\frac{R_s}{\omega} \times 10^7 \right)^2} \right]$$

——圆形或椭圆形导体,其中金属套电阻 $R_s > 100 \mu\Omega/m$ 时:

$$\lambda_1'' = \frac{3.2\omega^2}{R \cdot R_s} \left(\frac{2c}{d} \right)^2 \times 10^{-14}$$

——扇形导体, R_s 为任意值:

$$\lambda_1'' = \frac{0.94R_s}{R} \left[\left(\frac{2r_1 + t}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{\omega} \times 10^7 \right)^2} \right]$$

式中: r_1 ——三根扇形导体的外接圆半径,mm;

t ——导体之间绝缘厚度,mm;

d ——金属套平均直径,mm。

——椭圆形线芯 $d = \sqrt{d_M \cdot d_m}$,式中 d_M 和 d_m 分别为金属套的长轴和短轴平均直径。

——皱纹金属套: $d = \frac{1}{2}(D_w + D_u)$ 。

2.3.9 两芯和三芯钢带铠装电缆

钢带铠装使金属套涡流损耗增加,因此,如果电缆有钢带铠装则对2.3.7和2.3.8中所给出的 λ_1'' 值乘以下面因数:

$$\left[1 + \left(\frac{d}{d_A} \right)^2 \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu\delta}} \right]^2$$

式中: d_A ——铠装平均直径,mm;

μ ——钢带相对导磁率(通常取300);

δ ——铠装等效厚度 $\frac{A}{\pi d_A}$, mm;

其中: A 为铠装横截面积, mm²。

该修正仅适用于钢带厚度为 0.3 mm~1.0 mm。

2.3.10 分相铅包(SL型)铠装电缆

对每个线芯有单独铅套的三芯电缆 $\lambda_1''=0$, 而金属套损耗因数由下式给出:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \cdot \frac{1.7}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

式中: $X = 2\omega 10^{-7} \ln(2S/d)$ (Ω/m);

S ——导体轴线间距, mm。

2.3.11 钢管电缆屏蔽和金属套中损耗

如果钢管电缆每根导体仅在绝缘外有屏蔽, 例如铅套或铜带, 屏蔽损耗对导体损耗的比率可用 2.3.1 中单芯电缆金属套的公式计算, 只要考虑因钢管存在而引起的附加损耗进行修正。

修正公式为:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \cdot \frac{1.7}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

如果每个线芯有隔膜套和非磁性加强层, 可使用同一公式, 但应以金属套和加强层的电阻取代 R_s , 直径 d 由 d' 值取代:

$$d' = \sqrt{\frac{d^2 + d_2^2}{2}}$$

式中: d' ——金属套和加强层平均直径, mm;

d ——屏蔽或金属套的平均直径, mm;

d_2 ——加强层的平均直径, mm。

对椭圆形线芯, d 和 d_2 采用 $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ 代之, 式中 d_M 和 d_m 分别为长轴和短轴的平均直径。

注: 见 2.4.2。

2.4 铠装、加强层和钢管的损耗因数(仅适用于工频交流电缆)

在本条计算公式中对于电缆的金属铠装、加强层或钢管中产生的功率损耗用所有导体功率损耗的增量 λ_2 表示。

铠装和加强层所用材料相应的电阻率和电阻温度系数表 1 中给出。

2.4.1 非磁性铠装或加强层

一般方法是把加强层的损耗和金属套损耗合并在一起计算。在 2.3 中给出公式, 用金属套和加强层的并联电阻代替单一金属套电阻 R_s 。用金属套和加强层直径的均方根值代替金属套的平均直径 d (见 2.3.11)。此方法适合于单芯、两芯和多芯电缆。

加强层的电阻取决于加强带的节距, 即:

a) 如果加强带节距很长(纵向加强带), 则其电阻值按与电缆单位长度加强层用量相等以及与加强带内径相同的等效圆柱体来计算。

b) 如果加强带电缆轴线约成 54°角绕包, 则其电阻值按 a) 项计算值的 2 倍计算。

c) 如果加强带绕包节距很短(径向加强带), 则认为其电阻值无限大, 损耗可忽略不计。

d) 如果有两层及以上的加强带相互接触, 节距很短, 则其电阻值是 a) 项计算值的 2 倍。

这些考虑也适用 2.3.11 处理的钢管型电缆的各绝缘线芯。

2.4.2 磁性铠装和加强层

2.4.2.1 单芯铅护套电缆—钢丝铠装, 金属套两端互连。

该方法用于电缆间距很大(即:10 m 及以上)的敷设场合。金属套和铠装损耗的合并值通常比实际值大得多,因而载流量偏于安全。IEC 正在考虑更精确和更通用的计算方法。

下述方法没有考虑周围介质的可能影响,特别在电缆水底敷设情况下影响明显。

金属套和铠装两端连接在一起的钢丝铠装单芯电缆的铅套和铠装的损耗计算如下:

a) 金属套和铠装并联的等效电阻由下式给出:

$$R_s = \frac{R_s \cdot R_A}{R_s + R_A} (\Omega/m)$$

式中: R_s —— 最高工作温度下电缆单位长度金属套电阻, Ω/m ;

R_A —— 最高工作温度下电缆单位长度铠装交流电阻, Ω/m 。

钢丝铠装交流电阻变化范围从 2 mm 直径钢丝的直流电阻的 1.2 倍到 5 mm 直径钢丝直流电阻的 1.4 倍,该电阻值对最后结果影响不大。

b) 每相回路各元件的电感计算如下:

$$H_s = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{2S_2}{d} \right) (\Omega/m)$$

式中: H_s —— 金属套的电感, H/m。

$$H_1 = \pi \mu_c \left(\frac{n_1 d_i^2}{\rho d_A} \right) \times 10^{-6} \sin \beta \cos \gamma$$

$$H_2 = \pi \mu_c \left(\frac{n_1 d_i^2}{\rho d_A} \right) \times 10^{-6} \sin \beta \sin \gamma$$

$$H_3 = 0.4 (\mu_t - 1) \left(\frac{d_i}{d_A} \right) \times 10^{-6} \cos^2 \beta$$

式中: H_1 、 H_2 和 H_3 —— 钢丝的电感分量, H/m;

S_2 —— 三角形排列的相邻电缆轴线间距;平面排列的三个间距的几何平均值, mm;

d_A —— 铠装平均直径, mm;

d_i —— 钢丝直径, mm;

ρ —— 沿着电缆的钢丝节距, mm;

n_1 —— 钢丝根数;

β —— 铠装钢丝轴线与电缆轴线之间夹角;

γ —— 钢丝纵向磁通滞后与磁场强度的角度;

μ_c —— 钢丝纵向相对导磁率;

μ_t —— 钢丝横向相对导磁率。

对于 γ 、 μ_c 和 μ_t 见 d) 项。

令:

$$B_1 = \omega (H_s + H_1 + H_3) (\Omega/m)$$

$$B_2 = \omega H_2 (\Omega/m)$$

c) 金属套和铠装总损耗 $W_{(s+A)}$ 由下式给出:

$$W_{(s+A)} = I^2 R_e \cdot \frac{B_2^2 + B_1^2 - R_e B_2}{(R_e + B_2)^2 + B_1^2} \text{ (W/m)}$$

可假设金属套与铠装的损耗近似相等,因此:

$$\lambda' = \lambda_2 = \frac{W_{(s+A)}}{2W_c}$$

式中: $W_c = I^2 R$ 导体损耗, W/m。

d) 关于磁性 γ 、 μ_c 和 μ_i 的选取

这些参数值随着钢丝试样而变化,除非对所使用钢丝进行测量,否则必须假设一些平均值。直径为 4 mm~6 mm,抗拉强度约 400 N/mm² 的钢丝,假设下面的数据,不会有明显的误差:

$$\mu_c = 400$$

$$\mu_i = 10 \text{ 钢丝相互接触}$$

$$\mu_i = 1 \text{ 钢丝相互有间距}$$

$$\gamma = 45^\circ$$

如果需要更精确的计算且已知钢丝特性时,首先要知道磁场强度的近似值,以求取相应的磁性能。

$$H = \frac{1000 \cdot |\bar{I} + \bar{I}_s|}{\pi d_A} \text{ (安匝/m)}$$

式中: \bar{I} 和 \bar{I}_s 为导体电流和金属套电流的矢量值。假定 $|\bar{I} + \bar{I}_s| = 0.6I$ 作为初选值通常可满足要求,如果证明该计算值有很大差异应重新计算。

2.4.2.2 两芯电缆—钢丝铠装

$$\lambda_2 = \frac{0.62\omega^2 10^{-11}}{R \cdot R_A} + \frac{3.82A\omega 10^{-9}}{R} \left[\frac{1.48r_1 + t}{d_A^2 + 95.7A} \right]^2$$

式中: R_A ——最高铠装温度下铠装的交流电阻, Ω /m;

d_A ——铠装平均直径, mm;

A ——铠装的横截面积, mm²;

r_1 ——外切于各导体的外接圆半径, mm;

t ——导体之间的绝缘厚度, mm。

由于认为导体 400 mm² 及以下各导体电流分布不均匀性可予以忽略不计,故不必对其修正。

2.4.2.3 三芯电缆—钢丝铠装

2.4.2.3.1 圆形导体电缆

$$\lambda_2 = 1.23 \times \frac{R_A}{R} \left(\frac{2c}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left[\frac{2.77R_A 10^6}{\omega} \right]^2 + 1}$$

式中: R_A ——最高铠装工作温度下铠装的交流电阻, Ω /m;

d_A ——铠装平均直径, mm;

c ——导体轴线与电缆轴心之间距, mm。

由于认为导体 400 mm² 及以下各导体电流分布不均匀性可予以忽略不计,故不必对其修正。

2.4.2.3.2 SL 型电缆

SL 型电缆外有铠装的情况下,铅套电流的屏蔽作用使铠装损耗降低,上述的 λ_2 公式应乘以因数 $(1 - \lambda_1')$, λ_1' 从 2.3.1 求得。

2.4.2.3.3 扇形导体电缆

$$\lambda_2 = 0.358 \times \frac{R_A}{R} \left(\frac{2r_1}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left[\frac{2.77R_A 10^6}{\omega} \right]^2 + 1}$$

式中: r_1 ——三根型导体的外接圆半径, mm;

$$\omega = 2\pi f;$$

f ——电源频率, Hz。

2.4.2.4 三芯电缆 钢带铠装或加强层

下述公式适合于钢带厚度 0.3 mm~1.0 mm。

对于 50 Hz 时的磁滞损耗由下式给出:

$$\lambda_2' = \frac{s^2 K^2 10^{-7}}{R d_A \delta}$$

式中: s ——各导体轴线之间距离, mm;

δ ——铠装等效厚度 $= \frac{A}{\pi d_A}$, mm;

A ——铠装横截面积, mm²;

d_A ——铠装平均直径, mm;

K ——系数由下式给出:

$$K = \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu \delta}}$$

μ ——钢带相对导磁率, 通常取 300。

对于非 50 Hz 的频率, 上式求得的 k 值应乘以系数 $(f/50)$;

对于 50 Hz 频率时的涡流损耗由下式给出:

$$\lambda_2'' = \frac{2.25 S^2 K^2 \delta 10^{-8}}{R d_A}$$

对于非 50 Hz 的频率, 上式应乘以系数 $(f/50)^2$ 。

总铠装损耗为磁滞损耗和涡流损耗之和:

$$\lambda_2 = \lambda_2' + \lambda_2''$$

注: 若有磁性钢带或加强层, 金属套中涡流损耗就增加, 参照 2.3.9 处理。

2.4.3 钢管损耗

由两个经验公式给出钢管损耗, 其一适合于电缆线芯连接成紧靠三角形, 另一个公式适合于电缆线芯松开(摇篮形状)置于钢管内底部情况。实际线芯放置可能近于两者之间。因此应对每种结构形状进行损耗计算, 然后取其平均值。

注: 这些公式是美国的经验而得, 目前仅适用于该国的钢管类型和规格。

$$\lambda_2 = \left(\frac{0.0115S - 0.001485d_d}{R} \right) \times 10^{-5} \quad \text{——适用于紧靠三角形连接形状}$$

$$\lambda_2 = \left(\frac{0.00438S - 0.00226d_d}{R} \right) \times 10^{-5} \quad \text{——适用于摇篮形状}$$

式中: S ——相邻导体轴线间距, mm;

d_d ——钢管内径, mm;

R ——最高工作温度下导体单位长度的交流电阻, Ω/m 。

所示公式适用于频率 60 Hz。对于 50 Hz 上述各公式应乘以 0.76。

对钢管电缆, 在所有三个线芯成缆后再绕包扁钢丝铠装情况下, 其损耗与钢管的存在无关。对于这些电缆铠装损耗按 SI 型电缆计算(见 2.4.2.3.2, 而钢管损耗忽略不计)。

表1 所用金属电阻率和温度系数

材 料	电阻率 ρ $\Omega \cdot m(20^\circ C)$	温度系数 α_{20} 1/K(20 $^\circ C$)
导体		
铜	1.7241×10^{-8}	3.93×10^{-3}
铝	2.8264×10^{-8}	4.03×10^{-3}
金属套和铠装		
铅和合金铅	21.4×10^{-8}	4.0×10^{-3}
钢	13.8×10^{-8}	4.5×10^{-3}
青铜	3.5×10^{-8}	3.0×10^{-3}
不锈钢	70.0×10^{-8}	忽略
铝	2.84×10^{-8}	4.03×10^{-3}
铜导体值按 IEC 60028; 铝导体值按 GB/T 17048。		

表2 集肤和邻近效应对 k_s 和 k_p 系数的实验值
(铝导体的相应数值在考虑中)

导体类型	干燥和浸渍	k_s	k_p
圆绞线	是	1	0.8
圆绞线	否	1	1
紧压圆绞线	是	1	0.8
紧压圆绞线	否	1	1
分割圆线 ¹⁾	—	0.435	0.37
空心,螺旋形绞线	是	—	0.8
扇形型线	是	1	0.8
扇形型线	否	1	1
<p>1) 所给的数值适用于1500 m² 及以下四分割导体(无论是否有中心油道)。这些数据适用于各层单线相同绞向的导体。暂时采用这些数值,专题在考虑中。</p> <p>2) k_s 值由下式表示:</p> $k_s = \frac{d'_c - d_i}{d'_c + d_i} \left(\frac{d'_c - 2d_i}{d'_c + d_i} \right)$ <p>式中: d_i——导体内径(中心油道),mm; d'_c——具有相同中心油道的等效实心导体外径,mm。</p> <p>注:虽然目前尚无特定适用于对绞合铝导体的实验结果,建议对同心绞合的铝导体采用相似的绞合铜导体的系数和方法。误差偏于安全。</p>			

表3 工频下中压和高压电缆绝缘材料相对介电系数和损耗因数

电缆类型	ϵ	$\text{tg}\delta^{11}$
浸渍纸绝缘电缆		
粘性浸渍型、充分浸渍、预浸渍或整体浸渍		
不滴流	4	0.01

表 3(完)

电缆类型	ϵ	$\text{tg}\delta^{(1)}$
自容式充油 ²⁾ $U_0 \leq 36 \text{ kV}$	3.6	0.003 5
$U_0 \leq 87 \text{ kV}$	3.6	0.003 3
$U_0 \leq 160 \text{ kV}$	3.5	0.003 0
$U_0 \leq 220 \text{ kV}$	3.5	0.002 8
钢管、油压型 ³⁾	3.7	0.004 5
外部压气 ⁴⁾	3.6	0.004 0
内部压气 ⁵⁾	3.4	0.004 5
其他类型绝缘电缆 ⁶⁾		
丁基橡胶	4	0.050
乙丙橡胶 18/30(36)kV 及以下电缆	3	0.020
大于 18/30(36)kV 的电缆	3	0.005
聚氯乙烯	8	0.10
高密度和低密度聚乙烯	2.3	0.001
交联聚乙烯		
18/30(36)kV 及以下电缆(无填充料)	2.5	0.004
大于 18/30(36)kV 电缆(无填充料)	2.5	0.001
大于 18/30(36)kV 电缆(含填充料)	3.0	0.005

- 1) 最高允许温度下安全值,适用于各种类型电缆通常所规定的最高电压。
 2) 见 IEC 60141-1;
 3) 见 IEC 60141-4;
 4) 见 IEC 60141-3;
 5) 见 IEC 60141-2;
 6) 见 IEC 60502;

U_0 等于或大于下列值时,应该计及介质损耗:

电缆类型	U_0 KV
浸渍纸绝缘电缆	
粘性浸渍	36
充油和压气	64
其他类型绝缘电缆	
丁基橡胶	18
乙丙橡胶	64
聚氯乙烯	6
(高密度、低密度)聚乙烯	127
交联聚乙烯(无填充料)	127
交联聚乙烯(含填充料)	64

采用说明:

1) U_0 值与 JB/T 8996 相一致。

表 4 日光照射下电缆表面吸收系数

材 料	σ
沥青/黄麻护层	0.8
氯丁橡胶	0.8
聚氯乙烯	0.6
聚乙烯	0.4
铅	0.6