

屏蔽电缆在LNG液化厂中的应用研究

在LNG液化厂中，通常会有混合冷剂压缩机（以下简称“MRC压缩机”）电动机和闪蒸气压缩机（以下简称“BOG压缩机”）采用变频调速驱动，因此这些电动机及变频系统内的电缆需要采取屏蔽措施。以处理量为 $200 \times 10^4 \text{ S m}^3/\text{d}$ （ 20°C 、 101.325 kPa ）规模的内蒙天然气液化厂为例，介绍其中变频驱动系统内屏蔽电缆的选择要求，以及需要注意的事项，尤其是采用德国林德技术的相关要求。

刘艳峰/中国石油集团工程设计有限责任公司华北分公司

0 引言

随着频率制传动技术的发展，对频率变速传动系统的要求越来越高，尤其是对采用快速切换的IGBT、IGCT等半导体现代变频技术，尽管脉冲频率高或更断时间仅毫秒内，但还是对周围环境产生了影响。为保持变频器正常工作不受电磁干扰，连接变频器与三相交流电动机之间的电缆就要具有抗干扰性能高、较低的有效电容及较低的传输阻抗。本文通过介绍项目中使用的变频器系统对电缆屏蔽层的要求，展开对屏蔽电缆的介绍。



刘艳峰/工程师

关键词/Keywords

LNG ·
压缩机 ·
变频调速 ·
屏蔽电缆 ·

1 变频驱动系统介绍

本工程中选用的两套变频驱动系统的具体数据参数分别如表1~表3所示。

2 电缆屏蔽规定

2.1 国标规定

GB/T 12706.2—2008《额定电压6 kV（ $U_m = 7.2 \text{ kV}$ ）到30 kV（ $U_m = 36 \text{ kV}$ ）电缆》和IEC 60502—2—2005《Cables for Rated Voltages From 6 kV（ $U_m = 7.2 \text{ kV}$ ）up to 30 kV（ $U_m = 36 \text{ kV}$ ）》大致内容相当，因此只介绍国标部分相关章节。

（1）金属屏蔽结构

金属屏蔽应由一根或多根金属带、金属编织及金属丝的同心层或金属丝与金属带的组合结构组成。金属屏蔽可以是金属套或是在统包屏蔽情况下符合下述要求的铠装。选择金属屏蔽材料时，应特别考虑存在腐蚀的可能性，这不仅为了机械安全，而且也为了电气安全。

表1 隔离变压器数据表

序号	变频变压器名称	供电电压/kV	输出电压/V	频率/Hz	额定功率/kV·A
1	MRC变频隔离变压器	10	$2 \times 3 \times 1\,920$	50	$32\,628/6 \times 5\,438$
2	BOG变频隔离变压器	10	2×725	50	$10/2 \times 625$

表2 变频器数据表

序号	变频器名称	供电电压/V	输出电压/kV	频率/Hz	连续输出功率	连续输出电流/A
1	MRC电动机变频器	$2 \times 3 \times 1\,920$	6.9	50	$29\,005/\text{kV} \cdot \text{A}$	2\,427
2	BOG电动机变频器	2×725	0.69	50	1\,100/kW	1\,258

表3 电动机数据表

序号	电机名称	类型	电压/kV	频率/Hz	额定功率/kW	额定电流/A
1	MRC压缩机电动机	同步电动机	6.9	60	28\,425	2\,414
2	BOG压缩机电动机	异步电动机	0.6	50	900	1\,076

金属屏蔽包的搭盖和间隙应符合下述要求。

(2) 金属屏蔽要求

1) 金属屏蔽中铜丝的电阻,使用时应符合GB/T 3956—2008 测试要求的电阻值。

2) 铜丝屏蔽由疏绕的软铜线组成,其表面应用反向绕包的铜丝或铜带扎紧,相邻铜丝的平均间隙应不大于4 mm。

3) 铜带屏蔽由一层重叠绕包的软铜带组成,也可采用双层软铜带间隙绕包。铜带间的平均搭盖率应不小于15% (标称值),其最小搭盖率应不小于5%。铜带标称厚度为:单芯电缆 ≥ 0.12 mm;三芯电缆 ≥ 0.10 mm。

(3) 金属屏蔽横截面积的计算

1) 金属带屏蔽截面积计算公式为

$$\text{截面积} = n_l t_l w_l \quad (1)$$

式中, n_l 为金属带根数; t_l 为单根金属带的标称厚度,mm; w_l 为单根金属带的标称宽度,mm。

当屏蔽总厚度小于0.15 mm时,直径增加值为零;一层金属带重叠绕包屏蔽或两层金属带搭盖绕包屏蔽,屏蔽总厚度为金属带厚度的两倍;金属带纵包屏蔽;如果搭盖率小于30%,屏蔽总厚度为金属带的厚度;如果搭盖率达到或超过30%,屏蔽总厚度为金属带厚度的两倍。

举例计算,屏蔽截面积只与金属带厚度和宽度有关,与电缆外径无关,以6/6 kV—1×25 mm²和26/35 kV—1×400 mm²为例,绝缘屏蔽层的计算外径分别为16.2 mm和48 mm,若均用厚度0.12 mm和宽度35 mm的铜带,则其屏蔽截面积的计算值相同,均为42 mm²,尽管后者的铜带用量为前者的近三倍。由此可见,IEC 600949计算方法其安全预度是较充分的。

2) 金属丝屏蔽 (包括一反向扎线,若存在) 截面积计算公式为

$$\text{截面积} = \frac{n_w d_w^2 \pi}{4} + n_h t_h w_h \quad (2)$$

式中, n_w 为金属丝根数; d_w 为单根金属丝的直径,mm; n_h 为反向扎带根数; t_h 为厚度大于0.3 mm的反向扎带的厚度,mm; w_h 为反向扎带的宽度,mm。

2.2 林德及ABB规定

(1) MRC压缩机电动机变频驱动系统电缆

1) 电动机、变压器二次侧以及变频器电缆规定,分别如表4、表5所示。

表4 电动机和变压器二次侧电缆规定

项目	参数、描述
整流形式	36脉冲二极管整流
额定电压 U_i /V	1 920
电缆绝缘/kV	6/10, 推荐12/20
最大电缆长度 $l_{\max}$ /m	500 (根据电缆参数)
最大电缆并联数量	2 (600 mmTEU)、5 (1 000 mmTEU)
降额因数(%)	15

表5 变频器电缆规定

项目	参数、描述
逆变器类型	9电平电压源型逆变器
额定电压 U_i /V	6 900
最大电压变化率 $du/dt_{\max}$ (kV/ μ s)	<1.5
电缆绝缘等级/kV	6/10, 推荐12/20
最大电缆长度 $l_{\max}$ /m	500 (根据电缆参数)
最大电缆并联数量	4 (单逆变器), 2 (双逆变器)
降额因数(%)	5

2) 用户提供的电缆需具有以下特性。必须是屏蔽电缆。屏蔽层可以有效减小和限制电磁辐射(EMC要求)、接地电阻、共模电流和接触保护。如果电缆长度较短(小于50 m),可以采用铜箔屏蔽电缆,对于长电缆,铜丝屏蔽是必须的。具有独立导体屏蔽的三芯电缆是首选解决方案。可以采用单芯电缆且需按三角型排列安装。当由于客户或特殊安装原因需要时,应有镀锌铠装层,不是变频器操作的要求。为了减少电缆导体直径,推荐使用铜导体(减小弯曲半径)。如果使用铝电缆,特殊外护层必须应用(如标准铜电缆终端安装在终端单元COU/TEU)。电缆截面积的选择应该考虑减少并行电缆根数。最终的电缆技术规范还必须考虑安装方法、电缆长度引起的电压降、相邻电缆的发热、导体允许最高温度及当地环境温度等。一般来说,还应遵从电缆制造商的技术规范。为防止由于电位差引起的屏蔽层过负荷,动力电缆中必须有额外的接地电缆。接地电缆的横截面积至少为动力电缆单相横截面积的1/2。

3) 绝缘要求。由于ACS 5000变频器的拓扑结构和工作原理决定, 电缆必须承受的特殊电压波形包括共模电压, 快速的 du/dt 的影响。因此, ACS 5000变频使用电缆的绝缘要比正弦波电源更强。最小绝缘水平是6/10 kV电缆, 该电缆没有大幅度的绝缘。建议使用12/20 kV电缆, 因其有较长的寿命和较低的对地寄生电容。

(2) BOG压缩机电动机变频驱动系统电缆

1) 一般规定。系统电源输入电缆和电动机电缆的尺寸需要满足以下规定: 电缆必须满足驱动系统的负荷电流; 电缆必须为至少70℃最大允许温度连续使用的导体; PE导线/电缆(接地线)电感和阻抗必须根据允许的接触电压出现故障条件下的额定(接地故障发生时, 也不会使故障点电压升得过高); 600 V电缆最高允许被接500 V系统。对于额定电压为690 V的设备, 电缆的导体之间的额定电压最小应为1 kV; 驱动框架尺寸 R_5 及以上, 或大于30 kW的电动机, 必须使用对称的屏蔽电动机电缆, 一四导体系统可用于驱动框架尺寸 R_4 及以上, 或最大30 kW的电动机, 但建议采用屏蔽对称电缆。

2) 电缆类型选择。可用于驱动系统的电力电缆的类型代表如下: ①被推荐的电缆类型为对称的屏蔽电缆, 三相导体同轴对称, 另外PE导体同轴对称, 并有屏蔽层, 如图1所示; ②如果电缆屏蔽层的电导率小于50%相导体的电导率, 则需要一个单独的PE导体, 如图2所示; ③不允许采用的电动机电缆为一四导体系统。三相导体与保护导体, 如图3所示。

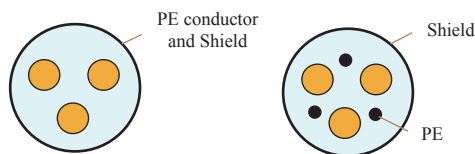


图1 对称的屏蔽电缆

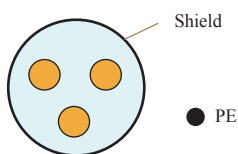


图2 单独PE导体电缆

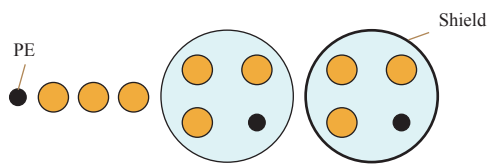


图3 一四导体系统

3 电缆屏蔽示意图

3.1 铜丝屏蔽电缆示意图

铜丝屏蔽电缆示意图如图4所示。

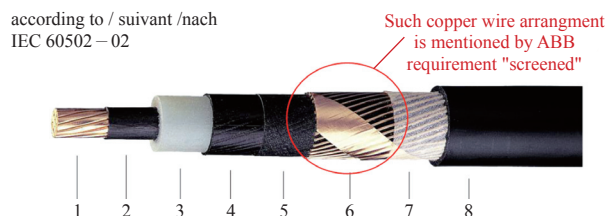


图4 铜丝屏蔽电缆示意图

1—铜导体 2—内部半导体层 3—XLPE绝缘层 4—外部半导体层
5—半导体膨胀包带 6—铜丝屏蔽 7—膨胀包带 8—聚乙烯护套

以上铜丝屏蔽结构中, 其挤出半导体外屏蔽层的厚度应适当加厚, 或在挤出半导体外屏蔽层后绕包1~2层半导体包带, 因铜丝很容易勒进外屏蔽, 严重时损伤到绝缘, 导致电缆击穿。像美国AEICCS 8标准所述, 铜丝屏蔽下挤出的半导体外屏蔽层最薄点允许厚度要比铜带的情况大25%以上; 还有, 如AS 1429规定, 铜丝屏蔽下挤出的半导体外屏蔽层厚度若为1.0 mm, 可用0.8 mm挤出厚度再加上0.2 mm包带厚度代替, 1.2 mm可用0.8 mm挤出厚度再加上0.4 mm包带厚度代替。还有诸如ABB公司等制造商的中压铜丝屏蔽交联电缆, 均在挤出半导体外屏蔽层后绕包了半导体包带。

3.2 变频专用电缆

变频专用电缆示意图如图5所示。

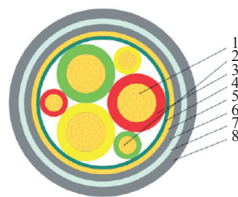


图5 变频专用电缆示意图

1—主导体 2—副导体 3—交联聚乙烯绝缘 4—包带 5—屏蔽
6—内护套 7—铠装 8—外护套

完全对称的三芯设计，具有更好的电磁兼容性，比四芯电缆有更好的性能，三根耐候耐温树脂绝缘线芯在缝隙处均匀等距绞合，形成一种真正的同心结构。

4 屏蔽电缆的选择

4.1 变频专用屏蔽电缆的特点

具有较低的有效电容；具有屏蔽性能，高密度编制屏蔽及复合屏蔽设计使电缆具有良好的抗电磁干扰、电磁辐射的性能，有利于新型短路自动保护设备的应用；较低且均匀的正（逆）序和零序阻抗，与普通四芯电缆相比，极大地改善了

供电品质；传输阻抗 R_x 是对屏蔽抗感应和电容耦合的有效量度，低传输阻抗可提供良好的电磁相容性；彻底屏蔽高次谐波电流分量对其他控制电路的干扰；屏蔽层的截面设计达到一定比例，可用作PE接地线芯；金属屏蔽层可以将电缆通电时产生的电磁场屏蔽在绝缘线芯内，减少对外界产生电磁干扰；金属屏蔽层可以将系统产生的设计范围内的故障电流安全引入接地系统，保护系统安全运行。

4.2 变频器系统电缆选择

变频器系统的屏蔽电缆列表如表6所示。

表6 屏蔽电缆列表

电缆位置	电缆型号	屏蔽类型	导线截面积 /mm ²	屏蔽层 截面积	电缆根数	铠装	总屏蔽横截面积 /mm ²
MRC压缩机电动机变频驱动系统							
变电站——MRC变频 隔离变压器一次侧	YJSV-6/10 1×300/25	铜丝屏蔽	300	25	每相4根，共计12根	无	12×25=300
隔离变压器二次 侧——MRC变频器	YJSV-6/10 1×300/25	铜丝屏蔽	300	25	每相4根，共计72根	无	72×25=1 800
MRC变频器——电动机	ZA-YJSV-6/10 1×300/25	铜丝屏蔽	300	25	每相6根，共计18根	无	18×25=450
电缆位置	电缆型号	屏蔽类型	导线截面积 /mm ²	PE导体 截面积	电缆根数	铠装	总屏蔽横截面积 /mm ²
BOG压缩机电动机变频驱动系统							
变电站——BOG变频 隔离变压器一次侧	YJV-8.7/10 3×95	无	95	无	单根	无	无
隔离变压器二次 侧——BOG变频器	BPYJVP2-0.6/1 3×185+3×35	铜带屏蔽	185	35	4根	无	3×35×4=420
BOG变频器——电动机	BPYJVP2-22-0.6/1 3×185+3×35	铜带屏蔽	185	35	5根	钢带	3×35×5=525

5 结束语

主要介绍了两种屏蔽电缆的选择及其注意事项，针对项目需求，咨询了多家电缆厂商，目前国内基本没有使用该电缆的项目，此种电缆的使用在欧洲较为流行，因此专门设计出了铜带屏蔽电缆的型号及其更为具体的参数；对于变频专用电缆，目前国内使用较多。

参考文献

[1] GB/T 12706.2—2008 额定电压1 kV ($U_m=1.2$ kV)

到35 kV ($U_m=40.5$ kV) 挤包绝缘电力电缆及附件 第2部分：额定电压6 kV ($U_m=7.2$ kV) 到30 kV ($U_m=36$ kV) 电缆 [S]. 北京：中国标准出版社，2008.

[2] IEC 60502-2 2005 Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m=7.2$ kV) up to 30 kV ($U_m=36$ kV) [S].

[3] 朱欣娣，武宇波，魏莹莹. 中压交联电缆金属屏蔽层的几个关键问题的讨论 [J]. 电线电缆，2009 (4)：11-13.

(收稿日期：2017-10-10) EA