大功率变频器及整流移相变压器过电压类别研究

周 宁

（中国石化工程建设有限公司，北京 100101）

摘要：大功率变频器通常指 10 000 kW 以上的变频调速系统，目前在石化行业尤其是液化天然气项目中应用较多。通过对大功率变频器及整流移相变压器过电压类别的研究，将变频器功率单元的过电压降低，满足技术和制造标准。

关键词：大功率变频器；整流移相变压器；过电压；类别

Research on overvoltage category of high power inverter and rectifier phase-shifting transformer

ZHOU Ning

(Sinopec Engineering Incorporation，Beijing 100101，China)

Abstract: High power frequency converter usually refers to the frequency conversion speed regulation system of more than 10 000 kW, which is widely used in petrochemical industry, especially in liquefied natural gas project. Through the research on the overvoltage category of high-power inverter and rectifier phase-shifting transformer, the overvoltage of converter power unit is reduced to meet the technical and manufacturing standards.

Key words: high power frequency converter; rectifier phase-shifting transformer; overvoltage; category

0 引言

大功率变频器一般认为是 10 000 kW 以上的系统，目前在石化行业尤其是液化天然气项目中应用较多，由于液化气体所需的冷剂压缩机要求具有较大的操作弹性，因此工艺专业一般都提出调速的要求。目前电压源型变频器应用最为广泛，本文只讨论电压源型。由于科技的不断进步，功率单元已逐步用 IGBT 等全控元件取代了原来的晶闸管，功率单元根据其工作和耐受电压的高低，有低压型和高压型两种。IGBT 既有低压型，也有高压型元件，而高压型元件还有 IGCT 和 IEGT，其代表厂商分别是 ABB 和 TEMIC。

1 大功率变频器的结构

大容量电动机的额定电压一般为 6 kV /10 kV，超过 10 000 kW 的电动机都采用 10 kV 作为额定电压。下面分不同结构进行说明。

1.1 低压串联型

图 1 为典型的低压串联型拓扑方案，顾名思义，采用的是低压型功率单元，如 1 700 V-IGBT 元件，电网电压经过干式移相变压器和二次若干组延边移相绕组，将一次电压转换为不同相角的二次低压，每组二次绕组经过单独的整流-直流-逆变单元，输出一个单相低电压，若干个单相低电压叠加组成高压，这样的高压共有三组，每组相角差 120°，就形成了基本的交流三相对称电源，

为电动机提供电源。综上所述，要想达到输出10 kV的线电压或6 kV的相电压，理论上，虽然低压功率单元工作电压比较低，但只要数量足够的功率单元串联起来，就可达到任何需要的电压。而10 kV、15 000 kW电动机则每相需要8~9个功率单元的串联。

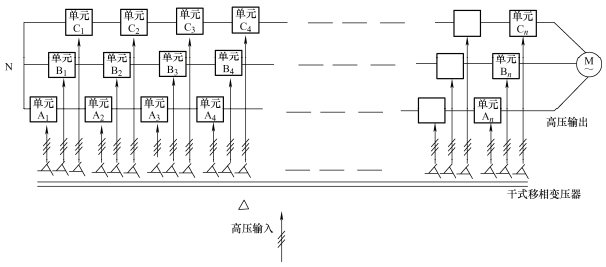

图1 典型低压串联型拓扑方案

Fig. 1 Typical diagram of low voltage seriese

1.2 高压串联型

图2为典型高压串联型拓扑方案，其与低压型的区别就是由于功率单元的工作和耐受电压提高了，串联数量可以减少，如10 kV、15 000 kW的电动机每相只需4个功率单元。

串联功率单元的数量可以说优缺点并存，不能对数量多好还是少好简单地下结论。

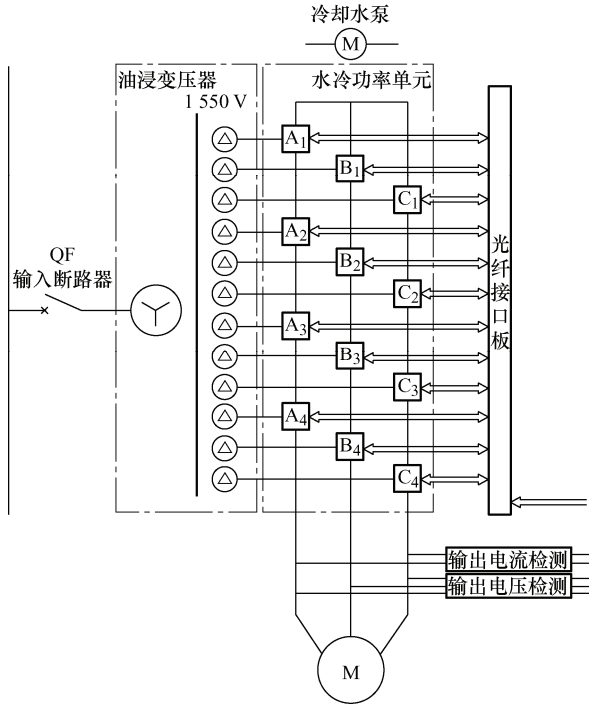

图2 典型高压串联型拓扑方案

Fig. 2 Typical diagram 2 of high voltage seriese

1.3 高压串并联型

图3为典型的高压串并联5电平结构，其左侧是移相变压器的输出，共输出6个绕组，中间是整流-直流-逆变的环节，其电压主要取决于直流环节的电容器，通过控制功率单元的导通关断可以产生出多种电平电压，叠加后形成近似正弦的波形。高压串并联型和前两种串联原理不同，电压电平的形成靠的是更加复杂的控制环节。如果再增加电容器和功率单元的数量，还可以形成相电压9电平、线电压17电平的拓扑结构。

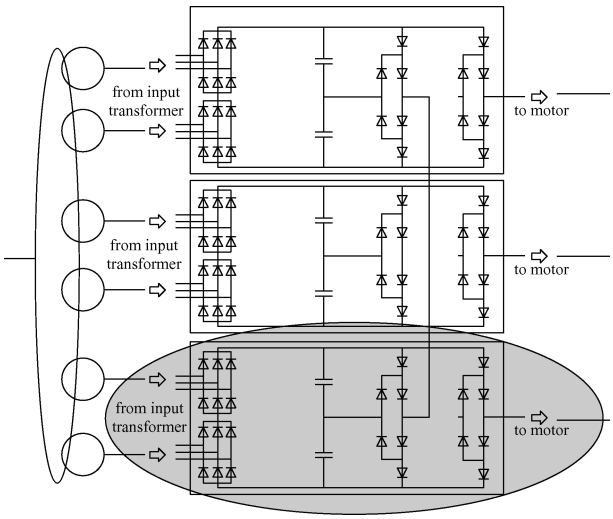

图3 典型高压串并联5电平结构

Fig. 3 Typical high voltage series parallel 5-level structure

上述三种典型的拓扑结构代表了绝大多数市场上的大功率变频器方案，对应的厂商就不一一赘述了，究竟哪种方案更好，还需要根据实际需要来选择。电平数量越多，则意味着输出电压波形越平滑，谐波含量越低。低压串联型理论上说，电压电平数量最多，尤其是输出电压越高，则电平数量越多。但功率单元数量的增加，会带来可靠性的降低。高压串联型元件数量大幅减少，可靠性大大提高，但输出的电压波形不如低压串联型平滑，谐波含量相对较高。对电缆线路、电动机的绝缘要求更高。而高压串并联型的功率单元数量随电平增加而增加，电平越高，单元数量越多，同时还必须配置钳位二极管。该钳位二极管跨接在电容和开关类功率器件之间，导致电气结构复杂。

因此三种方案各有优缺点，不能简单进行判

断孰高孰低。需要从多方面综合评定，来确定最适合的方案。

2 变频器的过电压类别

根据 GB/T 12668.501—2013《调速电气传动系统 第 5-1 部分:安全要求 电气、热和能量》，变频器有明确的定义，并用图形表述出来，如图 4 所示。

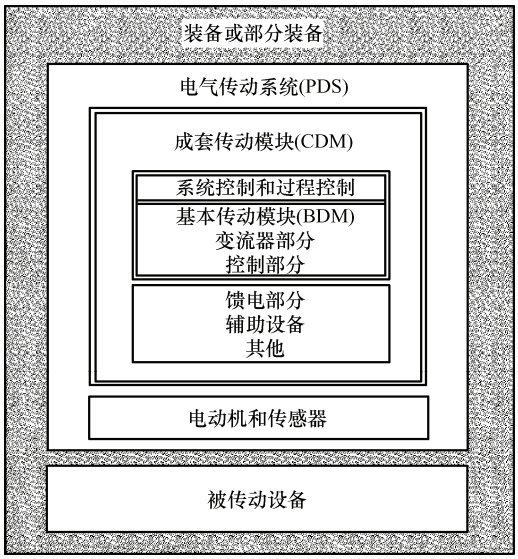

图 4 变频器定义

Fig. 4 Definition of frequency converter

电气传动系统(PDS)包括成套驱动模块(CDM)和电动机，而 CDM 又包括基本驱动模块(变流部分和控制部分)和馈电辅助部分。

对大功率变频器来说，根据标准定义应该包括整流移相变压器、变频功率单元、控制单元及单元直接的连接和馈出部分。

而对过电压的类别，标准中划分为四类，过电压类别 IV 指直接连接在电源侧的设备，没有经过主配电设备，如测量设备、电流保护的一次侧或直接连在户外架空线路的设备。

类别 III 指固定连接的设备，例如主配电设备及其下游设备。

类别 II 指没有固定连接的设备，如便携式电器、插接设备等。

类别 I 指连接到已经用措施使暂时过电压降到很低电路上的设备。

而注解中明确：非直接连接在电源干线上的变频器(PDS)要根据实际场所要求确定其过电压类别。

标准规定各类别设备的绝缘电压水平，包括冲击脉冲电压和暂时过电压，具体如下表所示。

表 绝缘电压水平

Tab. Insulation voltage level (单位：V)

第 1 栏	第 2 栏	第 3 栏	第 4 栏	第 5 栏	第 6 栏
系统电压	冲击脉冲电压				暂时过电压（峰值/方均根值）
	过电压类别				
	I	II	III	IV	
>1 000	4 000	6 000	8 000	12 000	4 250/3 000
3 600	9 000	16 000	20 000	40 000	14 150/10 000
7 200	17 500	29 000	40 000	60 000	28 300/20 000
12 000	29 000	42 500	60 000	75 000	39 600/28 000
17 500	40 000	55 000	75 000	95 000	53 750/28 000
24 000	52 000	75 000	95 000	125 000	70 700/50 000
36 000	75 000	95 000	125 000	145 000	99 000/70 000

注：不允许使用插值法。

根据上表可知，在给定的系统电压下，不同过电压类别的设备其绝缘电压相差很大，例如在 36 kV 系统下，类别 I 和类别 IV 冲击电压分别为 75 kV 和 145 kV，相差近一倍。因此，变频器的过电压类别不同，其内部的绝缘设计和型式试验完全不同，导致变频器的生成制造成本高低不同，对工程项目有较大的意义。

标准中规定，对于直接连接到电源干线上的电路与周围环境之间的绝缘，应当按照最严格的要求进行电压设计。通常，在对这种绝缘进行估算时，要能够耐受过电压类别 III 的冲击脉冲，只有在 PDS 连接到装备的开始端时，才使用过电压类别 IV。过电压类别 II 可以用于连接到无特殊可靠性要求的非工业用途电源上的插入式设备。

当变频器直接连接在电源干线上时，应按照过电压类别 III 来设计；而当变频器在设备起始端时，要按照过电压类别 IV 来设计。

标准中还规定，不直接连接到电源干线上的电路应当按照采用变压器二次电压作为系统电压确定的冲击脉冲电压或工作电压中给出更严格要求的电压设计。

通常，在对这种绝缘进行估算时，要能够耐受过电压类别 II 的冲击脉冲，只有在 PDS 连接到装备的开始端时，才使用过电压类别III。

当有变压器的电气隔离时，变频器的绝缘可以取变压器二次电压的冲击值和工作电压两者中更严格的值来进行设计。变频器通常按过电压类别 II 来设计，如果变频器在设备起始端时，则需按过电压 III 来设计。

变频器在设备的起始端，应是指没有经过断路器而直接连接在电路或变压器二次侧，如在断路器后，其过电压类别可降低一级。

图 5 为直接连接在电源干线上的变频器，没有经过开关，且其在设备起始端，因此需按过电压类别 IV 来设计。

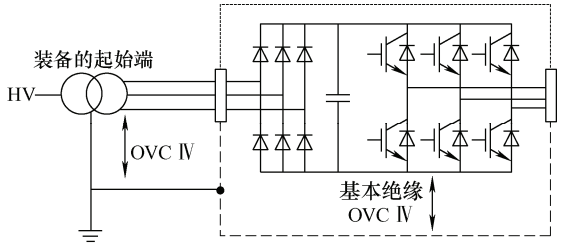

图 5　典型变频器方案 1

Fig. 5 Typical diagram 1 of frequency converter

图 6 为经过了开关后的变频器，其过电压类别降低为 III。

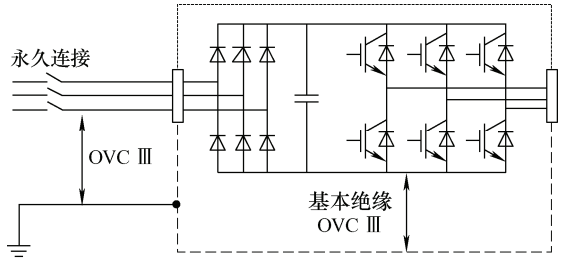

图 6　典型变频器方案 2

Fig. 6 Typical diagram 2 of frequency converter

图 7 为经过了变压器隔离后的变频器，虽然设备连接在电源干线上，但变频器的过电压类别降低为 III。

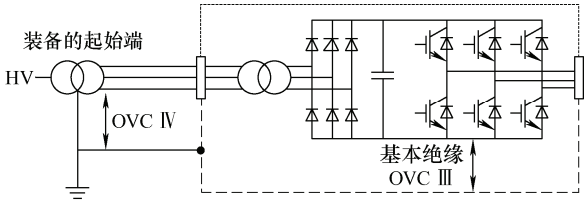

图 7　典型变频器方案 3

Fig. 7 Typical diagram 3 of frequency converter

图 8 为经过了开关，又经过了变压器隔离后的变频器，其过电压类别自然降低为 II。

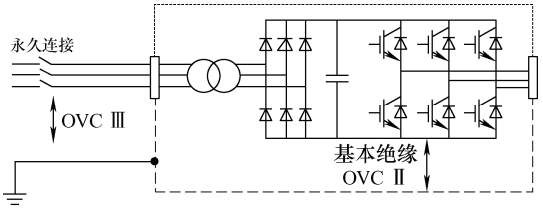

图 8　典型变频器方案 4

Fig. 8 Typical diagram 4 of frequency converter

某项目中，变频器需要驱动功率为 15 000 kW 的电动机，其电压为 10 kV，变电所有 35 kV 的母线，其简化的主接线图如图 9 所示。

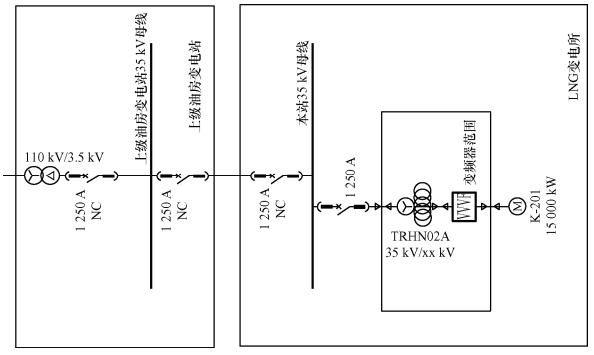

图 9　简化的主接线图

Fig. 9 Simplified main wiring diagram

因为功率很大，变频器是接在 35 kV 母线上的，根据前文所述变频器的原理，各厂商提供了不同的变频器拓扑方案，但变频器无论采用哪一种拓扑结构，整流移相变压器是必不可少的，根据不同的结构，整流变压器二次绕组相差很大。

低压串联型由于功率单元数量最多，二次绕组数量也是最多的，如果每相8个单元，二次绕组将达到24组，对应整流移相变压器结构非常复杂。而高压串联型如果每相4个单元，则二次绕组达到12组。对高压串并联型，3电平只需要2个二次绕组，5电平和9电平则需要6个二次绕组。

某一厂家变频器拓扑是高压串并联型，整流移相变压器采用两台35 kV输入、3.3 kV输出及二次侧为3个绕组的变压器。

某二厂家变频器拓扑是高压串联型，整流移相变压器采用一台35 kV输入、1.85 kV输出及二次侧为12个绕组的变压器。

某三厂家变频器拓扑是低压串联型，整流移相变压器采用两组：一组是一台35 kV输入、10 kV输出及二次侧为2个绕组的变压器；另一组是两台10 kV输入、720 V输出及二次侧为12个绕组的变压器。两组变压器串联，形成35 kV输入、720 V输出。

需要注意的是，目前大型变频器功率柜的过电压类别均为II类设计，如果按III类设计，需要重新设计和验证。因此其整流移相变压器是否能够降低过电压类别就成为关键因素。

方案一的变压器是电力整流变压器的成熟产品，具备降压、隔离和移相三种功能。安装在功率单元柜的上游，根据标准所述，能够将过电压类别从III降低为II，使得功率柜按过电压类别II设计，非常成熟稳定。

方案二的变压器连接在35 kV开关配出侧，变压器本身的过电压类别按III类设计，由于其二次侧有12个绕组，且电压比很大，绕组之间绝缘的设计非常复杂，对于要完成移相、降压及隔离三种功能来说非常困难，已知的调查情况显示，目前市场不一定有应用成熟的产品，因此，项目如果采用其方案，其功率单元柜的过电压类别绝缘设计就成了很大问题，需要重新设计和进行各种实验验证，这对项目实施来说充满不确定性。

方案三的变压器采用两组：第一组变压器为成熟的电力变压器，仅作为隔离和降压用，成功降低了过电压类别；而第二组只具有降压移相功能，不能降低过电压类别。因此，两组变压器各司其职，使功率单元柜的过电压类别可按II类设计，是非常传统和可靠的，其缺点是投资高，设备多，尺寸大，占地大。

另外再说明一点，高压变频器行业主流使用的变压器为干式变压器，已知的投入商业使用且经过大量验证的最高电压为13.8 kV，没有35 kV安全使用的证明；选择油浸变压器可以做到35 kV输入，但是此类产品主流市场最多到4组绕组，要满足项目需要的24组绕组，并未在市场上找到类似产品；即便找到，因其特殊性需要定制以及长时间的验证，且大量的绕组会使变压器的体积巨大，整个项目的实施过程以及后续安装运输、后期的备品配件采购都会带来不确定因素。

3 结束语

综上所述，大功率变频器及整流移相变压器的过电压类别关键在于整流变压器的配置，在以往的工程项目中，制造商尤其是国内制造商对过电压类别没有深入研究，对配电、整流和移相变压器所起的作用没有甄别，对一次侧的输入电压范围随意承诺，这样的做法有很大的风险和隐患。

通过本研究，只有10 kV输入的整流变压器在市场上是成熟产品，能够具备降压、隔离和移相的功能，使变频器过电压类别降低。

而如果是35 kV输入，则需要根据变频器拓扑原理选择合适的变压器进行配电变压器和整流变压器的组合，尽量使二次绕组不超过4组，或配置2组整流变压器，或直接将整流变压器连接在10 kV母线上，这样才能降低变频器功率单元的过电压，满足技术和制造标准。EA

参考文献

[1] 田力，高明，任蔚. 级联型变频器在高压大功率电机软启动中的应用[J]. 电子设计工程，2013，21(15)：31-33.

(下转至82页)

分别加等效的三相和单相电流，试验数据如下表所示。

表　试验数据

Tab. Test data

整定值倍数	动作电流/A	三相工况动作时间/s	单相工况动作时间/s
1.5	3.3	72.15	109.11
2	4.4	35.99	44.15
3	6.6	17.23	16.28
4	8.8	11.65	8.98
5	11	8.32	5.61
6	13.2	5.68	3.86

输入三相电流定义为三相工况；在电动机起动时同步输入单相电流定义为单相工况。

在起动时间为 10 s、三相工况输入 6.6 A 时，动作时间为 17.23 s，因为电动机起动过程中，热等效电流计算时，正序电流热过负荷系数取 0.5，热等效电流 I_{eq} 降低，动作时间大于 15 s；单相工况输入 6.6 A，此时，I_1=2.2 A，I_2=2.2 A，由于负序电流 I_2 的出现，负序电流发热时间常数为 6，相当于负序电流 6 倍叠加，热等效电流增大，动作时间较三相时短，为 16.28 s，电流越大，这种现象越明显。由于两种工况下的热等效电流不一样，热模型在相同时间内产生的热累积电流也就不一样，所以动作时间也不相同。

5　结束语

电动机热过负荷保护采用热等效模型，能够更好地保护电动机的短路故障，尤其对于不对称短路，动作时间更短，保护性能优于常规的定时限电流保护和 IEC 反时限电流保护。EA

参考文献

[1] 电力装置的继电保护和自动装置设计规范：GB/T 50062—2008[S].

[2] 南瑞继保电气有限公司. PCS-9626L 电动机保护装置技术和使用说明书[Z].

[3] 厂用电继电保护整定计算导则: DL/T1502—2016[S].

作者简介：

万　欣

万欣，工程师，研究方向：炼油厂供电车间。

(收稿日期：2020-11-26)

(上接至 54 页)

[2] 中华人民共和国国家标准. 调速电气传动系统 第 5-1 部分：安全要求电气、热和能量：GB 12668.501—2013[S].

[3] 陈少林. 基于 IGCT 两电平电压源型交直交大功率变频器设计[D]. 长沙：湖南大学，2018.

[4] 李兴宁，王书杰，陈震. 单元串联多电平高压大功率变频器研究[J]. 大功率变流技术，2010(3)：5-8.

[5] 李宗臣，张奕黄. 级联型多电平高压变频器的建模与仿真[J]. 电机与控制应用，2009，36(3)：31-34，52.

[6] 竺伟，陈伯时，周鹤良，等. 单元串联式多电平高压变频器的起源、现状和展望[J]. 电气传动，2006，36(6)：3-7.

作者简介：

周　宁

周宁(1974—)，男，高级工程师，主要从事石油化工行业电气设计工作。

(收稿日期：2020-11-15)