

变频器例行试验中的功率考核技术研究

余志涛, 耶小方, 武松剑, 高峰

(株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 从功率器件 IGBT 以及变频器的工作原理和工作特性出发, 对业界常用的三种变频器例行试验中功率考核试验方法进行技术分析和比较, 同时作者结合多年从事变频器测试技术工作积累的经验进行了验证和分析, 旨在为合理选择变频器功率考核试验方法和测试系统提供参考和指导。

关键词: IGBT; 变频技术; 功率考核; 质量

中图分类号: TN306

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2011)01-0001-06

Study on Power Test Technology in Converter's Routine Test

YU Zhi-tao, YE Xiao-fang, WU Song-jian, GAO Feng

(Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The article analyzes and compares three popular technologies used in the power test of converter's routine test, based on the working principles and characteristics of IGBT and converters, as well as the practical verification and analysis with the author's years of experience on converter testing. It aims to provide guide and reference for reasonable choice of converter's power test methods and test system.

Key words: IGBT; variable frequency technology; power test; quality

0 引言

随着我国变流技术的飞速发展, 变频器凭借其自身的强大技术优势, 在工业传动市场应用的普及率越来越高, 而且单台输出功率也越来越大(业界单台输出功率达到兆瓦级的变频器已较普及)。随着单台输出功率的不断增大, 系统的复杂性、产品电磁环境的恶劣程度也随之增大, 这也就无形中给产品的出厂质量带来了新的挑战。为了确保产品出厂后的质量和可靠性, 业界常用的方法是, 在变频器进行出厂例行试验时对其进行数小时的功率考核试验, 以达到将产品质量隐患提前暴露出来的目的。由于变频器功率考核试验系统

的搭建成本昂贵, 以及系统集成技术的复杂性和实际应用对可靠性的较高要求, 都导致业界在变频器例行试验中采用的功率考核试验方法不尽相同, 通常采用三种方案: (1)阻感负载(模拟电机负载)试验考核系统; (2)感抗负载(纯电感负载)试验考核系统; (3)背靠背电机负载试验考核系统。

不同的考核试验方法, 对变频器各项性能功率考核覆盖率的程度也不尽相同。理论上来说, 考核覆盖率越高, 产品的出厂质量保证也就越可靠。但是高覆盖率考核, 可能也就意味着需更高的试验系统搭建成本。本文重点从功率器件 IGBT 以及变频器功率考核的工作原理和工作特性出发, 对业界常用的几种变频器例行试验功率考核技术进行分析和比较; 并结合笔者多年在变频器测试技术工作中的一些经验进行了论证和分析, 希望为变频器设计及测试电气工程师们如何合理选择变频器功率考核试验系统起到指导性作用。

收稿日期: 2010-12-03

作者简介: 余志涛(1980-), 男, 工程师, 现主要从事机车产品测试技术工作。

1 IGBT 的工作原理和典型特性

绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 是由 MOSFET 和双极型晶体管复合而成的一种器件, 它融和了这两种器件的优点, 既具有 MOSFET 器件驱动功率小和开关速度快的优点, 又具有双极型器件饱和压降低而容量大的优点, 在现代电力电子技术中得到了越来越广泛的应用, 在较高频率的大、中功率应用中占据了主导地位。

IGBT 是一种电压控制型电力电子元件, 其理想等效电路如图 1 所示。由图 1 可知, 若在 IGBT 的栅极 G 和发射极 E 之间加上驱动正电压, 则 MOSFET 导通, 这样 PNP 晶体管的集电极 C 与栅极 G 之间成低阻状态而使得晶体管导通; 若 IGBT 的栅极和发射极之间电压为 0 V, 则 MOSFET 截止, 切断 PNP 晶体管基极电流的供给, 使得晶体管截止。

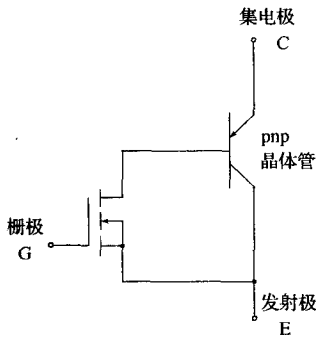


图 1 IGBT 等效电路
Fig. 1 IGBT equivalent circuit

为确保变流模块的质量和可靠性, 变流模块进行装机或单独出厂前必须对其功率器件 IGBT 的开关性能进行验证和适当的功率考核, 以考核变流模块的出厂质量。该测试通常采用双脉冲法, 其典型的开关性能测试系统如图 2 所示。

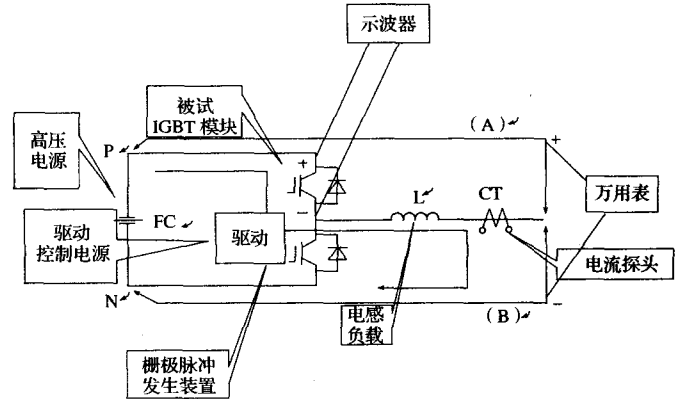


图 2 变流模块功率器件 IGBT 的开关性能测试系统简图

Fig. 2 Diagram of switching performance test system for converter module power device IGBT

为验证变流模块中功率器件 IGBT 的开关性能, 需分别向同一桥臂上管 (下管) IGBT 的栅极提供 2 个不同脉冲宽度的控制脉冲信号 (图 3), 同时测量上管 (下管) 功率器件 IGBT 第二个脉冲关断时 C 极与 E 极间关断峰值电压 (V_{DM}) 的电压值和第二个脉冲打开时上管 (下管) 功率器件 IGBT 的 C 极与 E 极间开通电流的大小 (图 3) 是否满足设计要求。

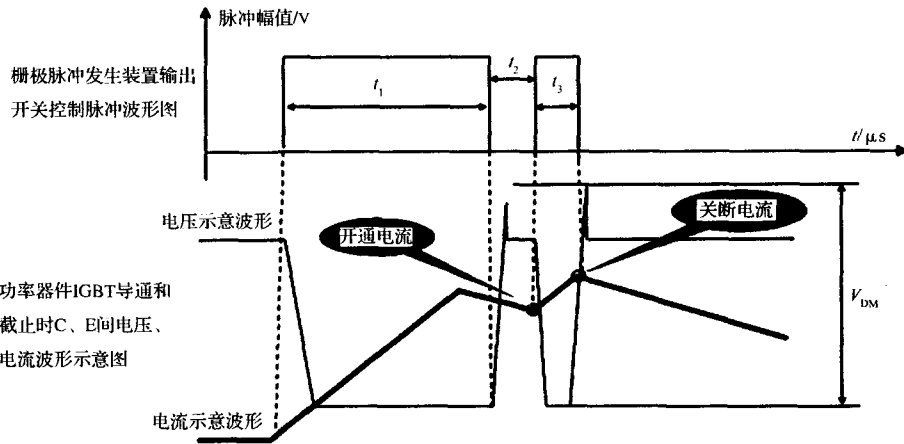


图 3 测试系统控制信号波形及各测量点电压、电流波形示意图

Fig. 3 Diagram of test system control signal waveform, as well as measuring point voltage and current waveforms

1.1 IGBT 的稳态特性

图 4 表示 $V_{CE}-I_C$ (输出特性) 与 V_{GE} 的依存性。由于 IGBT 导通时存在压降 (V_{CE}) 和电流 (I_C), 因此必然会产生

损耗。然而, 虽然 V_{CE} 越低, 发生的损耗越小, 但是由于该特性是随温度 T_j 和 V_{GE} 的改变而变化的, 因此, 设计变频器时需充分考虑该特性。

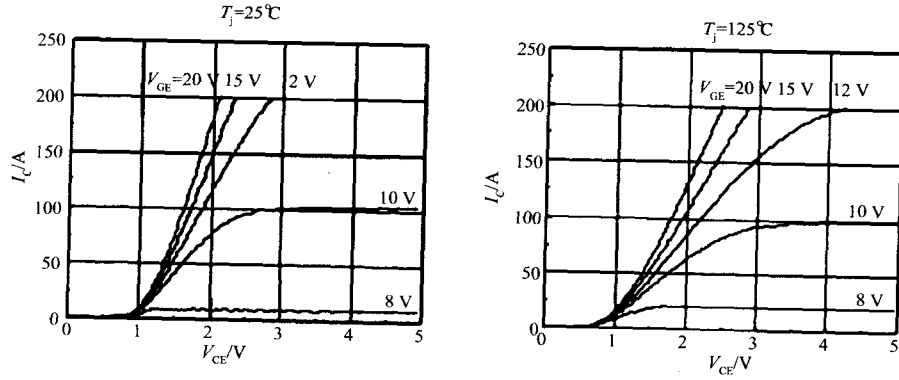


图4 $V_{CE(sat)}-I_C$ 特性

Fig. 4 $V_{CE(sat)}-I_C$ characteristics

如无特殊需求, 一般情况, 推荐采用 $V_{GE}=15\text{ V}$, 变频器的最大输出电流小于或等于元件的 I_C 额定电流值。另外, 图5是将图4中的数据转化成 $V_{CE}-V_{GE}$ 特性的 I_C 依存性曲线图, 从中可以看出, V_{CE} 急剧增加到极限时 V_{GE} 的大概标称值。

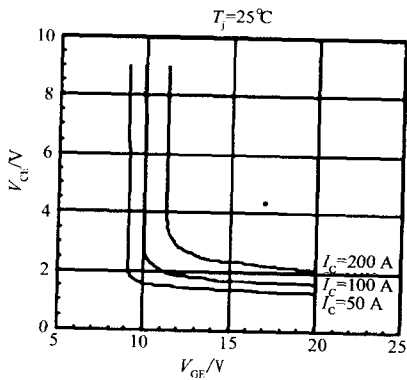


图5 $V_{CE(sat)}-V_{GE}$ 特性

Fig. 5 $V_{CE(sat)}-V_{GE}$ characteristics

IGBT模块由IGBT部和续流二极管(FWD)部构成, IGBT模块的整体损耗为IGBT部和FWD部损耗的总和。此外, 损耗可分为稳态时的和动态时的。图6为综合IGBT各部分的损耗。

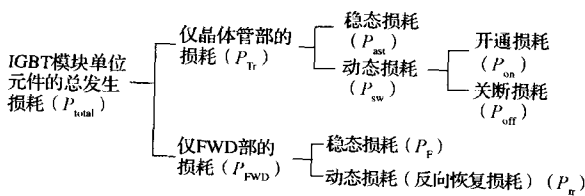


图6 IGBT 损耗分类

Fig.6 IGBT loss classification

无论IGBT部还是FWD部的稳态损耗均可通过输出特性额定值进行计算, 而动态损耗也可通过动态损耗-集电极电流特性曲线值进行推算。根据计算出的损耗进行散热设计, 保证结温 T_j 不超过IGBT的出厂设计值(推荐 $T_j=125^\circ\text{C}$)。

1.2 IGBT 的动态特性

由于IGBT一般用作开关, 因此充分了解其开通和关断时的动态特性非常重要。另外, 动态特性随各种参数改变而变化, 因此在进行变频器功率考核试验时必须加以考虑。

IGBT的动态特性主要包括动态时间和动态损耗, 即开通时间 t_{on} 、上升时间 t_r 、关断时间 t_{off} 、下降时间 t_f 、反向恢复时间 t_{rr} 和反向恢复电流 I_{rr} 等6项指标, 其动态时间特性如图7所示。

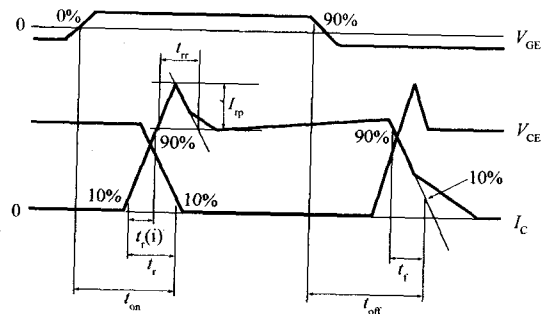


图7 IGBT 动态时间特性

Fig. 7 IGBT dynamic time characteristics

IGBT的动态特性可以通过图8所示的斩波电路进行说明。由于动态时间受集电极电流 (I_C)、温度 (T_j)、栅极电阻 (R_G) 的影响而变化, 例如, 在动态时间 (特别是

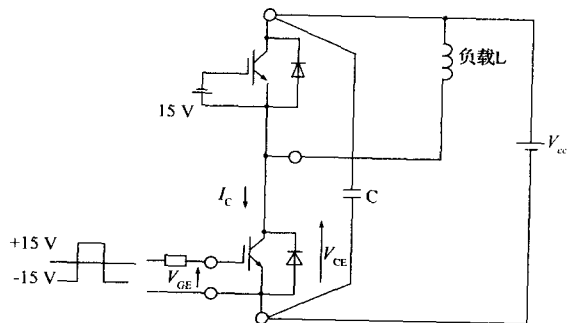


图8 IGBT 动态特性测试电路

Fig. 8 Testing circuit of IGBT dynamics characteristics

t_{off})变长的条件(R_G 较大等原因)下使用IGBT,可能出现由于空载时间不足而引发串联支路短路(即:串联支路中一个IGBT关断前,另一个IGBT已经导通,因此流过大电流)等不良情况,从而导致元件遭到破坏。另外,在 t_r 过短的条件下(由于 R_G 过小等原因)使用IGBT,将可能出现瞬态的电流变化(dI_C/dt)增大,由于电路中的电感 L_s 而产生的尖峰电压($=L_s \times dI_C/dt$)超出了IGBT峰值电压安全工作区(RBSOA)范围会导致元件遭到破坏,因此这点也需要充分注意。

另一方面,IGBT工作时(开通、关断)会出现动态损耗(E_{on} 、 E_{off} 、 E_{rr})。该特性受结温 T_j 、集电极电流 I_C 、栅极电阻 R_G 的影响而变化。其中对 R_G 的选定特别关键,如果过大,不但动态损耗变大,而且容易引起前面所述的由于空载时间不足而产生的串联支路短路。反之,如欲使动态损耗降到最低而将 R_G 变小,则有可能出现前面所述的激烈尖峰电压($=L_s \times dI_C/dt$)的问题。由此看出,对于 R_G 的选定,主电路的电感 L_s 非常重要,由于主电路的电感 L_s 越低, R_G 的选定就越容易(即使 R_G 小,尖峰电压也不容易出现),因此应当尽量使 L_s 的值小一些。

另外,由于决定 R_G 时必须考虑与IGBT驱动电路中电容的协调性,因此,需要应用本文1.3节的电容特性,并在充分探讨的基础上对 R_G 进行优选。

1.3 IGBT 的电容特性

图9为栅极充电电量 Q_G 的特性,示出了相对于栅极充电电量 Q_G ,集电极-发射极间的电压 V_{CE} 和栅极-发射极间的电压 V_{GE} 的变化。由于“ Q_G 增加”表示“IGBT的G-E间的电容中有电荷被充入”,一旦 Q_G 充电, V_{GE} (= Q_G / C -E间电容)上升,IGBT即开通。当IGBT开通时, V_{CE} 也随之下落到通态电压。上述的栅极充电电量 Q_G 表示驱动IGBT所需的电荷量,故在进行变频器功率考核时需要充分考虑驱动电路的电容特性。

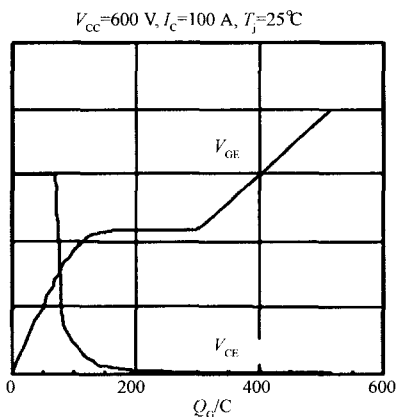


图9 V_{CE} 、 V_{GE} - Q_G 特性
Fig.9 V_{CE} 、 V_{GE} - Q_G characteristics

图10示出IGBT结电容,图中 C_1 是栅极-发射极间的输入电容, C_2 是集电极-发射极间的输出电容, C_3 是集电极-栅极间的反向传输电容。在进行变频器功率考核试验时必须考虑IGBT的上述电容特性和 Q_G 特性。

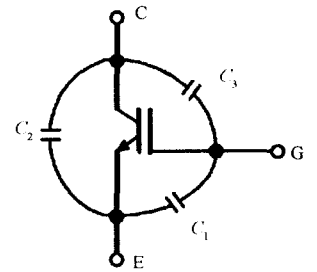


图10 IGBT 结电容
Fig.10 IGBT junction capacitance

1.4 内置续流二极管(FWD)特性

在IGBT模块中,续流二极管(FWD)与IGBT反并联连接,内置于模块中。该FWD具有 V_F - I_F 特性、反向恢复特性(t_{rr} 、 I_{rr})以及反向恢复工作时动态损耗(E_{rr})特性。这些特性与IGBT一样,用于计算FWD中发生的损耗。另外,FWD的特性随集电极电流(I_C)、温度(T_j)、栅极电阻(R_G)等变化而变化,所以在进行变频器功率考核试验时也必须考虑到。

1.5 反偏栅极电压 $-V_{GE}$ 不足而产生的IGBT误触发特性

反偏栅极电压 $-V_{GE}$ 一旦不足,将会引起IGBT误触发,使上下支路的IGBT同时导通,形成短路电流而损坏模块。切断该电流,又会由于浪涌电压而损坏产品,所以在设计变频器时必须确认不会出现这种由于上下支路短路而产生的短路电流现象(推荐 $-V_{GE} = -15 V$)。产生上述现象的原理见图11和图12,图11中的IGBT外加

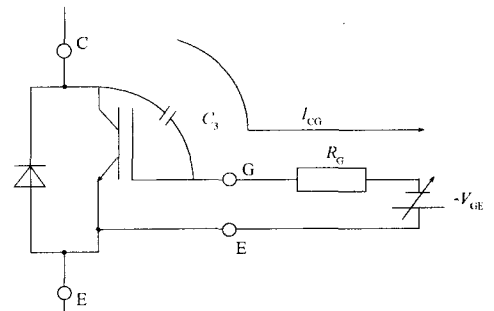


图11 dv/dt 的误动作原理

Fig. 11 Mechanism of dv/dt induced malfunction

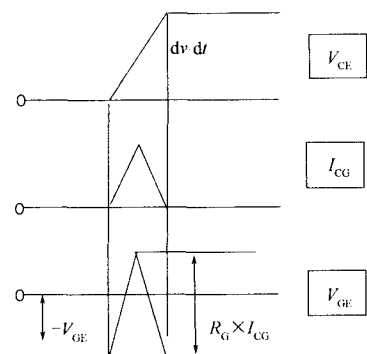


图12 反向恢复时的 V_{CE} 、 I_{CG} 和 V_{GE} 波形
Fig. 12 V_{CE} 、 I_{CG} and V_{GE} waveforms during reverse recovery

了 $-V_{GE}$ (图中没有明确表示,但可假定该IGBT的对置支路也同样串联着IGBT)。当对置支路的IGBT处于开通状态时,图11中的FWD就反向恢复。此时,C-E间产生像图12所示的 dv/dt 。由于该 dv/dt 的存在,电流 I_{CG} 流过C-G间的反向传输电容 C_{res} 和栅极电阻 R_G (图11)。该 I_{CG} 在 R_G 的两端引发 $\Delta V=R_G \times I_{CG}$ 的电位差, V_{GE} 如图12所示状态涌上+侧。此时,一旦 V_{GE} 峰值电压超过IGBT的 $V_{GE(th)}$,则IGBT导通,上下支路流过短路电流。

反之,只要 V_{GE} 峰值电压不超过IGBT的 $V_{GE(th)}$,上下支路就没有短路电流流过。因此为了避免发生这种不良现象,外加足够的反偏压电压($-V_{GE}$)很有必要。 $-V_{GE}$ 值需根据使用中的驱动电路、门极配线和 R_G 等的变化而合理设定(推荐为 $-15V$)。因此变频器进行功率考核前必须确认上下支路是否产生了短路电流,在进行变频器功率考核试验时也必须考虑到反偏栅极电压 $-V_{GE}$ 不足而产生的IGBT误触发。

上面仅论及到IGBT的5种典型工作特性,但综合起来基本上就3大特性:电感特性(L)、电容特性(C)和电阻特性(R)。

2 变频器功率考核试验

2.1 试验原理

通用变频器主要由交流输入输出电路、整流电路、中间直流电路、逆变电路和控制电路等组成。图13为变频器功率考核试验能量流向示意图,由单相(或三相)交流电源、待测变频器和负载3部分组成。单相(或三相)交流电源经过电抗器(或隔离变压器)滤波给整流器供电,电抗器(或隔离变压器)二次侧电压经过整流器将交流整流为直流,接着通过中间支撑阻容电路将整流后的中间直流电压进行稳压和滤波后送至逆变器,逆变器将中间直流逆变为变频变压的三相交流电,然后通过输出滤波电路进行适当处理后提供给三相负载,最后将电能转化为机械能或者热能。

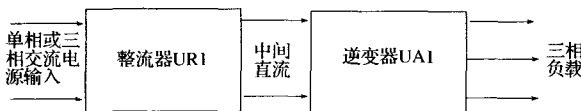


图13 变频器功率考核能量流向示意图

Fig. 13 Diagram of energy flow in converter power testing

2.2 功率考核试验方法1——阻感负载(模拟电机负载)试验考核系统

阻感负载(模拟电机负载)试验考核系统是将3组电感与电阻分别组成星型连接(图14),以模拟电机作为考核系统的试验负载。阻感负载(模拟电机负载)试验考

核系统的显著优点是,系统稳定、搭建技术要求不高、成本也很低;但其缺点也很明显,该负载系统将电能直接转化为了热能,耗能量大,电能的浪费严重;同时,热量的散发使投入负载房散热系统的成本也大大增加。

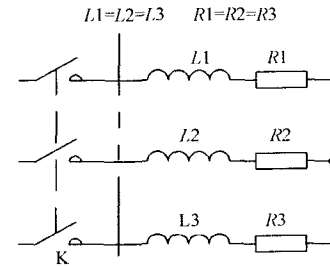


图14 阻感负载(模拟电机负载)结构示意图

Fig. 14 R-L loads (simulating motor load) schematic

阻感负载(模拟电机负载)作为试验考核系统的模拟负载,虽然经过了软件仿真和理论计算来确定阻抗参数,但毕竟与实际负载还是有很大区别,其显著考核盲区如下:

(1)该模拟负载由于阻抗恒定,感抗不大(与电机相比其感抗还是很小),也就基本上不会做到满功率考核,这样变频器输出端的电压达不到额定电压值,即没有达到实际工作电压的考核要求,特别是对装置中容性器件的考核没有到位。

(2)由于没有做到满功率考核,因此变频器输入电路和中间电路的电流大小也就达不到额定工作电流的考核要求,这也使得变频器内部的感性器件没有达到实际工作考核等级。

(3)根据上述两点,可以确定变频器的考核电磁环境无法达到实际工作中的环境指标。由于感抗不大(与电机相比其感抗还是很小),因此变流核心器件IGBT的动态特性、电容特性、内置续流二极管(FWD)特性和反偏栅极电压 $-V_{GE}$ 不足而产生的IGBT误触发等主要动态特性的考核就达不到实际工作考核要求的指标;同时,由于输入端电路和中间电路的电流不大,所以整流器UR1的变流核心器件IGBT的稳态特性也达不到额定工作考核指标要求。

2.3 功率考核试验方法2——感抗负载(纯电感负载)试验考核系统

感抗负载(纯电感负载)试验考核系统是将3组电感直接进行星型连接(图15),以模拟电机作为考核系统的试验负载。纯电感负载试验考核系统的显著优点是,系统稳定、节能、搭建技术要求不高、搭建成本也很低;其缺点也很突出,由于该负载为纯电感,因此只能进行短时无功功率考核。总的来说,感抗负载试验考核系统的缺点和优点都很显著,如果产品制造工艺、质

量控制和设计理念不是很到位的情况下,建议慎用感抗负载试验考核系统。

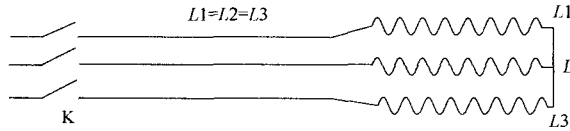


图 15 感抗负载(纯电感性负载)结构示意图
Fig. 15 L loads (pure inductive load) schematic

纯电感负载试验考核系统作为一套模拟负载,虽然经过了软件仿真和理论计算来确定感抗参数,但与实际负载的工作条件仍有很大的区别,所以也存在考核盲区:

(1)负载由于是纯电感抗,因此只能进行短时无功功率考核,这样变频器关键感性部件和容性部件(尤其是大功率感性部件和容性部件,如电感、变压器、电容、主电路连接点等)的静态工作特性不能得到真正的考核;特别是变流核心器件IGBT的静态特性没有得到真正考核,这就是感抗负载试验考核系统显著的缺点。

(2)负载由于为纯电感,因此考核时的电流上升率 di/dt 很快,在电流上升到最大值后,变频器将迅速地软关断保护,具体负载电流波形如图16所示。由于负载电流上升率 di/dt 很快以及变流模块迅速的软关断保护,变流核心器件IGBT的动态特性、电容特性、内置续流二极管(FWD)特性和反偏栅极电压 $-V_{GE}$ 不足而产生的IGBT误触发等动态特性的考核会很全面,这也是纯电感负载试验考核系统的最大优点。

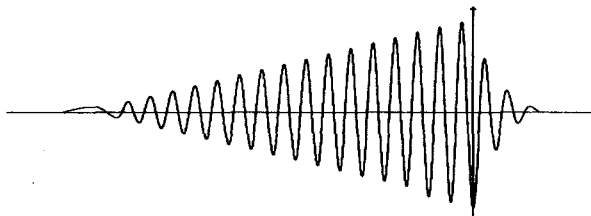


图 16 感抗负载功率考核电流波形示意图
Fig. 16 Diagram of current waveform in L-loads power testing

(3)负载电流上升速率很快以及迅速的软关断保护,容易导致IGBT的开关 di/dt 和内置续流二极管(FWD)的续流 di/dt 很大而产生尖峰电压(或浪涌电压)。所以,感抗负载试验考核系统能比较全面地考核变频器的各种异常保护功能。同时,对异常工况的考核也要求我们对负载电感量的选择必须准确、合理。

2.4 功率考核试验方法3——背靠背电机负载试验考核系统

背靠背电机负载试验考核系统是将电机作为功率考核负载,电机经过机械传动带动发电机转动发电(其能量转化过程为:电能→机械能→电能),然后再通过变频

器和变压器将电压回馈电网。以国际电工标准IEC61377推荐的直交变频器-电机能量互馈试验方案(背靠背)为基础,目前业界常用的两种典型的交直交变频器背靠背电机负载试验考核系统结构如图17所示。从图中可以看出,该系统的搭建成本大,对能量转换的稳定性和电能回馈并网的可靠性提出了很高要求,也就是说,对系统的设计和后期维护技术都提出了较高的要求。

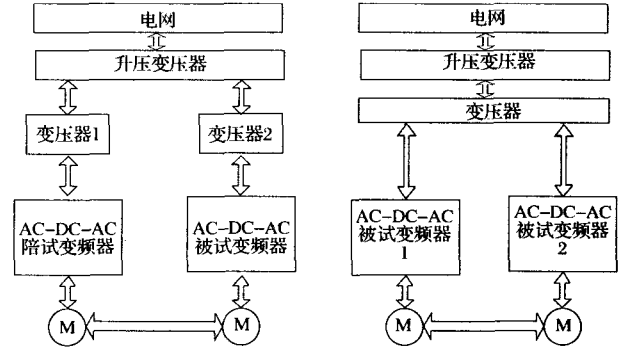


图 17 背靠背电机负载试验考核系统组合结构示意图
Fig. 17 Diagram of combined structure of back-to-back motor load testing system

背靠背电机负载试验考核系统直接模拟变频器实际工作环境,直接以电机作为功率考核负载,考核覆盖率高,可以实现各种功率等级的考核,其各方面优点都是显而易见的。同时,背靠背的能量回馈确保了电能的循环利用,实现了节能的目的。

3 结语

本文详细分析了变频器核心器件IGBT的工作原理和典型特性,分析和比较了业界常用的3种功率考核试验方案。笔者结合多年在变频器测试技术工作中积累的经验,综合分析经济效能后提出以下建议:

- (1)科研试制、前期市场推广产品以及大功率变频器出厂例行功率考核试验推荐采用背靠背电机负载试验考核系统;
- (2)小批量和中小功率变频器出厂例行功率考核试验推荐采用阻感负载(模拟电机负载)试验考核系统;
- (3)技术成熟、性能稳定可靠的变频器出厂例行功率考核试验推荐采用感抗负载(纯电感性负载)试验考核系统。

参考文献:

- [1] Chan H A, Englert P J. Accelerated Stress Testing Handbook: Guide for Achieving Quality Products[K]. USA: IEEE PRESS, 2001.
- [2] 李大虎,石新春. 三相电压型PWM整流器及其控制策略的仿真[J]. 大功率变流技术, 2010(3): 19-23.
- [3] 胡家喜,宋 娇. 三电平IGCT 变流器换流研究[J]. 大功率变流技术, 2009(5): 5-9.