

逆变器损耗及温度计算

张猛

(辽宁轨道交通职业学院 辽宁省沈阳市 110023)

摘要: 本文以 1140V/200kW 变频器系统中逆变器部分为研究对象, 基于解析法求解逆变器的损耗以及温度。基于拟合及插值算法, 对 IGBT 模块功率损耗模型进行推导及建立。最终得到功率器件的损耗以及温度, 与英飞凌 IPOSIM 的计算结果对比误差较小, 所得结果可为逆变器设计和散热器设计提供借鉴。

关键词: 变频器系统; IGBT 模块; 温度计算

1 引言

绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 模块兼具电力场效应管 (MOSFET) 和电力双极型晶体管 (GTR) 的优点, 一经面世便得到广泛应用。随着半导体制造工艺的发展和应用场合

的不断变化, 对于逆变器系统的要求也在提高, 逆变器系统的电压等级以及功率密度越来越高, 使其内部的 IGBT 模块需要承受更大的温度以及应力。影响逆变器失效的因素复杂且多样, 如环境应力、温度、长时间过载以及制造工艺等, 但是温度导致的热应力是器件失效的最重要因素。IGBT 模

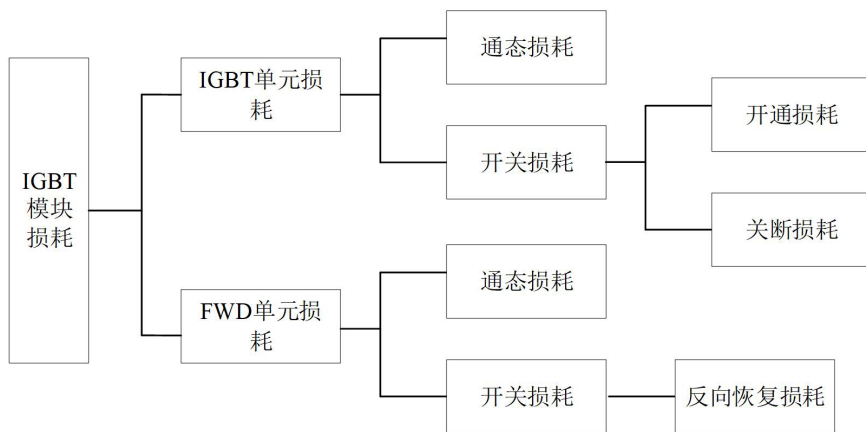


图 1: IGBT 模块损耗类型

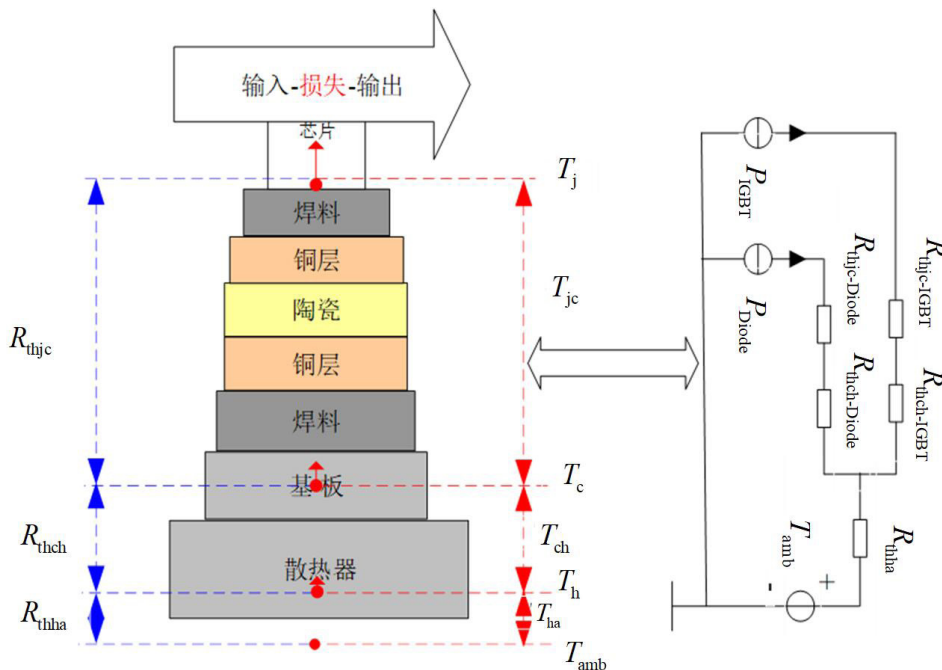


图 2: IGBT 模块热路模型

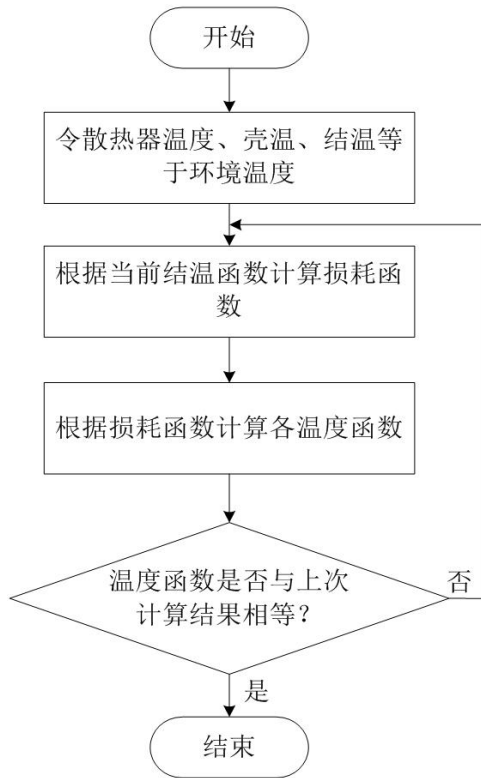


图 3: 损耗计算流程图

型热失效的根本原因是器件在工作过程中产生的热量大于散热量, 造成热量堆积并超过安全工作区, 最终导致器件的不可逆损坏^[1]。

在计算功率器件的损耗时, 主要计及电压、电流、温度和开关频率等因素。文献^[2]中给出一种在迟滞开关下 IGBT 及二极管损耗的估算方法, 通过实验验证所提方法的准确性。文献^[3]提出一种 IGBT 在额定工况下的快速损耗计算方法, 其结果和厂商的损耗计算结果很近。文献^[4]考虑了温度对损耗计算的影响, 提出了准确计算 IGBT 损耗的一种方案, 并通过热路法计算出器件的壳温。文献^[5]通过分析芯片的散热路径, 利用传热学知识分析各个传热环节之间的关系, 建立对应的热阻抗模型, 开发了一套功率器件瞬态结温计算程序。

在已知逆变器系统损耗的前提下, 使用仿真软件设计和分析冷却系统的散热能力是热量管理中重要的一步。将热量传递过程中遇到的阻力利用电热等效成电阻, 利用仿真软件来进行热仿真^[6]。文献^[7]中研究者对三电平变流器的电-热耦合特性进行研究, 得出开关损耗与快恢复二极管的反向恢复损耗和母线电压呈线性关系, 导通损耗和母线电压非线性相关。

2 逆变器损耗计算

逆变器系统中功率器件损耗计算主要涉及器件的开关损耗及系统运行时功率器件的稳定损耗两个方面。研究二者的损耗对于系统温度控制和散热器设计有着重要作用。

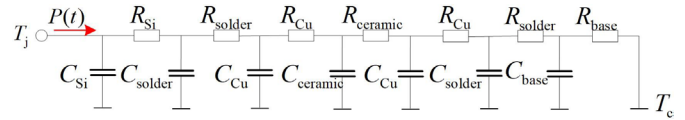


图 4: Cauer 网络模型

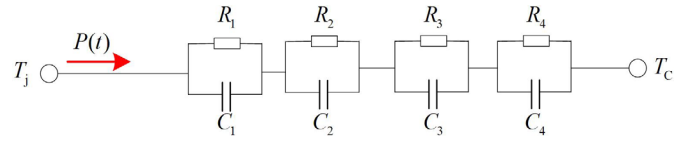


图 5: Foster 模型

如图 1 所示, IGBT 模块的损耗包含通态损耗和开关损耗, 一个功率模块包含 IGBT 单元和 Diode 单元。

2.1 IGBT通态损耗

IGBT 的通态损耗与通压降、结温、电流、调制系数有关。一个正弦波周期内 IGBT 的平均通态损耗为:

$$P_{\text{cond_IGBT}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{CE}}(t) i(t) \tau(t) dt \quad (1)$$

式中, $P_{\text{cond_IGBT}}$ 是 IGBT 通态损耗, T 是调制周期, $u_{\text{CE}}(t)$ 是 IGBT 通态压降, $i(t)$ 是通态电流, $\tau(t)$ 是导通时间函数。

IGBT 通态时压降函数和负载电流函数为:

$$u_{\text{CE}}(t) = U_{\text{CE0}}(T_j) + r(T_j) i(t) \quad (2)$$

$$i(t) = I \sin(\omega t) \quad (3)$$

式中, T_j 是 IGBT 芯片结温, $r(T_j)$ 是通态斜率电阻, $U_{\text{CE0}}(T_j)$ 是阈值电压。

导通时间函数 $\tau(t)$ 为:

$$\tau(t) = \frac{1}{2} [1 + m \sin(\omega t + \varphi)] \quad (4)$$

式中, m 是调制系数, φ 是相位差。

将式 (2) (3) (4) 代入 (1), 积分可得:

$$P_{\text{cond_IGBT}} = \frac{1}{2} [U_{\text{CE0}}(T_j) \frac{I}{\pi} + r(T_j) \frac{I^2}{4}] + m \cos \varphi [U_{\text{CE0}}(T_j) \frac{I}{8} + r(T_j) \frac{I^2}{3\pi}] \quad (5)$$

2.2 IGBT开关损耗

IGBT 每个脉冲内开通损耗 E_{on} 和关断损耗 E_{off} 的计算公式如下:

$$E_{\text{on}} = \frac{I_{\text{Pon}}}{I_{\text{P_test}}} \frac{U_{\text{DC}}}{U_{\text{DC_test}}} E_{\text{on_test}} \quad (6)$$

$$E_{\text{off}} = \frac{I_{\text{Poff}}}{I_{\text{P_test}}} \frac{U_{\text{DC}}}{U_{\text{DC_test}}} E_{\text{off_test}} \quad (7)$$

式中, I_{Pon} 、 I_{Poff} 分别是实际工作时的导通相电流和关断相电流, $I_{\text{P_test}}$ 是测试条件下相电流, U_{DC} 是逆变器母线电压, $U_{\text{DC_test}}$ 是测试 IGBT 开通和关断损耗时的母线电压, $E_{\text{on_test}}$ 、 $E_{\text{off_test}}$ 是测试条件下的开通损耗和关断损耗。

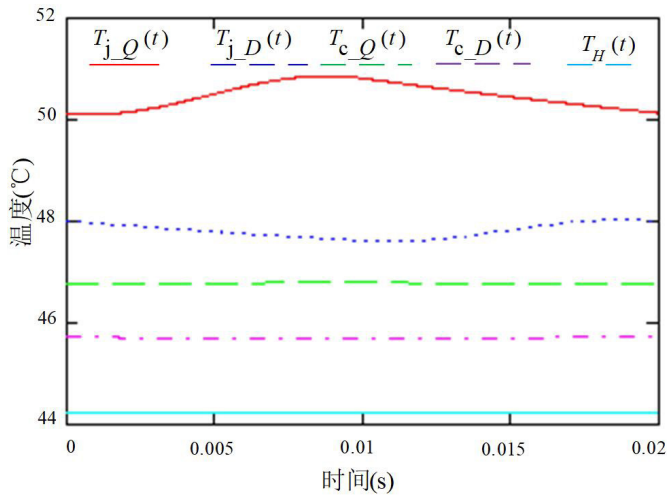


图 6: IGBT 模块温度曲线

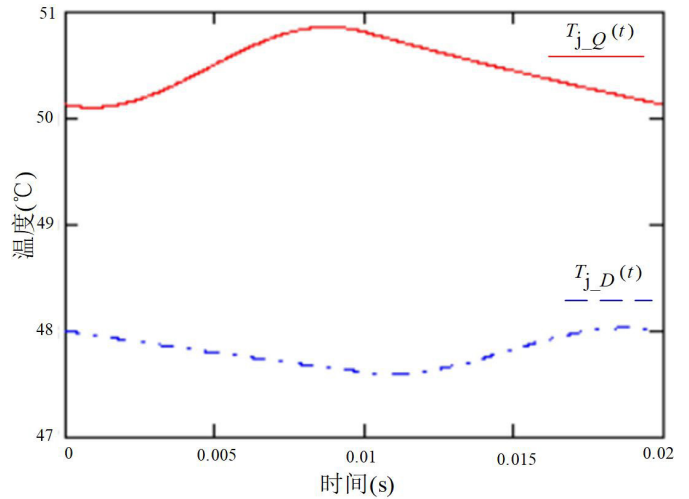


图 7: 芯片结温曲线

若 IGBT 开关周期足够小, 相电流基波 I_P 近似为开关周期内的相电流, 即:

$$I_P \approx I_{Pon} \approx I_{Poff} \quad (8)$$

则 IGBT 的开关损耗 P_{SW_IGBT} 可以写成下式。

$$P_{SW_IGBT} = f_{SW} \frac{1}{T} \int_0^T (E_{on} + E_{off})(t, I) dt \quad (9)$$

将式 (3)、(6)、(7)、(8) 带入式 (9) 可得:

$$P_{SW_IGBT} = \left[\frac{I_P}{I_{P_test}} \frac{U_{DC}}{U_{DC_test}} E_{on_test} + \frac{I_P}{I_{P_test}} \frac{U_{DC}}{U_{DC_test}} E_{off_test} \right] \frac{f_{SW_IGBT}}{T} \int_0^T \sin(\omega t) dt$$

$$= \frac{f_{SW_IGBT}}{\pi} \left[\frac{I_P}{I_{P_test}} \frac{U_{DC}}{U_{DC_test}} E_{on_test} + \frac{I_P}{I_{P_test}} \frac{U_{DC}}{U_{DC_test}} E_{off_test} \right] \quad (10)$$

2.3 FWD 通态损耗计算

FWD 和 IGBT 的通态损耗计算类似, 一个正弦周期的平均损耗可用下式表示:

$$P_{cond_FWD} = \frac{1}{T} \int_0^T u_F(t) i_F(t) \tau(t) dt \quad (11)$$

式中, P_{cond_FWD} 是 FWD 的通态损耗, T 是调制周期, $u_F(t)$ 和 $i_F(t)$ 是正向压降和正向电流, $\tau(t)$ 是导通时间函数。

FWD 的正向压降函数和电流函数为:

$$u_F(t) = U_{TO}(T_j) + r_T(T_j) i_F(t) \quad (12)$$

$$i_F(t) = I_F \sin(\omega t) \quad (13)$$

式中, $U_{TO}(T_j)$ 是阈值电压; $r_T(T_j)$ 是 FWD 的正向电阻。快恢复二极管的导通时间函数 τ 为:

$$\tau = \frac{1}{2} [1 - m \sin(\omega t + \phi)] \quad (14)$$

将式 (2.65) (2.66) (2.67) 代入 (2.64) 并积分, 可得:

$$P_{cond_FWD} = \frac{1}{2} [U_{TO}(T_j) \frac{I_F}{\pi} + r_T(T_j) \frac{I_F^2}{4} - m \cos \phi [U_{TO}(T_j) \frac{I_F}{8} + \frac{1}{3\pi} r_T(T_j) I_F^2]] \quad (15)$$

2.4 FWD 开关损耗计算

快恢复二极管开关损耗主要是关断损耗, 开通损耗极小, 可以忽略。因此, 本文只计算 FWD 关断损耗, 亦称反向恢复损耗。反向恢复损耗与开关频率 f_{SW} 以及反向恢复损耗 E_{rec} 有关。FWD 的反向恢复损耗的计算公式为:

$$E_{rec}(I) = E_{rec}(I_{test}, T_j) (0.45 \times \frac{I}{I_{test}} + 0.55) \quad (16)$$

式中, $E_{rec}(I_{test}, T_j)$ 和 I_{test} 分别是 FWD 在测试条件下的反向恢复损耗和电流, I 是实际电流, T_j 是芯片结温。

FWD 的开关损耗为:

$$P_{SW_FWD} = P_{rr} = \frac{f_{SW}}{\pi} E_{rec}(I_{test}, T_j) (0.45 \frac{I}{I_{test}} + 0.55) \frac{U_{DC}}{U_{DC_test}} \quad (17)$$

式中, P_{SW_FWD} 和 P_{rr} 分别是 FWD 开关损耗和反向恢复损耗。

3 逆变器温度计算

IGBT 模块温度求解的关键在于建立合适的损耗模型及传热模型。通过损耗和热路模型可以计算器件结温。

在热路模型中, 将功率损耗等效成电流源, 热阻等效为电阻, 热阻产生的温差等效为电压。图 2 所示为 IGBT 模块热路模型。

根据上述分析, 可以计算出 $T_{ha}(t)$ 、 $T_{ch}(t)$ 、 $T_{jc}(t)$, 从而得到散热器温度 $T_{heatsink}(t)$ 、外壳温度 $T_{case}(t)$ 、芯片结温 $T_j(t)$ 如式 (18)。

表 1: 额定负载下 IGBT 模块各部分损耗计算结果

损耗类型	P_{cond_IGBT}	P_{SW_IGBT}	P_{cond_FWD}	P_{SW_FWD}
损耗 /W	98.6	43.6	14.3	27

表 2: 调制方式为 SVPWM 时各工况下 IGBT 模块温度及其损耗

工况	参数名称	数值	参数名称	数值
1.2 倍过载	P_{total}	232.16	T_{J_IGBT}	53.80
			T_{J_Diode}	49.92
			$T_{heatsink}$	45.30
1.5 倍过载	P_{total}	316.06	T_{J_IGBT}	59.01
			T_{J_Diode}	53.24
			$T_{heatsink}$	47.27
2 倍过载	P_{total}	489.44	T_{J_IGBT}	69.78
			T_{J_Diode}	59.83
			$T_{heatsink}$	51.26

$$\begin{cases} T_{heatsink}(t) = T_{amb} + T_{ha}(t) \\ T_{case}(t) = T_{heatsink} + T_{ch}(t) \\ T_j(t) = T_{case} + T_{jc}(t) \end{cases} \quad (18)$$

IGBT 损耗为:

$$P_{IGBT} = P_{cond_IGBT} + P_{SW_IGBT} \quad (19)$$

FWD 损耗为:

$$P_{FWD} = P_{cond_FWD} + P_{SW_FWD} \quad (20)$$

故逆变器总损耗为:

$$P_{total} = 3 \times 2 \times (P_{IGBT} + P_{FWD}) \quad (21)$$

由于器件的温度和损耗相互影响, 计算时设置所有计算点初始温度为环境温度, 通过循环迭代计算, 得到最终稳定后的结温和损耗。计算流程图如图 3 所示。

通常用热容和热阻形成的 RC 热网络描述热阻抗。Cauer 网络和 Foster 网络为两种主要的电热等效网络。Cauer 网络中的每个节点都有明确的物理意义, 可以反映 IGBT 内部每层材料的 RC 值, 如图 4 所示是从芯片到外壳的 7 层 Cauer 结构示意图。

Foster 模型是一种串联等效模型, 如图 5 所示, 芯片到外壳的一维传热模型可等效成四阶 Foster 模型。Foster 模型中的 RC 参数提取容易, 模块生产厂商会在数据手册中提供结壳热阻抗曲线, 故 Foster 模型应用更为普遍。

4 仿真结果

根据上述分析计算, 在额定负载下, IGBT 模块半桥臂的损耗计算结果如表 1 所示。

图 6 为 IGBT 模块各部位的温度曲线, 图 7 为芯片结温曲线。图 6 中 $T_{j,Q}$ 为 IGBT 芯片的结温, $T_{j,D}$ 为 FWD 结温, $T_{c,Q}$ 为 IGBT 的壳温, $T_{c,D}$ 为 FWD 壳温, T_H 为散热器的温度。如表 2 所示。

5 结论

(1) 利用解析法求解 IGBT 和 FWD 在不同工况下的损耗和温度, 并且通过比对分析可知器件的结温和英飞凌

IPOSIM 的计算结果比较吻合。

(2) 在逆变器内部 IGBT 模块各部位间, 芯片结温波动最大、峰值最高, 而散热器温度波动最小、峰值最低: 功率模块各层温度从上到下依次降低。

(3) 基于热路模型, 对逆变器的损耗展开了计算研究, 给出了额定工况下的 IGBT 及 FWD 的损耗、结温以及壳温等曲线及数据。

参考文献

- [1] 唐波, 刘任, 吴卓, 等. 三相电压源逆变器内部 IGBT 模块温度的求解及评估 [J]. 电工电能新技术, 2017, 36(02): 50-58.
- [2] BaZzi A M, Krein P T, Kimball J W, et al. IGBT and Diode Loss Estimation Under Hysteresis Switching[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1044-1048.
- [3] 张明元, 沈建清, 李卫超等. 一种快速 IGBT 损耗计算方法 [J]. 船电技术, 2009, 29(01): 33-36.
- [4] Wang B, Tang Y. Calculation of Power Consumption and Junction Temperature of IGBT Module in Inverter[J]. Earth and Environmental Science, 2021(1): 702-707.
- [5] 曾文杰, 李华, 贺冠强, 等. 地铁车辆 IGBT 瞬态结温计算方法研究 [J]. 机车电传动, 2021(06): 140-146.
- [6] 赵玉明. 高压变频器的散热器性能研究 [J]. 能源与环境, 2017(03): 153-156+161.
- [7] 周肖飞. 大功率三电平变流器电-热耦合特性分析研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.

作者简介

张猛 (1991-), 男, 内蒙古自治区赤峰市人。大学本科学历。研究方向为自动化。