

基于 NTC 热敏电阻的温度实时在线监测技术研究^{*}

王蓓蓓^{1,2}, 张 良^{1,2}, 武 丹^{1,2}, 董 亮^{1,2}, 张加林^{1,2}

(1. 中电普瑞电力工程有限公司, 北京 102200; 2. 北京市直流输配电网工程技术研究中心, 北京 102200)

摘要: 对于以 IGBT 为主的半导体器件来说, 结温升高会严重影响其工作特性, 进而影响其构成的电力电子装置的可靠性。提出了一种基于 NTC 热敏电阻的温度实时在线监测技术。利用 IGBT 模块内部集成的负温度系数(NTC)热敏电阻, 将温度信号转化为频率信号, 通过光纤隔离后输入至逻辑处理芯片(CPLD), 经逻辑处理后在上位机进行温度实时显示。该技术具有频率信号可靠性高、温度显示准确等优点。最后搭建温度实时在线监测的工程样机, 配合电力电子装置的功率运行试验, 测试不同温度下的频率值, 对该技术的有效性进行验证。

关键词: NTC 热敏电阻; IGBT 结温; 压频变换; 实时监测; 电力电子装置

中图分类号: TM133

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211590

中文引用格式: 王蓓蓓, 张良, 武丹, 等. 基于 NTC 热敏电阻的温度实时在线监测技术研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(2): 107-110.

英文引用格式: Wang Beibei, Zhang Liang, Wu Dan, et al. Research on real-time on-line temperature monitoring technology based on NTC thermistor[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(2): 107-110.

Research on real-time on-line temperature monitoring technology based on NTC thermistor

Wang Beibei^{1,2}, Zhang Liang^{1,2}, Wu Dan^{1,2}, Dong Liang^{1,2}, Zhang Jialin^{1,2}

(1. China EPRI Electric Power Engineering Co., Ltd., Beijing 102200, China;

2. Beijing DC Transmission & Distribution Engineering Technology Research Center, Beijing 102200, China)

Abstract: For semiconductor devices, such as IGBT, the high junction temperature will seriously affect the operation characteristics, and such affect the reliability of power electronic devices constructed by them. The real-time on-line temperature monitoring technology based on NTC thermistor is proposed in this paper. By using the negative temperature coefficient(NTC) thermistor integrated inside IGBT module, temperature signals are converted to frequency signals and transferred to the logic processing chip(CPLD) via fiber isolation. The temperature is displayed in real time on computer after logic processing. It has the advantages of high reliability and accurate display. Finally, an engineering prototype of real-time on-line temperature monitoring technology is built to verify the effectiveness of this technology by testing the frequency values at different temperatures under the experiment of the power electronic device.

Key words: negative temperature coefficient thermistor; IGBT junction temperature; voltage and frequency conversion; real-time monitoring; power electronic device

0 引言

直流输电技术由于线路成本低、输电损耗小、供电可靠性高等优点, 近年来得到广泛的研究^[1-4]。而直流输电技术的发展离不开电力电子装置的参与。在电力电子装置中, IGBT 又以其耐压高、电流大、驱动简单、可靠性高等优点占主导地位^[5]。IGBT 在正常工作过程中会产生大量损耗, 该损耗会随着运行功率的增加而显著增加, 进而导致 IGBT 模块内部结温的升高。器件结温越高, 其运行安全裕度越小, 结温波动越大, 热循环寿命越短^[6]。

因此, 监测功率器件的工作结温对于失效机理分析和寿命预测非常关键。为方便试验人员观测, 应能将 IGBT 结温进行实时显示, 从而及时调节电力电子装置的运行功率。

常见的 IGBT 结温的采集方法主要有热传感器测量法、红外探测法、电参数间接测量法、电—热耦合仿真分析法等^[7]。但热传感器测量法属于接触式, 响应速度慢, 不能实时测温; 红外探测法属于非接触式, 可以实时测量温度, 但所需要的测量设备较为昂贵, 芯片发射率的修正方法较为复杂^[8]; 电参数法可以实现温度的实时测量, 但属于对 IGBT 温度等效参数的粗略估算, 精确度不

* 基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目

高^[9]；电—热耦合仿真分析法是基于 IGBT 模块的电模型和热模型建立起来的，但该种方法在仿真中较为适用，在实际工程中，不能实现对温度的实时测量^[10]。

文献[11]提出了一种利用光纤传感器实测结温的热阻测量法，但该种方法需要将光纤探头植入 IGBT 模块内部，这对工艺要求较高，并不实用。文献[12-13]在考虑 IGBT 结温、导通压降、导通电流相互影响的基础上，对其 V-I 特性曲线进行拟合，从而将 IGBT 等效为符合欧姆定律的电阻模型来对温度进行监测，但该种方法需要考虑因素较多，计算较为复杂。

本文提出了一种采用 IGBT 模块内部自带的负温度系数热敏电阻(NTC)来进行温度实时在线监测的技术，从而实现 IGBT 结温的实时显示。先对 NTC 热敏电阻的温度特性进行曲线拟合，得出 NTC 等效电阻与温度的关系表达式；然后对温度实时在线监测技术的原理进行详细介绍，将 NTC 等效电阻转化为频率信号，并计算出频率与温度的关系表达式；然后针对上传给逻辑处理芯片(CPLD)的频率信号给出逻辑处理的程序流程；最后搭建温度实时在线监测技术的工程样机，配合电力电子装置的功率运行试验，对不同温度下的频率值进行测量，验证该技术的有效性。

1 NTC 热敏电阻

负温度系数热敏电阻(Negative Temperature Coefficient, NTC)是一种随温度升高电阻值下降的敏感元器件，具有温度测量、温度控制和温度补偿的功能^[14]。目前市面上成熟的 IGBT 模块内部均封装有 NTC 热敏电阻，该电路与 IGBT 模块的其他电气部分绝缘。因此可以使用该电阻的温度特性来监测 IGBT 的结温。

依据 IGBT 制造厂商所给出的不同温度下对应的 NTC 等效电阻值，可以绘制出 NTC 等效电阻对温度的特性曲线，如图 1 所示，其中，温度取 20 ℃~125 ℃范围。

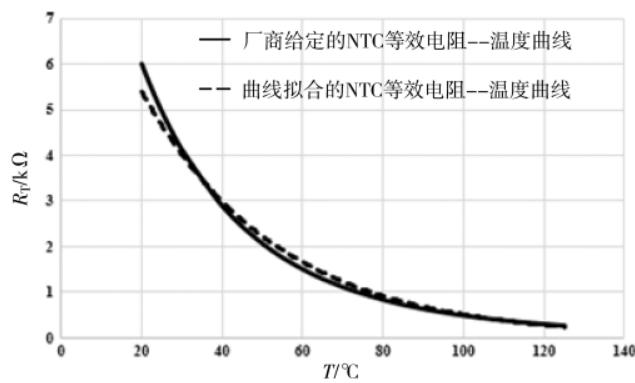


图 1 NTC 等效电阻与温度特性曲线

图 1 中，实线为供应商给定的 NTC 等效电阻值，利用最小二乘法，对该曲线进行拟合^[15]，得出 NTC 等效电阻与温度的逻辑表达式，如式(1)所示：

$$R_T = 9.2241e^{-0.029T} \quad (1)$$

式中， R_T 为 NTC 的等效电阻，单位为 $k\Omega$ ； T 为温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

图 1 中，短划线为根据式(1)绘制出的 NTC 等效电阻与温度的特性曲线，可以看出，在温度小于 30 ℃时，拟合曲线的准确度不高，但大于 30 ℃时，拟合曲线的准确度较高，可以利用式(1)进行后续温度实时在线监测的相关计算。

2 温度实时在线监测技术

在电力电子装置进行大功率运行试验时，为避免电磁干扰对温度信号的影响，需要将 NTC 等效电阻所表示的温度信号通过温度实时在线监测技术转换为频率信号，从而实现信号的隔离以及远距离传送等功能^[16]，保证温度信号传输的准确性。

2.1 实时在线监测技术

温度实时在线监测技术主要包含 5 部分功能电路：电阻分压电路、滤波电路、压频变换电路、光纤发送接收电路、逻辑处理电路，功能框图如图 2 所示。

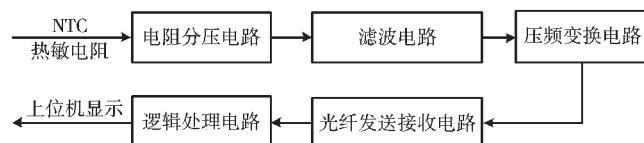


图 2 温度实时在线监测技术的功能电路框图

其中，电阻分压电路通过采用电压源、固定电阻与 NTC 热敏电阻串联，将其转换为电平信号；滤波电路采用阻容 RC 低通滤波器，对上一级的电平信号进行滤波；压频变换电路主要采用 LM331 压频变换芯片来实现，将电平信号转化为频率信号；光纤发送接收电路将频率信号进行隔离、远距离传输后，传至逻辑处理电路；逻辑处理电路采用 CPLD 芯片，对接收到的频率信号进行逻辑控制处理，转换为温度信号，上传至上位机，实现温度的实时显示。

图 3 是以 LM331 芯片为主的压频变换电路，输入电压 V_{in} 为 NTC 等效电阻经过分压电路后的电压值，经过 RC 滤波后进入到 LM331 芯片的输入引脚，配合外围的 R_t 与 C_t 、 R_L 与 C_L 的谐振电路，便可实现引脚 3 的频率信号输出。

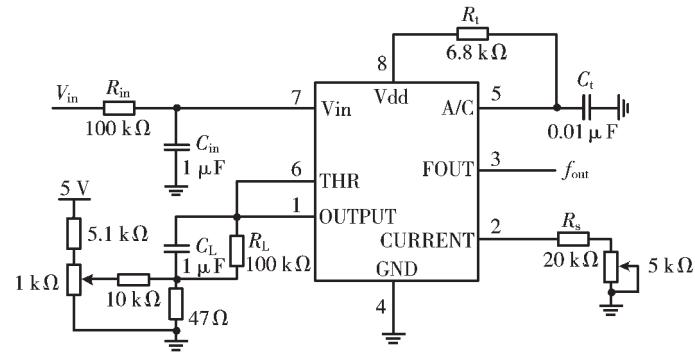


图 3 压频变换电路示意图

参照 LM331 的数据手册, 得出输出频率 f_{out} 与输入电压 V_{in} 之间的关系表达式, 如式(2)所示。

$$f_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{2.09} \cdot \frac{R_s}{R_L} \cdot \frac{1}{R_t \cdot C_t} \quad (2)$$

式中, V_{in} 为压频变换的输入电压值, 单位为 V; R_s 、 R_L 、 R_t 为 LM331 外围电路的谐振电阻, 单位为 Ω ; C_t 为 LM331 外围电路的谐振电容, 单位为 pF。

2.2 频率-温度曲线拟合

结合式(1)、式(2)以及分压电路的比例, 参照图 3 电路中的参数, 可以计算出不同温度下的频率值, 绘制出频率-温度曲线, 如图 4 所示。

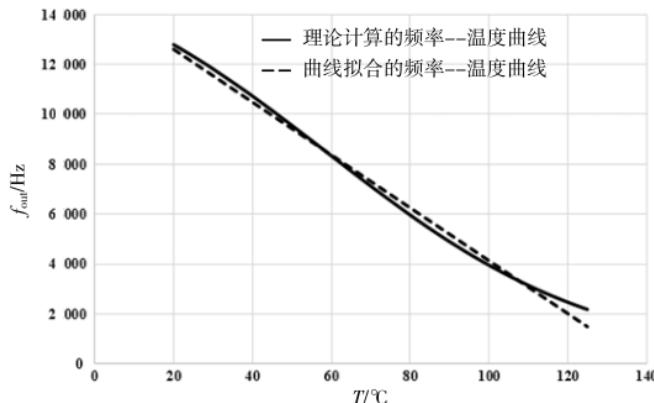


图 4 频率-温度特性曲线

其中, 实线为根据实际数据计算出的频率-温度特性曲线。对该曲线进行拟合, 可以得出表达式如式(3)所示。

$$f_{\text{out}} = -107T + 14822 \quad (3)$$

图 4 中短划线为依据式(3)所绘制出的, 可以看出, 在小于 110 ℃的温度下, 用式(3)来表示频率-温度特性曲线准确度较高。

2.3 逻辑控制流程

采用逻辑处理芯片 CPLD 对接收到的频率信号进行计数、平均值计算、温度值计算以及数值超范围报错处理, 具体程序实现流程如图 5 所示。

在 CPLD 接收到频率信号进行消抖处理后, 逻辑控制流程启动, 先在 1 s 的时间内对频率信号的上升沿进行计数, 便可得到频率值, 同时对该数值是否溢出进行判断, 当溢出时, 直接报故障上传, 当无溢出后, 进行 4 个数据的平均处理, 再依据式(3)将所得的频率值折算成对应的温度值。结合实际应用场合的环境温度、IGBT 的安全裕度以及频率温度曲线的准确率等因素, 上传至上位机的数据仅显示 20 ℃~110 ℃的温度范围。因此在程序中需要对折算后的温度值进行超范围报错判断, 当温度值大于 110 ℃时, 上位机显示温度值为 110 ℃并报错; 当小于 20 ℃时, 上位机显示温度值为 20 ℃并报错。

3 试验验证

搭建温度实时在线监测技术的工程样机试验平台, 编

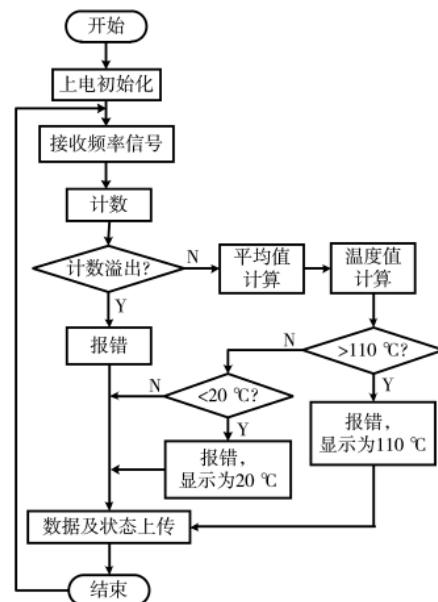


图 5 温度显示逻辑控制流程图

写相应的逻辑控制程序, 并配合电力电子装置的功率试验, 观测不同功率条件下所显示的实时温度, 测量其对应的频率值, 来验证该温度实时在线监测技术的有效性。

3.1 室温下的频率波形

搭建好工程样机试验平台后, 在电力电子装置不上主电的情况下, 测试室温时上传至 CPLD 的频率波形, 如图 6 所示。

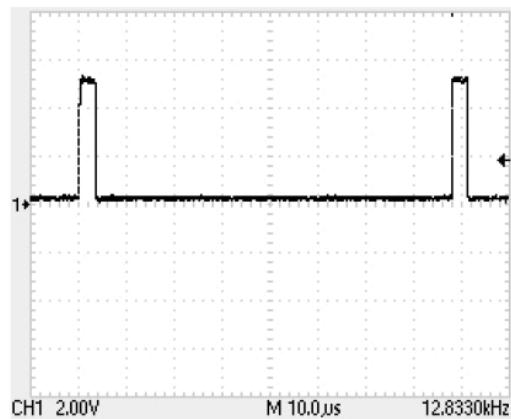


图 6 室温下的频率波形

其中, 测试时的室温为 21 ℃, 频率为 12.83 kHz, 与理论计算值相符。

3.2 频率-温度特性曲线

在电力电子装置不同的运行功率下, 观察上位机显示的温度值, 并记录此时的频率值, 并与频率理论值进行对比, 如表 1 所示。

从表 1 的数据可以看出, 试验的频率值与理论计算值的误差在频率理论值的 2% 以内, 吻合度很好, 说明该温度实时在线监测技术能够有效测量并显示 IGBT 的温度。

表 1 不同温度的频率试验值与理论值对比

温度/℃	频率理论值/kHz	频率试验值/kHz	误差百分比/%
21	12.68	12.83	1.18
30	11.80	11.80	0
40	10.71	10.69	0.19
50	9.54	9.52	0.21
60	8.32	8.29	0.36
70	7.11	7.08	0.42
80	5.95	5.92	0.50

4 结论

本文提出了一种温度实时在线监测技术,利用 IGBT 模块内部封装的 NTC 热敏电阻来反映 IGBT 温度。该技术以压频变换为主要电路功能,将 NTC 热敏电阻转换为频率信号进行传输,具有抗电磁干扰能力强、传输距离远等优点。同时采用逻辑处理芯片对接收到的频率信号进行逻辑控制处理,并在上位机进行实时显示,从而能够有效直观地查看到 IGBT 的实时温度。搭建该监测技术的工程样机试验平台,试验结果表明,上传至逻辑处理芯片的频率信号与理论计算值相符,能够有效监测并显示 IGBT 的实时温度。

参考文献

- [1] 石巍,方太勋,谢晔源,等.CLLC 型模块化输入串联输出并联直流变压器[J].南方电网技术,2017,11(4):7-22.
- [2] 张中锋,谢晔源,石巍,等.ISOP 型直流变压器的谐振网络分析与设计[J].浙江电力,2019,38(4):2-7.
- [3] Wang Zhilong, Xiao Lan, Zhao Peng. Researches on combined input-series output-parallel systems composed of full-bridge DC transformers and converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014(33):6009-6009.
- [4] 涂春鸣,兰征,肖凡,等.模块化电力电子变压器的设计与实现[J].电工电能新技术,2017,36(5):42-50.
- [5] 于坤山,谢立军,金锐.IGBT 技术进展及其在柔性直流输电中的应用[J].电力系统自动化,2016,40(6):139-143.
- [6] 孙鹏飞,罗皓泽,董玉斐,等.基于关断延迟时间的大功

(上接第 106 页)

- 130-134.
- [14] 李洪兴.变论域自适应模糊控制器[J].中国科学 E 辑,1999,29(1):32-42.
 - [15] 吴振苇,李双刚,张丽,等.基于弹载的高功率密度 LLC 变换器设计[J].电子技术应用,2020,46(11):109-113.
 - [16] 谭兵文,李春文.几种变论域伸缩因子选择方法的比较研究[J].科学技术与工程,2013,13(4):908-911.
 - [17] 骆秀秀,杨超,余岱玲,等.Buck 变换器的变论域模糊自适应 PID 控制的研究[J].工业控制计算机,2016,29(2):48-52.
 - [18] 刘杰.智能控制与 MATLAB 实用技术[M].北京:科学出版社,2017.

率 IGBT 模块结温提取方法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(13):3366-3372.

- [7] 李玲玲,许亚惠,李志刚.基于电—热耦合模型的 IGBT 模块结温计算方法[J].电源学报,2016,14(6):23-28.
- [8] 刘宾礼,陈明,唐勇,等.IGBT 芯片测温方法与温度分布研究[J].武汉理工大学学报,2013,37(1):144-148.
- [9] 杜明星,李豹,唐吉林,等.IGBT 模块结温估计方法及其温度特性研究[J].电源学报,2016,14(6):17-22.
- [10] 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(2):50-58.
- [11] 张亚玲,李志刚,姚芳,等.一种 IGBT 热阻测试方法的研究[J].河北工业大学学报,2016,45(1):1-4.
- [12] 贾英杰,罗毅飞,肖飞,等.一种符合欧姆定律的 IGBT 等效电阻模型[J].电工技术学报,2020,35(2):311-317.
- [13] 罗毅飞,汪波,刘宾礼,等.基于电压对电流变化率的 IGBT 结温变化机理及监测方法[J].高电压技术,2017,43(1):38-43.
- [14] 李旭琼,张廷玖,骆颖,等.高温 NTC 热敏电阻材料的研究进展[J].电子元件与材料,2015,34(12):7-9.
- [15] 孙庆龙.NTC 热敏电阻温度特性研究[J].大学物理实验,2013,26(4):16-26.
- [16] 丁彦闯,牛天兰,马修真.用 LM331 实现模拟信号的远距离隔离传送[J].大连铁道学院学报,2001,22(3):82-95.

(收稿日期:2021-04-02)

作者简介:

王蓓蓓(1990-),通信作者,女,硕士,工程师,主要研究方向:开关电源、器件驱动及控制系统,E-mail:wangbeimevir@sina.com。

张良(1982-),男,本科,工程师,主要研究方向:开关电源、器件驱动及控制系统。

武丹(1982-),女,硕士,高级工程师,主要研究方向:嵌入式、器件驱动及控制系统。



扫码下载电子文档

- [19] 饶刚,王威.200W 全数字开关电源设计[J].电子技术应用,2019,45(9):123-128.

- [20] 王泽峰,杨得秋,张军明.基于 LLC 的隔离型 PFC 设计与控制[J].电工技术,2020(11):14-16,22.

(收稿日期:2021-04-13)

作者简介:

饶刚(1973-),男,硕士,副教授,主要研究方向:机械 CAD/CAM、电子技术。

严帅(1993-),通信作者,男,硕士研究生,主要研究方向:机械电子工程,E-mail:yanshuai19931212@163.com。

金彬(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:LED 光照与散热。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所