

中压机电驱动系统的 SPWM 脉冲调制方案设计

王 鹏, 时春雨

(许昌许继风电科技有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 中压型机电驱动装置的脉冲调制技术较为复杂,需考虑死区、窄脉冲滤波等因素。提出一种新型正弦脉冲调制系统方案。采用 FPGA 设计 SPWM 的脉冲产生程序,提出新型的状态循环算法产生三角载波、脉冲信号,并对调制波的边沿比较进行了优化。同时,设计了 4.5 kV IGBT 的驱动板卡,给出了驱动芯片、驱动电路、滤波电路等方案。实验测试表明,所述方案的死区、脉冲宽度均满足中压 IGBT 的性能指标。

关键词: 正弦脉冲调制; 死区; 窄脉冲; 驱动电路

Abstract: Sinusoidal pulse width modulation (SPWM) technology of medium - voltage mechanical and electrical drive system is complex , and it needs considering the factors such as dead zone , narrow pulse filter. A new modulation system scheme is proposed. The FPGA is used to design the pulse generation program. The state machine cycle algorithm is also proposed to generate triangular carrier and impulse signal , and the edge of the modulation wave is optimized. At the same time , the driver board of 4.5 kV IGBT is designed , which contains the drive chip , drive circuit and filter circuit. Experimental tests show that the dead zone and pulse width of the proposed modulation system meet the performance index of medium - voltage IGBT.

Key words: sinusoidal pulse width modulation; dead zone; narrow pulse; drive circuit

中图分类号: TH39 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2017) 04 - 0082 - 05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.04.018

0 引言

目前,机电驱动领域对电力电子装置的脉冲驱动系统要求越来越高。其中,正弦脉冲调制(sinusoidal pulse width modulation, SPWM) 极为重要。中压型 IGBT 驱动装置具有电压等级高、功率大的优点,但其开通、关断时间较长,调制技术较为复杂。对于半桥型低压 IGBT 结构,死区通过驱动芯片即可完成,不必使用现场可编程门阵列(FPGA) 去处理。但对于 T 型三电平、多电平等非对称的中压 IGBT 拓扑^[1],死区无法通过驱动芯片设计,只能通过 FPGA 算法来设计。

现有文献对 FPGA 设计死区、窄脉冲的研究较少。文献[2-3]研究了 FPGA 的 SPWM 调制方案,给出了 SPWM 的算法原理,通过设计 FPGA 的通信、三角载波比较模块得到可调脉冲源。但其局限于低压 IGBT 的设计,未研究死区、窄脉冲的处理。文献[4]设计了一种死区处理方法,但未考虑三角载波、调制波在阶梯波边沿比较发生窄脉冲的情况,此窄脉冲加死区后会引引起脉冲失真。且其延时参数选型

较小,不适用于中压 IGBT 的调制。

下面提出一种新型中压 IGBT SPWM 调制系统,包括 FPGA 的软件设计、IGBT 的硬件驱动板卡设计。给出了 FPGA 软件流程图、驱动板卡电路图。对 50 Hz 正弦调制波的测试表明,脉冲宽度、死区时间、谐波特性均较为理想。

1 中压驱动系统的脉冲调制原理

1.1 SPWM 调制原理

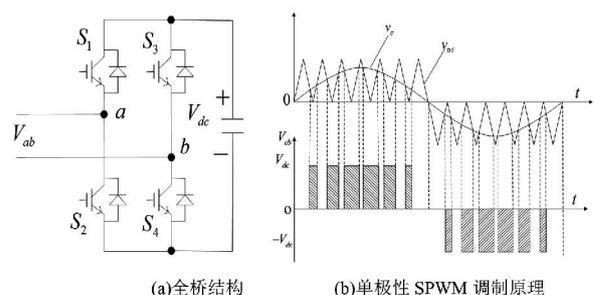


图1 全桥型拓扑的单极性 SPWM 调制

对于三电平、多电平拓扑的调制方案,均可等效成以 SPWM 调制为基础的扩展^[5],其脉冲仍存在互补型 PWM 脉冲。因此,以全桥 IGBT 结构为研究基础,见图

1. 其中: V_{ab} 为调制输出的交流侧电压; V_{dc} 为直流电压; v_c 为控制系统的参考调制波; v_{tri} 为三角载波。

单极性 SPWM 的原理如下: 1) 在 v_c 正半周内, 当调制波 v_c 大于三角波 v_{tri} 时 输出 V_{dc} 电平; 反之则输出零电平。2) v_c 负半周采用同样的调制方法, 并进行倒相操作。3) 相电压 V_{ab} 为在 V_{dc} 和 $-V_{dc}$ 间跳变的脉冲波, 载波频率 f_{tri} 与调制波频率 f_c 之比为载波比 N_f 。

目前, 国内外各厂家的中压 IGBT 电压等级为 3.3 kV、4.5 kV、6.5 kV 几种类型, 其结构包括压接式、焊接式两种类型。由表 1 可见, 中压 IGBT 的开通、关断时间较长, 是低压 IGBT 的 2~5 倍甚至更长。通过计算中压 IGBT 的损耗, 实际产品的开关频率通常较低, 一般选择 1 kHz 左右^[6] 这也要求避免产生较窄的脉冲。总之, 中压 IGBT 调制技术要求具有较大的死区和脉冲宽度。

表 1 不同电压等级的 IGBT 参数表

| 型号 | 电压等级/kV | 开通延时/ μ s | 关断延时/ μ s |
|-------|---------|---------------|---------------|
| IGBT1 | 4.5 | 0.7 | 7.5 |
| IGBT2 | 3.3 | 0.6 | 3.2 |
| IGBT3 | 1.7 | 0.6 | 1.3 |

表 1 中, IGBT1 为东芝的 ST1500GXH24, 额定电压 4.50 kV, 采用压接式封装。IGBT2 为英飞凌的 FZ1500R33HE3, 额定电压 3.3 kV, 采用焊接式封装。IGBT3 为英飞凌的 FF1000R17IE4, 额定电压 1.7 kV, 采用焊接式封装。

1.2 中压 SPWM 调制系统总体方案

以表 1 中的 IGBT1 为研究对象, 给出了 SPWM 调制系统的总体设计方案, 见图 2。

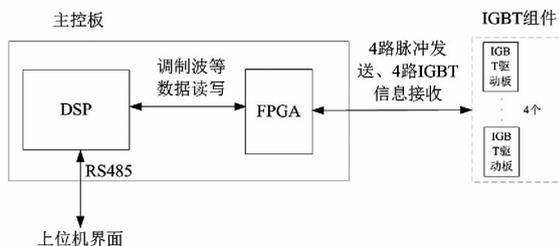


图 2 SPWM 调制系统的总体方案

图 2 中, 主控板采用 DSP + FPGA 结构; 每个 IGBT 采用单独的驱动板, 每个驱动板具有一收一发光纤。DSP 负责进行调制波 v_c 的产生, 完成控制、逻辑方案的操作; FPGA 负责接收调制波、产生三角波, 最终计算出 PWM 脉冲; 驱动板接收 FPGA 光纤信号, 并将光信号转化为驱动电压信号。上位机界

面可对调制波进行设置, 并设置启停命令。

2 FPGA 的软件方案

图 3 为 FPGA 软件方案示意图, 操作如下:

1) 进行时钟分频处理, 产生两路互补的高精度的三角载波信号, 接收 DSP 的正弦调制波信号 v_c 。

2) 利用状态循环算法进行调制波、三角载波的比较, 产生初步的 PWM 调制信号。如图 1 所示, S_1/S_2 互补, S_3/S_4 互补。

3) 施加死区、窄脉冲滤波处理, 进行故障检测。

驱动板卡的功能如下:

1) 接收 4 路光纤信号, 将其转化为电压信号, 供给驱动芯片; 输出门极 ± 15 V 的高低电平驱动。

2) 滤波电路对 IGBT 的 V_{ce} 进行检测, 并与驱动芯片进行信号交互。同时, 处理退饱和、过流等故障。

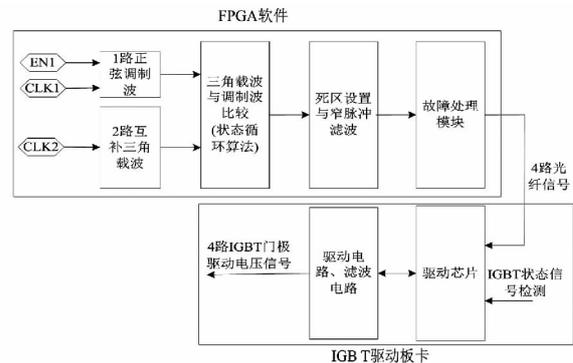


图 3 FPGA 软件方案示意图

2.1 三角载波的编程实现

采用“状态循环算法”实现三角载波的发生, 其 VHDL 程序实现的状态机如图 4、图 5 所示。

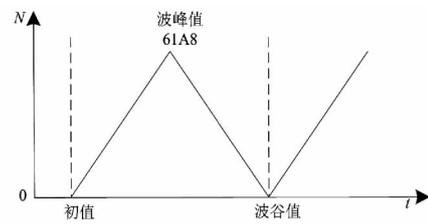


图 4 三角载波示意图

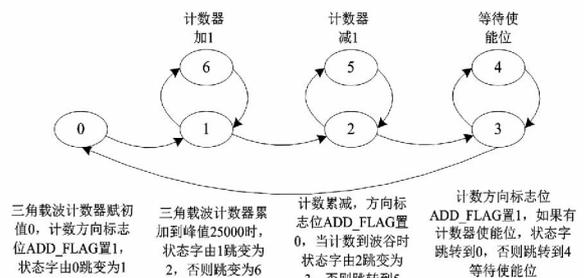


图 5 三角载波生成的状态循环算法

图4中,三角波的频率为250 Hz,计数器计数时钟为100 MHz,每8个计数时钟计数器TRICOUNTER增加1,三角载波的峰值理论计数值为25 000(61A8)。当出现正弦波的负半轴时,调制波及三角载波整体往上偏移25 000。

图5中,计数器存在几种状态字的变换。在计数器TRICOUNTER加到峰值25 000时,则每8个计数时钟三角载波计数器开始减1,等到三角载波计数器的值减到0时,三角载波计数器的值再增加。当存在持续的使能信号时,三角载波计数器会重复0~6的状态,实现循环的载波信号输出。

2.2 调制波与三角载波比较的编程实现

- 0: 实时更新调制波
 - 1: 保持状态字0跳转前的调制波
- 当调制波与三角载波相等时,状态字从0跳转至1
当三角载波大于调制波最大限幅的峰值时,状态字从1跳转至0
当调制波与三角载波相等时,状态字从0跳转至1

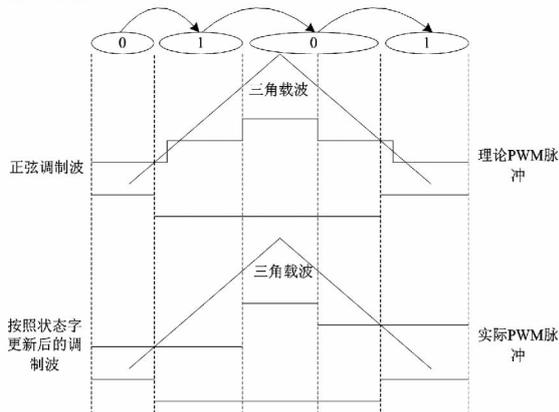


图6 调制波与三角载波比较的状态循环算法

图6中,采用“状态循环算法”实现调制波、三角载波比较。正弦调制波是数字化的阶梯波。如果在阶梯波切换的边沿发生了三角载波相交,则会出现较窄的脉冲。窄脉冲经死区处理后容易造成脉冲失真。

这里提出了状态循环算法,利用正弦波在一个三角载波周期只相交两次的原理,进行改进:1)三角载波、调制波第1次相等时,保持该调制波固定,防止出现阶梯变化;2)此后,当检测到三角载波大于调制波的最大限幅时,再更新调制波,允许第2次相交;3)第2次相交后仍保持调制波固定,防止其出现阶梯变化。

2.3 死区设置的编程实现

由于中压IGBT器件的关断延时通常比低压器件较长,在设置死区时,需考虑关断延时。图7中,结合东芝ST1500GXH24的技术参数,并参考外围驱动电路的实验测试,最终确定死区时间为20 μs。在图1中,死区应设置在S₁/S₂、S₃/S₄之间。

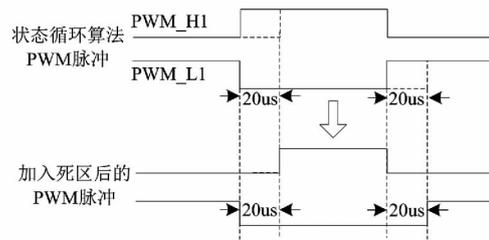


图7 死区设置原理图

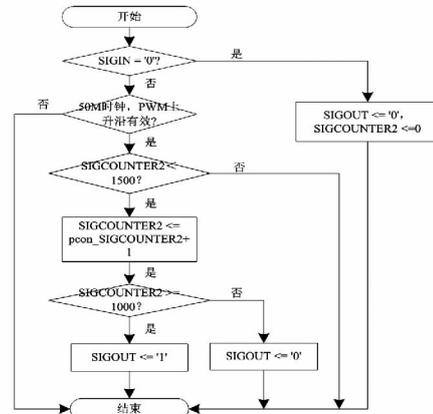


图8 死区设置的程序流程图

图8中,变量如下:

- 1) SIGIN, std_logic 输入;
- 2) CLK_1M, std_logic 工作时钟 50 MHz;
- 3) SIGOUT, std_logic 输出信号。

图8还要考虑最小脉宽的选择,一般最小脉冲宽度不小于死区,并通过IGBT的热损耗仿真等确定最小脉冲为20 μs。为了提高精度,死区的检测周期为SIGCOUNTER2 = 1 500,即30 μs处理一次死区,这样经过死区处理后的脉冲最小为10 μs。经过死区处理后,仍有可能产生小于20 μs的脉冲。因此,还要做20 μs的最小脉冲滤波处理。

2.4 故障处理软件设计

FPGA需要对IGBT的故障进行检测,以保证及时的闭锁脉冲处理^[7]。故障处理主要分为两类:一类是驱动板卡传输的驱动故障;另一类则是驱动板卡的电源故障,如图9所示。当判定故障后进行封锁脉冲操作;当系统复位有效时,所有故障均要清零。

3 IGBT的驱动板卡硬件设计

对于4.5 kV IGBT,采用了单独的驱动板卡控制单管IGBT。每个IGBT的驱动板卡如图10所示。该图包括光纤接口电路、驱动芯片、门极驱动电路、滤波电路等。

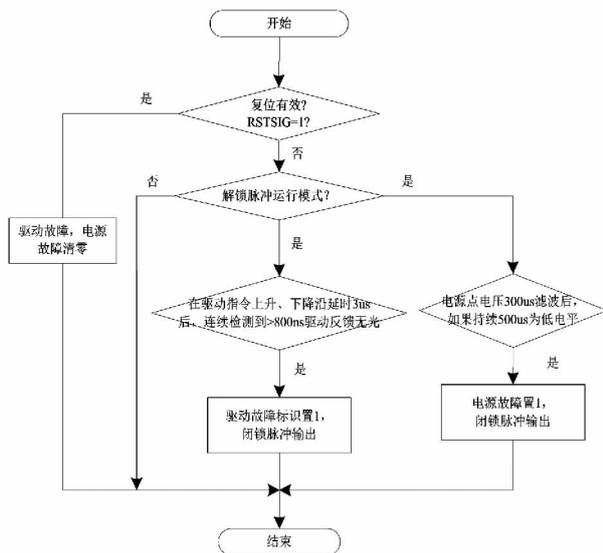
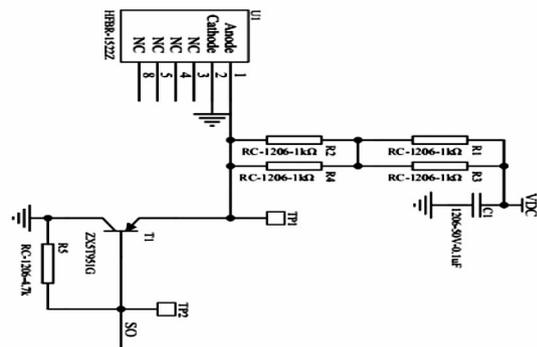
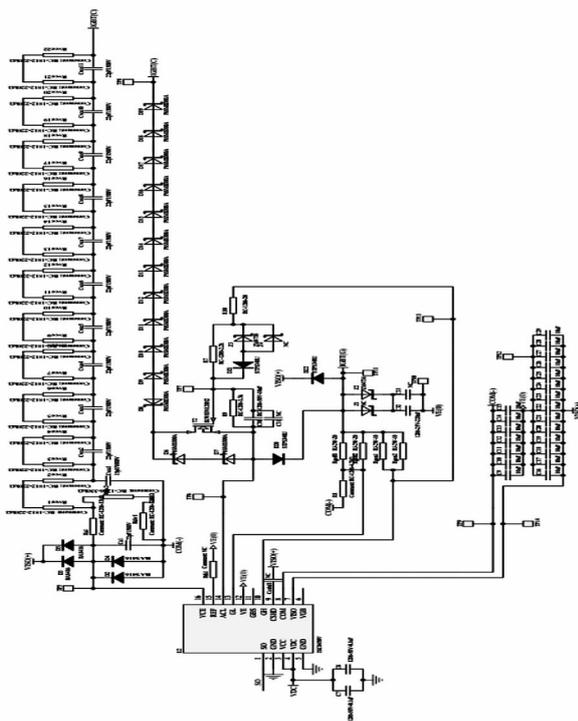


图9 故障处理程序流程图



(a) 光纤接口电路



(b) 驱动芯片与驱动电路

图10 驱动板卡电路图

图10中, 光纤接口电路接收FPGA的输入PWM信号。驱动芯片采用concept公司的驱动芯片1SC0450。其中, SO为FPGA的光纤信号转化的输入电平; V_{ce} 为IGBT的输出电压检测, 其外接有滤波电路; GH与GL为门极驱动电压输出, 即 $\pm 15V$; 该芯片会对退饱和、过流等故障进行检测。

4 实验验证

4.1 实验电路

按照图11搭建了实验系统, 参数如下: 直流电压源 $V_{dc} = 1kV$; 设计DSP的中断频率为2kHz, 用于产生50Hz正弦调制波, 幅值0.5; 三角载波 v_{tri} 频率为250Hz; 死区时间设为20 μs ; 最小脉宽设为20 μs 。

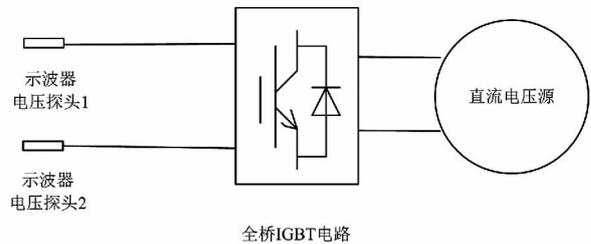


图11 SPWM调制实验电路

当直流电压稳定后, 对 S_1/S_2 管的死区、互补脉冲进行测试, 并测试交流侧输出的SPWM电压。最后, 利用泰克示波器汇总实验波形。

4.2 实验结果

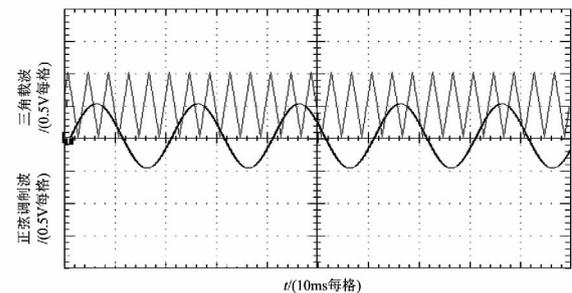


图12 FPGA中的调制波与三角载波信号

采用DA数模转换电路, 将FPGA的数字量信号转化为电压信号, 输出到示波器。其中, 1V代表数字量的幅值为1。

图12中, 单极性调制的正弦调制波与正半周的三角载波进行比较, 根据比较结果产生PWM脉冲信号。由于三角载波的频率高于正弦波, 正半周共产生5次相交。

图13中, 由于 S_1/S_2 两管互补, 因此 V_{ge1} 、 V_{ge2} 应在 $\pm 15V$ 之间互补切换, 并设置死区20 μs 。由于

外围驱动电路、杂散电感的影响,IGBT的开通时间比技术手册中的时间长,约为 $4\ \mu\text{s}$;关断过程也较长,约为 $16\ \mu\text{s}$ 。可见,脉冲的死区时间约为a、b间隔 $20\ \mu\text{s}$,能够满足开通、关断技术要求。

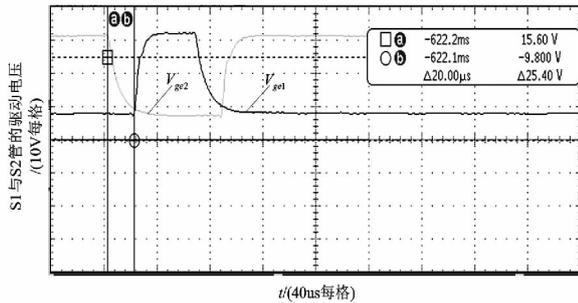


图13 加入死区的 S_1 、 S_2 门极驱动电压波形

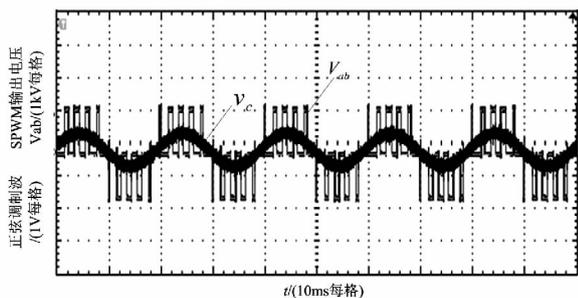


图14 交流侧输出的SPWM脉冲电压

图14为全桥电路输出的SPWM脉冲电压。可见,连续开关动作时,单极性调制的脉冲 V_{ab} 与正弦调制波 v_c 的变化趋势基本一致。由于三角载波的频率较低,在每个正弦波的半周共对应5个脉冲高电平。该输出脉冲的正负电平切换平滑,且无 $20\ \mu\text{s}$ 之下的窄脉冲,满足中压IGBT的性能要求。

5 结语

针对中压驱动系统的IGBT技术特性,设计了一种新型SPWM调制系统方案。对各厂家的中压IGBT

参数特性进行了对比,指出其对死区、开关频率要求较为严格。采用FPGA设计PWM信号算法,具有实时性高、软件设计灵活的优点。自主设计了IGBT的驱动板卡,驱动芯片采用了concept产品,其综合性能较为理想。所设计的SPWM调制系统可广泛应用于机电驱动、发电、自动化等领域。

参考文献

[1] 陈根,王勇,蔡旭.兆瓦级中压风电变流器的新型串联混合三电平NPC拓扑[J].中国电机工程学报,2013,33(9):48-54.

[2] 王海霞,曾成,伍萍辉.基于FPGA的高频整流SPWM波形发生器[J].电测与仪表,2013,50(1):94-97.

[3] 曹阳,凌志斌,马勤冬,等.基于FPGA的载波移相PWM发生器设计[J].电气传动,2014,44(7):19-23.

[4] 龚亚力,乔海强,钱帆,等.基于OMAPL138+FPGA的多路PWM发生器设计及应用[J].电测与仪表,2016,53(14):124-128.

[5] 李宁,王跃,王兆安.基于双调制波的三电平NPC变流器载波调制策略[J].电网技术,2014,38(3):707-714.

[6] 黄伟煌,胡书举,许洪华.中点钳位型中压三电平风电变流器的损耗分析[J].电力系统自动化,2014,38(15):65-70.

[7] 刘建平,侯凯,李伟邦,等.串联IGBT保护模块设计和故障诊断分析[J].电气传动,2015,45(10):76-80.

作者简介:

王鹏(1985),助理工程师,研究方向为风力发电机组工艺设计与开发;

时春雨(1983),助理工程师,研究方向为风力发电机组工艺设计与开发。

(收稿日期:2017-02-20)

(上接第64页)

[4] 李刚,王晓峰,周水斌,等.一种智能变电站断路器状态监测方案[J].电力系统保护与控制,2010,38(14):140-143.

[5] 关根志,贺景亮.电气设备的绝缘在线监测与故障维修[J].中国电力,2000,33(3):46-50.

[6] 戴利波.紫外成像技术在高压设备带电检测中的应用[J].电力系统自动化,2003,27(20):97-98.

[7] Boggs S. A., Stone G. C. Fundamental Limitations in the Measurement of Corona and Partial Discharge[J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulations, 1982,17(2):143-150.

[8] 何海涛,姚国珍.光纤光栅解调技术在电力系统中的应用[J].电力系统通信,2010,31(212):42-45.

[9] 郭团,赵启大,刘丽辉,等.光强检测型光纤光栅温度不敏感动态压力传感研究[J].光学学报,2007,27(2):207-211.

[10] 张燕君,姜俊波,唐瑞雪,等.新型分布式布拉格光纤光栅传感系统的研究[J].光电工程,2010,37(1):88-94.

[11] 莫德举,廖妍,傅伟铮.光纤布拉格光栅温度传感实验特性研究[J].测控技术,2006,25(3):24-26.

(收稿日期:2017-03-06)