

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2022.02.004

有缆海底观测系统浪涌电流抑制电路设计

李 超^{1,2}, 顾吉星³, 霍建玲^{1,2}, 刘松堂^{1,2}

(1. 国家海洋技术中心, 天津 300112; 2. 自然资源部海洋观测技术重点实验室, 天津 300112;

3. 国家海洋局烟台海洋环境监测中心站, 山东 烟台 264010)

摘 要: 本文分析了有缆海底观测系统中浪涌电流形成的原因, 介绍了目前通常采用的浪涌电流抑制电路。针对传统电路的不足, 本文设计了一种基于 MOSFET 场效应管的浪涌电流抑制电路, 原理是利用电容改变 MOSFET 场效应管的输出特性曲线, 延长其工作在非饱和区的时间, 通过栅极电压控制漏极电流逐渐增大, 从而达到控制浪涌电流的目的。本文阐述了浪涌电流抑制电路核心和外围电路的设计方案, 以及元器件参数的计算方法, 电路设计完成后在项目中得到应用并加以验证。实验结果表明: 电路设计达到了预期效果, 有效抑制了浪涌电流, 提高了供电系统的可靠性。

关键词: 海底观测; 浪涌电流抑制; MOSFET; 电路设计

中图分类号: P715.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2022) 02-0028-07

进入 21 世纪, 人类对海洋的探索由海面延伸到几千米甚至万米水深的海底, 海面和空间的观测技术显得捉襟见肘, 一种全新的监测技术孕育而生——有缆海底原位在线监测技术。科学家在实验室即可实时浏览海底监测仪器上传的数据, 并远程控制仪器的工作状态。海底原位在线监测技术既摆脱了船舶监测的船时限制, 又不受恶劣天气的影响, 还能通过因特网技术将大容量的视频图像源源不断地传到实验室, 使人们亲眼看到海底的景象, 开辟了海洋监测的新时代^[1]。随着海洋观测技术的发展, 鉴于海底原位在线监测技术的优势, 越来越多的国家开始有缆海底观测系统的研究和建设。美国在有缆海底观测技术方面是起步最早、种类最多、技术最全的国家, 目前建有不同专业用途的海底站网近 20 个。1996 年建成的长期生态系统观测站 (Long-term Ecosystem Observatory, LEO) 是美国第一个有缆海底观测系统, 用于长期观测近岸大陆架海水的生态环境^[2]。2015 年建成的美国海洋观测计

划 (Ocean Observation Initiative, OOI) 是目前世界上区域最大、观测范围最广、传感器种类最多的有缆海底观测系统^[3-4]。加拿大在 2009 年建成的东北太平洋时间序列海底联网试验网 (North-East Pacific Time-series Undersea Networked Experiments, NEPTUNE) 是世界上最早真正意义上的区域性海底观测网, 主干网全长 800 km, 最大水深 2 660 m^[5-6]。此外, 日本也建成了地震和海啸海底观测密集网络 (Dense Ocean-floor Network System for Earthquakes and Tsunamis, DONET)^[7]。与国外相比, 我国在有缆海底观测技术方面起步较晚, 但近些年在国家多个部门的支持下, 我们加快了这个领域的研究进度, 也取得了一定的成果, 如同济大学于 2009 年在东海小衢山建立了国内首个海底观测试验站、中国科学院南海海洋研究所于 2013 年建成海南三亚试验站, 以及浙江大学于 2014 年在东海建成的摘箬山岛海底观测网络示范系统等^[8-9]。

有缆海底观测系统是由岸基站、光电复合缆和

收稿日期: 2021-06-16

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFC1407506)

作者简介: 李超 (1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋环境监测技术研究。E-mail: 57174782@qq.com

海底控制舱组成的长期海底原位在线观测系统,控制舱的主要功能是完成电压变换和网络通信。控制舱将岸基站输送到水下的高压直流电压(通常为几百伏到一万伏)变换成直流低压(通常为12~48 V),通过统一的供电接口给科学仪器供电。控制舱供电通常由继电器控制,继电器吸合瞬间会在供电线路上产生一个很大的电流,这就是我们通常说的浪涌电流。浪涌电流产生的原因主要由供电线路上的等效电容和控制舱内滤波电容引起,电容的等效电阻很小,因此会产生很大的电容充电瞬时脉冲电流,也称为输入浪涌电流^[10-11]。浪涌电流的尖峰可能比稳态电流大几倍甚至十几倍,如不加以抑制,很容易造成后级电路保护器件烧毁、继电器开关触点熔焊及元器件受损等故障,严重影响控制舱的正常运行,进而影响整个海底观测系统的运行安全。因此,浪涌电流的抑制对控制舱的稳定运行至关重要,本文在分析浪涌电流产生机理的基础上,对浪涌电流抑制电路开展研究,分析了现有传统浪涌电流抑制电路的优缺点,设计了基于金属-氧化物半导体场效应晶体管(Metal-Oxide-Semiconductor Field-

Effect Transistor, MOSFET)的母线浪涌电流抑制电路,并详细介绍了元器件参数的计算过程,最后通过实验和示范运行对电路的性能进行验证。

1 浪涌电流产生原因分析

海底观测系统控制舱电源变换系统框图如图1所示。 C_r 为岸站到控制舱之间母线的等效电容,母线越长 C_r 值越大,当母线长为几十米时, C_r 可忽略不计,但当达到几公里甚至更长距离时,则需考虑 C_r 对浪涌电流的影响。为了抑制传导干扰,在直流/直流(Direct Current/Direct Current, DC/DC)变换器的前端通常会设置电磁干扰(Electro Magnetic Interference, EMI)滤波电路,其中含有数值较大的滤波电容。另外,DC/DC变换器本身为了滤除一些低频和低频干扰噪声,也含有大量的电容。继电器吸合瞬间,电源对滤波电容充电,直至电容充满电后电压稳定。由于电容的等效电阻很小,充电时近似于短路,因此会产生很大的瞬时浪涌电流,且电容容量越大,浪涌电流也越大^[12]。

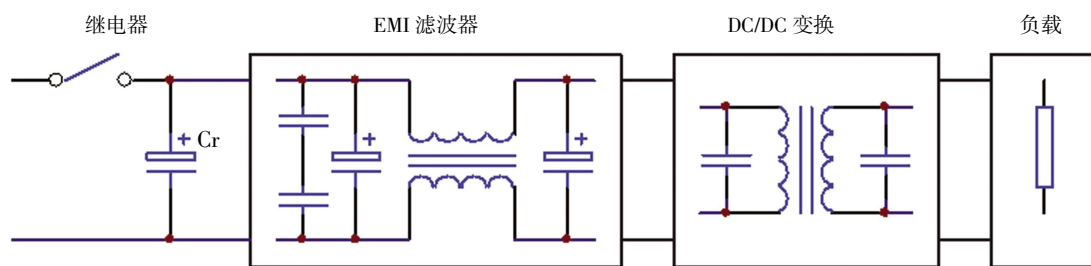


图1 控制舱电源系统框图

2 传统浪涌电流抑制电路

根据上述对浪涌电流产生原因的分析,通常采用在母线的输入端串联抑制性器件进行浪涌抑制。目前,较为传统的浪涌电流抑制方法主要有3种^[13-14]。

(1) 串联电阻。在母线上串联电阻,通电瞬间通过电阻给后面的电容充电,由于电阻具有较高的阻抗,从而减小浪涌电流。但这种方法存在缺点,系统正常工作后,串联的电阻会持续产生功率损耗。因此,对电路进行改进,在电阻上并联继电器,在系统正常工作后,通过延时电路控制继电器

吸合将电阻短路,此电路形式相对复杂,需要有专门的延时电路控制继电器。

(2) 串联负温度特性的热敏电阻(Negative Temperature Coefficient Thermistor, NTC)。NTC的阻值与温度成反比,常温下电阻较大,利用自身的高阻特性抑制浪涌电流,通电后由于自身损耗产生热量,其阻值随之降低,自身功耗也随之降低。该电路的优点是结构简单,缺点是关机后立即再次开启,NTC电阻会失去浪涌电流抑制效果,原因是NTC电阻已经处于高温状态,阻值已经非常小。

(3) 串联电感。在母线上串接一个差模电感,电感前的母线上并联一个快恢复型二极管用于续

流。电路的原理是利用电感抑制电流不能突变的基本特性,从而达到抑制浪涌电流的作用。该电路的优点是结构简单,实现方便。缺点是电感串联在回路中,产生功率损耗。另外,由于电感的体积较大,也不利于空间有限的水下密封舱体内安装。

3 基于 MOSFET 场效应管的新型浪涌电流抑制电路设计

3.1 MOSFET 场效应管的工作原理

如图 2 所示, MOSFET 场效应管在栅极电压控制下的导通过程分为 4 个阶段^[15-16]。

第 1 阶段: $t_0 \sim t_1$, 栅极电压 U_{GS} 由零上升到开启电压 U_{TH} , 这个阶段漏源极电流 I_{DS} 几乎为零, 管子处于截止状态。

第 2 阶段: $t_1 \sim t_2$, 栅极电压 U_{GS} 由开启电压 U_{TH} 继续上升到米勒平台电压, 漏源极电流 I_{DS} 逐渐增大, 这个阶段管子导通并工作在可变电阻区。

第 3 阶段: $t_2 \sim t_3$, 栅极电压 U_{GS} 维持在米勒平台电压, 管子完全导通并工作在放大区, 漏源极电流 I_{DS} 达到饱和并维持恒定。

第 4 阶段: $t_3 \sim t_4$, 栅极电压 U_{GS} 由米勒平台电压继续增大至管子的驱动电压, 此时管子完全导通。

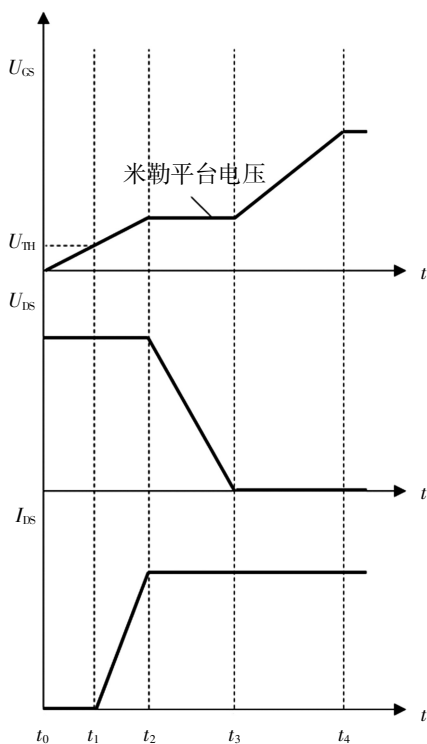


图 2 MOSFET 场效应管的导通过程曲线

MOSFET 场效应管是电压控制型器件, 当其工作在可变电阻区, 即导通过程的第 2 阶段时, 可以看作是一个压控电流源, 漏源极电流 I_{DS} 随栅极电压 U_{GS} 近似呈线性增大, 控制栅极电压的变化就能控制流过漏源极的电流大小。因此, 通过适当延长 MOSFET 管栅极输入电压建立的时间, 控制其在可变电阻区的导通过程, 使母线上的浪涌电流得到控制。

基于 MOSFET 场效应管的浪涌电流抑制电路, 除了能够解决传统电路本身固有的缺点外, 还具有体积小、开关速度快、损耗小和驱动方式简单的特点, 辅以外围器件即可方便的搭建浪涌电流抑制电路。根据内部导电沟道的不同, MOSFET 场效应管可分为 P 沟道和 N 沟道两种类型, 因 P 沟道的 MOSFET 导通电阻大、价格高和替换种类少等原因, 本文选用 N 沟道 MOSFET 设计浪涌电流抑制电路。

3.2 MOSFET 场效应管浪涌电流抑制电路设计

如图 3 所示, 输入电压为直流 375 V, 基于 MOSFET 场效应管的浪涌电流抑制电路由 MOSFET 场效应管、电阻、电容和稳压管等无源器件组成。图中 VT 为 N 沟道 MOSFET 场效应管, R1、R2 为分压电阻, R3 为限流电阻, C1 为充电电容, Cr 和 Rr 为供电系统总的等效电容和等效负载。

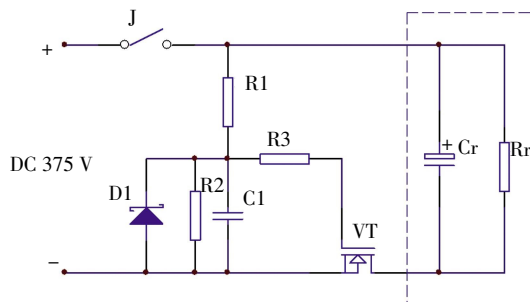


图 3 浪涌电流抑制电路

继电器 J 吸合瞬间, 由于电容 C1 两端电压不能突变, VT 的栅极电压 U_{GS} 被钳位在 0 V, VT 截止, Cr 上没有充电电流。随着输入电压经过电阻 R1 给电容 C1 充电, 栅极电压 U_{GS} 逐渐升高, 等到达开启电压 U_{TH} 后, VT 开始导通并工作在可变电阻区, 此时电流 I_{DS} 由零逐渐变大, 开始给电容 Cr 充电直至充满。随着 U_{GS} 继续升高到米勒平台电压, 最后稳定在设计的驱动电压值, VT 完全导通。整

个电路通过电阻 R_1 、 R_2 和电容 C_1 的值调整 VT 栅极电压 U_{GS} 的上升斜率,控制电流 I_{DS} 的大小,使电路得到较好的浪涌电流抑制效果。

(1) MOSFET 场效应管参数

MOSFET 管最主要的两个参数为 V_{DS} 和 I_D ,前者为漏源极耐受的最高电压,后者为最大连续漏极电流,这两个参数根据次级接驳盒的额定输入电压 U_{in} 和额定输出功率 P_{out} 确定。

控制舱的额定输入电压 U_{in} 为 375 V,考虑一定的余量,MOSFET 管的 V_{DS} 按 $1.5 U_{in}$ 计算。

$$V_{DS} = 1.5U_{in} = 1.5 \times 375 = 562.5 \text{ (V)} \quad (1)$$

额定输出功率 $P_{out} = 2000 \text{ W}$,DC/DC 变换器的效率 $\eta = 0.8$,根据欧姆定律计算母线上的额定输入电流 I_{in} ,MOSFET 管的 I_D 应不小于 $2 I_{in}$ 。

$$I_D = 2I_{in} = 2 \frac{P_{out}}{\eta U_{in}} = 2 \times \frac{2000}{0.8 \times 375} = 13.3 \text{ (A)} \quad (2)$$

根据以上计算,选用英飞凌 SPA15N60C3 场效应管,其最大漏源极耐受电压 650 V,连续漏极电流 15 A,满足电路需要。

为了保证场效应管能够长期稳定工作,其 PN 结温度 T_j 不能超过最大允许温度 150°C ,结温计算公式如式 (3) 所示。

$$T_j = T_a + P_d (R_{jc} + R_{cs} + R_{sa}) \quad (3)$$

式中, T_a 为环境温度; P_d 为管子实际功率; R_{jc} 为管子内部到外壳的热阻; R_{cs} 为外壳到散热片的热阻; R_{sa} 为散热片到空气的热阻。

该电路应用在海底观测系统的供电中,海底的海水温度较低,为了留有设计余量,我们将环境温度 T_a 设定为 40°C ;SPA15N60C3 场效应管导通时漏源极电阻 R_{DS} 为 0.28Ω ,通过的满载电流为 6.6 A,可求得此时功率 P_d 为 12.19 W;通过场效应管的技术参数规格书可知 R_{jc} 为 3.7°C/W ;当场效应管通过导热硅脂与散热器接触时, R_{cs} 的典型值为 $0.1 \sim 0.2^\circ\text{C/W}$,本文取 0.2°C/W 。

将以上数值带入式 (3),即可求得 R_{sa} 。

$$\begin{aligned} R_{sa} &= (T_j - T_a) / P_d - R_{jc} - R_{cs} \\ &= (150 - 40) / 12.19 - 3.7 - 0.2 \\ &= 5.12 \text{ (}^\circ\text{C/W)} \end{aligned} \quad (4)$$

由式 (4) 可知,选用热阻小于 5°C/W 的散热器即可保证 SPA15N60C3 场效应管的结温不超过

150°C ,选好散热器后再通过实际测量管子外壳的温度进行修正。

(2) 其他无源器件参数

电路中其他无源器件包括电阻、电容和稳压管。MOSFET 场效应管栅极的驱动电压不能超过 20 V,通常取 $10 \sim 15 \text{ V}$,驱动电压由电阻 R_1 和 R_2 分压获得。分压的同时,为了降低电阻上的损耗,需增大阻值以降低电流, R_1 取 $510 \text{ k}\Omega$ 、 R_2 取 $18 \text{ k}\Omega$,根据欧姆定律可计算驱动电压约为 13 V。 R_1 的功率损耗约为 0.257 W, R_2 功率损耗约为 0.009 W, R_1 和 R_2 可选择 5% 精度的金属膜电阻,功率分别为 1 W 和 0.25 W。 R_3 为场效应管栅极限流电阻,通常取几欧姆到十几欧姆,可采用 5% 精度的金属膜电阻,阻值 5.1Ω ,功率 0.25 W。稳压二极管 D1 用于保护场效应管不会因栅极电压过高而损坏,可选用 1N5245,其稳压值 15 V,功率 0.5 W。

R_1 的阻值确定以后,电容 C_1 的大小决定着场效应管栅极电压建立的快慢。继电器 J 吸合后,电源经过电阻 R_1 对 C_1 进行充电, C_1 上电压与时间的变化关系如式 (5) 所示。

$$U_{C1}(t) = U_{in}(1 - e^{-t/R_1C_1}) \quad (5)$$

由式 (5) 可计算出场效应管栅极电压 U_{GS} 到达米勒平台电压的时间 t_m 。

$$t_m = R_1 C_1 \times \ln \frac{U_{in}}{U_{in} - U_{GS}} \quad (6)$$

通过示波器观察,浪涌电流持续时间为 332 ms,但主要能量集中在前 200 ms,本文按 200 ms 进行设计;查询 SPA15N60C3 场效应管的参数表,其米勒平台电压为 5 V。

由式 (6) 可得式 (7)。

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{t_m}{R_1 \times \ln \frac{U_{in}}{U_{in} - U_{GS}}} = \frac{200 \times 10^{-3}}{510 \times 10^3 \times \ln \frac{375}{375 - 5}} \approx \\ &29.26 \text{ (}\mu\text{F)} \end{aligned} \quad (7)$$

电容 C_1 实际取值 $33 \mu\text{F}$ 。

3.3 试验验证

浪涌电流抑制电路板设计完成后,在核电站致灾生物监测项目的供电系统中应用并加以验证。监测系统供电控制舱电压变换控制板如图 4 所示,包括浪涌电流抑制板和电压变换控制板。电压变换控制板输入电压 375 V,输入滤波电容 $200 \mu\text{F}$,电压

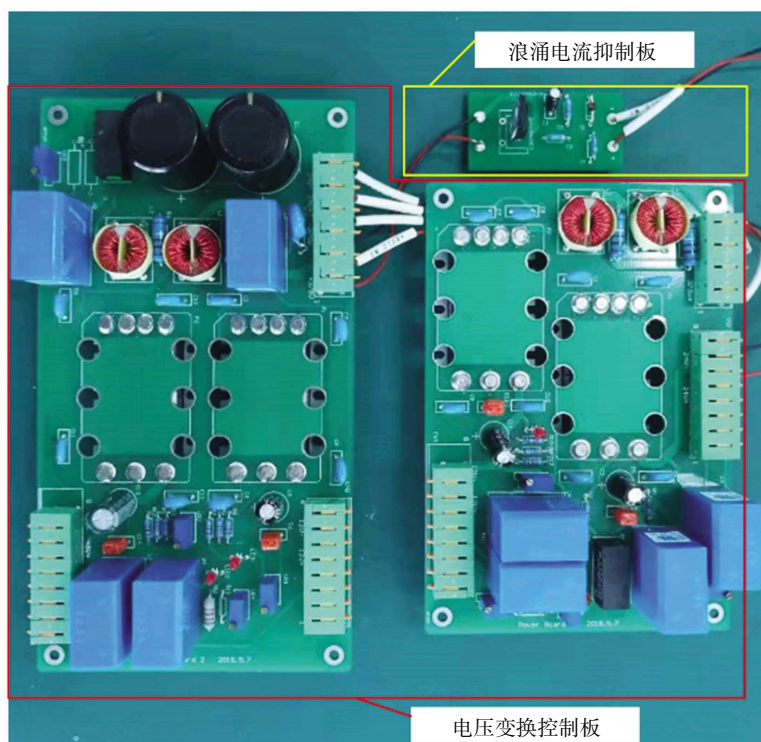


图4 电路板实物图

变换后共有4路输出,其中1路48 V、2路24 V、1路12 V,输入和输出均设有电压、电流信号采集。

测试仪器为YOKOGAWA DL950示波记录仪,分别测量了输入母线上接入浪涌电流抑制电路板和

没有接入浪涌电流抑制电路板两种情况下的浪涌电流,如图5和图6所示。图片中下半部分为上半部分浪涌电流的局部放大,从局部放大图中可以看到有两个电流尖峰,第一个电流尖峰是开机瞬间给电

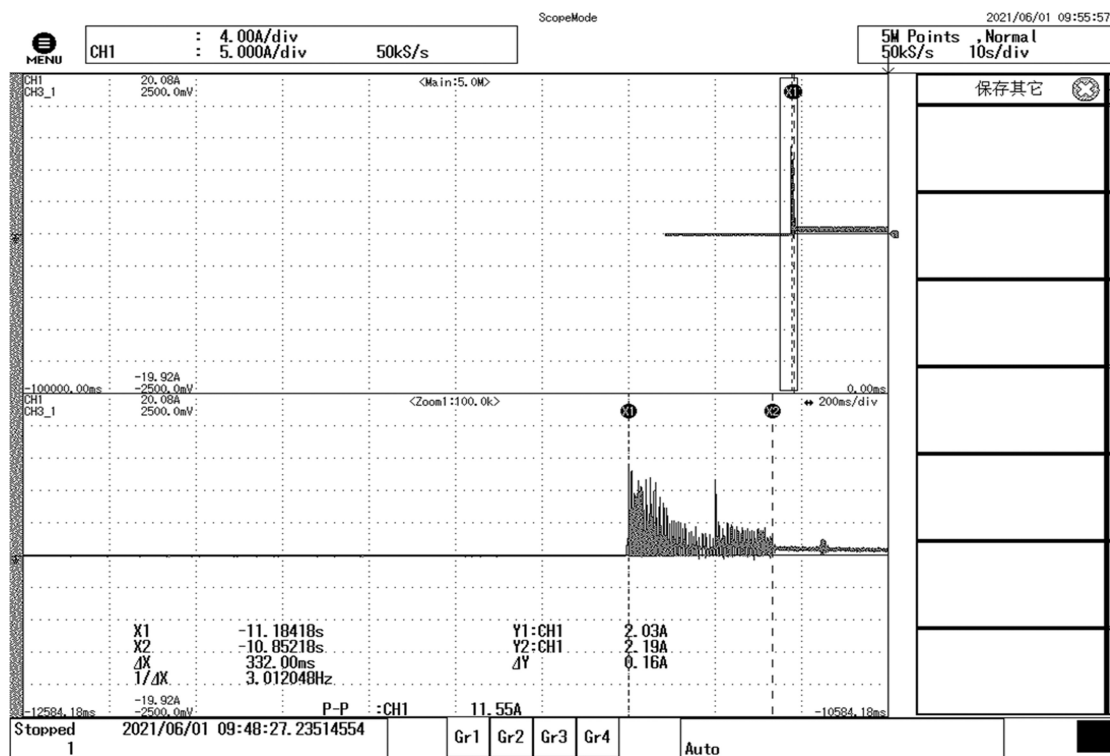


图5 未接入浪涌电流抑制板的浪涌电流波形

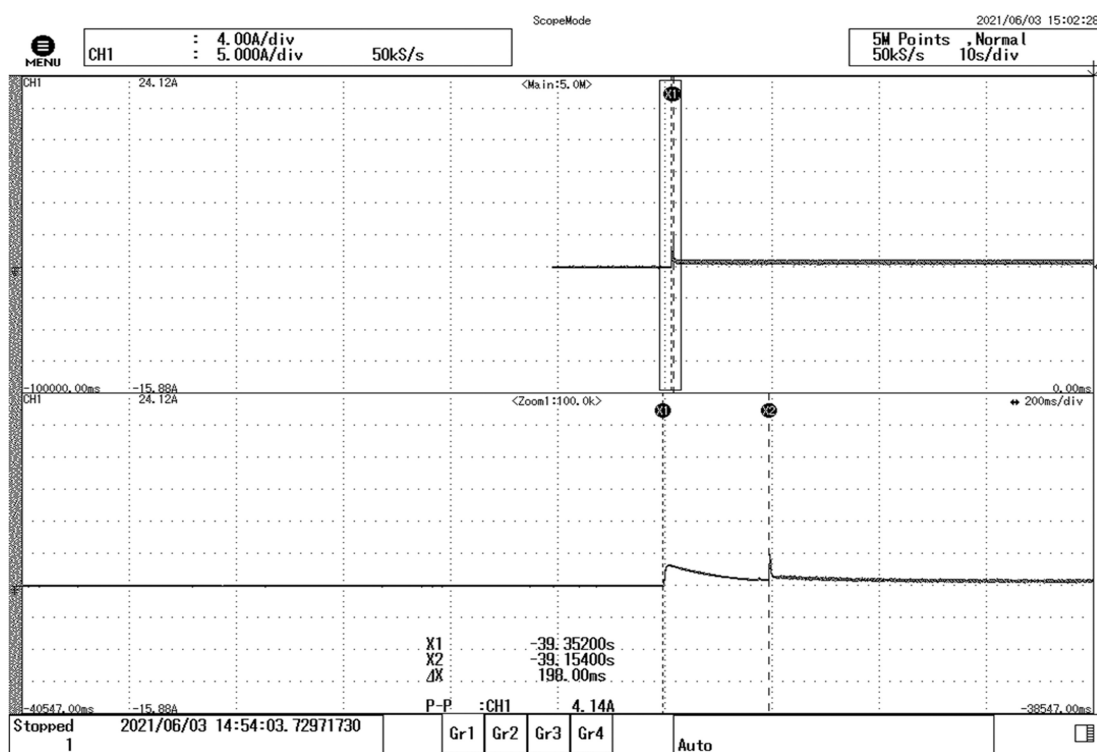


图6 接入浪涌电流抑制板的浪涌电流波形

路板上的两个滤波电容充电的电流,即主要的浪涌电流。第二个电流尖峰是给滤波电容充满电后,后级的DC/DC变换器开始工作时的浪涌电流。未接入浪涌电流抑制电路板时,开机瞬间母线上的浪涌电流峰—峰值为11.55 A,接入浪涌电流抑制电路板后的浪涌电流峰—峰值为4.14 A。可以看出,浪涌电流抑制电路将浪涌电流限制在了合理范围内,有效降低了母线上的输入浪涌电流,取得了预期的抑制效果。

4 结 论

本文通过对浪涌电流产生原因的分析,提出了一种基于MOSFET场效应管的浪涌电流抑制电路,并成功应用在国家重点研发计划“滨海核电站取水区典型致灾生物立体监控系统及应用示范”项目致灾生物监测供电系统中。在没有接入浪涌电流抑制板时,开机瞬间,电源直接给电容充电,瞬间充电电流达到11.55 A,势必对电路中元器件造成冲击,

影响使用寿命。接入浪涌电流抑制板后,开机后串联在母线上的MOSFET场效应管SPA15N60C3并未导通,母线上的电流为零,随着栅极电压逐渐增高,SPA15N60C3开始工作在可变电阻区,母线上开始出现充电电流并逐渐增大,最大充电电流为4.14 A。随着电容上的电压逐渐升高,充电电流逐渐减小,当电容充满电后,电流稳定在系统空载电流值,约0.3 A。对比浪涌电流的大小,接入浪涌电流抑制板后,浪涌电流减小为原来的三分之一。实验证明,基于MOSFET场效应管的浪涌电流抑制电路能够很好地起到供电母线上浪涌电流的抑制作用,有效地保护后级元器件,提高供电质量。致灾生物监测系统于2021年9月布放在海南昌江核电冷源取水口,截至目前供电系统一直稳定运行,保障系统获得实时的监测数据。示范期间经历多次人为停断电,恢复供电以后,系统均能正常工作,通过上位机监控软件显示浪涌电流均在可控范围内,示范运行结果表明浪涌电流抑制方案的可靠性和稳定性。

参考文献:

- [1] 汪品先. 走向深海大洋: 揭开地球的隐秘档案[J]. 科技潮, 2005, 1: 24–27.
- [2] 陈鹰, 杨灿军, 陶春辉, 等. 海底观测系统[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
- [3] 海洋地质国家重点实验室 (同济大学). 海底科学观测的国际进展[M]. 上海: 同济大学出版社, 2017.
- [4] COWLES T, DELANEY J, ORCUTT J, et al. The ocean observatories initiative: Sustained ocean observing across a range of spatial scales[J]. Marine Technology Society Journal, 2010, 44(6): 54–64.
- [5] BARNES C R, BESTMM R, JOHNSON F R, et al. Challenges, benefits, and opportunities in installing and operating cabled ocean observatories: Perspectives from NEPTUNE Canada[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, 38(1): 144–157.
- [6] CHAVE A D, WATERWORTH G, MAFFEI A R, et al. Cabled ocean observatory systems[J]. Marine Technology Society Journal, 2004, 38(2): 30–43.
- [7] 审中寅. 日本海洋实时监测系统 DONET 简介[J]. 国际地震动态, 2018, 7: 34–40.
- [8] 李风华, 郭永刚, 吴立新, 等. 海底观测网技术进展与发展趋势[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(3): 33–35.
- [9] 许惠平, 张艳伟, 徐昌伟, 等. 东海海底观测小衢山试验站[J]. 科学通报, 2011, 56(22): 1839–1845.
- [10] 王益军. 一种卫星用浪涌电流抑制电路的设计与分析[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(1): 86–88.
- [11] 韩大旺. 开关电路浪涌电流保护的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
- [12] LIU F, LIU P Z, CHAI W Y. Design of high voltage surge suppression circuit for unmanned ground vehicle computer system[J]. IEEE ICUS, 2017: 539–543.
- [13] 朱艳婷, 孙涛. 一种适用于 Boost 变换器的浪涌电流抑制电路[J]. 电子技术, 2016, 10: 79–81, 78.
- [14] 杜培德, 卢翔, 鄢毅之. 一种机载 DC/DC 浪涌电流抑制电路的设计[J]. 微电子学, 2018, 48(2): 216–221.
- [15] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [16] 姜东升, 邱羽玲. 基于 MOSFET 器件的开机浪涌电流抑制电路设计[J]. 电源技术, 2019, 43(7): 1216–1218.

Design of Surge Current Suppression Circuit for Cabled Seafloor Observation System

LI Chao^{1,2}, GU Jixing³, HUO Jianling^{1,2}, LIU Songtang^{1,2}

(1. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China; 2. Key Laboratory of Ocean Observation Technology, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300112, China; 3. Yantai Marine Environmental Monitoring Center Station of State Oceanic Administration, Yantai 264010, China)

Abstract: The paper analyzes the causes of surge current in the cabled seafloor observation system, and introduces the widely used surge current suppression methods. With regard to the shortcoming of these traditional methods, a surge current suppression circuit based on MOSFET is designed. The principle is to use the capacitance to change the output characteristic curve of MOSFET to extend its working time in the unsaturated region, and control the drain current to increase gradually through the gate voltage, so as to control the surge current. The design scheme of the core and peripheral of the surge current suppression circuit and the calculation method of the component parameters are described in detail. After the design is completed, it is applied and verified in the project. The experimental results show that the expected effect is achieved, the surge current is effectively suppressed, and the stability of power supply system is improved.

Key words: seafloor observation; suppression of surge current; MOSFET; circuit design