

DOI: 10.7652/xjtuxb201612016

一种用于高压电力电子开关的新型 多路输出隔离供电系统

辛征¹, 王秀和¹, 孙树敏², 王辉¹, 程艳², 李洪杰³

(1. 山东大学电气工程学院, 250061, 济南; 2. 山东电力科学研究院, 250002, 济南;

3. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了改善目前电力电子开关在高电压等级下隔离变压器数量过多、传统多路供电系统过于庞大的问题,提出了一种新型的多路输出隔离供电系统。采用变压器松耦合技术,为该多路隔离供电系统设计了一种新型电路拓扑结构,推导了其参数计算公式,对关键参数进行了选值与优化,并在需要 20 路输出供电的串联 IGBT 电力电子开关电路进行了实验验证。实验结果表明:在满载情况下,供电电路的输出电压稳定在 18 V,可以为 20 路电力电子开关稳定供电;系统在缩小体积和空间的基础上实现了高电压隔离,隔离直流电压高达 30 kV,并且此系统能够拓展至更多电力电子开关串联应用中。实验证明了该供电系统的实用性和设计方法的可行性。

关键词: 电力电子开关;多路输出;高压隔离;松耦合

中图分类号: TN405;TN43 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)12-0099-07

A Novel Multi-Output Isolation Power Supply System for High Voltage Power Electronic Switch

XIN Zheng¹, WANG Xiuhe¹, SUN Shumin², WANG Hui¹, CHENG Yan², LI Hongjie³

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Electric Power Science Research Institute, Jinan 250002, China;

3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To solve the problem that too many isolation transformers are required for power electronic switch at high voltage level, leading to excessive scale of traditional multi-channel power supply system, a new type of multiple output isolation power supply system is proposed, in which a novel circuit topology is designed based on transformer loose coupling technology. The calculation formula of the parameters is derived, and the key parameters are selected and optimized. The experimental verification is carried out on a series IGBT power electronic switching circuit which needs 20-way output power supplies. The experimental results show that: in the case of full load, the output voltage of the power supply circuit is stable at 18 V, and the system can stably supply power for the 20-way power electronic switches. The system realizes the high voltage isolation in reduced volume and space, and the isolated voltage reaches DC 30 kV. The system can be extended to more power electronic switches in series.

Keywords: power electronic switch; multiple output; high voltage isolation; loose coupling

收稿日期: 2016-05-06。 作者简介: 辛征(1979—),男,博士生;王秀和(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577109)。

网络出版时间: 2016-09-23 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160923.1708.016.html>

近年来,随着电力电子技术的不断发展,半导体电力电子开关越来越广泛地应用于工业生产和实践中^[1-5],包括脉冲功率技术、重复性高压脉冲发生器、核工业、静态无功补偿器、绝缘状态检测等多个领域^[6-12]。相比较于传统的气隙开关,常见的半导体开关如 MOSFET、IGBT 等具有易于直接控制、放电重复率高、使用寿命长等优点。然而,单个的半导体开关耐受电压较低,只能达到几百到数千伏,这远远不能满足行业需求,因此需要将半导体开关器件串联使用以提高其耐受电压等级,这就使得每个成品的电力电子开关将由几十甚至上百个开关器件串联而成。

电力电子开关的发展对供电系统提出了更高的要求。首先,电力电子开关使用的开关器件数量众多,需要配备具有多路输出能力的供电系统;其次,由于每种电力电子开关器件的对地电压不同,因此供电系统的各种输出电压之间需要具备高电压隔离能力;另外,为了符合电力电子开关的小型化趋势,供电系统必须具备重量轻、体积小特点;最后,在某些电压极高的场合下,电力电子开关也需要串联使用,这就需要供电系统要易于扩展,能够为更多的开关单元供电。

传统的供电系统采用单路供电形式,在每个电力电子器件的门极使用隔离变压器进行电压隔离,由于现在电力电子开关所需电压等级越来越高,隔离变压器数量也越来越多,使得供电系统过于庞大,不利于系统的扩展与应用。随着开关电源技术的不断成熟,为适应不同的应用场合,逐渐诞生了许多具备不同拓扑结构的开关供电变换器。文献[13]给出了应用于灵活交流输电系统的多路输出供电技术,该技术基于一组直流电流源实现了多路隔离供电,

然而其输出路数有限,隔离电压等级不足。文献[14]采用全桥推挽互补结构的供电系统,采用 4 个电力电子器件来实现隔离供电,但其结构稍显复杂。文献[15]提出了不同的电流源供电形式,即通过 12 个环形磁芯变压器二次侧绕组为 12 路开关模块供电,将电流源输出用一根导线穿过所有磁芯实现能量传递,然而该文献没有给出相关的控制策略,而且该供电系统属于开环系统,其工作的稳定性和可靠性有待商榷。

综上所述,本文基于反激式拓扑结构设计了一种新型的通用型多路输出隔离供电系统,不但具有给多个电力电子开关提供足够的供电能力,还具备较高的电压隔离能力,而且由于设计中包含了功率因数调节功能,使得系统更加稳定可靠。文中首先给出了该系统的电路结构和工作原理,然后根据电路结构推导了工作方程,针对一个实际的半导体开关所需的驱动能力,按照方程计算出了各个电路参数后,搭建了实际的供电电路,并对其进行了供电能力测试,试验结果证明了该系统的实用性和有效性。

1 总体方案

1.1 电路结构

如图 1 所示,多路输出隔离供电系统采用反激式变换器拓扑结构。由于只采用了一个电力电子开关 M_1 ,所以控制策略相应的得到了简化。输入侧采用一个环形变压器 T_{r1} 将电压降至 V_{ac} 输入至系统中,为了与高压半导体开关的模块化级联设计思想相对应,每一个开关单元都对应一个输出磁芯。一次侧线圈穿心绕过所有磁芯 $T_1 \sim T_n$,为所有二次侧门极驱动提供能量。需要指出的是,不同于传统的整流桥输出电容, C_1 仅相当于一个低频滤波器而

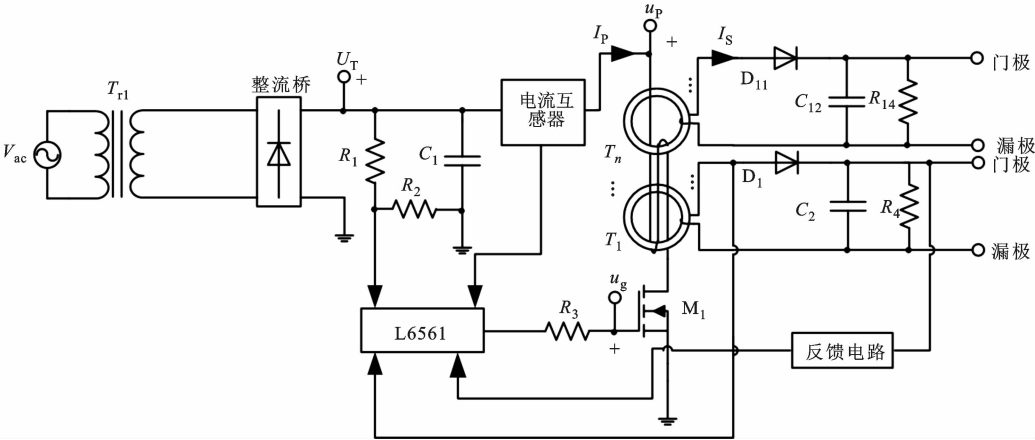


图 1 供电系统总体电路图

不是一个储能电容,因此电容值要求较低。

电路工作波形示意图如图 2 所示,其中 U_T 为整流桥输出电压, I_P 为一次侧电流, I_S 为二次侧电流, u_P 为一次侧绕组两端电压, u_g 为 M_1 门极电压。变换器由 L6561^[16-17] 控制,采用变频临界控制模式,当 I_S 降为 0 时开关 M_1 即导通。控制环由一个内部电流环和一个外部电压环组成,电压环基于比例反馈环节的标准积分控制电路,电流环通过一个电流互感器采集一次侧电流变化,通过 R_1 和 R_2 组成的电压采样电路对整流桥输出电压进行采样,将电流和采样得到的电压波形进行比较控制,得到的一次侧电流波形为半正弦波形包络的一系列电流脉冲。

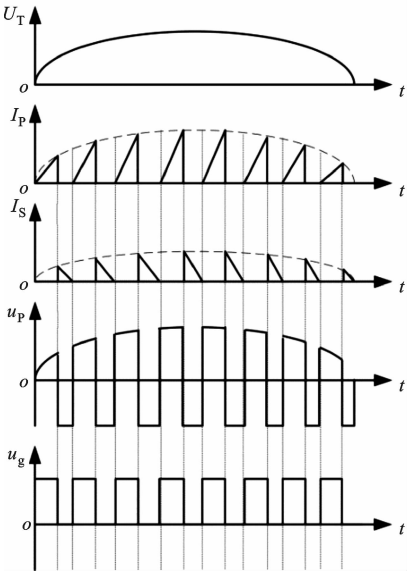


图 2 供电系统的理论工作波形

为了实现电压的多路输出,同时使该供电系统易于拓展至为更多电力电子开关单元供电,可以将单一开关单元的多个供电绕组盘绕至一个磁芯上,如图 3 所示。与传统的多路输出高电压供电电路相比,这种结构每个开关单元仅仅需要一个隔离电压变换器。假设每个开关单元内部由 n 个开关模块串联而成,那么使用该结构可以将供电系统的体积和重量减小为原来的 $1/n$ 左右。

对更多的半导体开关单元串联使用的情况,可以为每个开关单元配置一个磁芯。然后,反激变换器的一次侧绕组穿心绕过所有磁芯,其一次侧绕组并未紧密包绕于磁芯表面,而是穿心绕过所有磁芯,采用与传统变压器所用的紧耦合方式不同的“松耦合”方式为所有开关单元供电。这种设计方式使得一次侧绕组的匝数较少,一次侧电感远远小于传统的反激式供电电路,但是一次侧电流尖峰会增加,并

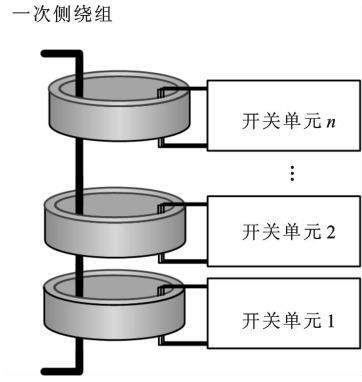


图 3 为多个半导体开关供电的方案示意图

且引入了较大的奇次谐波,因此系统中增加了功率因数调节环节,该环节将一次电流峰值包络至半正弦型整流输出电压波形内,最大程度上减小了奇次谐波的影响。

1.2 电路工作方程

如上文所述,将整流桥输出电压等效为理想的半正弦波,一次侧电流被整流桥输出的半正弦波形完全包络,则整流桥的输出电压 $V_{ob}(t)$ 和三角形电流波的峰值 $I_{pk}(t)$ 计算公式如下

$$V_{ob}(t) = V_{pk} |\sin(2\pi f_L t)| \quad (1)$$

$$I_{pk}(t) = I_{pkm} |\sin(2\pi f_L t)| \quad (2)$$

式中: V_{pk} 为输入电压峰值; I_{pkm} 为所有一次侧电流峰值中的最大值; f_L 为工频 50 Hz。

MOSFET 导通时间 T_{on} 的计算公式如下

$$T_{on} = \frac{L_p I_{pk}(t)}{V_{ob}(t)} = \frac{L_p I_{pkm}}{V_{pk}} \quad (3)$$

式中: L_p 为一次侧电感值。 l_e 和 A_e 为有效磁路长度和磁芯横截面积, L_p 、 l_e 、 A_e 的计算公式如下

$$L_p = \frac{\sigma \mu_0 \mu_r A_e N_p^2}{l_e} \quad (4)$$

$$l_e = \frac{\pi(D+d)}{2} \quad (5)$$

$$A_e = \frac{0.8(D-d)h}{2} \quad (6)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; μ_r 为磁芯的相对磁导率; N_p 为一次侧绕组匝数; D 和 d 分别为磁芯的外径和内径; h 为磁芯高度; σ 为开关单元个数。

MOSFET 关断时间 T_{off} 的计算公式如下

$$T_{off}(\theta) = \frac{L_p I_{pkm} |\sin(\theta)|}{\sigma N_{ps} V_{out}} \quad (7)$$

式中: $\theta = 2\pi f_L t$; N_{ps} 为一次侧和二次侧匝数比; V_{out} 为每个二次侧绕组的输出电压。

开关频率 f_{sw} 的计算公式如下

$$f_{sw}(\theta) = \frac{1}{T_{on} + T_{off}} = \frac{V_{pk}}{L_p I_{pkm}} D(\theta) \tag{8}$$

根据式(8),可计算出最小开关频率为 $f_{sw}(\pi/2)$, $D(\theta)$ 为占空比,它的计算公式如下

$$D(\theta) = \frac{1}{1 + K_v} | \sin(\theta) | \tag{9}$$

$$K_v = \frac{V_{pk}}{\sigma N_{ps} V_{out}} \tag{10}$$

每个磁芯上有 m 个绕组,因此系统需求的总的输入功率计算公式如下

$$P_{in} = m \sigma P_{out} / \eta \tag{11}$$

式中: P_{out} 为每个开关模块所需的功率; η 为每路输出绕组的期望工作效率。同时,每个相位的平均电流计算如下

$$I_{pvg}(\theta) = \frac{1}{2} I_{pkm} \frac{| \sin(\theta) |}{1 + K_v | \sin(\theta) |} \tag{12}$$

所以输入功率为

$$P_{in} = \overline{V_{in}(\theta) I_{pvg}(\theta)} = \frac{1}{2} V_{pk} I_{pkm} \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{\sin^2(\theta)}{1 + K_v \sin(\theta)} d\theta \tag{13}$$

峰值电流为

$$I_{pkm} = 2 P_{in} \left(V_{pk} \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{\sin^2(\theta)}{1 + K_v \sin(\theta)} d\theta \right)^{-1} \tag{14}$$

2 双开关串联供电系统的设计

基于上文所述的电路方程,本文为一套半导体开关设计了一个完整的供电电路系统。半导体开关由两个开关单元串联而成,适用于 30 kV 耐压等级的高电压场合,每个开关单元有 10 个开关电路模块组成,供电系统参数见表 1。

表 1 供电系统参数

参数	数值
额定功率 P/W	36
输入电压有效值 V/V	36
最大输出路数	20
输出电压 V_{out}/V	18
最大输出电流 I_{pkm}/A	0.1

具体的电路参数可由表 1 给出的输出功率要求得出。需要指出的是,供电系统除了提供合适的输出功率与输出电压实现多路隔离输出之外,还需要保证体积小和重量轻,以便于和半导体开关结合使用。同时,在设定电路参数的时候还要考虑到器件的工作范围。综合来看,需要权衡的参数如下。

(1)一次侧和二次侧绕组的匝数。由于每个磁

芯上有很多的二次侧绕组,因此一次侧和二次侧的匝数应该在满足供能和输出电压的基础上尽可能的小,以保证足够的绝缘距离。

(2)磁芯饱和特性。尽管功率因数调节功能在一定程度上平衡了一次侧电流波形,使得最大电流尖峰不致过大,但由于一次侧绕组匝数过于小,一次侧电流尖峰仍然是很容易引起磁路饱和的。为了避免这种状况,首先应该通过调试电路参数使得最大电流尖峰值控制在合理范围,其次应该选择合适尺寸和磁导率的磁芯。

(3)磁芯损耗。虽然开关频率 f_{sw} 随时在变化,但其值不应该太大以免增大磁芯损耗。

(4)开关导通时间 T_{on} 。由于 MOSFET 导通是一个过程,所以预设的导通时间 T_{on} 必须能保证 MOSFET 能够充分动作。

最终,具体参数可根据式(1)~式(14)以及图 4 给出的确定方法计算得出。文中所用的环形磁芯材料为缺氧体,磁芯的几何参数如表 2 所示。根据式(3)、式(8)、式(14)可计算出 I_{pkm} 和 f_{sw} ,推算出 T_{on} 随 V_{pk} 和 N_s 变化的关系。需要指出的是,一旦磁芯确定了, ΔB 也随之确定,需要控制一次侧绕组匝数 N_p 和峰值电流 I_{pkm} 以避免环形磁芯的饱和。同时,为了减小峰值电流 I_{pkm} ,需要减小 N_s ,然而随着 N_s 的减小, f_{sw} 不断增大,所以需要平衡二者之间的选择。最终经过多次试算,当 $N_p = 2$ 时,设定 $V_{pk} =$

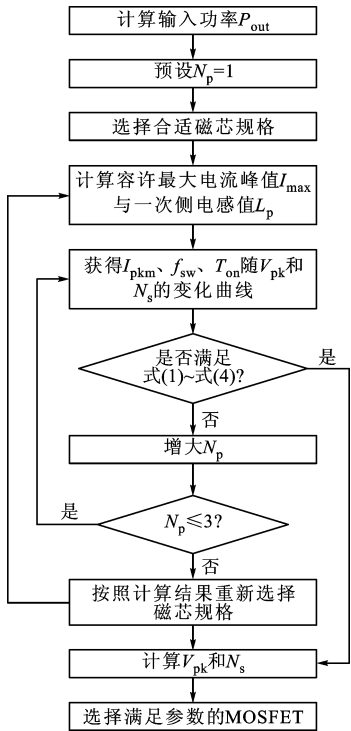


图 4 电路参数的确定方法

50 V、 $N_s=1$ 即可满足要求。

表 2 环形磁芯参数		
参数	数值	
高度 h/mm	60	
内径 d/mm	102	
外径 D/mm	64	
相对磁导率 μ_r	2 000	
饱和磁通密度 B_s/T	0.52	
剩余磁通密度 B_r/T	0.13	

3 实验结果

最终设计完成的供电电路由 3 部分构成。一次侧电路如图 5 所示,包括图 1 中一次线圈之前的所有结构;两个磁芯,每个磁芯上缠绕着 10 路输出绕组和相应的辅助供电电路,并且和各自的开关单元集成于一块电路板上,如图 6 所示。一次侧线圈穿心绕过所有磁芯,将三者耦合起来。所有输出绕组均承担不同的电压,这些输出绕组集中在磁芯中心,因此隔离电压等级选为最高电压等级。开关最大耐压为 30 kV 的直流电压,因此采用 50 kV 耐压的硅胶绝缘线。50 V 峰值的输入电压由降压变压器从外部引入。

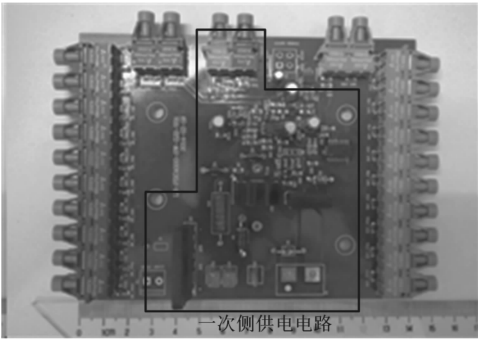


图 5 一次侧电路板实物图

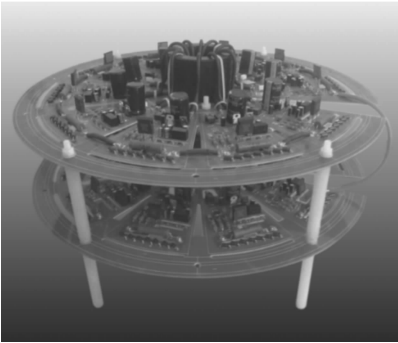


图 6 二次侧磁芯辅助供电电路与串联双半导体开关整体实物图

供电电路为双开关单元满载供电,实验波形如图 7 所示。图 7a 为 MOSFET 的源极漏极电压 V_{ds} 波形,波形基本正常,但是在 M_1 上 V_{ds} 电压有一个振铃尖峰,这是由于绕组漏感和 MOSFET 杂散电容的谐振引起的。在本文的松耦合式反激变换器拓扑结构中,一次侧绕组只有两匝,因此这种现象是无法避免的。但是,从实验结果可以看出,其尖峰电压最高不超过 200 V,而本供电系统中使用的 MOSFET 额定耐压为 500 V,故而有很大的裕量。因此,这种振铃现象不会对系统的可靠工作产生影响。

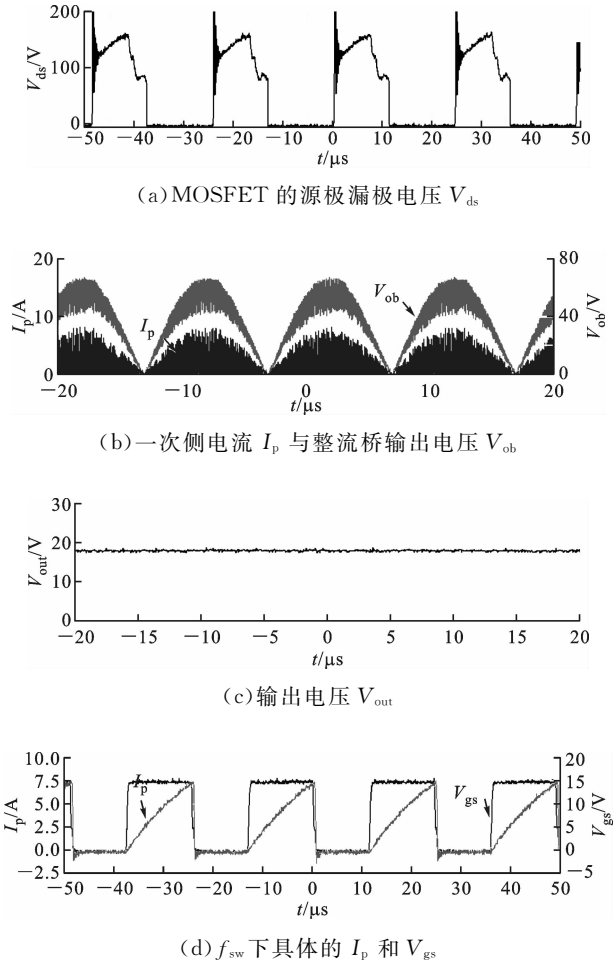


图 7 双开关单元供电时的关键实验波形

图 7b 为一次侧电流 I_p 与整流桥输出电压 V_{ob} ,由波形可知一次侧电流 I_p 被半正弦波包络,和整流桥输出电压波形 V_{ob} 类似,功率因数调节功能正常发挥了作用。

图 7c 为输出电压 V_{out} ,由图可知和预设值相同,满载情况下的输出电压稳定在 18 V。

图 7d 给出了振荡频率最小时具体的 I_p 和 M_1 的门极电压 V_{gs} 。由式(8)可知, I_p 在振荡频率最低时达到最大值,在图 7d 中 $I_{pkm}=7.5\text{ A}$,此时 $f_{sw}=$

42 kHz, $T_{on} = 14 \mu s$ 。由此可知, M_1 导通时 ($V_{gs} = 15 V$) I_p 迅速上升, M_1 关断时 I_p 迅速降为 0, 开关元件可以在满载的情况下迅速完成开关动作, 供电系统完全可以正常工作。

同时, 由图 5 可以看到, 每个开关单元由 10 个 IGBT 开关模块串联而成, 但为其供电仅仅需要一套隔离式反激变压器, 与传统的供电系统相比, 体积和重量都减小为了原来的 1/10 左右。

4 结 论

本文设计了一种新型的为高压半导体开关供电的松耦合多路输出隔离供电系统。该系统不但能够给多个半导体开关提供足够的供电能力, 而且具备较高的电压隔离能力。文中推导了系统各参数的计算公式, 对电路中的关键参数 I_{pkm} 、 f_{sw} 和 T_{on} 等进行了选值与优化。实验证明, 该供电系统设计方法可靠, 能够为双单元串联的半导体开关(每个开关单元包括 10 路开关模块), 给予可靠供电。开关元件可以在满载的情况下迅速完成开关动作, 供电系统工作正常。通过采用反激式变换器拓扑结构, 系统与传统供电系统相比, 体积和重量大大减小了。与此同时, 系统在缩小体积和空间的基础上又实现了充分的高电压隔离, 隔离直流电压高达 30 kV, 高压隔离多路供电系统确实有效。

包含本供电系统的半导体开关已作为关键部件集成在电力电缆绝缘状态检测设备中, 此后会将此供电系统用于其他需要多路输出隔离供电的场合, 如发光二极管 LED 驱动等系统中。

参考文献:

- [1] 骆东旭, 李尊朝, 关云鹤, 等. 一种新型 GaAs 基无漏结隧穿场效应晶体管 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(2): 68-72.
LUO Dongxu, LI Zunchao, GUAN Yunhe, et al. A novel GaAs-based tunnel field-effect transistor without drain junction [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(2): 68-72.
- [2] 李远洁, 江凯, 刘子龙. 低温增强型非晶钢镓锌氧薄膜晶体管特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(12): 1-5.
LI Yuanjie, JIANG Kai, LIU Zilong. Characteristics study of low temperature enhanced amorphous in GaZnOTh in film transistors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(12): 1-5.
- [3] ELASSER A, PARTHASARATHY V, TORREY D

- A. A study of the internal device dynamics of punch-through and nonpunch-through IGBTs under zero-current switching [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 1(1): 21-35.
- [4] BRYANT A, SHAOYONG Y, MAWBY P, et al. Investigation into IGBT dV/dt during turn-off and its temperature dependence [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10): 3019-3031.
- [5] DUJIC D, CHUANHONG Z, MESTER A, et al. Power electronic traction transformer-low voltage prototype [J]. Power Electronics, 2013, 28(12): 5522-5534.
- [6] SANDERS H D, GLIDDEN S C. 2 500 Hz 16 kV high current thyristor based solid state switch [C]// Proceedings of the 2008 IEEE International Power Modulators and High Voltage Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 369-370.
- [7] LIU K F, LUO Y, QIU J. A repetitive high voltage pulse adder based on solid state switches [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(4): 1076-1080.
- [8] RYOO H J, KIM J S, RIM G H, et al. Development of 60 kV pulse power generator based on IGBT stacks for wide application [C]// 2006 IEEE International Power Modulator Conference. Washington, DC, USA: IEEE Electron Device Letters, 2006: 511-514.
- [9] KON H, TOBITA M, SUZUKI H, et al. Development of a multiple series-connected IGBT converter for large-capacity STATCOM [C]// The 10th International Power and Energy Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 2024-2028.
- [10] TAKAHASHI T, OKAMOTO T. Insulation diagnosis for XLPE cables using damping oscillating high voltage [C]// 2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 471-474.
- [11] ZORNGIEBEL V, HECQUARD M, SPAHN E, et al. Modular 50 kV IGBT switch for pulsed-power applications [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 364-367.
- [12] 王润新, 刘进军, 侯丹. 用于实现互联系统仿真的电源模块大信号模型 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(6): 76-81.
WANG Runxin, LIU Jinjun, HOU Dan. Large-signal model of power supply mules for implementing inter-connected system simulations [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(6): 76-81.
- [13] ZHANG Yanli, FEI Wanmin, LU Zhengyu. A novel

- isolation power supply for gating multiple devices in FACTS equipment [C]//2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 117-119.
- [14] FEI Wanmin, LU Zhengyu, XIA Linghui, et al. A novel high-voltage isolation power supply for multiple devices driving [C]//2004 the 4th IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 111-114.
- [15] AHMAD A A, ABRISHAMIFAR A, MIRZARGAR M. A current source power supply for driving of series connected power switch [C]//2008 the 43th IEEE International Universities Power Engineering Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-4.
- [16] 王志鹏,陶生桂,汤春华. 基于 L6561 的电流准连续模式 APFC 电源设计 [J]. 通信电源技术, 2004, 21(4): 9-12, 15.
- WANG Zhipeng, TAO Shenggui, TANG Chunhua. Design of APFC circuit operated in critical current mode based on L6561 [J]. Telecom Power Technologies, 2004, 21(4): 9-12, 15.
- [17] 任泽成,王志强,周长亮. 有源功率因数校正控制器 L6561 的 PSIM 仿真分析和应用 [J]. 电源世界, 2007(12): 58-60.
- REN Zecheng, WANG Zhiqiang, ZHOU Changliang. Simulation and application of the APFC controller L6561 based on PSIM [J]. The World of Power Supply, 2007(12): 58-60.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 31 页)

- [11] TAFLOVE A, HAGNESS S C. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method [M]. Norwood, MA, USA: Artech House, 2005: 28.
- [12] BERENGER J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. Journal of Computational Physics, 1994, 114: 185-200.
- [13] SACKS Z S, KINGSLAND D M, LEE R, et al. A perfectly matched anisotropic absorber for use as an absorbing boundary condition [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1995, 43(12): 1460-1463.
- [14] GEDNEY S D. An anisotropic PML absorbing medium for the FDTD simulation of fields in lossy and dispersive media [J]. Electromagnetics, 1996, 16(4): 399-415.
- [15] 葛德彪,闫玉波. 电磁波时域有限差分方法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 81.
- [16] MANSOURABADI M, POURKAZEMI A. FDTD hard source and soft source reviews and modifications [J]. Progress in Electromagnetics: Research C, 2008, 3(3): 143-160.
- [17] REID A J, JUDD M D, STEWART B G, et al. Partial discharge current pulses in SF₆ and the effect of superposition of their radiometric measurement [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2006, 39(19): 4167-4177.

[本刊相关文献链接]

- 张亮,车斌,韩旭涛,等. 负极性振荡雷电冲击电压下 SF₆ 尖板模型局部放电特性. 2016, 50(4): 108-116. [doi:10.7652/xjtuxb201604017]
- 钟理鹏,汲胜昌,刘凯,等. 低微水的体积分数对 SF₆ 局部放电及分解特性的影响. 2016, 50(3): 112-119. [doi:10.7652/xjtuxb201603018]
- 赵煦,孟永鹏,成永红,等. 变压器绕组对局部放电电磁波传播特性的影响. 2015, 49(4): 6-11. [doi:10.7652/xjtuxb201504002]
- 任重,董明,任明,等. 冲击电压下 SF₆ 气体在极不均匀场中局部放电的时频特征. 2013, 47(8): 115-120. [doi:10.7652/xjtuxb201308020]
- 赵煦,孟永鹏,成永红,等. 变压器现场超高频局部放电信号的时域特征分析. 2011, 45(12): 82-86. [doi:10.7652/xjtuxb201112015]
- 杨景刚,黎大健,李军浩,等. 气体绝缘开关直线和 T 型结构中电磁波传播特性的仿真. 2008, 42(12): 1526-1530. [doi:10.7652/xjtuxb200812019]
- 李军浩,司文荣,杨景岗,等. 直线及 L 型 GIS 模型电磁波传播特性研究. 2008, 42(10): 1280-1284. [doi:10.7652/xjtuxb200810018]
- 李军浩,司文荣,杨景刚,等. 电力变压器局部放电特高频信号外部传播特性研究. 2008, 42(6): 718-722. [doi:10.7652/xjtuxb200806015]

(编辑 杜秀杰)