

基于绝缘芯平面变压器的新型高压直流电源的 调试及输出特性

田佳甲^{1,2} 刘永好¹ 张金玲¹ 李瑞¹ 卢宋林¹ 李德明¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

摘要 介绍了一种以绝缘芯平面变压器为核心部件的新型高压直流电源的原理和基本结构,并给出了自行设计的实验样机的参数。对样机进行了调试,并测量了不同负载下电源的输出特性,发现在负载较重时电源会出现明显的压降。建立合理的等效电路和参数模型,对导致压降的原因进行了理论分析,进而提出了相应的解决方法,并进行了实验验证。结果证明,在负载较重时,绝缘芯平面变压器中的压降主要由漏磁引起,此问题通过调整功率因数解决。

关键词 绝缘芯平面变压器, 输出特性, 漏磁, 功率因数

中图分类号 TL50

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.070402

20世纪50年代开始,绝缘磁芯变压器(Isolated Core Transformer, ICT)作为高压发生器被用于辐照加速器中^[1]。ICT型加速器的束流功率大、结构简单、能量转换效率高、价格和维护成本较低,被广泛应用于辐照工业及污水废气处理^[2]。但由于工作频率低,ICT电源体积大、储能高,限制了它的应用。绝缘芯平面变压器(Planar Isolated Core Transformer, PICT)兼具ICT和平面变压器的特点,是将ICT高频化的一个理想方案^[3-4]。

PICT型高压直流电源本质是一种大功率开关电源变压器,核心功率转换部分由逆变电路和PICT构成。PICT的磁芯采用铁氧体材料,次级绕组和整流电路布置在印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)上,多层PCB串联后可获得数百千伏的直流电压。

PICT型电源于20世纪90年代开始在国外发展,相比低频电源,同等性能指标下PICT型电源体积小、功率密度高、储能低、可靠性高和组装性能好^[5-6],有望成为1MV以下大功率直流高压电源的主流发展方向。

1 PICT型电源的工作原理及主要参数

研究小组设计建造了一台PICT型电源的实验样机,它的工作模块如图1所示。

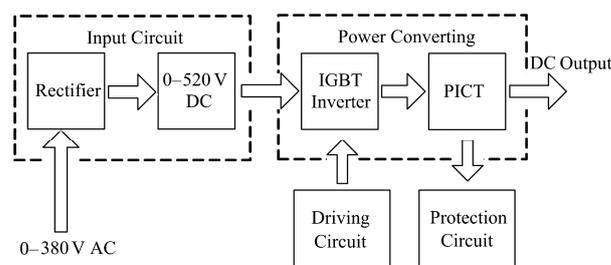


图1 PICT型电源的工作模块
Fig.1 Block diagram of PICT DC power supply.

电网供给的三相交流电压 U_0 (380 V, 50 Hz)经调压器得到峰值为 U_p 的交流电压,由整流滤波电路转换成直流,经H桥逆变后获得频率为33 kHz的脉冲方波输入到PICT中。图2是PICT的主要结构示意图。

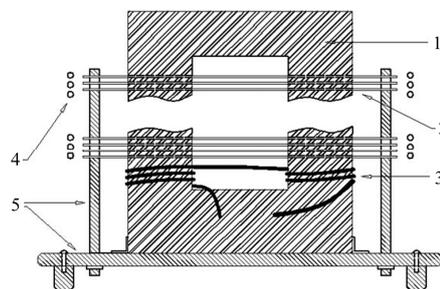


图2 PICT的主要结构 1: 铁氧体磁芯, 2: PCB板, 3: 初级线圈, 4: 电晕环, 5: 支撑结构

Fig.2 Schematic diagram of PICT. 1: Ferrite core, 2: PCB plate, 3: Primary coil, 4: Corona ring, 5: Supporting structure

第一作者: 田佳甲, 男, 1988年出生, 2012年于中国科学技术大学获硕士学位, 现为博士研究生
通讯作者: 李德明, E-mail: lideming@sinap.ac.cn
收稿日期: 2015-04-07, 修回日期: 2015-04-26

图 2 中 PICT 初级绕组匝数 $N_1=5$, 次级由 27 层 PCB 板构成, 每层 PCB 板包含 32 个单元, 每单元包含匝数 $n_2=2$ 的次级线圈及整流倍加模块, 次级线圈总匝数为 N_2 。PCB 板依次串联获得直流高压, 相邻 PCB 板间电位不同, 通过绝缘膜隔离 (图 2 中未画出)。PICT 工作在 SF_6 或 N_2 中, 直径约为 550 mm, 高度为 500 mm。其理论输出为:

$$U_{\text{DC}} = \frac{2N_2U_p}{N_1} = \frac{2 \times 32 \times 27n_2U_p}{N_1} \quad (1)$$

2 PICT 电源的调试

图 3 是加工完成并嵌入磁芯薄片的 PCB 单元以及组装完成即将在钢筒中调试的 PICT。PCB 单元采用贴片元件, 在次级线包中间留出空间放置磁芯薄片, 再用粘合剂固定。多层 PCB 板通过图 3(a) 中左下和右上的焊点连接, 从顶端高压帽引出电压。

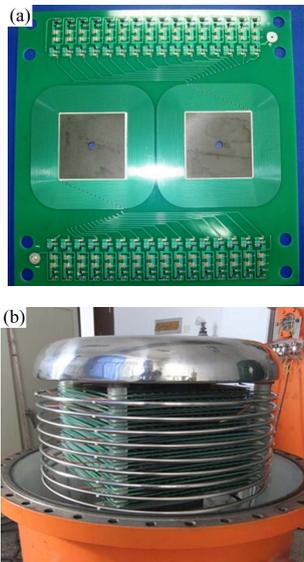


图 3 PCB 单元(a)及 PICT 样机(b)的实物图
Fig.3 PCB unit (a) and the PICT in cylinder (b).

PCB 单元有很强的带载能力, 单层 PCB 板初级输入 500 V 的方波时, 输出电压约为 12 kV, 接 120 k Ω 负载, 负载电流为 100 mA。维持 20 min 后磁芯、线路和元件没有明显的升温, 说明 PCB 单元可以输出较高的电流和功率, 且损耗较小。

PICT 的设计指标: 初级线圈匝数 $N_p=5$; 次级线圈匝数 $N_s=1\ 728$; 工作频率 $f=33\ \text{kHz}$; 输入电压范围 20–380 V; 方波占空比 0.45; 铁氧体磁导率 $\mu_r=2\ 400$; 初级电感量 $L_p=70\ \mu\text{H}$; 最大输出电压 $U_{\text{out}}=300\ \text{kV}$; 最大输出电流 $I=100\ \text{mA}$; PCB 板间耐压 25 kV。

课题组进行了空载和带载的初步调试实验。样机中的开关电源的额定功率为 1.8 kW, 实验结果如表 1 所示。

表 1 PICT 调试结果
Table 1 Results of PICT operation.

负载大小	初级电压 U_p	输出电压	负载电流	变比
Load / M Ω	Input voltage U_p / V	Output voltage / kV	Load current / mA	Transformer ratio
4	400	220	0.05	550
7	200	100	15	500

在带载实验中, 局限于开关电源的功率, 在输出电压达到 100 kV 后没有进一步提升。从表 1 可以看到, PICT 在空载和带载运行时都能维持较高的变比, 但明显低于设计参数, 并且负载变重时 PICT 的压降也会增大。因此, 样机在调试中面临的主要问题是压降问题。

文献[7–8]是电源搭建初期对 PICT 的研究, 对包含 5 层 PCB 板的 PICT 的空载特性 (负载电流约为 50 μA) 进行了讨论。实验显示在 PCB 板层数较多以及带载运行时 PICT 会表现出不同的特性。

3 压降原因分析

PICT 的压降主要有两个原因:

第一, 内阻和绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 的分压。这是因为 PICT 初级电感量小, 导致初级电流很大, 尤其是励磁电流可以达到数十安培。

第二, 绝缘膜导致的漏磁。绝缘膜的磁导率接近 1, 在主磁路中相当于气隙, 会引起旁路磁通^[9], 如图 4 所示。

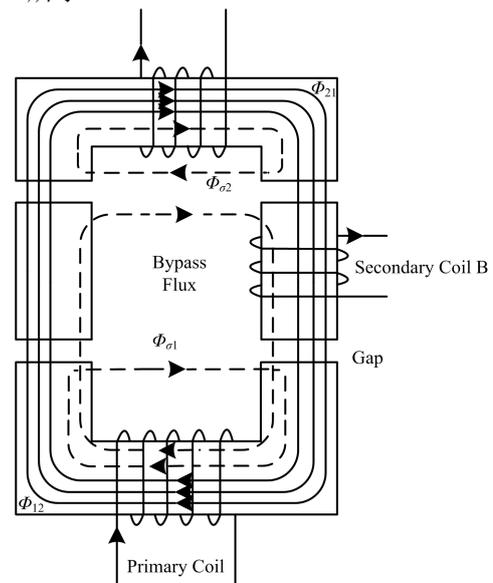


图 4 旁路磁通示意图
Fig.4 Schematic diagram of bypass flux.

由图 4 可知，旁路磁通使距离初级线圈较远的次级线圈的磁耦合率降低，引起顶层 PCB 板的电压降，例如次级线圈 A 的输出电压会低于次级线圈 B。漏磁在电路中等效为漏感，将 27 层 PCB 板从下到上编号为 $n=1, 2, \dots, 27$ ，对第 n 层 PCB 板，漏感 L_{kn} 的大小随高度增大，即 L_{k1} 最小， L_{k27} 最大。

漏感中会储存一部分无功功率，引起输出电压和效率的降低。但漏感在负载较重时才会引起比较明显的压降，这是 PICT 中的漏感和分布电容的相互作用导致的。

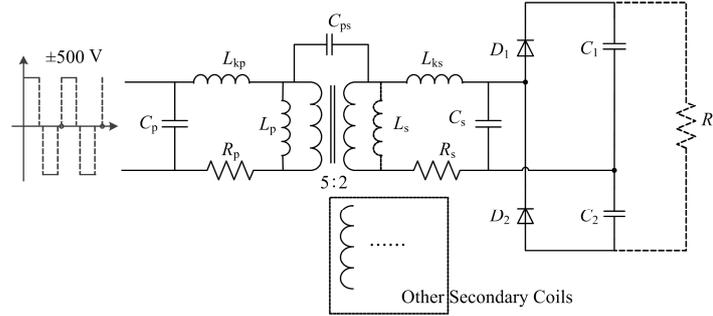


图 5 PICT 的基本单元
Fig.5 Basic module of PICT.

为便于分析，将图 5 中的电路做以下简化：一，将非线性的倍加整流电路部分简化为一个等效的负载电阻；二，忽略原副边的内阻；三，忽略初次级绕组间和 PCB 板间的电容。将初级参数映射到次级，得到图 6 中的 Γ 型电路。

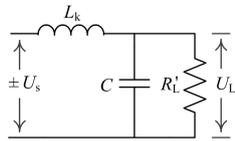


图 6 简化后的 Γ 型等效电路
Fig.6 Simplified ' Γ ' circuit of PICT.

从图 6 可以看出，电容 C 所起的作用取决于与其并联的等效电阻 R'_L 的阻抗高低， R'_L 越大，电容支路与漏感 L_k 的谐振越明显。 R'_L 与 R_L 正相关，因此对于图 5 所示电路，负载 R_L 较重时，分布电容作用很小，漏感会引起输出电压的降低；空载时，分布电容与漏感之间的谐振会使输出电压升高，但因为 Q 值很小，所以不会很明显。

为对上述推论进行验证，研究小组对不同负载下 PICT 的输出特性进行了实验研究。

4 PICT 的输出特性

实验方法是在 PICT 中将第 1-27 层 PCB 板接同样大小的负载 R_L ，测量各层 PCB 板的电压输出

PICT 的分布电容包括次级绕组匝间电容、上下层 PCB 板间电容和初次级绕组之间的电容，大小通常为 pF 量级，因此可以用含三个电容的高频变压器二端口网络电路^[10]来模拟 PICT。因此在计入漏感、内阻和分布电容时，PICT 基本单元的电路如图 5 所示。图 5 中 L_p 和 L_s 为初级线圈和次级线圈的电感， R_p 和 R_s 为原边和副边的内阻， R_L 为负载电阻， L_{kp} 和 L_{ks} 为原边和副边的漏感， C_p 和 C_s 为初级和次级的分布电容， C_{ps} 为初次级之间的分布电容。

U_{Ln} 并以 PCB 编号为横坐标绘制电压曲线。然后改变负载的大小，比较不同曲线的趋势。

精确测量分布电容是很困难的，但可以估算一个范围。若每个次级绕组单元的分布电容 $0.1 \text{ pF} < C < 10 \text{ pF}$ ，那么分布电容支路的阻抗 R_C 在 $15 \text{ k}\Omega - 1.5 \text{ M}\Omega$ 。因此设计 5 组实验，对应的次级单元负载 R_L 如表 2 所示。

表 2 实验所采用的负载电阻 R_L 数值
Table 2 Values of R_L in experiments.

每单元 R_L	PCB 板实际所接负载	满载电流
Value of R_L	Load of each PCB	Full load current
/ k Ω	/ k Ω	/ mA
3.75	120	100
18.75	600	20
56.25	1 800	6.67
112.5	3 600	3.33
937.5	30 000	0.04

在负载相同时输出电压的大小不会影响压降的大小，因此为测量方便，单块 PCB 板的输出电压为 1 kV 左右。在负载电阻较大时，为消除测量工具内阻的影响，在负载两端并联分压比为 10000:1 的 1 G Ω 高压精密电阻分压器，对分压器上的电压进行测量。

如图 7 所示， $R_L=3.75 \text{ k}\Omega$ 时，位置越高的 PCB 板的输出电压越小，顶层 PCB 板相对底层的压降为

15.4%; $R_L=18.75\text{ k}\Omega$ 时, 压降为 13.2%; $R_L=112.5\text{ k}\Omega$ 时, 压降为 7.3%, 此时漏感与分布电容已经产生明显的谐振; 接近空载时, $R_L=937.5\text{ k}\Omega$ 时, 顶层 PCB 板的电压略高于底层。实验结果与理论分析吻合。

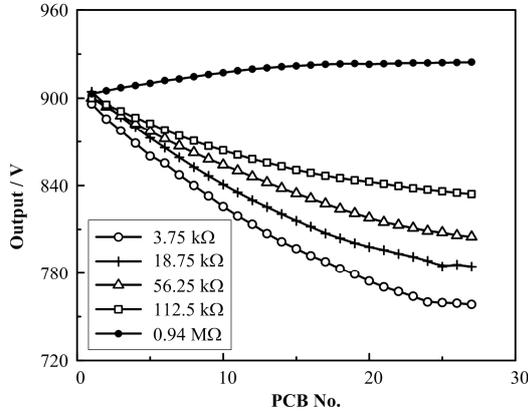


图 7 不同负载下的电压曲线
Fig.7 Voltage curve under different loads.

5 输出特性的改善

要增大电源的输出、改善输出特性就要消除漏感(漏磁)的不利影响。选用更薄的绝缘膜可以减小 PICT 的漏感, 但电气绝缘的要求限制了绝缘膜的最小厚度。

实验表明分布电容与漏感的谐振作用可以对电压产生一定的补偿, 因此带载运行时可以考虑引入电容来补偿电压^[7-8,11], 相当于调整 PICT 的功率因数。对图 6 中的电路做一个相量图的分析, 如图 8 所示。

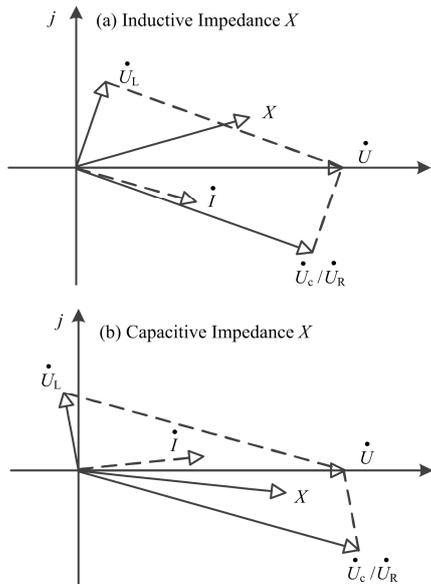


图 8 次级电路的相量图
Fig.8 Phasor analysis of secondary circuit.

图 8 中 \dot{U} 为总电压, X 为输入阻抗, i 为总电流, \dot{U}_L 为漏感两端的电压, \dot{U}_c 和 \dot{U}_R 为输出电压。当变压器次级二端口的输入阻抗为感性时, 负载两端的电压低于原电压; 而为容性时, 则会高于原电压。电容的数值越大, 输出电压越高。

不同位置的 PCB 板漏感不同, 在实际运行中通常将各层 PCB 板补偿到输出电压一致。文献[7-8]提出了一种计算补偿电容大小的方法, 但实验中发现这种方法得到的数值存在较大偏差。通过 Multisim 模拟可以得到精确的补偿电容的数值。

以第 27 层 PCB 板为例, Multisim 显示需要并联 33 nF 的补偿电容。实验小组用 2.2 nF、33 nF 和 47 nF 的电容进行了对比实验, 实验中 PCB 板所接的负载电阻均为 120 kΩ, 即每单元负载 $R_L=3.75\text{ k}\Omega$ 。实验结果如表 3 所示。

表 3 补偿电容实验结果
Table 3 Results of compensation capacitor experiment.

补偿电容 C Value of C / nF	底层输出 U_1 Value of U_1 / V	补偿前 U_{27} U_{27} without C / V	补偿后 U_{27} U_{27} with C / V
2.2	3 900	3 280	3 320
33	3 890	3 280	3 930
47	3 920	3 290	4 660

如表 3 所示, 在补偿电容为 33 nF 时, 顶层的 PCB 板与底层的输出电压近似相等; 如果将电容值增大到 47 nF, 输出电压可以进一步升高。

因此, 负载较重时在分布电容的位置并联一个补偿电容是可行的改善输出特性的方法。

6 结语

PICT 型直流高压电源是一种具有广阔前景的新型电源。为保证 PICT 有稳定的输出特性和高的运行效率, 在保证变压器的电压等级、变比、绝缘等各项指标达到要求的基础上, 还要考虑到分布参数对输出特性的作用。实验表明 PICT 型电源带载能力较强, 并且在负载较重时, 可以通过无功补偿的方法消除漏感的影响, 提高电源的功率因数、输出电压和效率。

参考文献

- 1 陈佳洱. 加速器物理基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1993
CHEN Jiaer. Accelerator physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1993
- 2 徐建铭. 加速器原理[M]. 北京: 科学出版社, 1974

- XU Jianming. Accelerator principle[M]. Beijing: Science Press, 1974
- 3 Collier J A. High voltage DC source including magnetic flux pole and multiple attacked AC to DC converter stages with planar coils[P]. United States Patent, 5166965, 1992
- 4 Vanderlinde D, Boon C A M, Klaassens J B. Design of a high-frequency planar power transformer in multilayer technology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1991, **38**(2): 135–141. DOI: 10.1109/41.88907
- 5 Huljak R, Thottuvelil V, Marsh A, *et al.* Where are power supplies headed[C]. IEEE APEC, 2000: 10–17
- 6 Quinn C, Rinne K, O'Donnell T, *et al.* A review of planar magnetic techniques and technologies[C]. IEEE APEC, 2001: 1175–1183
- 7 Kang C, Liu Y H, Li D M. Analysis of output voltage on a planar insulating core transformer[J]. Nuclear Science and Techniques, 2012, **23**(1): 15–18
- 8 康成, 刘永好, 黄建鸣, 等. 绝缘芯平面变压器的漏磁补偿[J]. 强激光与粒子束, 2012, **24**(7): 1595–1598. DOI: 10.3788/HPLPB20122407.1595
- KANG Cheng, LIU Yonghao, HUANG Jianming, *et al.* Compensation of leakage flux on insulated core flat winding transformer[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, **24**(7): 1595–1598. DOI: 10.3788/HPLPB20122407.1595
- 9 陈为, 毛行奎, 罗恒廉, 等. 高频电感器线圈损耗分析与交错气隙布置[J]. 电工技术学报, 2003, **18**(6): 73–76. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6753.2003.06.015
- CHEN Wei, MAO Xingkui, LUO Henglian, *et al.* Winding loss analysis and staggered air-gap arrangement for high-frequency inductors[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2003, **18**(6): 73–76. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6753.2003.06.015
- 10 宋晓婷. 高频高压变压器分布参数测量和绕组结构设计[D]. 大连理工大学, 2013
- SONG Xiaoting. Measurement of stray parameters in high-frequency high-voltage transformer and winding structure design[D]. Dalian University of Technology, 2013
- 11 Salisbury W W. Air-core transformer[P]. United States Patent: 2963669, 1960

Test and output characteristics research on high voltage DC generator based on high-frequency planar insulated core transformer

TIAN Jiajia^{1,2} LIU Yonghao¹ ZHANG Jinling¹ LI Rui¹ LU Songlin¹ LI Deming¹

¹(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Background: Insulated Core Transformer (ICT) used in irradiation industry has many disadvantages on account of its low operating frequency, Planar Insulated Core Transformer (PICT) is developed for high-frequency high voltage direct current (H-V DC) generator. **Purpose:** This study aims to develop a novel PICT-based H-V DC for power supply less than 1 MeV, and investigate its output characteristics for the design and optimization of PICT. **Methods:** Preliminary test on self-designed PICT apparatus is carried out and the output characteristics under different loads are measured. Both theoretically and by Multisim PICT's equivalent circuit and parametric model are built and the reason giving rise to voltage drop is analyzed. Emphatically, the influence of stray parameters to the output characteristics is discussed and experimental verification is also presented. **Results & Conclusion:** Leakage flux causes voltage drop when the load current is heavy. To eliminate the leakage flux, power coefficient must be rectified by compensation capacitor, and the relevant experimental verification shows satisfactory results. And Multisim simulation is considered to be practicable in physical design of PICT in view of good consistency with experimental result.

Key words PICT, Output characteristic, Leakage flux, Power coefficient

CLC TL50