

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.006

基于磁芯复位的脉冲变压器剩磁抑制与输出特性分析

支玉婷¹, 张家兴², 魏笔洋¹, 邱立^{1,3}, 方春华^{1,3}, 江进波^{1,3}

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网河南省电力公司三门峡供电公司, 河南 三门峡 472000;
3. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 脉冲变压器广泛应用于气体开关触发器,磁芯剩磁导致触发器在重频运行时输出波形的一致性不高,使气体开关导通时延和抖动发生变化。磁芯复位是消除剩磁影响的有效方法,目前研究多基于经验公式估算复位电流,存在复位时间长、精度不足的问题。通过测试磁芯的脉冲磁化特性,建立了基于磁芯非线性的脉冲变压器场路耦合模型,分析剩磁与复位过程对输出特性的影响,并对复位电流大小、隔离电感及旁路电容等关键参数进行了仿真优化。针对20 kV级气体开关触发器,依据优化的磁芯复位电路,测试其重频工况下的输出性能。实验结果表明,设计的直流复位电路可以隔离脉冲高压,提高磁芯利用率,脉冲输出波形的平均幅值为19.88 kV,离散系数为0.08%,脉冲前沿平均值为3.32 μs ,离散系数为0.42%,脉宽平均值为3.77 μs ,离散系数为0.21%,波形的一致性较高。

关键词: 脉冲变压器; 场路耦合仿真; 输出特性; 磁芯复位

Analysis of Residual Magnetism Suppression and Output Characteristics on Pulse Transformer Based on Core Reset

ZHI Yuting¹, ZHANG Jiaying², WEI Biyang¹, QIU Li^{1,3}, FANG Chunhua^{1,3}, JIANG Jinbo^{1,3}

(1. College of Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. Sanmenxia Power Supply Company State Grid Henan Electric Power Company, Henan Sanmenxia 472000, China; 3. Hubei Provincial Engineering Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: Pulse transformers are widely used in gas switch triggers. Residual magnetism in the magnetic core leads to weak consistency of the output waveforms during repetitive frequency operation, causing variations in the conduction delay and jitter of the gas switch. Magnetic core reset is an effective method for eliminating the influence of residual magnetism. The current research is primarily based on empirical formulas to estimate the reset current, resulting in such problems as long resetting time and insufficient accuracy. By testing the pulse magnetization characteristics of the magnetic core, a field-circuit coupling model of the pulse transformer based on core nonlinearity is set up. The effects of remanence and reset processes on the output characteristics are analyzed, and such key parameters as reset current, isolation inductance and bypass capacitance are simulated and optimized. For 20 kV-class gas switch triggers, its output performance under repeated-frequency conditions is tested in accordance with the optimized magnetic core reset circuit. The experimental results show that the designed DC reset circuit can effectively isolate high-voltage pulses and enhances core utilization rate. The average amplitude of the pulse output waveform is 19.88 kV, with a coefficient of variation of 0.08%. The average pulse rise time is 3.32 μs , with a coefficient of variation of 0.42%. The average pulse width is 3.77 μs , with a coefficient of variation of 0.21%. The waveform exhibits high consistency.

Key words: pulse transformer; field-circuit coupling simulation; output characteristics; core reset

收稿日期:2025-09-20; 修回日期:2025-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51707105);强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室基金项目(NKLIPR2406)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51707105), the Fund Project of the State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Environment Simulation and Effects(NKLIPR2406).

0 引言

脉冲变压器作为气体开关触发系统的重要组成部分,其高幅值、快前沿的输出特性对脉冲功率装置的稳定性起着重要作用^[1-4]。在脉冲功率装置中,常采用磁芯来提高初级和次级之间的电磁耦合^[5-7],而磁性材料的磁滞特性会使磁芯在重复频率脉冲放电过程中反复磁化,磁芯可能存在剩磁,影响磁芯磁化过程,造成额外能量损耗,同时影响变压器输出性能^[8-10]。磁芯复位作为一种提高磁芯利用率的有效方式,广泛应用于脉冲功率装置^[11-14]。

国内外学者关于脉冲功率装置的磁芯复位开展了一系列研究。文[15]中针对直线变压器驱动源磁芯磁滞回线上升支展开分析,发现未去磁磁芯更易饱和且饱和后励磁电流增大,但仿真结果与实验结果有差异。文[16]中通过研究改变输入电压或工作频率的方式控制磁开关直流复位信号,发现反向复位程度越深,磁芯利用率越高,输出波形脉宽越宽。文[17]利用脉冲复位,揭示了磁芯复位状态与复位电容大小、电压和能量有关。文[18]发现复位电路可以减半磁芯所需截面积,但需对回路中的高压脉冲进行隔离。文[19]建立了脉冲变压器复位电路并通过实验样机验证了其高频运作的可行性。因此基于脉冲变压器磁芯的剩磁特性,深入研究磁芯复位机制,对优化脉冲变压器设计,提高脉冲功率装置稳定性,以及在更高重复频率工况下研究脉冲变压器均具有重要意义。

而目前复位电路的设计方法均是基于矫顽力 H_c 的计算^[20-21],未根据磁芯脉冲磁化过程进行详细分析,因此复位时间尚未确定。文中根据脉冲变压器磁化理论,针对磁芯剩磁及复位进行分析,建立基于磁芯非线性的脉冲变压器场路耦合模型,优化其复位系统参数,通过实验测试复位电路和脉冲放电回路工作状况,分析直流复位对脉冲变压器输出特性的影响。

1 脉冲变压器磁化理论

1.1 磁芯剩磁理论

脉冲放电电路通过初级电容 C_p 储能,初级电容满电后开关 K 闭合,并在次级绕组的次级电容 C_s 两端耦合输出电压,其原理图见图1。

相较于标准正弦电流,脉冲变压器输入电流呈衰减振荡特性,对应磁芯磁化过程中非对称正向反向特征。磁化电流衰减振荡下磁芯磁化过程见图2。

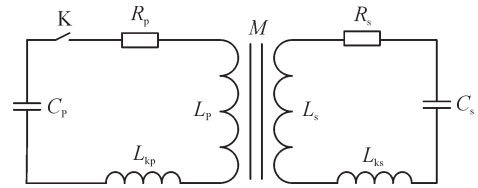


图1 脉冲变压器电路

Fig. 1 Pulse transformer circuit

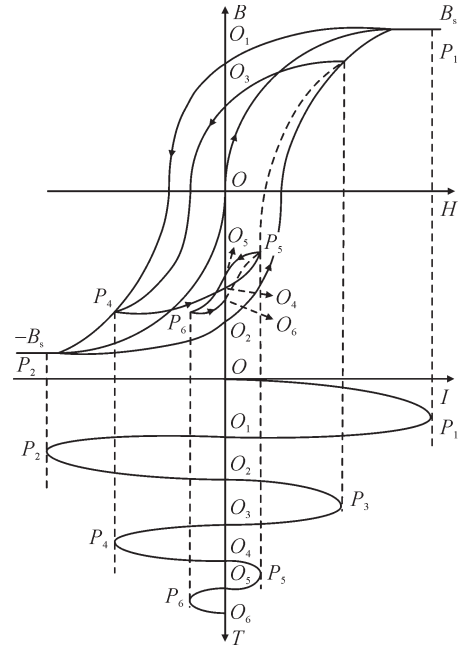


图2 磁化电流衰减振荡下磁芯磁化过程

Fig. 2 Magnetization process of the core under magnetization current decay oscillation

图2中: O, O_1, O_2, \dots 等点表示磁化电流为零时对应磁化曲线与纵轴的交点; P_1, P_2, P_3, \dots 等点表示磁化电流达到峰值时对应磁场强度和磁芯磁感应强度。初级电容谐振放电近似短路放电,磁化电流在磁芯饱和时达到峰值,随后逐渐衰减至零。衰减过程对应磁芯交替反复磁化,磁滞回环随电流幅值衰减而减小,最终趋于极限磁滞回环,其剩磁趋于零。

重频工况下,脉冲变压器常采用脉冲晶闸管的半导体开关控制电容放电,当其电流反向且承受反向电压时关断。由于恢复电荷存在差异,关断时刻不同导致磁芯磁化剩磁点不同,进而影响输出波形的变化^[22]。根据电磁感应定律整理得

$$B(t) = \frac{1}{N_p S_e} \int_0^t U_p dt + B_r = \frac{1}{N_s S_e} \int_0^t U_s dt + B_r \quad (1)$$

式(1)中: U_p, U_s 分别为初、次级电压; N_p, N_s 分别为初、次级绕组匝数; B_r 为磁芯剩余磁感应强度; S_e 为磁芯有效截面积。

由上述分析可知,重频工况下磁芯的磁化过程将有所不同,由于脉冲变压器磁化电流衰减与磁芯磁化过程存在不对称性,磁芯放电初始状态与最终

状态差异,剩磁 B_r 会影响脉冲变压器输出特性,减小连续脉冲放电时可用的磁感应强度增量 ΔB , 加快磁芯饱和速度,影响变压器输出性能^[23-25]。

1.2 磁芯直流复位理论

剩磁会减小磁芯可用伏秒积,导致变压器损耗增加。磁芯复位是消除剩磁、提高磁芯利用率的有效方法^[26-27]。由于脉冲复位需要额外脉冲发生装置^[28-30],复位电压高且绝缘处理难度大,而直流复位的磁化范围为 $-B_s$ 至 $+B_s$ ^[31],磁感应增量 ΔB 更大,因此本研究中采用直流复位方案。

为实现磁芯复位,要求复位电源产生的伏秒积要大于等于根据复位绕组线圈匝数与磁芯磁感应强度变化量乘积对应的磁通量,当复位电源为直流电源时,可进一步简化得式(2),复位电流 I_r 的大小可由式(3)推导得到。当复位绕组匝数较多时,对复位电流幅值的要求减小,复位所需伏秒积和电压幅值需求增加。复位后脉冲放电时磁元件可用的磁感应增量 ΔB 可达到 $2B_s$,有效提高磁芯利用率。

$$U_r \cdot t_p \geq N_r \Delta B S_c \quad (2)$$

$$I_r = \frac{l_{av} H_c}{N_r} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: H_c 为磁芯静态矫顽力; l_{av} 为平均磁路长度; N_r 为磁芯复位绕组匝数; I_r 为复位电流理论值。通常认为最佳去磁磁场强度应大于2倍矫顽力,即复位电流应大于 $2 \times I_r$ 。实际上,对于快脉冲变压器,重频工况下其磁化速度更快,导致实际复位电流可能会大于2倍理论值^[32]。

由于输出较大电流的恒流源结构复杂且价格昂贵,在去磁脉冲放电过程中,常通过增大复位绕组匝数来减小复位电流,造成复位绕组两端感应电压较高。为避免直流电源损坏,需采用隔离电感和旁路电容的方式保护直流电源^[33]。脉冲变压器磁芯直流复位电路设计组成见图3。

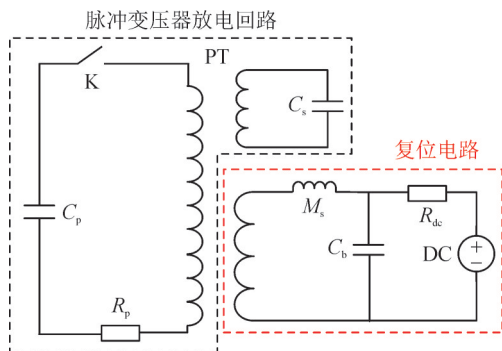


图3 脉冲变压器复位电路

Fig. 3 Reset circuit of pulse transformer

复位电路主要由隔离电感 M_s 、旁路电容 C_b 、直流电源 DC 以及直流电源内阻 R_{dc} 构成。在脉冲放电

电路中,初级电容 C_p 完成充电后闭合开关 K,通过初、次级绕组在次级电容 C_s 两端感应生成输出电压。复位电路工作时,次级电容 C_s 、隔离电感 M_s 、旁路电容 C_b 构成隔离回路,旁路电容两端电压即为直流电源两端电压。当负载电容两端电压为 U_s ,流经旁路电容的电流为 I_b 时,由此回路得式(4)

$$U_s - \frac{1}{C_s} \int I_b(t) dt = M_s \frac{dI_b(t)}{dt} + \frac{1}{C_b} \int I_b(t) dt \quad (4)$$

根据式(4)可求得 I_b 及旁路电容两端电压 U_b :

$$I_b(t) = U_s \sqrt{\frac{C_s C_b}{(C_s + C_b)}} \sin \omega_b t \quad (5)$$

$$U_b(t) = U_s \frac{C_s}{C_s + C_b} (1 - \cos \omega_b t) \quad (6)$$

式(5)、(6)中,衰减频率 $\omega_b = \sqrt{(C_s + C_b)/C_s C_b M_s}$ 。

当 C_s 和 U_s 一定时, C_b 越大, U_b 幅值越低。同时, M_s 越大, ω_b 越小, $(1 - \cos \omega_b t)$ 的值越接近 0,隔离效果越好。因此在脉冲变压器的设计过程中需进一步分析隔离电感和旁路电容参数,使其有效隔离保护复位电路,提高电路的工作稳定性。

2 脉冲变压器复位系统仿真及参数优化

基于脉冲变压器的磁芯衰减振荡磁化过程的非对称特性,设计直流复位方案,对复位电路隔离电感、旁路电容参数进行优化。利用双绕组法分析磁芯脉冲磁化特性,对测试结果进行参数辨识。通过建立精确的场路耦合模型,进一步研究复位电流、复位时间对消除磁芯剩磁的作用,实现对复位参数的设计与优化。

2.1 磁芯 Jiles-Atherton 参数的获取

磁芯磁化过程中,磁感应强度 B 随磁场强度 H 呈非线性变化,相比于无法表征磁芯磁滞特性且易出现收敛问题的分段线性法, J-A 模型可以考虑磁芯的磁滞特性,更好地模拟磁芯磁化至饱和及退饱和过程,磁化曲线相对平滑,仿真收敛性更好^[34]。由于脉冲变压器在工频下磁芯磁化数据与脉冲条件下磁芯实际磁化特性差异较大,为获取可以准确表征磁芯磁化特性的 J-A 参数,对磁芯特性进行测试,并对测试结果进行辨识。

通过双绕组法对变压器磁芯的脉冲磁化特性进行测试,动态测试电路见图4,初级电路是试验变压器 T 经硅堆 D_0 、保护电阻 R_0 整流给初级电容器充电,当充至设定值 U_0 后开关 S 导通,电容 C 经开关 S、初级回路电阻 R_1 和励磁绕组 L_c 放电,测量绕组 L_m 两端感应出高压脉冲。测试磁芯选择为脉冲变压器

同型号同尺寸的铁基纳米晶环形磁芯。实验分别测量初级电容放电电压 U_0 、流经原边励磁绕组的电流 $i(t)$ 和副边绕组两端的电压 $u(t)$ 。

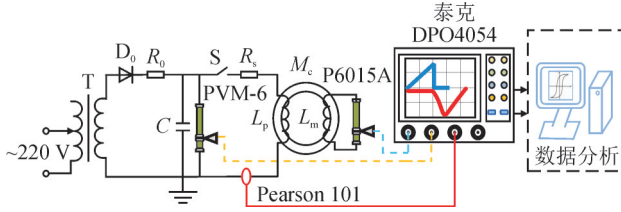


图4 磁芯脉冲磁化特性测试电路图

Fig. 4 Test circuit diagram for pulse magnetization characteristics of magnetic cores

实验平台中脉冲变压器初始磁化电流上升沿为 $3.19 \mu\text{s}$ 左右, 等效为正弦波的 $1/4$ 周期, 其等值频率为 156 kHz 。通过改变储能电容 C 和充电电压 U_0 控制磁芯测试频率, 使其与脉冲放电磁化频率相近。当 $C=200 \text{ nF}$ 、 $U_0=2.50 \text{ kV}$ 时, 测量绕组两端电压 $u(t)$ 和流经励磁绕组电流 $i(t)$ 波形见图5。

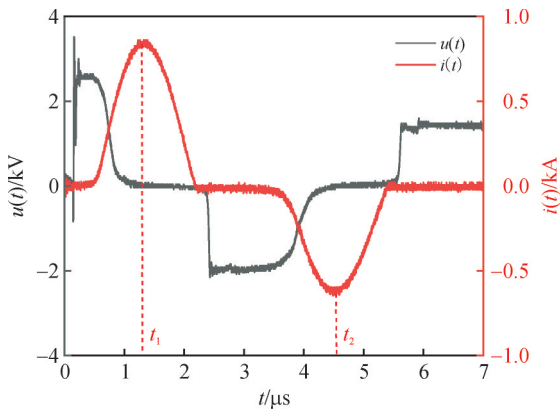


图5 电压及电流测量波形

Fig. 5 Voltage and current measurement waveforms

当 t_1 为 $1.30 \mu\text{s}$ 时, 磁化电流达到最大值; t_2 为 $4.55 \mu\text{s}$ 时, 磁化电流达到最小值, 由式(7)算出等值频率 f_{test} 约为 153 kHz 。基于控制脉冲测试等值频率与脉冲变压器额定工作条件下, 对初级磁化电流等值频率接近的结果进行 J-A 参数辨识, 并用 J-A 参数定义磁芯材料特性。通过 MATLAB 可计算出对应磁感应强度 $B(t)$ 和磁场强度 $H(t)$, 见图6。

$$f_{\text{test}} = \frac{1}{2(t_2 - t_1)} \quad (7)$$

由于脉冲磁化特性测试平台采用初级电容放电, 经初始磁化及反向磁化后, 通过后半段数据计算得到的磁滞回线包含于饱和磁滞回线内部, 不能充分表征磁芯脉冲磁化特性。针对此问题, 选取 $t_1 \sim t_2$ 对应 $B-H$ 数据集, 绘制磁芯由饱和至反向饱和对应的左半支磁滞回线, 将曲线原点对称得到完整的闭合磁滞回线, 采用输入磁感应强度 B , 输出磁场

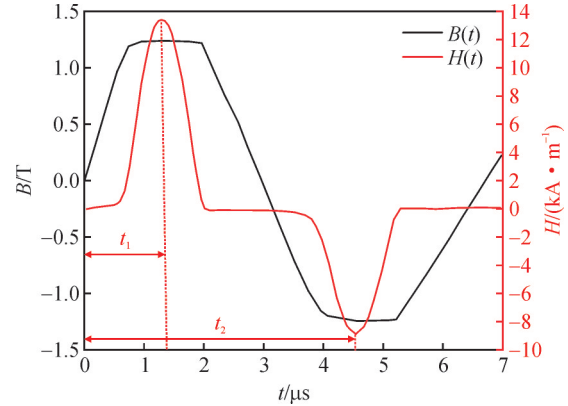


图6 $B(t)$ 和 $H(t)$ 变化曲线

Fig. 6 Variation curves of $B(t)$ and $H(t)$

强度 H 的逆 J-A 模型, 得到脉冲激励下变压器磁芯较为准确的 J-A 参数, 见表1。并将辨识后 J-A 参数的磁滞回线与实验结果进行对比, 见图7, 最大误差为 2.95% 。识别后得到的 J-A 参数可以较好地模拟磁芯磁滞特性, 将其应用于脉冲变压器场路耦合模型中定义磁芯磁化特性, 有利于提高仿真模型精度。

表1 磁芯 J-A 参数

Table 1 Magnetic core J-A parameters

参数	数值
饱和磁化强度 $M_J / (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	827 185
域壁密度 $\alpha / (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	18.86
钉扎损耗 $h / (\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$	14.50
磁化可逆性 c	0.01
域间耦合 a	5.60×10^{-5}

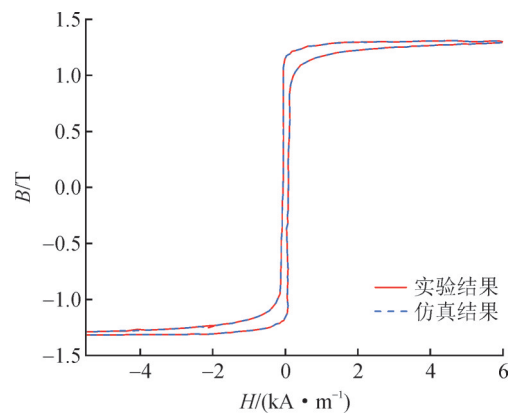


图7 磁滞回线模拟与实验结果

Fig. 7 Simulation and experimental results of hysteresis loop

2.2 复位电路场路耦合模型

根据脉冲变压器的复位电路建立了基于有限元的场路耦合模型, 其控制方程包括麦克斯韦方程组及 J-A 本构关系, 用于模拟脉冲变压器的实际工作情况, 场路耦合模型见图8。初级电容 C_1 为 $2.20 \mu\text{F}$, 充电至 U_0 后触发开关 K , 通过 0.30Ω 初级回路电阻

R_p 激励初级线圈,并与次级线圈耦合在190 pF负载电容上感应输出脉冲。模型各项参数根据实验平台中元件实际参数进行设置:根据目标参数输入电压为500 V时,输出电压20 kV以上,选择初级绕组2匝,次级绕组85匝,其中磁芯为铁基纳米晶材料,相对磁导率 $>50\ 000$,相对介电常数为15,磁芯的磁滞特性通过J-A模型表征并依据表1参数识别结果设置。初级电容充电500 V时,不同磁芯截面磁感应强度分布见图9,脉冲前沿为1.75 μs 时磁芯磁场强度分布见图9(a); $t=3.21\ \mu\text{s}$,此时输出电压达到峰值,磁芯处于饱和状态下对应磁场强度分布见图9(b)。

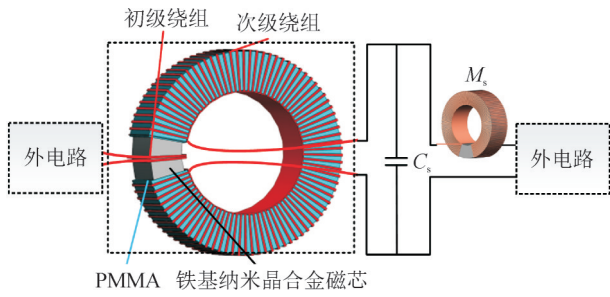


图8 脉冲变压器场路耦合模型

Fig. 8 Pulse transformer field-circuit coupling model

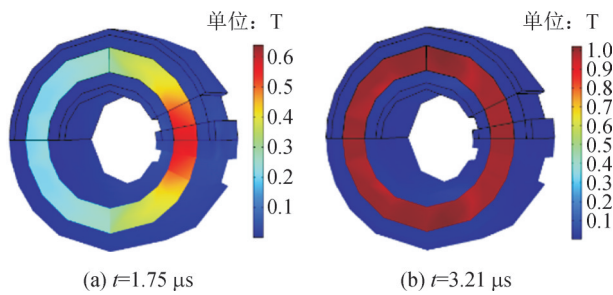


图9 不同时刻变压器磁芯磁感应强度分布

Fig. 9 Magnetic flux density distribution in the transformer core at different instants

在保证一定的磁场求解精度的基础上,为减少计算量,提高模型收敛性,对仿真模型进行如下假设及简化:①脉冲变压器材料均匀且各向同性;②初次绕组等效为均匀多匝,以密绕的方式环绕磁芯表面,绕制形状为矩形;③通过等效减小磁芯模型截面积的方式设置表征磁芯的填充系数。

对脉冲变压器次级输出电压和初级回路电流进行实验测试,并与仿真进行对比,验证准确性。当初级电容放电电压 U_0 为500 V时,脉冲变压器次级输出电压、初级回路电流实验与仿真波形对比见图10,各指标误差均小于10%,仿真模型准确度相对较高,可基于此模型开展进一步分析。

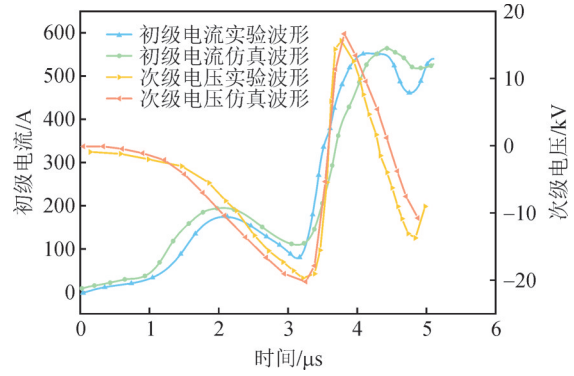


图10 初级电流和次级电压仿真与实验波形

Fig. 10 Primary current and secondary voltage simulation and experiment waveforms

2.3 参数优化仿真

2.3.1 复位信号

根据磁芯复位理论分析可知,当复位绕组匝数 N_r 较多时,对复位电流幅值要求较小,但其两端感应出的脉冲电压较高;当 N_r 较少时,复位绕组阻抗减小,其两端电压降低,影响复位速度,因此,复位绕组匝数选择为20匝。此时,经过复位后磁芯磁感应强度分布较为均匀。脉冲变压器平均磁路长度为20.40 cm,铁基纳米晶材料静态矫顽力为1.20 A/m,由式(3)得出复位电流 $I_r=12.24\ \text{mA}$ 。对于脉冲变压器复位电路,当放电频率达到几十Hz至上百Hz时,脉冲放电间隔脉冲间隔可近似等于复位作用时间,以脉冲放电工作重复频率10 Hz为例,复位时间 t_p 约为100 ms。不同剩磁时复位电源所需参数见表2。

表2 不同剩磁下复位电源所需参数

Table 2 Parameters for reset power supply with different B_r

剩磁 B_r/T	复位磁感应强度增量 $\Delta B/\text{T}$	复位电源伏秒积 $U_r t_p/(\text{mV}\cdot\text{s})$	复位电压 U_r/mV
+0.96	1.92	10.08	100.80
+0.80	1.76	9.24	92.40
+0.60	1.56	8.19	81.90
+0.40	1.36	7.14	71.40
+0.20	1.16	6.09	60.90
0.00	0.96	5.04	50.40

由于脉冲放电电压振荡衰减速度快、幅值高,导致磁芯剩磁大小不固定。因此针对磁芯可能出现的最大剩磁选择额定的复位电压,使其可以将磁芯状态由不同剩磁状态复位至反向饱和状态。磁芯剩磁越小,其复位至反向饱和状态所需复位电压越小。磁芯剩磁最大为0.96 T,复位至反向饱和状态 $\Delta B_{\text{max}}=1.92\ \text{T}$,要求伏秒积为10.08 $\text{mV}\cdot\text{s}$ 。同理可以求出不同重复频率下对应的复位电压。脉冲放电频率增加时,脉冲放电间隔和复位时间缩短,复

位电压幅值越高,复位时间越短。实际设计中需结合磁芯特性、电路损耗等因素,保证复位效果,缩短复位时间,提升脉冲变压器输出性能。

2.3.2 隔离电感和旁路电容

为避免复位电路对主电路的干扰,需通过隔离电感与旁路电容对脉冲放电信号进行隔离,保护直流电源^[24]。相比于空心电感,隔离电感采用含磁芯的电感可有效减小体积。同时,为实现对脉冲放电的有效隔离并降低对复位电路的影响,应保证隔离电感较大。因此当隔离电感匝数一定时,磁芯选择磁导率较大的铁基纳米晶材料。根据脉冲变压器输出电压测试波形可知,输出电压振荡放电,隔离电感磁芯被反复磁化,但是相邻周期磁化方向相反,其中第一峰幅值较高,脉宽相对较长,因此可以针对脉冲输出第一峰进行分析磁芯饱和问题,对隔离电感磁芯进一步设计。

脉冲输出第一峰幅值为 20.26 kV,脉冲前沿为 3.21 μs ,根据测试波形计算脉冲输出第一峰的伏秒积为 27.36 $\text{mV}\cdot\text{s}$,由于复位绕组匝数小于次级绕组匝数,隔离电感两端感应电压幅值会相对降低,按照参考脉冲输出电压的伏秒积计算隔离电感线圈匝数,综合考虑隔离效果等问题,最终磁芯尺寸选择 80 mm \times 50 mm \times 25 mm,有效截面积为 2.63 cm^2 。为了保证隔离效果,要使隔离电感的伏秒积大于脉冲输出的伏秒积,根据式(2)可得隔离电感线圈匝数应大于 108.36,因此选择电感匝数为 110,磁芯平均磁路长度 l_{av} 取 20.40 cm,由式(8)得,电感值为 195.56 mH。

$$L_{\text{ms}} = \frac{\mu_0 \mu_r N_{\text{ms}}^2 S_c}{l_{\text{av}}} \quad (8)$$

式(8)中, N_{ms} 为隔离电感匝数。为防止测试中损坏直流电源,需对隔离电感和旁路电容值及其隔离效果进行场路耦合仿真验证。为简化设计,定义旁路电容与负载电容相同容值,并将直流电源支路用电源等效内阻。通过旁路电容电压验证其隔离效果。隔离电感磁芯尺寸一定时,电感匝数将决定伏秒积与电感值。隔离电感匝数变化时旁路电容两端电压 U_b 见图 11。

当隔离电感匝数小于 100 匝时,隔离电感磁芯在脉冲放电第一峰的前沿阶段迅速饱和,类似磁开关的导通失去隔离作用,电感匝数越少磁芯饱和速度越快,对应的电压 U_b 越小。当隔离电感匝数为 110、130 匝时,隔离电感磁芯未饱和,此时电压低于 225 V,可以实现高压脉冲的有效隔离。隔离电感匝数减少存在磁芯饱和现象,导致隔离失效,因此选定其匝数为 130 匝。确定隔离电感匝数后,对不同

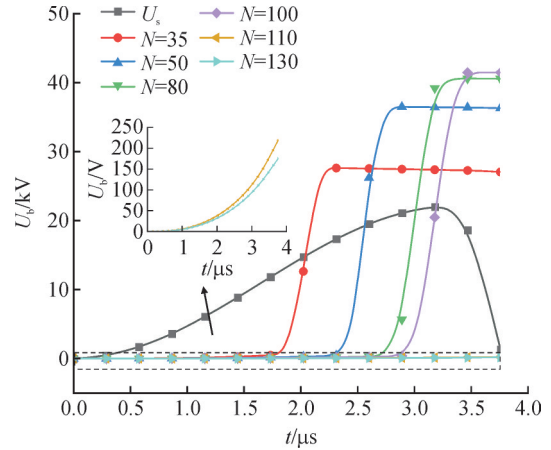


图 11 不同匝数隔离电感的电压

Fig. 11 Voltage across isolated inductor with different turns

容值旁路电容的效果进行验证,旁路电容两端电压仿真计算结果见图 12。

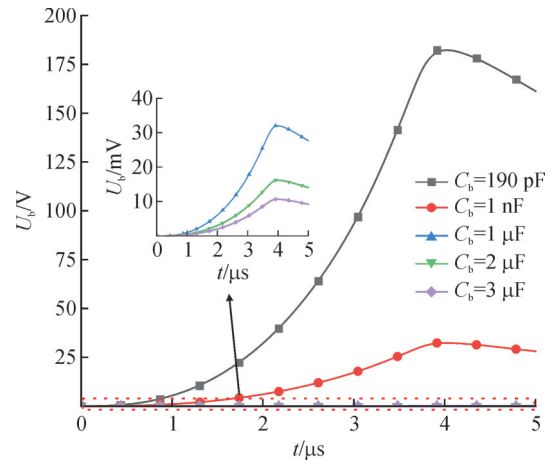


图 12 不同容值旁路电容两端电压

Fig. 12 Voltage across bypass capacitors with different capacitance values

仿真结果显示,当隔离电感匝数为 130 匝时,旁路电容的容值对电压抑制效果有显著影响:当 C_b 由 190 pF 增至 3 μF 时,峰值电压由 182.5 V 降低至接近于零。容值增大,对应容抗减小,旁路电容与隔离电感分压减小,隔离效果更好,更有利于保护直流电源。因此,选择 3 μF 的旁路电容。

3 磁芯复位系统实验分析

脉冲变压器磁芯复位电路原理图见图 13,包括脉冲放电回路、晶闸管触发电路和复位电路。脉冲放电回路:初级绕组 2 匝、次级绕组 85 匝、复位绕组 20 匝;初级储能电容 $C_p=2.20 \mu\text{F}$,次级电容 $C_s=190 \text{pF}$;脉冲晶闸管 S_1 采用 MKP9030-042 型号。触发电路包括按钮控制的单次触发电路和 PWM 控制的重频触发电路,均由独立 5 V 电源供电。复位电路采用

0~24 V可调电源,配置 50 Ω限流电阻、130匝隔离电感和 3.30 μF旁路电容。测试系统采用泰克 P6015A 电压探头、Pearson101 电流探头和北极星 PVM-6 高压探头分别测量初级电压、初级电流和次级电压,所有信号通过等长电缆接入泰克 DPO4054 示波器保证同步。

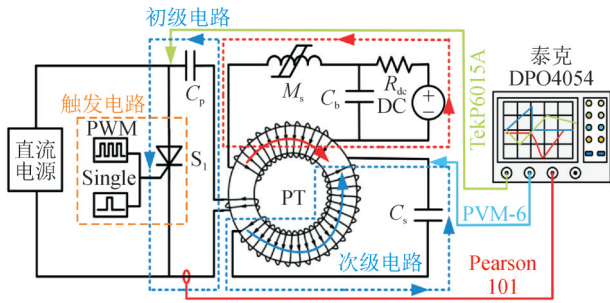


图 13 磁芯复位电路原理图

Fig. 13 Schematic diagram of the magnetic core reset circuit

3.1 隔离性能测试

为验证回路整体隔离效果,防止隔离失效导致直流去磁电源损坏,用 50 Ω电阻代替直流电源与旁路电容并联进行测试,旁路电容 C_b 实测值为 3.3 μF,测试直流去磁电源两端电压波形见图 14。

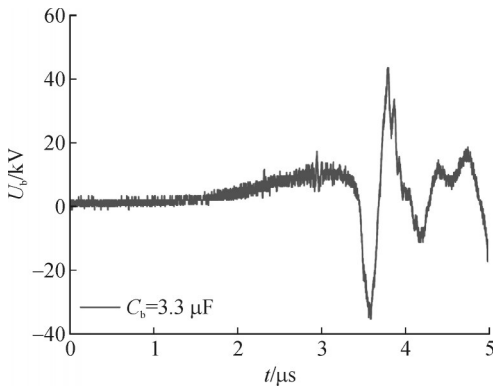


图 14 直流去磁电源两端电压

Fig. 14 DC demagnetizing power supply terminal voltage

当脉冲变压器次级输出电压达到峰值时,旁路电容电压为 13.3 V,此后振荡过程电压最大值 43.2 V,此冲击电压在直流去磁电源的耐压范围内,因此直流去磁电源可安全稳定运行,隔离性能良好。

3.2 磁芯复位实验结果及分析

3.2.1 单次模式复位测试

在不同大小的复位电流下对磁芯复位进行复位单次脉冲放电实验,复位时间为 1 min。因复位电流需大于 (2×12.24) mA,实验测试复位电流分别选择 25、30、35、38、40 mA。初级电容充电 500 V 时,脉冲放电前经不同大小的复位电流后测量的次级输出电压波形对比见图 15。由图 15 计算磁芯的磁

感应强度增量情况见图 16。

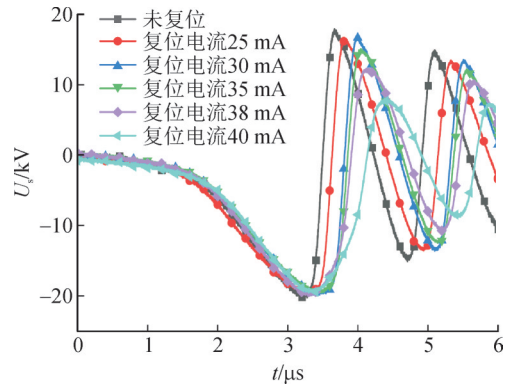


图 15 次级输出电压波形

Fig. 15 Waveforms of secondary output voltages

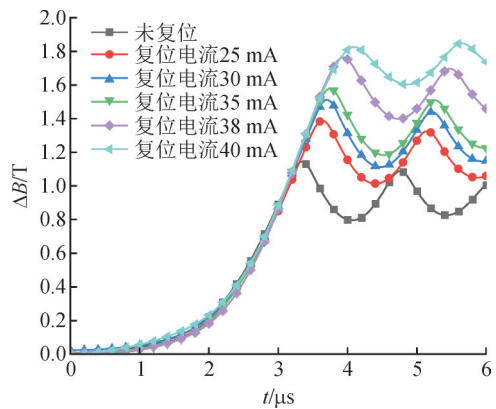


图 16 磁芯磁感应强度增量

Fig. 16 Increment of magnetic flux density in core

由图 15 可知,磁芯未复位时,脉冲电压在接近峰值的前沿阶段,磁芯已经开始饱和。磁芯采用直流复位后,随复位电流递增,脉冲变压器输出电压幅值基本不变,脉宽随之增加,说明磁芯饱和的时刻延后。对应图 16 分析可知,当复位电流较小时,磁芯反向退磁,剩磁值较小,导致磁芯可利用磁感应强度 ΔB 较小,磁芯仍然在脉冲前沿阶段饱和。当复位电流达到 38 mA 后,磁芯饱和时刻已经在输出脉冲的后沿,当电流为 40 mA 后饱和时刻已降至脉冲幅值的一半,因此可以选择 40 mA 的复位电流,此时磁芯的 ΔB 达到了 1.82 T。

3.2.2 重频模式复位测试

磁芯采用 40 mA 直流复位,测试得到不同频率时脉冲变压器的次级电压脉冲波形见图 17。

由图 17 可知,变压器磁芯均在脉冲输出后沿饱和,随频率增大,脉冲间隔时间(直流去磁时间)减小,复位产生的伏秒积减少,导致反向去磁后剩磁值减小,磁芯可利用的 ΔB 减小。针对气体开关触发器应用,脉冲变压器输出脉冲幅值的稳定性对气体开关抖动影响较大,直流去磁后即使脉冲变压器的工作频率发生改变,其脉冲电压幅值也基本不变。

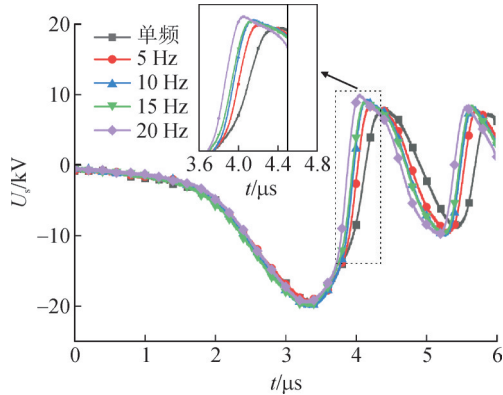


图 17 不同重复频率下输出电压波形

Fig. 17 Output voltage waveforms at different repetition frequencies

针对重复频率为 20 Hz 时,选取其中连续 10 次输出电压波形对比见图 18。脉冲变压器输出脉冲幅值平均值为 19.88 kV,离散系数为 0.08%;前沿平均值为 3.32 μs ,离散系数为 0.42%;脉宽平均值为 3.87 μs ,离散系数为 0.21%;未去磁时,脉冲幅值、前沿及脉宽的离散系数分别为 0.76%、1.45%、0.29%,因此,采用文中的直流去磁方法,脉冲变压器输出波形的稳定性有了明显提升,达到了预期目标。

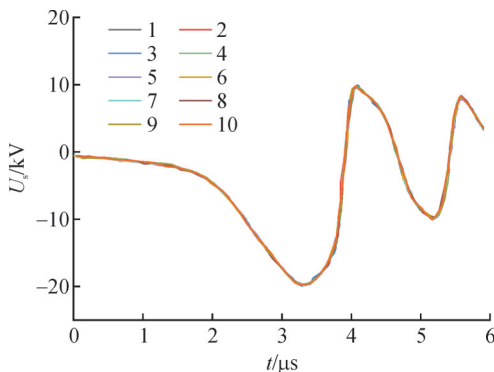


图 18 重频 20 Hz 下输出电压波形一致性对比

Fig. 18 Output voltage waveform consistency comparison at 20 Hz repetition frequency

4 结论

文中基于重频工况下脉冲变压器磁芯非对称磁化过程提出了一种直流复位方法,采用 J-A 模型对磁芯脉冲磁化特性参数识别,建立磁芯场路耦合模型,优化复位电路参数,对不同复位电流单次脉冲放电的输出参数,以及在不同重复频率下复位效果进行实验测试并分析。主要研究结论如下:

1) 脉冲变压器磁芯剩磁会影响变压器输出性能,通过直流复位可增大磁芯的 ΔB ,提高磁芯的利用率,改善变压器输出性能。

2) 测试磁芯的 $B-H$ 曲线并辨识出 J-A 参数,基于

磁芯 J-A 参数建立脉冲变压器的场路耦合模型,可以精确计算复位电流大小及复位时间,优化复位电路参数,为磁芯复位电路提供精确设计方法。

3) 脉冲变压器的磁芯采用直流复位,输出电压幅值的稳定性明显提高,此直流复位方法为含磁芯元件的重频脉冲功率装置设计提供了参考。

参考文献:

- [1] 丛培天. 中国脉冲功率科技进展简述[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(2): 2-12.
CONG Peitian. Review of Chinese pulsed power science and technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(2): 2-12.
- [2] 赵 华. 强流脉冲电子束源高压开关及其精准同步触发系统研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2024.
ZHAO Hua. Research on high-voltage switching for high-current pulsed electron beam sources and their precise synchronous triggering systems[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2024.
- [3] 刘永芳. 紧凑型高性能脉冲调制器的研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2019.
LIU Yongfang. Research on compact high-performance pulse modulator[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019.
- [4] 张 弛. 脉冲升压型高压脉冲电源的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
ZHANG Chi. Research on pulse-boosting high-voltage pulse power supplies[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [5] 史 列. 基于二维材料异质结的中红外脉冲光纤激光特性研究[D]. 济南: 济南大学, 2024.
SHI Lie. Study on the characteristics of mid-infrared pulsed fiber lasers based on two-dimensional material heterojunctions[D]. Jinan: University of Jinan, 2024.
- [6] 王翔宇, 卢彦雷, 朱郁丰, 等. 紧凑型高功率亚纳秒脉冲压缩装置的设计研制[J]. 强激光与粒子束, 2023, 35(2): 143-147.
WANG Xiangyu, LU Yanlei, ZHU Yufeng, et al. Design and development of compact high power subnanosecond pulse compression device[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2023, 35(2): 143-147.
- [7] 余 滔, 饶俊峰. 固态 LTD 的脉宽叠加技术仿真[J]. 电子科技, 2024, 37(4): 47-54.
YU Tao, RAO Junfeng. Simulation study on pulse width superposition of solid-state LTD[J]. Electronic Science and Technology, 2024, 37(4): 47-54.
- [8] 袁炜颖, 甘萌莹, 袁建生. 通过改变外电路电容减小变压器剩磁的方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2997-3003.
YUAN Weiyong, GAN Mengying, YUAN Jiansheng. Method of reducing transformer remanence by changing capacitance of external circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2997-3003.

- [9] 沈春城,严柏平,黄大卓,等. 基于波形复杂特性的励磁涌流快速识别算法研究[J]. 电气工程学报,2024,19(1):243-253.
SHEN Chuncheng, YAN Baiping, HUANG Dazhuo, et al. Research on fast identification algorithm of inrush current based on complex characteristics of waveform[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(1):243-253.
- [10] 李鹏程,陈阳,李永卿,等. 一起励磁涌流闭锁导致的配电自动化开关异常动作案例分析[J]. 云南电力技术,2024,52(3):88-93.
LI Pengcheng, CHEN Yang, LI Yongqing, et al. A case analysis of abnormal operation of distribution automation switch caused by the magnetizing inrush current lockout[J]. Yunnan Electric Power, 2024, 52(3):88-93.
- [11] 饶俊峰,吴施蓉,朱益成,等. 双极性固态直线变压器驱动器的研制[J]. 强激光与粒子束,2021,33(6):51-60.
RAO Junfeng, WU Shirong, ZHU Yicheng, et al. Development of bipolar solid-state linear transformer driver[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(6):51-60.
- [12] 陈鑫玉. 脉冲功率系统中有源复位电路的研究[D]. 成都:西南交通大学,2018.
CHEN Xinyu. Research on active reset circuits in pulsed power systems[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2018.
- [13] 刘悦,周洁敏,洪峰,等. 基于脉冲变压器的高压脉冲电源设计[J]. 电力电子技术,2025,59(7):94-99.
LIU Yue, ZHOU Jiemin, HONG Feng, et al. Design of high-voltage pulse power supply based on pulse transformer[J]. Power Electronics, 2025, 59(7):94-99.
- [14] 张元昌. 副边附加电容实现磁复位的正激变换器分析与设计[D]. 西安:西安科技大学,2022.
ZHANG Yuanchang. Analysis and design of a forward converter with magnetic reset achieved via auxiliary capacitance on the secondary side[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology, 2022.
- [15] WEI Zhenyu, RAO Xuni, HE Xu, et al. Circuit simulation with nonlinear magnetic core of a new linear transformer driver stage[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(8):4084-4090.
- [16] KIM S H, EHSANI M. Control and analysis of magnetic switch reset current in pulsed power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2):529-533.
- [17] 徐海鹏,杨兰均,张志远,等. 脉冲变压器磁芯重复频率复位电路的研究[J]. 强激光与粒子束,2018,30(1):117-121.
XU Haipeng, YANG Lanjun, ZHANG Zhiyuan, et al. Repetitive reset circuit of magnetic core of pulse transformer[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(1):117-121.
- [18] GROVER H S, DAWSON F. Active and passive reset circuits for multistage magnetic pulse compression. (MPC)circuits used in gas laser applications[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(9):3131-3138.
- [19] 王庆峰,车永旺,李相强,等. 基于能量回收原理脉冲变压器复位系统仿真与实验研究[J]. 强激光与粒子束,2022,34(9):103-109.
WANG Qingfeng, CHE Yongwang, LI Xiangqiang, et al. Simulation and experimental research of pulse transformer reset system based on energy recovery principle[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(9):103-109.
- [20] 王自恒. 单级高功率因数副边磁复位正激变换器研究[D]. 西安:西安科技大学,2023.
WANG Ziheng. Research on single-stage high power factor secondary-side magnetic reset forward converter[D]. Xi'an:Xi'an University of Science and Technology, 2023.
- [21] 冯冠儒. 高效率有源钳位正激变换器及其系统的关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2023.
FENG Guanru. Key technologies for high-efficiency active clamping forward converters and their systems[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [22] 江进波,张家兴,王佳栋,等. 磁芯剩磁对脉冲变压器输出参数及损耗的影响研究[J/OL]. 工程科学与技术, 1-16[2025-09-20]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20250321.1718.001>.
JIANG Jinbo, ZHANG Jiaying, WANG Jiadong, et al. Study on the influence of core residual magnetism on output parameters and losses of pulse transformers[J/OL]. Journal of Engineering Science and Technology, 1-16[2025-09-20]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20250321.1718.001>.
- [23] 郭泽,魏君义,赵晓震,等. 基于储能振荡的大型电力变压器剩磁消除方法研究[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-11[2025-09-20]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.241423>.
GUO Ze, WEI Junyi, ZHAO Xiaozhen, et al. Research on residual magnetism elimination methods for large power transformers based on energy storage oscillation[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-11[2025-09-20]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.241423>.
- [24] 张云舰,孔祥清,孙乾,等. 基于励磁电感的变压器铁心剩磁估算[J]. 变压器,2024,61(6):6-11.
ZHANG Yunjian, KONG Xiangqing, SUN Qian, et al. Estimation of residual magnetism in transformer cores based on excitation inductance[J]. Transformer, 2024, 61(6):6-11.
- [25] 吴伟亮,刘细平. 一种变压器剩磁削弱技术研究[J]. 电气技术, 2022, 23(1):35-41.
WU Weiliang, LIU Xiping. Research on a technology of weakening the residual flux of transformer[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(1):35-41.
- [26] 万臻博,丁卫东,孙凤举. 直线变压器驱动源磁芯磁化过程的仿真研究[J]. 高电压技术,2024,50(4):1792-1800.
WAN Zhenbo, DING Weidong, SUN Fengju. Simulation research on magnetization processes of magnetic cores in linear transformer driver[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4):1792-1800.
- [27] 吕璐,黄子平,叶毅,等. 猝发多脉冲感应腔磁芯直流复位系统研制[J]. 强激光与粒子束,2025,37(6):98-103.
LYU Lu, HUANG Ziping, YE Yi, et al. Development of a magnetic core direct current reset system of the multi-pulse induction cells at burst mode[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2025, 37(6):98-103.
- [28] 袁帆,宋岚. 基于脉冲增益的开关电源磁芯复位仿真[J]. 计算机仿真,2022,39(5):264-267.
YUAN Fan, SONG Lan. Simulation of magnetic core reset of switching power supply based on pulse gain[J]. Computer

- Simulation, 2022, 39(5): 264-267.
- [29] 唐天缘. 隔离型DC-DC变换器关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
TANG Tianyuan. Research on key technologies for isolated DC-DC converters[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [30] KACZMARCZYK P, KMON P. A prototype radiation energy measuring integrated circuit with an asynchronous current-pulse reset block providing analog-to-digital conversion in 28 nm CMOS[J]. Journal of Instrumentation, 2024, 19(4): 1088-1748.
- [31] 汪晶慧, 范鹏, 陈为. 基于直流励磁的磁性元件直流磁化特性测量与分析[J]. 电工电能新技术, 2025, 44(3): 99-108.
WANG Jinghui, FAN Peng, CHEN Wei. Measurement and analysis of DC magnetization characteristic of magnetic component based on DC excitation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2025, 44(3): 99-108.
- [32] 江进波, 王佳栋, 程廷强, 等. 基于场路耦合方法的100 kV脉冲变压器设计与磁饱和特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4893-4903.
JIANG Jinbo, WANG Jiadong, CHENG Tingqiang, et al. Design of a 100 kV pulse transformer based on field-circuit coupling method and its magnetic saturation characteristics research[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4893-4903.
- [33] 易虹宇. 高效率隔离变换器的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2025.
YI Hongyu. Research and design of high-efficiency isolation converters[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2025.
- [34] 江进波, 李毅, 曹宇, 等. 脉冲激励下铁基纳米晶磁芯的Jiles-Atherton模型参数辨识及应用[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36(6): 129-137.
JIANG Jinbo, LI Yi, CAO Yu, et al. Parameter identification and application of Jiles-Atherton model for Fe-based nanocrystalline cores under pulsed excitation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2024, 36(6): 129-137.
- 支玉婷(2002—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为脉冲功率技术(E-mail: 17839238786@163.com)。
张家兴(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为脉冲功率技术(E-mail: ezjiaxing@163.com)。
魏笔洋(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为脉冲功率技术(E-mail: WeiBy0601@163.com)。
江进波(1988—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为脉冲功率技术和高电压与绝缘技术(通信作者)(E-mail: jinbojiang@163.com)。

(上接第39页)

- HAN Yongxia, FENG Shuaisong, GAO Yuqun, et al. Review on research of overvoltage and overcurrent protection for flexible DC distribution system[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(12): 81-89.
- [22] 章寒冰, 林旭义, 宋艳, 等. 基于改进下垂曲线的柔性直流配电网电压控制方法研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 161-166.
ZHANG Hanbing, LIN Xuyi, SONG Yan, et al. Research on voltage control method of flexible DC distribution network based on improved droop curve[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(10): 161-166.
- [23] 冯天豪. 柔性中压直流配电网接地方式及故障暂态分析的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
FENG Tianhao. Research on grounding method and fault transient analysis of flexible medium-voltage DC distribution network[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [24] 刘宇昂, 戴志辉, 杨明玉, 等. 柔性直流电网故障电流复合抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 93-101.
LIU Yu'ang, DAI Zhihui, YANG Mingyu, et al. Composite fault-current suppression strategy for flexible DC grids[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 93-101.
- [25] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于MMC的环状直流配网在不同接地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 1-10.
DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Analysis on fault characteristics of MMC-based ring DC distribution networks under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 1-10.
- [26] MONADI M, ZAMANI M A, KOCH-CIOBOTARU C, et al. A communication-assisted protection scheme for direct-current distribution networks[J]. Energy, 2016(109): 578-591.
- [27] WANG Dongju, ZHOU Hao, DENG Xu. Switching overvoltage characteristics of 1 100 kV UHVDC converter station[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1205-1212.
- [28] 李霞林, 郭力, 黄迪, 等. 直流配电网运行控制关键技术研究综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3039-3049.
LI Xialin, GUO Li, HUANG Di, et al. Research review on operation and control of DC distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3039-3049.
- 刘书瀚(1995—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统过电压与绝缘配合、柔性直流输配电、直流断路器等(通信作者)(E-mail: 100698175@qq.com)。