



·脉冲功率技术·

空心脉冲发电机剩磁能量回收方法^{*}

张 鹏, 李海涛, 胡长勇, 孔令硕

(山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255020)

摘 要: 为了降低空心脉冲发电机的能量损耗与励磁绕组发热, 提出了一种具有剩余磁能回收功能的脉冲发电机励磁电路。通过在电容支路设置调节电感, 使放电完成后的电容电压反向, 迫使晶闸管与二极管关断, 以切换电流通路来实现剩余励磁能量到电容器中的转移。该电路使用晶闸管作为主开关, 电流关断能力强的特点使其在大功率脉冲发电机的应用中具有一定优势。对提出的励磁能量回收电路的工作过程进行了介绍, 仿真分析了剩余能量回收对励磁绕组能量损耗和脉冲发电机发热的影响, 并对该电路拓扑的工作原理进行了实验验证。结果表明: 该电路可以迅速回收励磁绕组中的剩余能量, 缩短励磁电流续流时间, 减少励磁损耗与能量损耗。仿真与实验结果反映的规律与电路原理一致, 表明了该电路方法的可行性。

关键词: 脉冲发电机; 能量回收; 实验研究; 脉冲功率电源; 电路拓扑

中图分类号: TM301

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230124

Remanent magnetic energy recovery method for air-core pulse alternator

Zhang Peng, Li Haitao, Hu Changyong, Kong Lingshuo

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255020, Shandong)

Abstract: To reduce the energy loss of the air-core pulse alternator and the heating of the field winding, a field circuit topology with the function of recovering residual magnetic energy is proposed. By setting the adjustable inductance in the capacitor branch, the capacitor after the discharge has a reverse voltage, forcing the thyristor and the diode to turn off, and switching the current flow path to realize the transfer of the remaining excitation energy to the capacitor. The circuit uses the thyristor as the main switch, and its high current turn-off capability gives it an advantage in the application of high-power pulse alternator. The working process of the proposed excitation energy recovery circuit is introduced, the influence of residual energy recovery on the energy loss and heat generation of the field winding is simulated and analyzed, and the working principle of the circuit topology is verified experimentally. The results show that the circuit can quickly recover the residual energy in the field winding, shorten the freewheeling time of the excitation current, and reduce the excitation loss and energy loss. The law reflected by the simulation and experimental results is consistent with the circuit principle, which shows the validity of the circuit method.

Key words: pulse alternator, energy recovery, experimental research, pulse power supply, circuit topology

空心脉冲发电机作为一种新型脉冲功率电源, 通过旋转发电机系统将惯性能转化为电能, 集储能、机电能量转换和功率调节为一体^[1-3], 具有储能密度高、功率密度高、波形调节灵活、体积小、质量小等诸多优点, 在脉冲功率技术领域具有非常大的应用潜力^[4-5]。然而, 脉冲发电机放电结束后剩余的励磁电流在续流时会产生励磁损耗并给绕组带来温升, 这成为了脉冲发电机发展的主要障碍之一^[6-8]。

目前, 国内外学者基于电路理论、流体力学和材料科学等对脉冲发电机的励磁能量回收方法和热管理进行了不同程度的研究, 并取得了一系列重要结论^[9-11]。文献 [12] 提出了两种励磁绕组的主动冷却结构, 该结构使脉冲发电机在连续放电期间绕组的热点温度稳定在限定水平。文献 [13] 在他励脉冲发电机的基础上提出了一种可回收

* 收稿日期: 2023-05-11; 修订日期: 2023-09-13

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2019QEE018)

联系方式: 张 鹏, m13852433558@163.com。

通信作者: 李海涛, lihaitao840812@163.com。

剩余励磁能量的多模块励磁电路。利用晶闸管负极串联的电感关断晶闸管,借助续流支路回收励磁绕组的剩余能量,大大缩短了电容器在下一工作周期的预充电时间,提高了系统运行效率。文献[14]也在他励脉冲发电机的基础上提出了一种并励串收式的励磁拓扑结构,有效降低了励磁绕组的损耗。文献[15]对单相脉冲发电机设计了桥式回收电路,使放电结束后的励磁电流被换向回转子桥,从而使励磁绕组中的电能转换成转子的动能。文献[16-17]对桥式回收电路进行了策略设计,通过控制桥式电路的触发角,可以使脉冲交流发电机作为双向电力系统工作,从而在能量回收过程中将励磁绕组中的电磁能转换成储存在转子中的动能,避免了能量的损耗。本文设计了一种可回收剩磁能量的自励空心脉冲发电机励磁电路。使用脉冲电容器回收放电结束后的励磁绕组剩余能量,降低了励磁绕组的产热,提高了脉冲发电机效率。首先对励磁能量回收电路的不同工作阶段建立了数学模型,给出了衡量电路优劣的电路性能指标;然后建立了脉冲发电机仿真模型,对传统电路与励磁回收电路进行了仿真对比;最后搭建了励磁电路的验证性实验平台,对能量回收方法进行了实验验证。

1 传统脉冲发电机励磁电路及问题分析

图1为传统脉冲发电机系统的电路结构。其工作过程如下:首先使用原动机将装有励磁绕组的转子拖动到额定转速,并对电容充电至额定电压,使整个系统产生初始储能。在接收到励磁信号时,脉冲电容器开始对励磁绕组放电。旋转中的励磁绕组与电枢绕组发生电枢反应,在电枢绕组中产生感应电流。电流经过整流电路流回励磁绕组,如此往复形成一种正反馈过程,励磁电流呈指数形式增加。待收到发射信号时,触发放电开关并利用电枢绕组对负载放电。

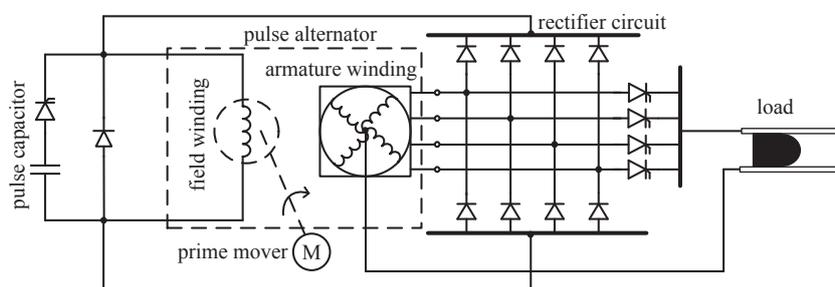


Fig. 1 Traditional pulse generator topology

图1 传统脉冲发电机拓扑结构

脉冲发电机放电结束后,励磁绕组中的电流仍可达到数kA。这些电流经过续流回路续流时,电能被逐渐释放,转化成热能消耗在励磁绕组上。电能的浪费会使整个系统的效率降低,热能的产生会影响脉冲发电机的使用寿命,因此有必要对励磁绕组的剩余能量进行回收。

2 励磁电路的改进与分析

2.1 拓扑结构

图2为具有励磁能量回收的脉冲发电机改进拓扑。图3为具体的励磁回收电路结构,其主要包括脉冲电容器 C_0 、调节绕组 L_{t1} 、励磁绕组 L_f 、3个晶闸管 K_{t1} 、 K_1 、 K_{c1} 和1个二极管 D_1 。励磁回收电路的主要原理是通过调节电感使脉冲电容器产生反向电压,以迫使励磁控制开关自动关断,在放电结束后通过触发剩磁回收控制开关导通,以利用脉冲电容器的反向电压使续流晶闸管自动关断,并使励磁绕组中的剩余能量转移到脉冲电容器中。

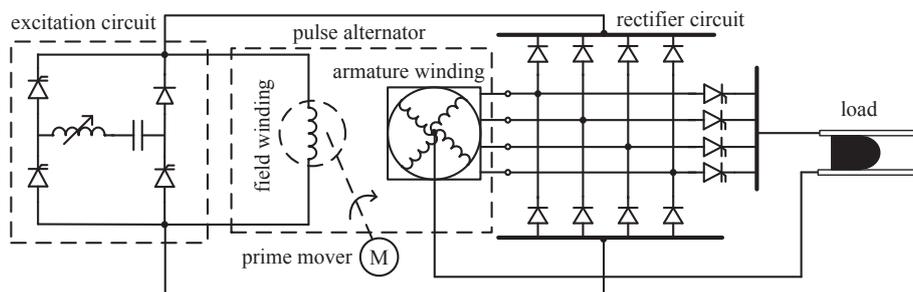


Fig. 2 Pulse generator with excitation energy recovery

图2 具有励磁能量回收的脉冲发电机拓扑

2.2 工作过程

图4为励磁回收电路在励磁阶段、续流阶段与能量回收阶段的电流流路径。为了简化电路分析,只考虑励磁绕组的电阻 R_f 与调节绕组的电阻 R_{t1} ,忽略线路内阻和导线连接处的电阻。同时以电容电压 U_c 与励磁电流 I_f 作为最终的模型描述。

开始励磁时,触发晶闸管 K_{t1} 与 K_1 使其导通,此时二极管 D_1 承受反向电压而关断,脉冲电容器开始对励磁绕组励磁,工作回路如图4(a)所示。由于调节绕组的作用,使放电完成后的脉冲电容器产生反向电压,此时二极管 D_1 承受正向电压而开通,晶闸管 K_{t1} 承受反向电压而关断,脉冲电容器的回路被切断,电路进入续流状态。

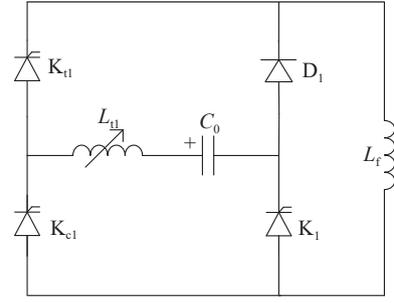


Fig. 3 Excitation energy recovery circuit

图3 励磁能量回收电路

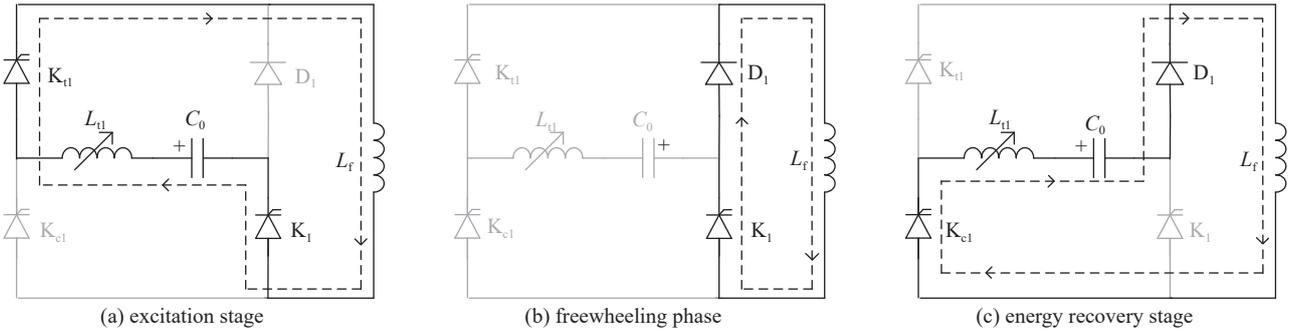


Fig. 4 Working process of excitation energy recovery circuit

图4 励磁能量回收电路工作过程

励磁阶段的串联回路中主要包括脉冲电容器 C_0 、调节绕组 L_{t1} 和励磁绕组 L_f ,可由基尔霍夫定律建立等式

$$\begin{cases} U_c = (L_f + L_{t1}) \frac{dI_f}{dt} + I_f(R_f + R_{t1}) \\ I_f = -C_0 \frac{dU_c}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可得二阶齐次线性微分方程

$$U_c'' + \frac{R_f + R_{t1}}{L_f + L_{t1}} U_c' + \frac{1}{(L_f + L_{t1})C_0} U_c = 0 \quad (2)$$

励磁阶段的初始条件为

$$\begin{cases} U_c(0) = U_0 \\ U_c'(0) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_0 为脉冲电容器的初始电压值。结合式(2)和(3),可得到脉冲电容器电压 U_c 与励磁电流 I_f 的解析式

$$\begin{cases} U_c = \frac{\omega_0 U_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi) \\ I_f = \frac{U_0}{\omega(L_f + L_{t1})} e^{-\delta t} \sin(\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} \delta = \frac{(R_f + R_{t1})}{2(L_f + L_{t1})} \\ \omega_0 = \sqrt{1/L_f L_{t1} C_0} \\ \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \\ \varphi = \arctan(\omega/\delta) \end{cases} \quad (5)$$

续流阶段开始时电容支路被切断,电容保持反向电压,此时的电流流向如图4(b)所示。当励磁电流处于续流状态时,脉冲发电机的电枢绕组会经过整流电路对负载放电,放电的瞬时状态较为复杂,因此本文在解析计算时不

考虑励磁绕组与电枢绕组发生的电枢反应, 只针对励磁电路进行分析, 并假定励磁电流处于自然续流状态。规定续流阶段开始时刻为 T_0 , 由公式(4)可得到脉冲电容器电压与励磁电流解析式

$$\begin{cases} U_c = \frac{\omega_0 U_0}{\omega} e^{-\delta T_0} \sin(\omega T_0 + \varphi) \\ I_f = \frac{U_0}{\omega(L_f + L_{t1})} e^{-\delta t} \sin(\omega T_0) \end{cases} \quad (6)$$

在需要回收能量的时刻触发导通晶闸管 K_{c1} , 使电容的反向电压施加到晶闸管 K_1 两端并使其关断。励磁电流由续流支路转换到电容所在支路, 电容被正向充电, 剩余能量被逐渐吸收。回收阶段结束后, 晶闸管 K_{c1} 两端被施加反向电压而关断, 电容电压得以保持不变。回收阶段的电流流向如图 4(c) 所示。规定开始回收的时刻为 T_1 。当 $t > T_1$ 时, 可得到回收阶段时脉冲电容器 U_c 与励磁电流 I_f 的解析式

$$\begin{cases} U_c = \omega L_f I_{f(T_1)} e^{-\delta t} \sin(\omega t) \\ I_f = \frac{\omega_0 I_{f(T_1)}}{\omega} e^{-\delta t} \sin(-\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $I_{f(T_1)}$ 为续流结束后的励磁电流, 可表示为

$$\begin{cases} I_{f(T_1)} = \frac{U_0}{\omega(L_f + L_{t1})} e^{-\delta T_1} \sin(\omega T_1) \\ t > T_1 \end{cases} \quad (8)$$

2.3 电路性能指标

2.3.1 励磁电流续流时间 T_r

根据式(7), 令 $I_f=0$, 得到 $-\omega t + \varphi = 0$, 可求得励磁电流的续流时间为

$$T_r = \frac{\varphi}{\omega} \quad (9)$$

2.3.2 励磁绕组产热 Q_f

励磁绕组中大部分的热量由电阻产生, 因此 Q_f 可以表示为

$$Q_f = \int_0^t I_f^2 R_f dt \quad (10)$$

2.3.3 脉冲发电机效率比 η_r

脉冲发电机的效率系统效率 η_s 定义为整流后直流母线上的电流和电压乘积的积分与系统初始储能的比值。在一个放电周期中, 系统的初始储能 Q_Σ 来源于转子的惯性能和脉冲电容器的初始电能, 其表达式为

$$Q_\Sigma = \frac{1}{2} J(\Omega_0^2 - \Omega_1^2) + \frac{1}{2} C U_0^2 \quad (11)$$

式中: J 为转子转动惯量, Ω_0 为转子初始机械角速度, Ω_1 为放电结束后转子的机械角速度, C 为脉冲电容器电容。

脉冲发电机系统效率 η_s 可以表示为

$$\eta_s = \frac{\int_0^t U(t) I(t) dt}{Q_\Sigma} \times 100\% \quad (12)$$

式中: $U(t)$ 与 $I(t)$ 分别是整流后直流母线上的电压值与电流值。

对于励磁能量回收电路, 有一部分能量被回收进了脉冲电容器, 所以在计算系统的初始储能时要减去脉冲电容器中回收的能量 Q_c , 此时效率 η_s 可表示为

$$\eta_s = \frac{\int_0^t U(t) I(t) dt}{Q_\Sigma - Q_c} \times 100\% \quad (13)$$

另外, 在计算电机效率的表达式(13)中, $U(t)$ 与 $I(t)$ 是与负载特性有关的物理量, 放电结束后的励磁能量回收过程并不会影响负载所获得的能量, 因此为了具有普遍性, 采用脉冲发电机效率比 η_r 来表示有励磁能量回收电路的工作效率与无励磁能量回收电路工作效率的比值, 表达式为

$$\eta_r = \frac{Q_\Sigma}{Q_\Sigma - Q_c} \quad (14)$$

3 仿真分析

3.1 仿真模型

本文使用有限元软件搭建了一个四相四极脉冲发电机模型, 图 5 为脉冲发电机的 2D 模型, 主要包括定子、转子、励磁绕组与电枢绕组, 其参数展现在表 1 中。每相电枢绕组取 6 匝, 材料为铜; 励磁绕组取 80 匝, 材料为铝。在电磁场仿真中, 对于定、转子的复合材料, 因其磁导率与空气近似, 因此用空气区域代替。在温度场仿真中, 定、转子采用碳纤维环氧树脂材料。

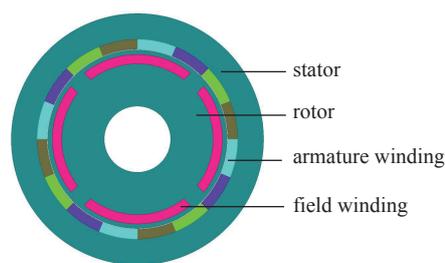


Fig. 5 2D model of pulse alternator

图 5 脉冲发电机 2D 模型

表 1 脉冲发电机仿真参数

Table 1 Simulation parameters of pulse alternator

number of pole pairs	number of phases	rotor speed/ (r·min ⁻¹)	rotor outer diameter/mm	stator outer diameter/mm	moment of inertia/(kg·m ²)	field winding inductance/mH	field winding resistance/mΩ	capacitance of capacitor/mF	initial excitation voltage/V
2	4	12000	540	760	30	4.2	90	3	1000

3.2 电场仿真结果分析

结合图 1 与图 2 的脉冲发电机电路进行电场仿真, 仿真分析被分为有励磁能量回收与无励磁能量回收两种情况。

由图 6 可以看出, 脉冲发电机在经过励磁过程与续流过程后, 还剩下 6.7 kA 的励磁电流。对于无能量回收的传统电路, 放电结束后励磁电流会经过二极管续流, 94 kJ 的能量会被励磁绕组中的电阻消耗, 并且电流衰减较缓慢, 所需时间大于 20 ms, 电能最终转换成无法回收的热能。励磁能量回收电路的励磁电流从 6.7 kA 衰减至 0 kA 仅用了 6 ms, 部分能量被回收进了电容, 同时缩短了脉冲发电机一个工作周期。

图 7 为励磁绕组在一个工作周期的产热情况。其中, 放电过程产热最多, 从 0.02 MJ 增加到了 0.1 MJ。回收过程产生了 0.01 MJ 的热量, 伴随着励磁电流降为 0 kA, 产热在 0.11 MJ 保持不变。能量回收电路的励磁绕组明显比传统电路产生的热量少, 产热时间更短。

图 8 是脉冲电容器的电压变化。两种电路的电容电压在初始励磁后都下降到了 0.5 kV。为了给励磁回收阶段做准备, 回收电路在 15 ms 时通过调节电感使脉冲电容电压下降到 -0.05 kV, 迫使晶闸管关闭。随后, 经过 6 ms 的回收时间, 电容电压上升到了 7.2 kV, 回收了 77 kJ 的能量, 回收后的能量可以作为下一工作周期中的初始励磁能量, 节省了对励磁电容的充电时间, 提高了脉冲发电机系统的工作效率。

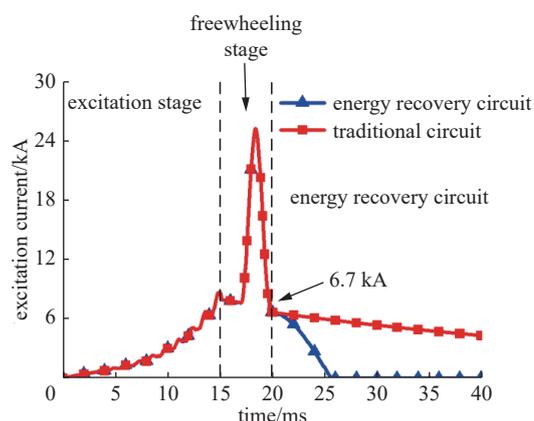


Fig. 6 Excitation current waveform

图 6 励磁电流波形

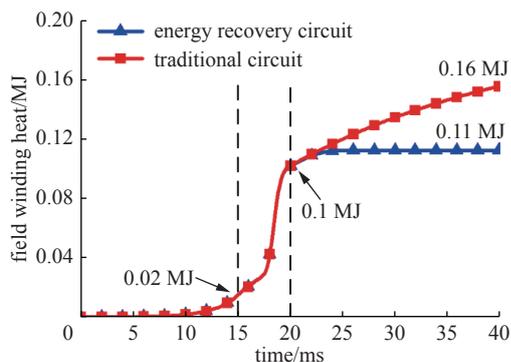


Fig. 7 Heat generation of field winding

图 7 励磁绕组产热

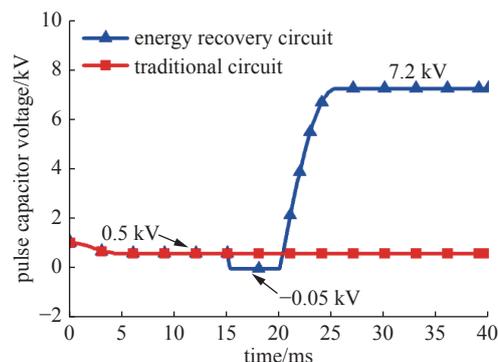


Fig. 8 Pulse capacitor voltage

图 8 脉冲电容电压

3.3 温度场仿真结果分析

在脉冲发电机负载固定的情况下, 放电周期是唯一能影响热场的因素, 本文选取 40 ms 作为一个放电周期, 对

两种电路进行仿真。其中,自然对流系数设置为 10 W/m^2 ,初始温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

图 9 为脉冲发电机在一个放电周期完成后的温度分布情况。其中传统电路的脉冲发电机最高温度为 $38.6 \text{ }^\circ\text{C}$,励磁能量回收电路的脉冲发电机最高温度为 $34.9 \text{ }^\circ\text{C}$,两者相差 $3.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。励磁绕组在励磁过程与放电过程中产生较多的欧姆损耗,导致热量的相对集中,部分热量通过气隙传递到了电枢绕组中,但是在自然对流冷却的条件下,电枢绕组的温升不会太大,保持在 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。

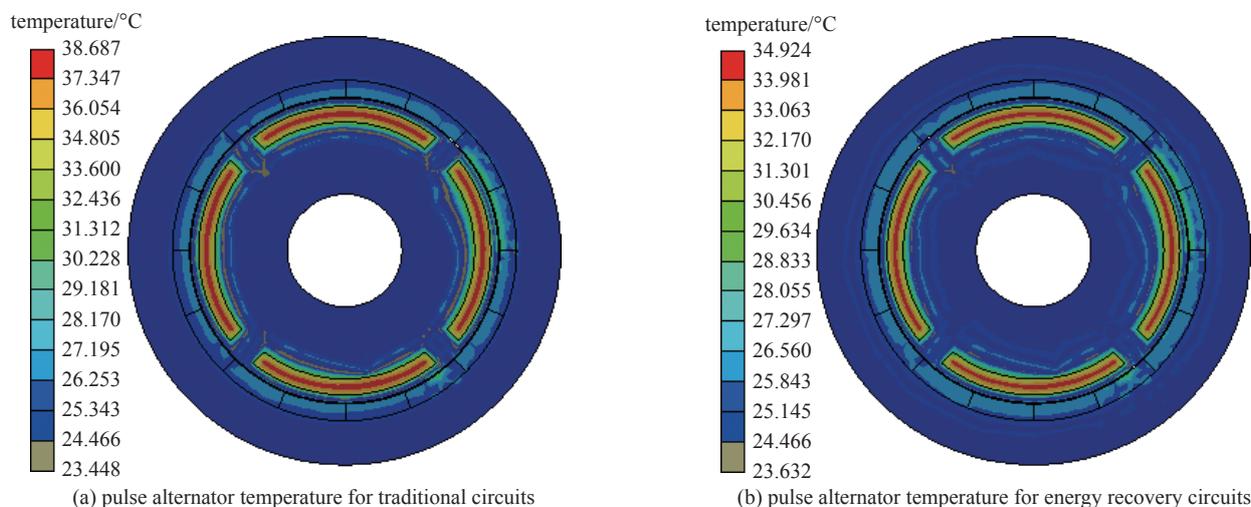


Fig. 9 Temperature distribution of pulse alternator

图 9 脉冲发电机温度分布

图 10 为脉冲发电机一个放电周期的最高温度变化情况。由于电机的最高温度主要集中在励磁绕组中,因此图 10 也反映了励磁绕组的温度变化。15 ms 到 20 ms 为续流阶段,温度上升最快,从 $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 上升到了 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 。励磁回收电路经过 6 ms 的回收时间,温度在 $34.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 趋于平稳,而传统电路的励磁电流此时处于续流状态,温度还在逐渐增加。在低于碳纤维环氧树脂 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的极限温度下,对剩余励磁能量进行回收可以增加脉冲发电机的放电次数。

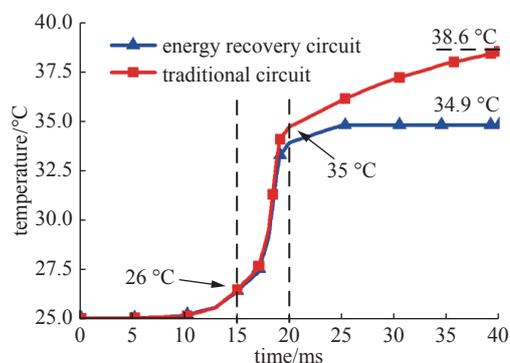


Fig. 10 Temperature curve of pulse alternator

图 10 脉冲发电机温度分布

3.4 对比分析

放电结束后励磁绕组剩下 94 kJ 的能量,回收阶段脉冲电容器回收了 77 kJ 的能量,回收效率为 81.9% 。根据式(11)可求得系统大约使用了 369 kJ 的惯性能与 1.5 kJ 的电容电能。将所求能量数值代入式(14)可以得到脉冲发电机效率比 η_r 为 1.28 ,即励磁回收电路比传统电路的工作效率提高了 0.28 倍。

表 2 为通过理论计算与仿真分析得到的两种电路的电路指标。从中可知,剩余励磁能量的回收可以大幅缩短续流时间,同时可以减少励磁绕组产热,有效降低电机的温升。

表 2 电路性能指标

Table 2 Circuit performance indices

circuit mode	freewheeling time/ms	winding heat/MJ	winding temperature/ $^\circ\text{C}$
traditional circuit	>20	>0.16	38.6
energy recovery circuit	6	0.11	34.9

4 实验验证

搭建了小型实验平台验证所提出电路拓扑的可行性,使用普通线圈代替脉冲发电机的励磁绕组,且所有参数的设定以实验室现有条件作为依据,如表 3 所示。图 11 为搭建的验证性实验平台,主要包括电源、电容器、调节绕组、示波器、励磁绕组、FPGA、晶闸管驱动和若干开关器件。

表 3 实验电路参数

Table 3 Parameters of experimental circuit

capacitance of capacitor/ μF	voltage of capacitor/V	inductance of regulating winding/ μH	resistance of regulating winding/ $\text{m}\Omega$	inductance of field winding/ mH	resistance of field winding/ $\text{m}\Omega$
100	400	180	20	1.5	320

电源为电容器提供初始电压,在电路运行过程中需断开,防止破坏电路原理。晶闸管的额定正向平均电流为 200 A,控制极触发电流为 50 mA,反向峰值电压为 1600 V。二极管的正向最大电流为 200 A,耐压为 1600 V。开关器件均符合实验平台要求。FPGA 是以数字电路为主的集成芯片,属于可编程的逻辑器件。通过 FPGA 给晶闸管驱动电路传输高低电平信号,驱动电路将电平信号转换成电信号施加给晶闸管门极,从而控制晶闸管的导通时刻。

图 12 为示波器的实验结果。从图中可知,电容初始预充电压为 400 V,续流阶段产生了 100 V 的反向电压。励磁电流最大值为 70 A。4 ms 时晶闸管驱动接收到 FPGA 的高电平信号,晶闸管 K_{c1} 导通,励磁电流从 35 A 迅速衰减至零,电容电压上升至 130 V。电容回收的能量占初始总能量的 10.56%,该能量可作为电路下一工作周期的初始储能使用。励磁绕组在 4 ms 时剩下 0.919 J 的能量,回收阶段电容器回收了 0.845 J 的能量,可得电容的回收效率为 91.9%。从实验波形来看,实验结果反映的电路原理与理论基本一致,验证了该励磁电路的可行性。

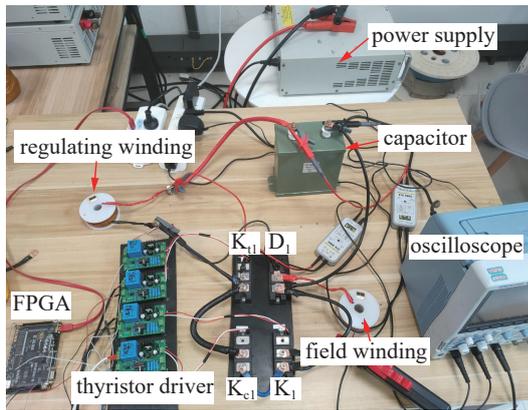


Fig. 11 Experimental circuit

图 11 实验电路

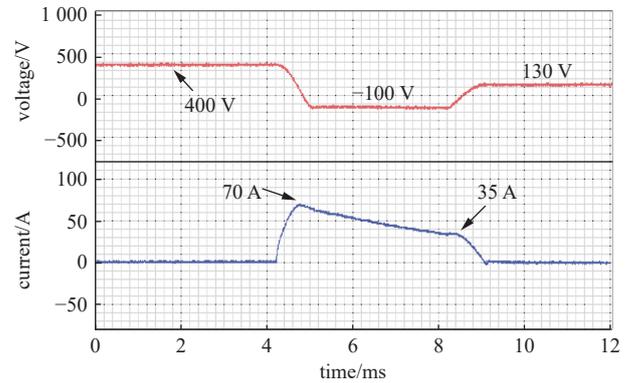


Fig. 12 Experimental results

图 12 实验结果

5 结 论

本文针对空心脉冲发电机提出了一种励磁能量回收电路。利用电感串联电容使电容产生反压,从而关断导通的晶闸管并切换电流回路,实现了励磁绕组剩余能量回收功能。仿真与实验结果反映的规律与电路原理基本一致,表明此电路具有可行性。与传统电路进行了仿真对比,励磁时间短与损耗小等特点表明此电路具有优越性。另外,该电路在提高脉冲发电机效率的同时,回收了励磁绕组的剩余能量。回收的能量可供电路下一工作周期使用,减少电容预充电时间,有利于脉冲发电机的连续脉冲放电。

参考文献:

- [1] 李军, 严萍, 袁伟群. 电磁轨道炮发射技术的发展与现状[J]. 高压技术, 2014, 40(4): 1052-1064. (Li Jun, Yan Ping, Yuan Weiqun. Electromagnetic gun technology and its development[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1052-1064)
- [2] 陶雪峰. 空心补偿脉冲发电机励磁与放电控制方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017. (Tao Xuefeng. Research on the excitation and discharge control method of air-core compensated pulsed alternator[D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2017)
- [3] 叶才勇, 于克训, 刘晓旭, 等. 补偿脉冲发电机电流脉冲成形的分析[J]. 高压技术, 2008, 34(2): 373-376. (Ye Caiyong, Yu Kexun, Liu Xiaoxu, et al. Investigation on the current pulse formation of compulsators[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 373-376)
- [4] 陶雪峰, 刘昆. 空心补偿脉冲发电机设计与仿真[J]. 电工技术学报, 2018, 33(9): 1931-1937. (Tao Xuefeng, Liu Kun. Design and simulation of an air-core compulsator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(9): 1931-1937)
- [5] 陶雪峰, 刘昆. 补偿脉冲发电机放电波形优化方法[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 095001. (Tao Xuefeng, Liu Kun. Pulse shaping method for compulsator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 095001)
- [6] Ye Caiyong, Yu Kexun, Lou Zhenxiu, et al. Investigation of self-excitation and discharge processes in an air-core pulsed alternator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(1): 150-154.

- [7] Yu Kexun, Duan Huijie, Xie Xianfei. The electromagnetic and thermal analysis of an air-core pulsed alternator driving the railgun[C]//Proceedings of the 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems. 2019.
- [8] Yu Kexun, Zhu Hanting, Xie Xianfei, et al. Loss analysis of air-core pulsed alternator driving an ideal electromagnetic railgun[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(3): 1589-1599.
- [9] 吴伏家, 东潘龙. 20MJ 补偿脉冲发电机的设计与仿真[J]. *现代电子技术*, 2014, 37(2): 149-152. (Wu Fujia, Dong Panlong. Design and simulation of 20 MJ compulsator[J]. *Modern Electronics Technique*, 2014, 37(2): 149-152)
- [10] 张丰伟. 空芯脉冲发电机电源系统分析与控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017. (Zhang Fengwei. The analysis and control of a pulsed power supply system based on an air-core alternator[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017)
- [11] 赵伟铎, 崔淑梅, 刘庆, 等. 空心补偿脉冲发电机温度场计算与分析[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(27): 95-101. (Zhao Weiduo, Cui Shumei, Liu Qing, et al. Thermal field calculation and analysis of an air-core compulsator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(27): 95-101)
- [12] Cui Shumei, Zhao Weiduo, Wu Shaopeng. Research on the thermal field and active water cooling system design of an air-core compulsator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, 39(1): 257-262.
- [13] 李海涛, 刘剑, 赵博, 等. 一种可回收剩余励磁能量的他励空芯脉冲发电机励磁电路: 113315427A[P]. 2021-08-27. (Li Haitao, Liu Jian, Zhao Bo, et al. A separately excited air-core pulse alternator excitation circuit capable of recovering residual excitation energy: 113315427A[P]. 2021-08-27)
- [14] 孙鹤鸿, 李文超, 付荣耀, 等. 一种用于他励脉冲发电机励磁能量回收的并励串收式拓扑结构: CN115085348A[P]. 2022-09-20. (Xun Yaohong, Li Wenchao, Fu Rongyao, et al. A shunt-excited series-received topology for the recovery of excitation energy of separately excited pulse generators: CN115085348A[P]. 2022-09-20)
- [15] Li Xiyuan, Song Liwei, Cui Shumei. Energy reclaim control of an air-core pulsed alternator[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. 2015.
- [16] Li Xiyuan, Cui Shumei, Song Liwei. Impact factors for energy reclamation control of an air-core pulsed alternator[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26: 0606805.
- [17] Ding Jianmin, Xie Xianfei, Yu Kenxun. Energy recovery of air-core pulsed alternators after discharge process[C]//Proceedings of 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference. 2021.