

Design and optimization of a pulsed power generator for electrical wire explosion

MScAE Francesc Hernández García

Abstract—This master's thesis aims to develop robust techniques for inducing extreme conditions in fluids by employing a Pulsed Power Generator (PPG). The project focuses on studying and controlling electrically induced single-wire explosions to efficiently produce shock waves in air and water. An in-depth literature review is conducted, followed by an exploration of the necessary theoretical background to understand the multidisciplinary physical phenomena. A methodology is developed to ensure the safe operation of the PPG, along with defining the Schlieren optical setup and operating procedures for the high-speed camera capable of reaching speeds up to 10 million frames per second. The electrical parameters of the PPG are determined through short-circuit experiments and compared to an analogous RLC-like circuit using analytical and numerical simulations. Systematic experimentation is conducted across different copper wire diameters of $\varnothing 150\ \mu\text{m}$, $\varnothing 400\ \mu\text{m}$ and $\varnothing 500\ \mu\text{m}$ and different initial capacitor voltages up to 23 kV. The optimal explosion conditions are identified, notably with a wire diameter of $\varnothing 400\ \mu\text{m}$ in air, resulting in peak pressures in the order of hundreds of bar and Mach numbers up to 21.4. In water, the peak pressures reach tens of kilobar and Mach numbers up to 1.8. The analysis quantifies the transferred electrical energy and initial mechanical energy of the shock waves, reaching power magnitudes in the order of gigawatts and electrical-to-mechanical energy transfer efficiency up to 33%. The results are compared with numerical simulations and existing literature, culminating in a comprehensive report that synthesizes findings from literature review, hands-on experimentation, and analysis.

Sammanfattning—Denna masteruppsats syftar till att utveckla robusta tekniker för att inducera extrema förhållanden i fluida med hjälp av en Pulserande Kraftgenerator (PPG). Projektet fokuserar på att studera och kontrollera elektriskt inducerade explosionsfenomen med en enda tråd för att effektivt producera stötvågor i luft och vatten. En grundlig litteraturoversikt genomförs, följt av en utforskning av den nödvändiga teoretiska bakgrunden för att förstå de mångdisciplinära fysikaliska fenomenen. En metodik utvecklas för att säkerställa säker drift av PPG, tillsammans med definieringen av det Schlieren-optiska uppställningen och driftsförfarandena för höghastighetskameran som kan nå hastigheter på upp till 10 miljoner bilder per sekund. De elektriska parametrarna för PPG bestäms genom kortslutningsexperiment och jämförs med en analog RLC-liknande krets med analytiska och numeriska simuleringar. Systematiska experiment utförs med olika koppartråddiametrar på $\varnothing 150\ \mu\text{m}$, $\varnothing 400\ \mu\text{m}$ och $\varnothing 500\ \mu\text{m}$ och olika initiala kondensatorsspänningar upp till 23 kV. De optimala explosionsförhållandena identifieras, särskilt med en tråddiameter på $\varnothing 400\ \mu\text{m}$ i luft, vilket resulterar i topptryck på ordningen hundratals bar och Mach-nummer upp till 21.4. I vatten når topptrycken tiotals kilobar och Mach-nummer upp till 1.8. Analysen kvantifierar den överförda elektriska energin och den initiala mekaniska energin hos stötvågorna, vilket når effektmagnituder på ordningen gigawatt och en överföringseffektivitet av elektrisk till mekanisk energi på upp till 33%. Resultaten jämförs med numeriska simuleringar och befintlig litteratur, vilket kulminerar i en omfattande rapport som sammanfattar resultaten från litteraturrenövringen, praktisk experimentation och analys.

Index Terms—Pulsed Power Generator, Electrically Induced Wire Explosion, Shock Wave Generation, Compressible Fluid Dynamics, High Voltage Engineering.

NOMENCLATURE AND ACRONYMS

R	Resistance [Ω]
L	Inductance [H]
C	Capacitance [F]
i	Current [A]
v	Voltage [V]
ε	Dielectric permittivity [F/m]
μ	Magnetic permeability [H/m]
σ	Electrical conductivity [S/m]
D	Diameter [m]
l	Length [m]
s	Laplace variable
ρ	Density [kg/m^3] or Electrical resistivity [$\Omega\cdot\text{m}$]
\mathbf{V}	Velocity vector (u, v, w) [m/s]
p	Pressure [Pa]
T	Temperature [K]
h	Specific enthalpy [J/kg]
e	Specific internal energy [J/kg]
a	Speed of sound [m/s]
γ	Ratio of specific heats
\dot{q}	Heat addition rate [W/kg]
\mathbf{f}	Body forces vector (f_x, f_y, f_z) [N/kg]
M	Mach number
W	Shock wave speed [m/s]
u_p	Speed of particles behind the shock [m/s]

<i>AUFS</i>	Artificial Upstream Flux Vector Splitting
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics
<i>CS</i>	Contact Surface
<i>EOS</i>	Equation Of State
<i>EWE</i>	Electrical Wire Explosion
<i>FPL</i>	Fluid Physics Laboratory
<i>FVM</i>	Finite Volume Method
<i>KCL</i>	Kirchhoff's Current Law
<i>KTH</i>	Kungliga Tekniska Högskolan
<i>LHS</i>	Left-Hand Side
<i>MHD</i>	Magnetohydrodynamics
<i>PPG</i>	Pulsed Power Generator
<i>RC</i>	Rogowski Coil
<i>RHS</i>	Right-Hand Side
<i>SW</i>	Shock Wave
<i>SWG</i>	Shock Wave Group
<i>TDT</i>	Total Damping Time
<i>UPS</i>	Uninterruptible Power Supply



Download the thesis!