

TRACKING DE ONDAS DE CHOQUE DE PLASMA DEFORMABLES

G. Correa-Reina, F. Casanova, M. Venere, C. Moreno, A. Clause

PLADEMA-ISISTAN, Comisión Nacional de Energía Atómica y Universidad Nacional del
Centro, 7000 Tandil.

¹ INFIP-UBA. ² CONICET

RESUMEN

Se presenta un modelo de simulación numérica del movimiento y deformación de una onda de choque de plasma durante la descarga eléctrica en un gas a baja presión. El modelo fue implementado en un simulador de dispositivos de plasma-focus, que utiliza estas ondas para producir emisiones de radiación pulsada.

El esquema de cálculo implica el tracking de la onda de choque ionizante, desplazándose a velocidad hipersónica. Durante el desplazamiento, la lámina de corriente cambia su forma, lo cual varía las condiciones de contorno mecánicas y eléctricas, realimentando los términos de fuerza y disipación

INTRODUCCIÓN

Uno de los dispositivos de fusión termonuclear más eficientes es el cañón acelerador de plasma de deuterio (plasma focus). El cañón está formado por un par de electrodos coaxiales cilíndricos ubicados en una cámara que contiene gas deuterio a baja presión (entre 0.5 y 10 mb). Cuando se descarga rápidamente un banco de capacitores a alta tensión sobre los electrodos del cañón, se forma una onda de choque de plasma con forma anular por donde pasa la corriente eléctrica. Por acción de la fuerza de Lorentz, la lámina se acelera desplazándose hasta el extremo libre del cañón, causando entre otros fenómenos la variación de la inductancia del circuito, la compresión del gas, el calentamiento súbito a temperaturas de millones de grados y la producción de un pulso de reacciones termonucleares deuterio-deuterio o deuterio-tritio.

La optimización de los flujos neutrónicos y los costos, requieren el cálculo del movimiento del plasma y de la sensibilidad de los parámetros geométricos y de operación. Este cálculo implica el tracking de la onda de choque ionizante, desplazándose a velocidad hipersónica. Durante el desplazamiento, la lámina de corriente cambia su forma, lo cual varía las condiciones de contorno mecánicas y eléctricas, realimentando los términos de fuerza y disipación. En este trabajo se presenta un modelo de simulación numérica del movimiento y deformación de la lámina de plasma durante la descarga. El diseño y la implementación se realizaron utilizando el paradigma de orientación a objetos reutilizando un framework de simulación de reactores nucleares.

MODELO COMPUTACIONAL

La Fig. 1 muestra un esquema del dispositivo de plasma focus. Básicamente consiste en un par de electrodos cilíndricos coaxiales, colocados dentro de un gas a baja presión, entre los cuales se descarga un banco de capacitores con tensiones iniciales del orden de las decenas de kV. Inicialmente se forma una lámina de plasma en el borde izquierdo. La lámina se ve acelerada fuertemente por el campo magnético azimutal generado por la misma corriente. Al llegar al extremo de los electrodos la lámina se cierra hacia adentro como muestra la Fig. 1, implotando sobre el eje del sistema. La implosión genera un pulso de unos 200 ns de plasma de alta densidad (10^{25} m^{-3}) y temperatura (varios KeV), produciendo una emisión importante de rayos x, iones, electrones y, usando deuterio o tritio como gas, neutrones de fusión.

La lámina de corriente fue modelada en simetría azimutal, con un conjunto de elementos (segmentos cónicos) que poseen atributos representantes del estado termomecánico de un anillo de plasma: posición, masa, velocidad, aceleración, espesor y energía interna. Cada elemento de plasma (Fig. 2) se desplaza en dirección perpendicular a sí mismo, acelerándose por la fuerza de Lorentz. La variación de cantidad de movimiento del elemento- i es:

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{l_i}{r_i} I^2$$

Al desplazarse, cada elemento acumula la masa barrida por la onda de choque, es decir:

$$\frac{dm_i}{dt} = \rho_0 A_i v_i$$

Los elementos del contorno tienen la posibilidad de perder masa por expulsión del plasma —ya que a veces se usan electrodos enrejados.

Tracking y reestructuración del frente de choque

Se desarrolló una técnica de *tracking* y re-estructuración de elementos, para resolver el problema de deformación de la onda de choque. Dado que cada nodo se mueve respecto a su normal, si se aplicara el movimiento a cada uno en forma independiente, cada uno quedaría desacoplado de su vecino, perdiendo cohesión en la lámina representada. Para mantener en todo momento la lámina unida sin violar las leyes de conservación, se aplicó el siguiente algoritmo:

- 1) Calcular el desplazamiento que debería tener cada elemento respecto a su normal de acuerdo a las ecuaciones de movimiento (flechas punteadas en la Fig.2).
- 2) Se desplazan los nodos (uniones entre elementos) de acuerdo a un nuevo vector calculado como el promedio de los desplazamientos de los elementos adyacentes.

Una vez aplicado este algoritmo, si bien se obtiene un conjunto de nodos acoplados, como resultado del movimiento los nodos han variado de tamaño, quedando algunos más grandes que otros. Si se sigue el proceso de simulación sin tener en cuenta este efecto, se producen inestabilidades geométricas locales. Para evitar esto, luego de cada paso de tiempo, se re-estructura la lámina con nodos de igual tamaño, manteniendo la densidad de nodos aproximadamente constante. El procedimiento usado es el siguiente:

- 1) Se calcula la longitud, l_i^{new} , que debe tener cada nodo para mantener el número de nodos por unidad de longitud constante.
- 2) Se construye una nueva lámina avanzando sobre los nodos viejos hasta llegar a longitud del nuevo nodo deseado. este nuevo nodo toma los atributos de los nodos viejos que abarcó proporcionalmente a la longitud que haya tomado de cada uno de ellos.

Ecuaciones del circuito eléctrico

Eléctricamente el cañón de plasma trabaja como una impedancia variable acoplada en serie con un circuito RCL. Las ecuaciones del circuito completo son:

$$\frac{d}{dt}[(L_{ext} + L_c)I] + (R_{ext} + R_c)I + \frac{Q}{C} = 0$$

La inductancia del cañón corresponde a una geometría coaxial de radio variable. La contribución de cada elemento puede discretizarse como:

$$L_i = \frac{\mu_0}{4\pi} l_i \cos\theta_i \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

La inductancia total del cañón es la suma de todas las contribuciones elementales:

$$L_c = \sum_i L_i$$

Los electrodos también fueron discretizados para permitir la configuración de diferentes geometrías con simetría de revolución.

Implementación computacional

Se realizó el diseño del simulador según el paradigma de orientación a objetos, creando una jerarquía de clases que reflejan la disposición física del dispositivo. Se reutilizó la arquitectura del Simulador Ludwig (Boroni et al, 1999) diseñada para la resolución de sistemas nucleares modelados con ecuaciones diferenciales ordinarias por el método de Runge-Kutta y la utilización de la arquitectura Model-View mediante la implementación del pattern *Observer*.

Se define una clase base *BasicElement* la cual define el comportamiento de las clases cuyo comportamiento se representa por ecuaciones diferenciales ordinarias. De esta clase derivan *PlasmaNode*, *ExternalCircuit* y *FusionDevice*, la primera de estas, representa la discretización de la lámina de plasma, la segunda al circuito externo y la última a todo el dispositivo en su conjunto.

En cada paso de la simulación, todos los *BasicElements* ejecutan un paso del Runge Kutta. luego el segundo paso y así sucesivamente de forma que todos calculen los nuevos valores de variable para el nuevo paso de tiempo.

RESULTADOS

Se calculó la evolución del frente de choque durante una descarga en un equipo de plasma focus de baja energía, sobre el cual se disponen de datos experimentales para comparación. Los parámetros del equipo se detallan en la Tabla 1.

Usando una sonda magnética se midió el tiempo de llegada del frente a lo largo de una línea radial sobre el aislante. En la Fig. 3 se muestran los tiempos de llegada a distintas posiciones radiales sobre el aislante. Se puede observar que la dinámica varía con la presión de carga (*i.e.*, el inicio del movimiento y la velocidad).

Para modelar la formación de la lámina, es necesario describir matemáticamente los mecanismos de ionización durante la ruptura dieléctrica y la respuesta dinámica del spark-gap que cierra el circuito. Estos fenómenos fueron modelados con dos términos de resistencia: uno constante (representativo del spark-gap) y otro dependiente de la temperatura del plasma (representativo de la lámina en formación). Los resultados del modelo se comparan en la Fig. 3 con los datos experimentales. Puede observarse una excelente concordancia, tanto en el tiempo de espera como en la velocidad. En la Fig. 4 se muestran los cálculos de la evolución de la corriente y la inductancia del cañón. En la Fig. 5 se ilustra la posición de la lámina en distintos tiempos.

Tabla 1. Parámetros del experimento

Parámetro	Valor
Longitud del ánodo	120 mm
Longitud del cátodo	120 mm
Longitud del aislante	35 mm
Espesor del aislante	5 mm
Radio del ánodo	18 mm
Radio del cátodo	36 mm
Voltaje inicial	30 KV
Capacidad	10.5 μ F
Inductancia externa	42.6 nH

CONCLUSION

Se presentó un modelo de simulación de ondas de plasma hipersónicas, que ocurren durante descargas eléctricas en gases a baja presión. El modelo fue implementado en un simulador de dispositivos de plasma-focus, que utiliza estas ondas para producir emisiones de radiación pulsada. El movimiento del frente de plasma debe ser calculado mediante una técnica de tracking y reconstrucción para evitar inestabilidades numéricas. Los resultados preliminares muestran buena concordancia con mediciones experimentales.

REFERENCIAS

Boroni. Cuadrado. Guido-Lavalle. Clausse. Simulador orientado a objetos de la central nuclear Embalse, CACIC99, CD:\Anales\Paper30\SimEmbCACIC (3).doc. Tandil, 25-29 de octubre de 1999.

NOMENCLATURA

p_i	Momento del elemento i .
μ_0	Permeabilidad del vacío.
l_i	Longitud del elemento i .
r_i	Radio medio del elemento i .
I	Corriente.
m_i	Masa del elemento i .
ρ_0	Densidad de llenado del gas.
A_i	Area del elemento i .
v_i	Velocidad del elemento i en dirección a su normal.
l_i^{new}	Longitud corregida del elemento i .
L_{ext}	Inductancia externa constante del circuito.
L_c	Inductancia variable del cañón.
R_{ext}	Resistencia externa al cañón.
R_c	Resistencia del cañón.
Q	Carga del banco de capacitores.
C	Capacidad.
L_i	Inductancia del elemento i .
θ_i	Angulo del elemento i respecto al eje de simetría.
L_c	Inductancia del cañón.

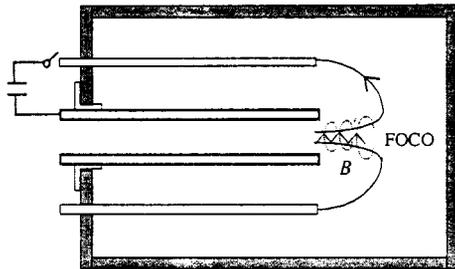


Figura 1. Esquema de un plasma-focus

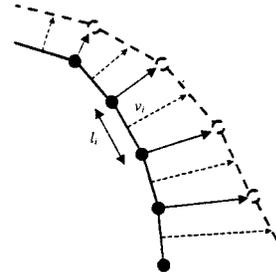


Figura 2. Modelo de movimiento del frente de choque de plasma

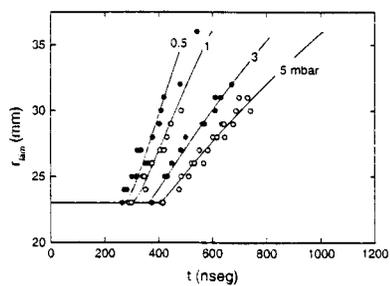


Figura 3. Posición radial de la lámina de plasma en función del tiempo

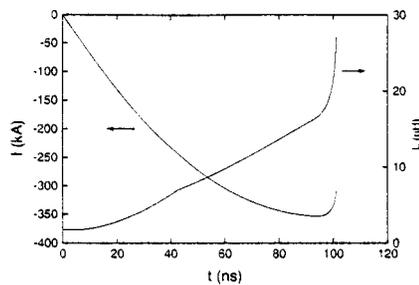


Figura 4. Corriente e inductancia durante la descarga

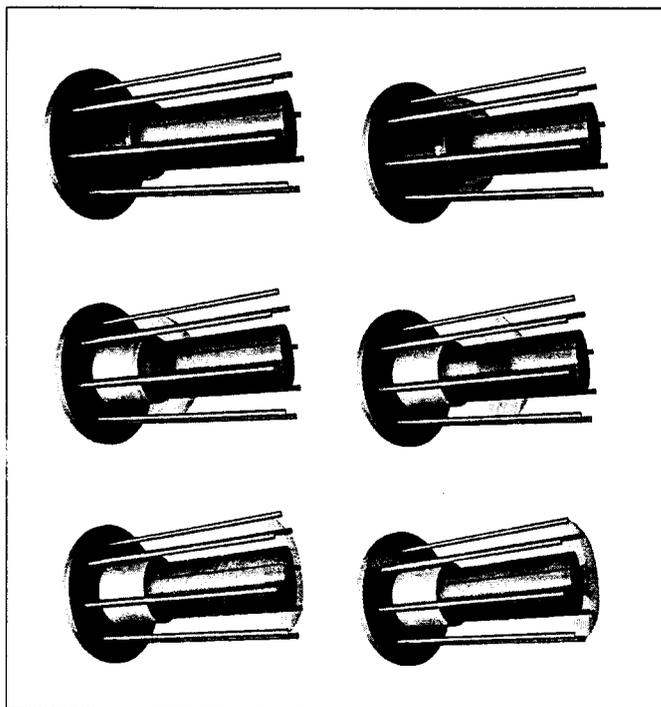


Figura 8. Evolución temporal del frente de choque de plasma.