

Análise de Desempenho de um Gerador de Compressão de Fluxo Helicoidal

Benedito Sá de Araújo Filho e Luis Roberto Ramos
Instituto de Aeronáutica e Espaço

Resumo — Gerador de compressão de fluxo é um dispositivo capaz de gerar altas correntes elétricas a partir de correntes relativamente baixas (~1kA), utilizando o princípio de conservação de fluxo magnético.

Neste trabalho, apresentam-se os resultados da análise de desempenho de um gerador de compressão de fluxo helicoidal.

Inicialmente, mostra-se o esquema do gerador utilizado. Em seguida, é apresentada uma síntese da teoria da conservação do fluxo e como se obter a amplificação da corrente através desta.

Finalmente, se tem os resultados experimentais, onde se verifica que o gerador estudado apresenta um bom desempenho na amplificação da corrente, no valor da figura de mérito e no ganho de energia.

Palavras-chaves — Gerador de Compressão de Fluxo.

I. INTRODUÇÃO

O gerador de compressão de fluxo (GCF) é um dispositivo cuja finalidade é gerar altas correntes a partir de correntes de baixa intensidade. O princípio físico que permite que haja este ganho é a conservação do fluxo magnético [1] (o fluxo que atravessa um solenóide, neste caso). O princípio de conservação de fluxo diz que a corrente final é maior quanto menor for a indutância final do GCF. Para que o princípio seja válido é necessário que o fluxo magnético gerado por uma corrente inicial que passa por um solenóide seja rapidamente comprimido. Para isso, utilizam-se explosivos para reduzir o volume onde o campo magnético está confinado. A indutância final do sistema deve ser muito menor que a inicial, fazendo com que a corrente final aumente.

II. CONSIDERAÇÕES SOBRE O SISTEMA

O GCF consiste de uma armadura que é um tubo cilíndrico metálico, preenchido com explosivo [2]. A armadura é envolvida coaxialmente por um solenóide. Uma carga resistiva fecha o circuito entre a armadura e o solenóide. A Fig. 1 mostra o GCF.

A operação básica de um GCF não é complicada de se entender, mas diversos passos estão envolvidos para que haja sucesso na passagem da energia para a carga resistiva. Inicialmente uma corrente fornecida por um capacitor, flui através do solenóide, passa pela carga resistiva e retorna pela armadura. Este sistema pode ser modelado por um sistema RLC, quando se está trabalhando na situação estática (sem expansão causada pela detonação do explosivo).

Benedito Sá de Araújo Filho, benedito@iae.cta.br, Tel. 55-12-3947-4729.

Luis Roberto Ramos, luisramos@iae.cta.br, Tel.55-12-3947-4755.

Este trabalho foi financiado pelo COMAER, através do Projeto Thor.

No estado dinâmico (com explosivo), o explosivo dentro da armadura é então iniciado e a frente de onda começa a propagar nas direções radial e axial. A armadura faz com que a expansão radial do explosivo seja mais lenta, mas nada impede a progressão axial causando a formação de uma forma de cone na expansão da armadura.

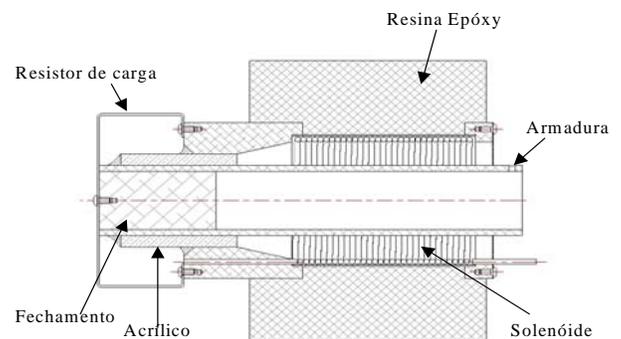


Fig. 1. Esquema básico do GCF helicoidal.

Após o início da detonação o capacitor é essencialmente desconectado e o processo de compressão do fluxo se inicia. A armadura continua a se expandir com velocidades radial e axial até que em certo momento a armadura entre em contato com o solenóide. A expansão continua e poucos microssegundos após todo o fluxo ser comprimido a corrente é entregue a carga e o GCF é totalmente destruído. A Fig. 2 ilustra os estágios da detonação de um GCF para uma compressão de fluxo. [3]

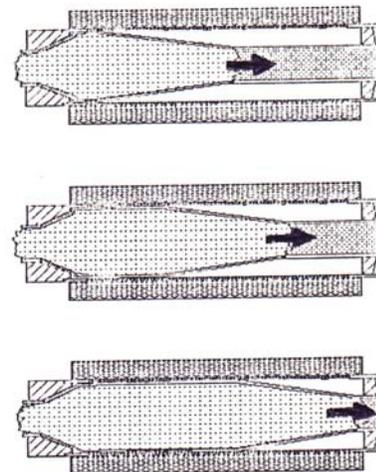


Fig. 2. Estágios da detonação de um GCF.

III. PRINCÍPIO DE CONSERVAÇÃO DE FLUXO

O compressor de fluxo magnético opera de acordo com o princípio de conservação de fluxo. Isso significa que o fluxo magnético em qualquer instante de tempo se conserva.

Seja C o contorno de um condutor perfeito e S a superfície. Nessa superfície existe um fluxo magnético ϕ criado pela presença de um campo magnético B tal que:

$$\phi = \int_S B \cdot dS \quad (1)$$

Derivando ambos os lados da equação em relação ao tempo, obtém-se:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_S B \cdot dS \quad \text{ou} \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} = \int_S \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS \quad (2)$$

Das equações de Maxwell relaciona-se o campo elétrico e o magnético.

$$\text{rot}(E) = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

Das propriedades do rotacional tem-se:

$$\int_S \text{rot}(E) \cdot dS = \oint_C E \cdot dl \quad (4)$$

Se C é o contorno de um condutor ideal tem-se que:

$$\oint_C E \cdot dl = 0 \quad (5)$$

Segue que:

$$\int_S \text{rot}(E) \cdot dS = 0 = \int_S -\frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS \quad (6)$$

Logo:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

O fluxo magnético em uma superfície S pode ser relacionado a um corrente I e uma indutância L por:

$$\phi = \int_S B \cdot dS = L \cdot I \quad (8)$$

Derivando em relação ao tempo, tem-se:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial(LI)}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

Os fluxos inicial e final são iguais para um caso ideal. Desta forma:

$$\phi_o = \phi_f \quad (10)$$

Logo:

$$L_o I_o = L_f I_f \quad (11)$$

No GCF, a expansão da armadura, causada pela detonação do explosivo, comprime o fluxo no sistema ao reduzir o espaço ocupado pelo campo magnético. Com isso ocorre uma redução da indutância do sistema, fazendo com que a corrente aumente de acordo com o princípio de conservação de fluxo. O ganho de corrente é dado pela razão entre a corrente final e inicial. Através da (11) tem-se que esse ganho é dado simplesmente pela relação entre as indutâncias, ou seja:

$$I_f = I_o \frac{L_o}{L_f} \quad (12)$$

IV. FIGURA DE MÉRITO

A (12) descreve um caso ideal, onde o fluxo é conservado totalmente. Nos casos reais, o desempenho do GCF é dado introduzindo o conceito de figura de mérito, definido como:

$$\frac{I_f}{I_o} = \left(\frac{L_o}{L_f}\right)^\beta \quad (13)$$

Onde β é a figura de mérito. Isolando-se β na (13) chega-se a

$$\beta = \frac{\ln(I_f/I_o)}{\ln(L_o/L_f)} \quad (14)$$

No caso ideal, onde não há nenhuma perda de fluxo $\beta=1$ [4].

A figura de mérito é útil para determinar a eficiência de um GCF. Para entender isso, observe que a energia inicial contida em um GCF é dada por:

$$E_o = \frac{1}{2} L_o I_o^2 \quad (15)$$

A energia final no sistema é dada por:

$$E_f = \frac{1}{2} L_f I_f^2 \quad (16)$$

O ganho na energia do sistema pode ser expresso como a razão entre a energia final e a energia inicial.

$$E_G = \frac{E_f}{E_0} = \frac{L_f I_f^2}{L_0 I_0^2} \quad (17)$$

Substituindo a definição de corrente final (13) na (17) a expressão para o ganho de energia é expressa em termos da figura de mérito como segue:

$$E_G = \left(\frac{L_0}{L_f}\right)^{2\beta-1} \quad (18)$$

Nesta equação, fica evidente que para que haja conservação de energia o β tem que ser igual a 0,5. Para GCF do tipo helicoidal β toma valores de 0,75 ou maiores [5].

V. ANÁLISE EXPERIMENTAL E RESULTADOS

Neste experimento utilizou-se o GCF mostrado na Fig. 1.

A indutância inicial é a indutância total, considerando a indutância do solenóide mais a indutância do resistor de carga. A indutância final do sistema é a indutância do resistor de carga, após todas as espiras do solenóide já terem sido destruídas.

O gráfico a seguir, Fig. 3, mostra o resultado do ensaio estático e descreve um circuito *RLC* conforme é apresentado na teoria antes de ocorrer à detonação. Deste resultado, obtém-se a corrente inicial, como sendo o primeiro pico de corrente que será considerada como referência a ser comparada com os resultados obtidos ns ensaios dinâmicos.

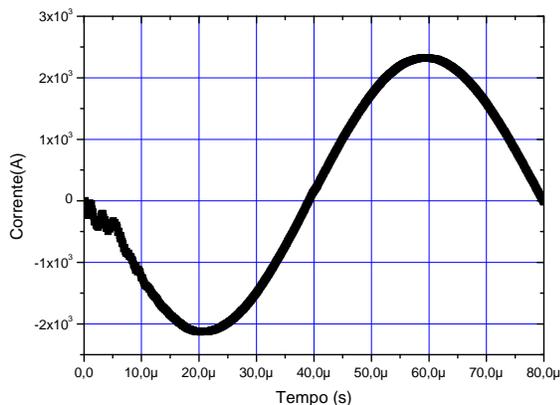


Fig. 3. Relação de corrente elétrica pelo tempo na situação estática.

A Fig. 4 mostra o resultado da corrente normalizada durante a detonação. Pode-se notar a diferença no formato da curva, pois não se tem mais um circuito *RLC*, e sim um circuito do tipo *RL* devido ao desacoplamento do capacitor. Observa-se um aumento significativo da corrente durante a realização do ensaio dinâmico devido à variação não linear de L .

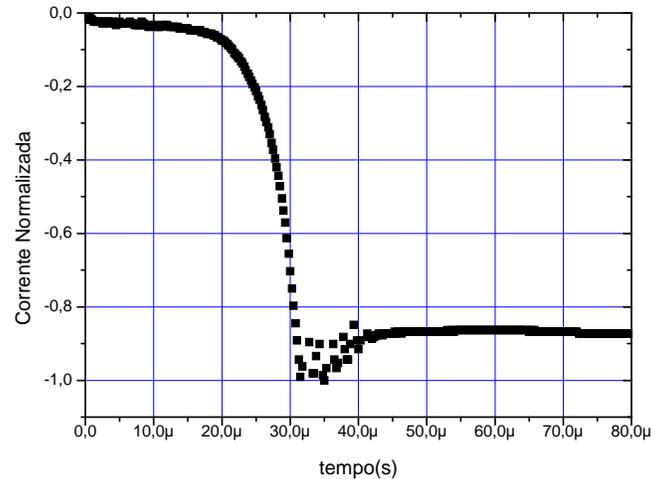


Fig. 4. Relação de corrente elétrica pelo tempo na situação dinâmica.

Os resultados estão sumarizados na Tabela I. Onde se mostram a corrente inicial, as faixas: no ganho da corrente, no valor da figura de mérito e no ganho da energia obtidos.

TABELA I RESULTADOS OBTIDOS

I_0	-2132 A.
Ganho na corrente	entre 30 e 50
β	entre 0,73 e 0,88
E_G	entre 8,5 e 34,7

Os resultados obtidos estão de acordo com os encontrados na literatura [6].

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho são apresentados inicialmente os conceitos da tecnologia de geradores de compressão de fluxo.

Um modelo foi desenvolvido baseado nestes conceitos e após a realização do projeto e montagem deste foi realizada uma serie de ensaio com a finalidade de verificar o seu desempenho.

Os resultados obtidos são bastante significativos, pois os ganhos de corrente, valor da figura de mérito e ganho de energia são compatíveis com os resultados apresentados na literatura por pesquisadores que estão na vanguarda da tecnologia na área de geradores de compressão de fluxo. Deve se ressaltar que além do desenvolvimento: dos conceitos teóricos, do projeto e da montagem toda uma metodologia foi desenvolvida para registrar, medir e analisar o desempenho do artefato.

Com este projeto alcançou-se um alto nível de tecnologia, com uma conceituação teórica bem elaborada e o domínio da parte experimental nesta área, mas novos geradores deverão ser desenvolvidos buscando um aprimoramento do estágio já alcançado nesta fase.

REFERÊNCIAS

- [1] Fowler, C.M., Garn, W.B., Caird, R.S. “ Production of Very High Magnetic Field by Implosion”. *Journal of Applied Physics*, Vol.31, N°3, March 1960.
- [2] Younger, S., Lindemuth, I., Reinovsky, C., Fowler, C.M., Goforth, J., Ekdal, C., “Lab to Lab”. *Los Alamos Science*, N°24, 1996.
- [3] Koop, C. “Eletromagnetic Bomb a Weapon of Electronic Mass Destruction”. Melbourne, Australia, 2000.
- [4] J. Shearer, F. Abraham, C. Aplin, *et al.*, “explosive-Driven Magnetic-Field Compression Generators”, *Journal of Applied Physics*, Vol. 39, No. 4, Março de 1968.
- [5] C. Fowler, R. Caird e W. Garn, “ An Introduction to Explosive Magnetic Flux Compression Generators”, *Los Alamos Report LA-5890-MS*, 1975.
- [6] T. Holt, A. Neuber, J. Dickens e M. Kristiansen, “Impact of Helix Geometry on MCG Flux Losses”, *IEEE*, 2002.