

INFORME DE PRUEBA CONCEPTUAL DE MÁQUINA DE DOBLE ROTOR COMO GENERADOR

Realizado por:

Alfredo Álvarez García, Profesor Titular del Área de Ingeniería Eléctrica, UEx
María Belén Rivera Vaga, PDI Dpto. Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática, UEx

Antecedentes.

En julio de 2023 se presenta, para su evaluación en el Laboratorio de Ingeniería Eléctrica de la Escuela de Ingenierías Industriales de Badajoz (Universidad de Extremadura), una máquina eléctrica rotativa de nuevo diseño basada en la patente presentada en la *European Patent Office* con el número de índice Global (Global Patent Index) - EP 3512082 A4 (<https://data.epo.org/gpi/EP3512082A4-MAGNETIC-DEVICE-SUITABLE-FOR-USE-AS-A-POWER-GENERATOR-OR-DRIVE-MOTOR>), cuya documentación puede consultarse *on-line*.

Introducción

Se trata de hacer una evaluación del *funcionamiento como generador* de un prototipo *bifásico* realizado en base a la patente referida, con algunas mejoras introducidas en su ejecución.

Hay que mencionar que esta máquina está originalmente diseñada para funcionar como motor alimentada por 2 inversores monofásicos sincronizados entre ellos, y con la máquina, por sensores de campo efecto Hall. Estos inversores no están presentes en el funcionamiento como generador.

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Ingeniería Eléctrica de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura (UEx). Hay que señalar que el Área de Ingeniería Eléctrica de la Escuela no cuenta con un laboratorio específico de ensayo de máquinas eléctricas, por lo que los ensayos fueron diseñados con medios del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de los alumnos de la Escuela.

Unidad bajo estudio

Las conclusiones del presente informe se refieren a una máquina rotativa de referencia **BN3** (Fig. 1) con dos rotores de imanes permanentes (PM), uno a cada lado de un estator cilíndrico, con sus campos magnéticos enfrentados a las bobinas de éste. Dichas bobinas están arrolladas a piezas ferromagnéticas de longitud aproximadamente igual a un paso polar, que recubren la superficie de forma *casi* tangencial, dejando libre sus extremos desde donde el campo magnético cruza a los rotores.

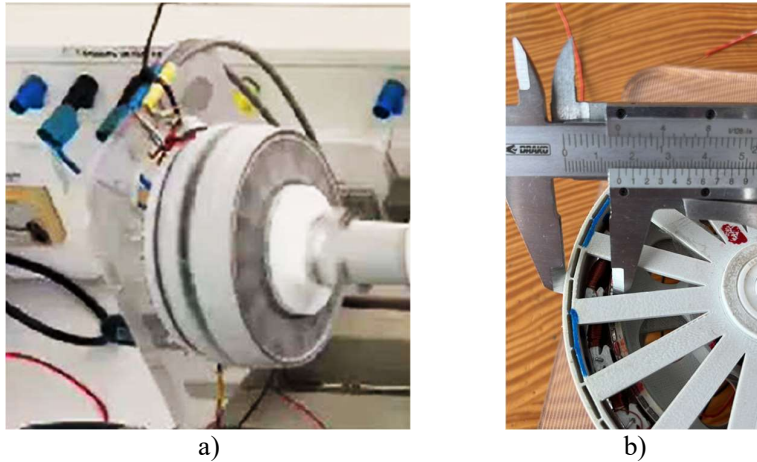


Fig. 1. a) Máquina *BN3* en banco de ensayo. b) Detalle constructivo.

En el caso de la unidad ensayada (*BN3*), las bobinas están construidas con hilo de 0.3 mm de diámetro, lo que a priori limita la corriente (según tablas estándares) a 0,25 A. Puesto que esta unidad es un prototipo, es posible que un diseño optimizado basado en los resultados conjuntos de todos los prototipos construidos incremente el valor de la corriente nominal.

El bobinado estático es bifásico, ocupando cada fase, junto a los imanes correspondientes de los rotores, una sección axial del cilindro de poca longitud. Así, los campos magnéticos asociados a cada fase no se superponen.

Los rotores pueden girar en el mismo sentido o sentido contrario (*contrarrotación*), lo que da inicialmente ventajas a esta máquina para su funcionamiento como motor en aplicaciones de sustentación (drones, por ejemplo) y bombeo.

Dada la inexistencia de material ferromagnético excepto en el estator, que es un casquillo cilíndrico de escaso espesor, el peso de la máquina con relación al volumen es bajo, lo que le añade ventajas para las aplicaciones mencionadas.

En una evaluación previa de rotación se superaron sin problemas las 2.500 rpm. Un diseño ajustado y optimizado estimamos que superará ampliamente las 3.000 rpm, sin embargo para esta unidad trabajaremos con una velocidad máxima estimada de 2.000 rpm en condiciones de carga, insistiendo en que se trata de una estimación por debajo de sus posibilidades.

Para su funcionamiento como motor, las fases se alimentan de sendos inversores sincronizados por sensores de campo de efecto Hall. Desafortunadamente, dichos inversores no estaban a punto en el momento de las pruebas, por lo que no se pudieron sacar conclusiones claras de este modo de funcionamiento.

Para su funcionamiento como generador se montaron los rotores para girar en el mismo sentido, prescindiendo de los datos de los sensores de campo.

La Tabla I muestra los valores de referencia de la máquina.

TABLA I

Longitud axial externa total	4,5 cm
Diámetro externo total	13 cm
Longitud axial por fase [L_ϕ]	1 cm
Diámetro del circuito estatórico [D_{est}]	9,5 cm
Espesor radial del circuito estatórico	0,5 cm
Espesor radial del acoplamiento* [ΔR] (rotor interior – estator – rotor exterior)	1,5 cm
Velocidad límite estimada	2.000 rpm
Nº de polos	18 (9 ciclos)
Nº de fases	2
Diámetro hilo esmaltado	0,3 mm
Corriente nominal del hilo	0,25 A

* ver Fig. 1-b)

Llama la atención que, a pesar del volumen total de la máquina, el volumen que ocupa el acoplamiento completo, V_B (que es el volumen que ocupa el campo magnético, donde se produce la transformación) es de:

$$V_B = 2L_\phi \cdot \Delta R \cdot \pi D_{est} = 89,5 \text{ cm}^3$$

Este volumen en una máquina cilíndrica convencional con relación de aspecto 1, sería un cilindro de alrededor de 5 cm de altura y 5 cm de diámetro, que corresponde a potencias asignadas generalmente inferiores a 15 W.

Banco de ensayo como generador

Para su ensayo como generador se montó un banco de pruebas estándar formado por un motor DC con excitación independiente, acoplado mecánicamente a los ejes (solidarios) del conjunto rotórico del BN3. Una de las dos fases del estator se conectó a una carga resistiva variable que se incrementó desde vacío (sin conectar) hasta cortocircuito, mientras que la otra se dejó en vacío. La Fig. 2 reproduce el esquema de montaje.

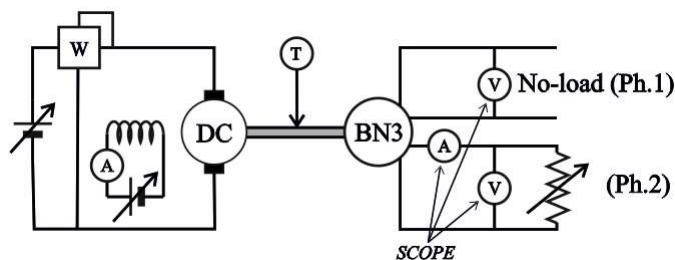


Fig. 2. Esquema del ensayo

Resultados

Medidas en vacío

Las formas de onda de las tensiones de fase en vacío (ver oscilogramas en la Fig. 3) indican que las dos fases son iguales y desfasadas $\pi/2$ (90°). La pequeña asimetría por semiciclo que se observa es consecuencia de asimetrías del campo sobre el estator fácilmente corregibles constructivamente.

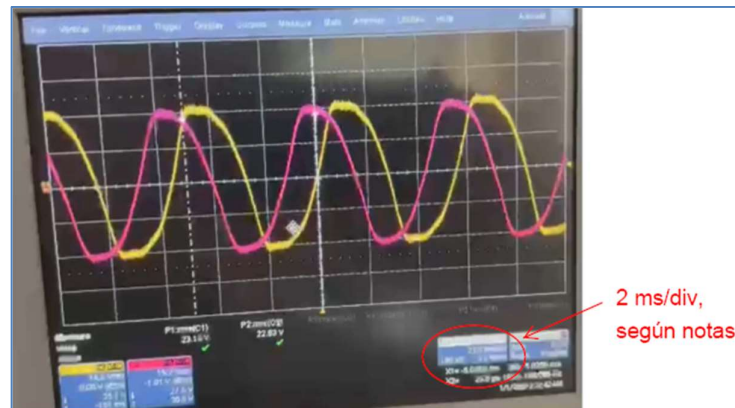


Fig.3. Tensiones de las 2 fases en vacío a 1.200 rpm.

El ensayo a velocidad variable se representa en la Fig. 4. La relación entre las velocidades y las correspondientes frecuencias(medidas en los oscilogramas) verifican el número de polos indicado en la Tabla I.

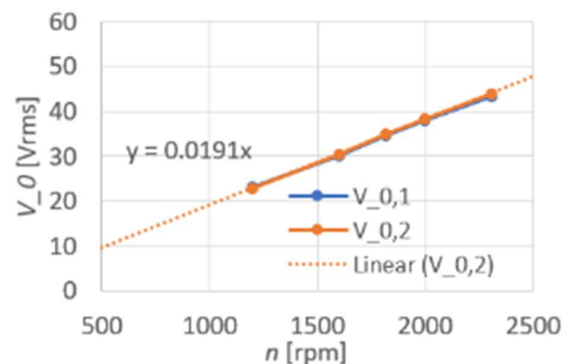


Fig. 4. Ensayo de vacío a velocidad variable. Se representan los valores rms de las tensiones en las 2 fases y el ajuste lineal de la segunda.

Los valores obtenidos representan un buen aprovechamiento del flujo de los polos en la parte del circuito magnético que soporta el bobinado.

Medidas en carga

El ensayo en carga se realiza con el montaje de la Fig. 2 de nuevo, fijando una velocidad e incorporando a la fase 2 la resistencia de carga desde un valor alto hasta el cortocircuito.

La desventaja del hilo usado (0,3 mm de diámetro) es la resistencia que ofrece, que causa una caída de tensión muy apreciable en carga y que puede verse en los oscilogramas (véase como ejemplo el de la Fig. 5, realizado a 2.300 rpm y una corriente de 0,65 A en la fase 2)



Fig.5. Oscilograma de las tensiones en las fases a 2.300 rpm en donde se aprecia la reducción de la tensión en la fase cargada con 0,6 A respecto a la que permanece en vacío.

La característica externa ($V-I$) de la fase cuantifica esta caída de tensión. La Fig. 6 muestra los resultados a 800, 1250 y 1500 rpm. Se observa

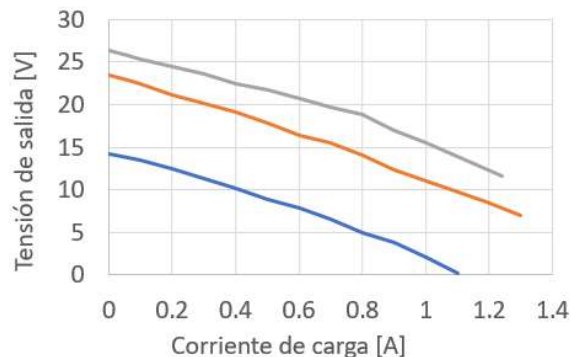


Fig.5. Característica externa del generador (fase 2). Las curvas están medidas (de inferior a superior) a 800, 1250 y 1500 rpm.

Las caídas de tensión que se observan son casi lineales con la corriente y con pendientes similares, lo que indica que el material ferromagnético está en zona no saturada.

Las corrientes a las que se ha llegado son mucho mas altas que las tipificadas para el hilo esmaltado de 0,3 mm de diámetro, Si bien es verdad que las corrientes no se mantienen mucho

tiempo para las medidas del ensayo, creemos que la estructura del motor favorece mucho la disipación por autoventilación.

En cuanto a las características energéticas, como se ha dicho, están limitadas por el diseño. No obstante, las gráficas siguientes (Figs. 6) muestran la forma de evolución de las curvas de potencia y rendimiento, ilustrándola con la curvas para 1250 y 1500 rpm.

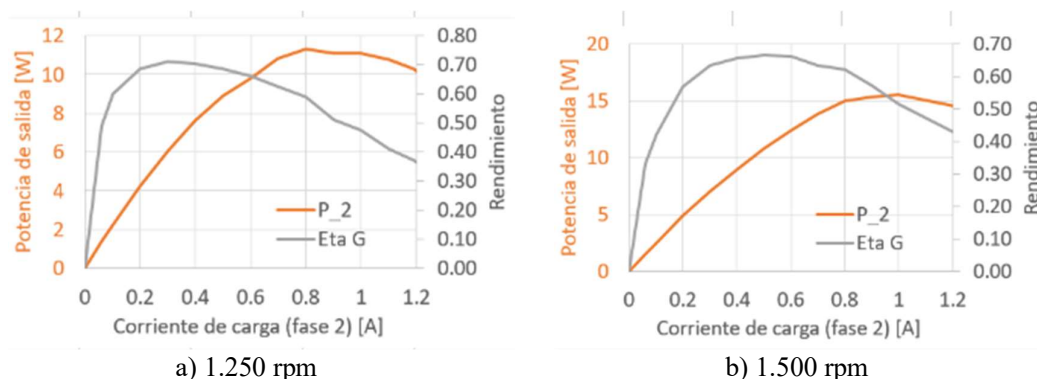


Fig.5. Curvas de potencia y rendimiento del generador BN3

Es de señalar que los ensayos se llevaron hasta los 2.500 rpm, obteniéndose potencias máximas cercanas a los 40 W, aunque con corrientes que superaban los 1,4 A, con calentamiento excesivo en poco tiempo.

Otros aspectos observados son los siguientes:

1. Los valores de potencia son los que corresponden al número de espiras de las bobinas (tensión de salida) y sección del hilo (corriente de salida).
2. Los máximos de potencia se producen por encima de la corriente nominal teórica del hilo. No obstante creemos que, dadas las buenas condiciones de disipación térmica, podrían llegar a soportarse alrededor de 0,6 A (rms) en régimen permanente.
3. La curva el rendimiento tiene el máximo a corriente mucho más bajas que la de máxima potencia, situación que podría corregirse por diseño.
4. Los valores de rendimiento máximo están alrededor del 70 %, según la velocidad.
5. La pendiente de la curva de rendimiento cae más rápido de lo normal a partir del máximo. Esto parece lógico por la alta resistencia de fase del inducido y es corregible por diseño.

Conclusiones

Se ha ensayado como generador una máquina originalmente diseñada para funcionamiento como motor en régimen de alimentación no-sinusoidal, establecido por 2 inversores monofásicos sincronizados entre ellos y con la máquina por sensores de campo efecto Hall. La máquina, por tanto, no está optimizada para funcionar como generador.

En los ensayos como generador se ha estudiado la salida de cada fase directamente, en vacío y con una carga resistiva, lo que conduce a un régimen de tensiones y corrientes casi sinusoidal (ver Fig. 5) que poco tiene que ver con el régimen de trabajo para el que fue diseñada.

En tales condiciones la máquina presenta una respuesta mecánica en giro libre que denota una baja tasa de pérdidas magnéticas que se debe probablemente a la pequeña sección transversal del núcleo de cada sección de bobinado (bobinas individuales) y al hecho de que la longitud de los circuitos magnéticos (de polo a polo) es corta y no se implican, como en máquina convencionales, zonas de cierre de campo magnético lejos del espacio en el que se realiza la conversión electro-mecánica de la energía.

El generador, sin estar optimizado, trabaja con valores de potencia comparables o superiores a máquinas de igual peso (volumen magnético). El aumento de volumen total es inherente a la existencia de doble rotor.

Con estos resultados es previsible que una buena estrategia de alimentación para el funcionamiento de la máquina como motor, confiera a ésta, además de la función de contrarrotación, capacidades energéticas (potencia máxima y rendimiento) sensiblemente superiores a la de motores de igual peso.

--

Informe realizado y firmado digitalmente en Badajoz, a 12 de diciembre de 2023

Alfredo Álvarez García,

M^a Belén Rivera Vega