

**NUEVAS APORTACIONES AL MOTOR
ELÉCTRICO DE FLUJO AXIAL CON
ROTOR CONDUCTOR, EXENTO DE
MATERIAL FERROMAGNÉTICO**

*Tesis Doctoral presentada por:
José López López
para optar al grado de Doctor*

Agradecimientos

Al momento de empezar a escribir este apartado, empiezan a circular por mi cabeza las personas que me han ayudado, apoyado, o empujado a la realización de la Tesis doctoral, y son muchas. Cada una a su manera ha servido para hacer una valoración, enseñarme aquello que no entendía o sencillamente animarme en la continuación del estudio iniciado.

Por un lado mis padres, que siempre han insistido en que debía llegar al final. Todo lo que hacía o era poco o se podía mejorar. Siempre han pensado que se debe empezar a recorrer un camino sólo si se está dispuesto a llegar al final.

Por otro lado mi esposa Mariví, al igual que yo, opina que la prolongación natural de unos estudios experimentales y el desarrollo de una carrera docente pasa por la realización de una experiencia como es la Tesis. Espero que algún día ella se aplique el mismo criterio y decida iniciar la suya. Estoy seguro de que así será cuando encuentre el tema que le interese lo suficiente.

Al Dr. Ricard Bosch i Tous, por aceptar ser mi director de Tesis, por toda la paciencia que ha tenido con un “teórico” como yo, por enseñarme que según en qué se trabaje es inevitable ensuciarse, y por la capacidad inagotable de enseñar la metodología de trabajo en un laboratorio de máquinas, más próximo a un taller que no a un immaculado laboratorio docente.

Al Dr. Josep Prat i Ayats, compañero de estudio en la tesis, con él he compartido los últimos tres años y medio de trabajo, mi voz de la conciencia, que no me dejaba despistarme en mi meta final, que era la presentación de este trabajo.

Al grupo humano de personas con las que trabajo, y en particular los compañeros del departamento al que pertenezco en la EUETIB, que me han aceptado como uno más desde el principio, haciendo que el trabajo no se convierta en una carga insostenible, mas bien al contrario, un lugar en el que depositar muchas ilusiones, a todos ellos les doy mi más sincero agradecimiento.

A la empresa AMES, que accedió amablemente a realizar unos ensayos de permeabilidad magnética que servirían para contrastar los resultados obtenidos en el laboratorio.

Al Departament d'Enginyeria Elèctrica de la U.P.C. que me ha permitido trabajar en sus laboratorios y me ha sufrido, en el más amplio sentido de la palabra, durante cinco largos años. Al Sr. Capella, que ha sido el único capaz de soportar todos los chistes que tenía en mi espeluznante repertorio.

A las personas que han sido becarios del laboratorio durante mi estancia y que nos hemos soportado mutuamente: Arturo Albajar, Eduardo Pérez, Jordi Bosch, Jordi Guijarro, Ángel, César, y Antonio. A Manuel Babiano Alonso, un ingeniero industrial, amigo desde el bachillerato, que conocía a todos estos chicos y no les avisó de mi llegada para que así no pudieran salir huyendo.

Un apartado especial merece el señor Santiago Pardos, sin cuya ayuda no habría sido posible la realización de los prototipos que presento, y que ha sido un ejemplo inigualable verle trabajar la mecánica de los prototipos con una facilidad verdaderamente engañosa.

En el punto de creación, debo agradecer también la ayuda prestada desde el centro CIM y el taller mecánico y electrónico de la UPC, que atendieron con paciencia y sugirieron soluciones muy adecuadas a los problemas y peticiones que les planteaba.

Al Institut de Ciències de Materials de Barcelona (ICMAB), a sus responsables y particularmente a Xavier

Granados. Aquí agradezco toda la paciencia que tuvieron conmigo. Me permitieron utilizar un equipo de sus laboratorios sin el cual habría sido imposible completar parte de este trabajo.

Al Fútbol Sala, deporte que ha sido mi verdadera obsesión, de hecho mi esposa cree que todavía lo es, porque me ha permitido conocer los mejores amigos de mi vida. Es la perfecta válvula de escape que cortocircuita perfectamente mi vida laboral y me permite conocer mejor el mundo real, el mundo exterior al que vive una persona dedicada a su trabajo.

A los ordenadores, aparatos sin los cuales me habría sido imposible escribir correctamente estas pocas páginas en menos de quince años. De hecho a pesar de que es difícil presentar algo con errores con estas máquinas, estoy seguro de que yo lo habré conseguido.

A los días de tormenta de verano. A la capacidad de crítica de la especie humana. A la esperanza en un futuro mejor. A las imágenes espaciales de las sondas viajeras, que nos muestran dos cosas:

La perfección de la naturaleza, frente a la imperfección humana.

Lo insignificante que somos
aunque algunos crean todo lo contrario.

INDICE

	pag.
Agradecimientos	I
Índice de Fotos	VII
1.- Introducción	1
1.1.- Motivación	1
1.1.1.- Motivación personal	1
1.1.2.- Motivación técnica	2
1.2.- Objetivo	3
1.3.- Objeto	4
1.4.- Alcance	5
1.5.- Estructura del estudio	6
2.- Estudios previos. Sistema motor-generador formado por dos servomotores de flujo axial ..7	
2.1.- Consideraciones sobre la refrigeración forzada	7
2.2.- Caloducto sobre un grupo motor generador de 5kW (GMG-5)	10
2.3.- Grupo motor-generador (GMG-5). Comportamiento térmico transitorio	13
2.4.- Conclusiones	21
PRIMERA PARTE	
3.- Antecedentes	25
3.1.-Máquinas	25
3.1.1.-Motor de inducción de flujo axial	25
3.1.2.-Motor lineal tubular	27
3.2.- Materiales	28
3.2.1.- Materiales conductores	28
3.2.2.- Materiales magnéticos. Chapa magnética	28
3.2.2.1.- Resina con polvo de hierro	29
3.2.2.1.1.- Medidas de inducción de poliéster con polvo de hierro	29
3.2.2.1.2.- Campo magnético de saturación	31
3.2.2.1.3.- Permeabilidad magnética del material	32
4.- Caracterización de un motor existente (prototipo Bosch-5)	35
4.1.-Descripción	35
4.1.1.- Características mecánicas del rotor	37
4.2.- Circuito magnético	38
4.3.- Circuito eléctrico	40
4.4.- Circuito equivalente	41
4.5.- Prestaciones y ensayos propuestos	41
4.5.1.- Seminductor A	42
4.5.1.1.- Ensayo en vacío	43
4.5.1.2.- Tensión transferida al semiestátor opuesto	43
4.5.1.3.- Balance de energías	44
4.5.1.4.- Circuito equivalente aproximado	45
4.5.2.- Seminductor B	46
4.5.2.1.- Ensayo en vacío	46
4.5.2.2.- Tensión transferida al semiestátor opuesto	46
4.5.2.3.- Balance de energías	46
4.5.2.4.- Circuito equivalente aproximado	48

4.5.3.- Conclusiones de los apartados 4.5.1 y 4.5.2	49
4.5.4.-Conexión simultánea de los dos semiestátores	51
4.5.4.1.- Ensayo en vacío. Curvas características	51
4.5.4.2.- Ensayo de frenado. Curvas características	52
4.5.4.2.1.- Curva par máximo - intensidad	53
4.5.4.2.2.- Curva par - velocidad	55
4.5.5.- Ensayo a frecuencia variable. Ensayos a 100 Hz, 125 Hz, 150 Hz, 200 Hz	56
4.5.5.1.- Gráfica intensidad - velocidad	58
4.5.5.2.- Gráfica deslizamiento- intensidad	58
4.5.5.3.- Gráfica factor de potencia- intensidad	59
5.- Hipótesis y construcción del prototipo P-1	61
5.1.- Antecedentes para el diseño del prototipo P-1	61
5.2.- Definición y construcción del prototipo P-1	63
5.2.1.- Circuito eléctrico	63
5.2.2.- Circuito hidráulico	66
5.2.3.- Finalización del proceso constructivo	67
5.2.3.1.- Condicionantes eléctricos	68
5.2.3.2.- Condicionantes magnéticos	69
5.2.3.3.- Condicionantes dieléctricos	71
5.2.3.4.- Condicionantes mecánicos	72
5.2.3.5.- Condicionantes térmicos	72
5.2.3.6.- Condicionantes hidráulicos	73
5.3.- Ensayos del prototipo P-1	74
5.3.1.- Semiestátor 1	76
5.3.2.- Semiestátor 2	78
5.3.3.- Inclusión de núcleo de hierro	79
5.3.- Conclusiones	81

SEGUNDA PARTE

6.- Nueva hipótesis de trabajo	85
6.1.- Doble inductor	86
6.1.1.- Máquina sin ranuras y sin materiales ferromagnéticos.	86
6.2.- Aproximación a la capa de corriente	87
6.3.- Flujo magnético de dispersión	87
6.4.- Espira de sombra	88
7.- Prototipo P-2	89
7.1.- Definición	89
7.2.- Propuesta de camino de corriente	91
7.3.- Ensayos	92
7.3.1.- Pruebas experimentales	92
7.3.2.- Estudio teórico	93
7.4.- Conclusiones	94
8.- Prototipo P-3	97
8.1.- Nueva propuesta de camino de corriente	97
8.2.- Proceso de fabricación del prototipo P-3	98

8.3.- Circuito equivalente del camino de corriente	99
8.3.1.- Cálculo teórico de los valores de L_1 y L_2	100
8.3.2.- Cálculo teórico de las resistencias R y R_C	102
8.3.3.- Dualidad Circuito serie-circuito paralelo	103
8.4.- Ensayos realizados	104
8.5.- Fasores espaciales	105
8.5.1.- Suposición A	108
8.5.2.- Suposición B	109
8.5.3.- Suposición C	110
8.6.- Conclusiones	111
8.6.1.- Conclusiones en cuanto al estudio teórico	111
8.6.2.- Conclusiones en cuanto a diseño	112
9.- Prototipo P-4	113
9.1.- Propuesta nº 3 de camino de corriente	113
9.2.- Espiras exploradoras. Búsqueda de polos magnéticos	115
9.2.1.- Desplazamiento radial	116
9.2.1.1.- fem inducida en la espira exploradora situada sobre uno de los huecos	116
9.2.1.2.- fem inducida en la espira en un desplazamiento radial hacia el exterior desde la posición del apartado 9.2.1.1	117
9.2.1.3.- fem inducida en la espira exploradora al realizar un desplazamiento radial en la posición más exterior del toroidal	117
9.2.2.- Desplazamiento circular a radio constante	118
9.3.- Búsqueda de desfases	119
9.4.- Prueba de frecuencia	122
9.5.- Medidas de campo magnético mediante sonda Hall	123
9.5.1.- Medidas realizadas	125
9.5.1.1.- Temperatura ambiente	126
9.5.1.1.1.- Mapas de campo magnético del plano activo	130
9.5.1.2.- Temperatura de nitrógeno líquido	135
9.5.1.3.- Corrientes inducidas en el inductor secundario	138
10.- Prototipo P-5. Plano activo en forma de estrella	141
10.1.- Definición	134
10.2.- Búsqueda de desfases	136
10.2.1.- Conexión en monofásico	136
10.3.- Conclusiones	140
11.- Prototipo P-6. Doble transformador	149
11.1.- Definición	149
11.2.- Monofásico	151
11.2.1.- Comparación entre dos intensidades de alimentación del toroidal, 0.85 A y 1.0 A	151
11.2.2.- Campo en diferentes posiciones. Intensidad de alimentación constante de 1.0 A	152
11.3.- Bifásico	152
11.3.1.- Campo en diferentes posiciones (Intensidad de alimentación del toroidal constante de 1.0 A)	152
11.4.- Conclusiones	153
12.- Prototipo Doble inductor de flujo axial	155

12.1.- Definición y construcción	155
12.1.1.- Disco inductor secundario	157
12.1.2.- Cálculo teórico de las resistencias	160
12.1.3.- Medidas de autoinducción	162
12.2.- Prueba en nitrógeno líquido	164
13.- Conclusiones y futuras líneas de trabajo	167
13.1.- Conclusiones	167
13.2.- Futuras líneas de trabajo	171
14.- Bibliografía	173

ANEXOS

INDICE DE FOTOS

Número	Título	Capítulo
0		
1	Forma del intercambiador tipo I. Se coloca en los semiestátos de la máquina A	2.2
2	Forma del intercambiador tipo II. Se coloca en los semiestátos de la máquina B	2.2
3	Conjunto motor generador junto al circuito de refrigeración	2.2
4	Disipador y circuito de refrigeración	2.2
5	Grupo motor-generador	2.2
6	Vista del estator. Se observa la ranura vacía	4.1
7	Devanado de los estátos de los motores de flujo axial en estudio	4.1
8	Carcasa exterior del estátor del motor MA-55 de Mavilor SA	4.1
9	Estátos Mavilor sobre el soporte de trabajo. Se observa la curva cardan y, a la derecha, el freno de polvo magnético	4.5
10	Grupo motor utilizado como fuente de señal eléctrica de frecuencia variable	4.5
11	Bancada de control del grupo motor de frecuencia variable	4.5
12	Molde de yeso que se utiliza para realizar la primera prueba de distribución de espiras	5.2
13	Esquema teórico de un semiestátor	5.2
14	Negativo de las espiras de cada semiestátor sobre aluminio	5.2
15	Molde de poliuretano para controlar la segura disposición de las espiras	5.2
16	Prueba de colocación de las espiras	5.2
17	Semiestátor 1 a punto para la soldadura de las espiras	5.2
18	Semiestátor con aislantes de fibra de vidrio y silicona	5.2
19	Semiestátor en el que se observa la entrada hidráulico-eléctrica común	5.2
20	Semiestátos en los que se pueden observar los aislantes entre espiras, los refuerzos para equilibrar la tensión mecánica y la entrada eléctrica e hidráulica apiñada en una zona concreta	5.2
21	(TS) Transformador de intensidad utilizado en ensayos de elevadas corrientes	5.3
22	Conexiones hidráulicas y eléctricas coincidentes	5.3
23	Otra vista de la proximidad de las conexiones	5.3
24	Proceso de prensado . Se utilizan dos maderas y un espárrago roscado	5.3
25	Vista superior del proceso de prensado	5.3
26	Resultado definitivo del proceso de prensado en el semiestátor 1	5.3
27	Resultado definitivo del proceso de prensado en el semiestátor 2	5.3
28	Vista posterior del núcleo de hierro una vez colocado	5.3
29	Resultado final y elementos de prueba	5.3

30	Fotografía del primer plano activo. Se observa los cortes que definen los c a m i n o s d e c o r r i e n t e	7.2
31	Plano circular inferior. No es un plano activo. Está soldado con estaño a los tramos cilíndricos	7.2

Número	Título	Capítulo
32	Muestra del primer tipo de rotor utilizado con los transformadores de intensidad. Su elevada resistividad le hizo inadecuado para su utilización como rotor	7.3
33	Plano activo del prototipo P-3	8.1
34	Comparación entre los planos activos del P-2 y P-3	8.1
35	El señor Santiago muestra el P-3 una vez finalizada su construcción	8.2
36	Vista del P-3	8.2
37	Vista completa del P-3	8.2
38	Vista frontal del P-3	8.2
39	Horno de inducción y P-3 a punto para hacer un ensayo	8.4
40	Vista del circuito R-L del horno de inducción capaz de suministrar 20 A a una frecuencia de 5 kHz	8.4
41	Plano activo nº 3. Se observan unos huecos grandes (ventanas) y otros más pequeños, que corresponden a las espiras de sombra	9.1
42	Transformador de corriente con la 3ª propuesta de plano activo. Se puede tener una idea relativa de su tamaño	9.1
43	Equipo de medición de campos magnéticos axiales. El equipo pertenece al ICMAB.	9.5
44	Prototipo preparado para realizar la toma de datos con el equipo de medición	9.5
45	Colocación del prototipo sobre el equipo de medida	9.5
46	Sistema de alimentación del P-4 mientras se realiza la toma de datos	9.5
47	Rotor conductor de cobre utilizado en el P-7	12.1
48	Proceso de soldadura de los diversos componentes del P-7	12.1
49	Despiece de los componentes del prototipo P-7	12.1
50	Despiece definitivo del P-7	12.1
51	Despiece definitivo del P-7. Vista frontal	12.1
52	Semiestatores y rotor	12.1
53	Conjunto acoplado	12.1
54	Recipiente en el que se sumerge el p-7	12.2
55	P-7 introducido en el vaso de precipitados. El diámetro del recipiente es ideal p a r a l a p r u e b a	12.2

56	Recipiente con el P-7 en proceso de enfriamiento. Se observa el plástico de protección	12.2
----	--	------

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- MOTIVACIÓN

1.1.1.- MOTIVACIÓN PERSONAL

Cuando en Junio de 1991 finalicé los estudios superiores, nada me hacía suponer que unos años mas tarde me encontraría escribiendo estas palabras. Realmente pocas ganas me quedaban como para acometer con garantías la realización de una tesis doctoral.

En la facultad conocía varios compañeros de estudios que, una vez finalizado los mismos, solicitaron una beca para poder hacer la tesis doctoral en un departamento. Si la petición era aceptada, se pasarían los siguientes cuatro años como parte integrante del departamento, pero sin garantía alguna de estabilizar su situación una vez leída la tesis, y con el mismo problema, sino mayor, para encontrar trabajo en el exterior.

Personalmente, no estaba dispuesto a invertir los cuatro años posteriores a la obtención del título de licenciado en la realización de una tesis doctoral. Los objetivos a corto plazo se centraban en encontrar un trabajo mas o menos relacionado con los estudios, y para ello, el tener un título de Doctor no significaba preferencia o facilidad en el mercado laboral. Una Tesis Doctoral la englobo más en el terreno de las afinidades personales, del gusto por un tema, profundizar de manera particular en aquella rama que presenta unos retos a los que uno no se puede resistir.

Prefería comenzar la carrera laboral y con el tiempo, sin prisas, iniciar una tesis relacionada con el tipo de trabajo que ejerciera. Pero una vez más la vida me demostró que los planes de futuro no son más que castillos en el aire que pueden desmoronarse al menor golpe de viento.

Efectivamente, en un plazo bastante corto y por casualidades de la vida, tuve la posibilidad de acceder a una plaza de Profesor Titular de Escuela Universitaria en l'Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona. Esta posibilidad inicialmente era impensable para mi. El proceso que yo conocía para acabar de profesor en la universidad pasaba por hacer la tesis, quedarse en el departamento, y con

INTRODUCCIÓN

el tiempo empezar a dar algunas clases -de prácticas, problemas, sustituciones -, en este período ir haciendo méritos para que al final, se pudiese opositar a una plaza de profesor universitario. Esta etapa podía ser demasiado larga y, personalmente, yo no quería estar tanto tiempo sin haber estabilizado mi situación personal.

El caso es que ¡¡estaba trabajando en una escuela universitaria. . Las “condiciones de contorno” habían cambiado, ¡y de que manera!.

Formalmente no tenía obligación alguna de realizar una tesis doctoral, pero moralmente sí. Primero porque me encontraba de lleno en el seno de la universidad, pertenecía a la familia universitaria y pienso que cualquier componente de la misma debe hacer lo posible para realizar el doctorado. Y segundo porque si uno se encuentra en la carrera docente, por respeto a los alumnos y compañeros de trabajo, hay que llegar hasta el final. Y el final es el doctorado.

Me encontraba entonces ante un nuevo desafío. No por el trabajo que conlleva los llamados estudios de tercer ciclo y el trabajo experimental, sino porque me encontraba en un cruce de caminos entre los cuales había que escoger uno.

A la hora de elegir el programa de doctorado y dirigirme hacia la persona que fuese mi director de tesis, me replantee la situación que tenía de partida: ¿Dónde trabajaba? *En una escuela de ingeniería técnica*, ¿Qué tipo de enseñanza necesitan los alumnos? *Enseñanza lo más aplicada posible*, y por último ¿Qué parte de mi aprendizaje estaba más débil? *Pues la parte de práctica y trabajo en un laboratorio*. Así decidí iniciar una tesis doctoral a finales de 1992.

1.1.2.- MOTIVACIÓN TÉCNICA

Pensé que ya que estoy en una escuela de Ingeniería posiblemente pudiera realizar el Doctorado en una escuela de Ingeniería. La especialidad que estudié en la Facultad de Físicas de la UB fue la de electricidad y electrónica industrial. Pero lo que buscaba era trabajar en un laboratorio lo más parecido a un taller, trabajar con máquinas, con motores, no limitarme al mundo de los modelos, de las simulaciones, sin ver un objeto real, los problemas que conlleva la fabricación o construcción de un motor, el tomar medidas, la imbricación de la mecánica con la electricidad... definitivamente, debería dirigirme hacia el departamento de ingeniería eléctrica.

Después de comentar con algunas personas mis inquietudes, se me indicó a quien podía dirigirme y hablar del tema: al Dr. Ricard Bosch i Tous.

La charla con él fue clara, me invitó a que volviese en un plazo de cuatro días para poder realizar un ofrecimiento serio y definido. Recuerdo perfectamente que por mi condición de “teórico” me avisó de que una empresa como la que se iniciaba, conllevaría un extra de dificultad por el desconocimiento de aspectos básicos para trabajar con él.

A mi ese contratiempo no me preocupaba demasiado, probablemente tendría que aprender muchas cosas de cero, sobre todo prácticas, y esto ya me pareció bastante atractivo. La posibilidad de trabajar sobre motores especiales, de aplicaciones especiales, creo que uniría por un lado la parte de investigación con prototipos que habría que fabricar, con los estudios en libros sobre temas de aplicación general.

Y creo que la elección fue correcta. En este tiempo he adquirido conocimientos de diferentes temas y espero poderle sacar todo el provecho posible.

1.2.- OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo tiene en primer lugar, la finalidad de hacer girar rotores de material conductor en forma de disco y debido a un flujo rotativo axial. El precedente en el equipo de trabajo al respecto es a cargo de Ricard Bosch.

Se propone magnificar los efectos de variación parcial de la inductancia mutua entre rotor y estátor observados por Bosch, para ello se probará:

- Minimizar el número de espiras por polo y fase para que la variación de posición rotórica desequilibre al máximo la corriente de ambos semiinductores.
- Reducir la profundidad de las ranuras para acercar la actuación de las corrientes estatóricas a la "capa de corriente" teórica.
- Las conexiones entre las espiras de los prototipos serán en paralelo, para así poder obtener desequilibrios entre corrientes de barras diferentes en función del efecto de inductancia mutua que cree la posición del rotor conductor.
- El trabajar con conductores de gran sección ha de permitir efectos peliculares y de proximidad que ahorren la construcción del devanado estabilizador en jaula de sombra propuesto por Bosch en su tesis doctoral, al introducir el amortiguamiento necesario por las pérdidas adicionales en los propios conductores inductores.
- El flujo estabilizador se intentará cerrarlo a través del aire, para simplificar la construcción.
- Las máquinas a diseñar tendrán en esta propuesta un exceso de pérdidas por efecto Joule, que han sido expresamente buscadas. Para evacuarlas se utilizará básicamente el agua en refrigeración directa por el interior de los conductores.

El objetivo de búsqueda de geometría y conexiones favorables es doble:

- 1.- Preparar la tecnología superconductor que cambiará las máquinas y prestaciones actuales. Los superconductores de alta temperatura, a causa de su forma, geometría y el método de refrigeración presentan preferencia por la geometría de flujo axial, en lugar de la típica geometría de flujo radial en el entrehierro de las máquinas eléctricas clásicas.
- 2.- Si a las máquinas se las hace trabajar con alta frecuencia, pueden trabajar con entrehierros superiores a los actuales y con prestaciones parecidas a las que se obtienen con superconductores. Sus circuitos magnéticos hay que simplificarlos al máximo, para trabajar con formas comerciales como los toros de ferrita dulce (o materiales similares).

Por esto en la segunda parte del trabajo, se propone que la propia máquina presente una excelente simetría magnética y que lleve el transformador de adaptación de impedancias sobre el mismo conjunto. Ello es imprescindible tanto en alta frecuencia como con superconductores. Por comodidad se ha trabajado a 50 Hz, disipando en lo posible las pérdidas con agua o nitrógeno líquido para preparar las geometrías y entorno de trabajos futuros.

1.3.- OBJETO

INTRODUCCIÓN

El objeto de este trabajo es el estudio y de motores eléctricos de flujo axial con rotor conductor exento de materiales ferromagnéticos.

Se parte del estudio del comportamiento térmico de una máquina de flujo axial. El comportamiento térmico limita la potencia máxima del motor. Una evacuación adecuada del calor generado por efecto joule, permitirá aumentar la potencia que suministra la máquina. Éste es el punto de inicio del trabajo.

Este trabajo se plantea como continuación del de Ricard Bosch. Es una geometría y prestaciones poco habituales en las máquinas eléctricas y su literatura asociada. El autor cree que, una década después, el estudio en este sentido está especialmente justificado por la aparición de los superconductores de alta temperatura.

En el trabajo de Bosch, quedaron muchos temas por estudiar, sobre todo en la optimización de la parte tractora del rotor y en los detalles de los devanados excitados por corriente. Se han estudiado y mejorado muchos de estos aspectos, y como el lector podrá apreciar, en algún caso es preciso el conocimiento de la obra citada anteriormente para comprender en profundidad la problemática de que se trata.

La levitación propuesta por Bosch se basa en la siguiente geometría:

Un sistema estático formado por dos semiestátores fijos entre sí, que deja un pequeño entrehierro atravesado por un flujo magnético en sentido axial.

El rotor en forma de disco conductor, homogéneo y sin partes ferromagnéticas ocupa parte del citado entrehierro. Las corrientes inducidas que circulan en sentido radial, originan el campo rotativo y forman el sistema principal o tractor.

El cierre de estas corrientes se realiza de forma tangencial, tanto en el estátor como en el rotor en las llamadas cabezas de bobina. La interacción entre las corrientes de la cabeza de bobina estática y rotórica puede producir la levitación del rotor en determinadas circunstancias según Bosch.

Por todo ello deberán profundizar siete puntos que se enumeran a continuación:

1.- Los sistemas de excitación del estátor deben tener un mínimo de cuatro bobinas conectadas eléctricamente en paralelo (dos en cada semiestátor desfasadas 180° geométricos entre sí).

El rotor, al ser conductor, isótropo y sin hierro, sólo obedece al esfuerzo electromagnético con las corrientes que se originan en su seno.

La corriente tractora del rotor es radial y origina, en las cabezas de bobina corrientes tangenciales en el rotor, de la misma magnitud y que pueden utilizarse para estabilizar por el mecanismo siguiente:

Dado un sistema de corrientes equilibrado entre ambos semiestátores y con el rotor, si este se desplaza hacia uno de los semiestátores, mejora el acoplamiento inductivo mutuo. La reacción de inducido hace crecer la corriente en el semiestátor hacia el que se dirige con lo que aumenta su fuerza de repulsión. Algo parecido ocurre en el sentido radial con las bobinas situadas a 180° geométricos es preciso tener en cuenta el campo magnético secundario que originan las cabezas de bobina.

2.- La amortiguación necesaria para que este fenómeno sea estable, la proporcionan las pérdidas por efecto joule del devanado en jaula de sombra que complementa el efecto de las cabezas de bobina.

3.- Profundizar en el desarrollo del motor de inducción de flujo axial trifásico con rotor de aluminio. Estudiar los estabilizadores que se basan en el acoplamiento electromagnético entre las corrientes de los estátores y las corrientes inducidas en el rotor conductor.

4.- Comprobar la bondad de la conexión en paralelo, respecto a la conexión en serie, de los bobinados estatóricos para favorecer la levitación y el autoequilibrado.

5.- Potenciar la ausencia de material ferromagnético en los prototipos. Ello ocasiona la merma de fuerza magnetomotriz, que se compensa con el aumento de la corriente de alimentación. La resistencia de los conductores estatóricos será, por tanto, baja. Si la corriente es muy elevada, conviene tener conductores que se aproximen al concepto de “capa de corriente”, esto es, un conductor de baja resistencia por ranura.

6.- Poder utilizar frecuencias superiores a las habituales en uno o dos órdenes de magnitud, al no haber materiales ferromagnéticos en juego.

7.- Los prototipos a estudiar serán gobernados por corriente. Se hace preciso que se conecten a una fuente de corriente. El sistema eléctrico convencional tiene la filosofía de fuente de tensión, así se implementa en el propio prototipo la conversión tensión-corriente. Esta conversión tensión-corriente se hace mediante transformadores de intensidad. Se comprueba la importancia de la geometría en el resultado final de impedancia.

1.4.- ALCANCE

Algunos de los trabajos anteriores del equipo de trabajo (así como los desarrollados paralelamente) al que ahora tienen delante, se han encaminado hacia el estudio de las máquinas gobernadas por corriente. El presente trabajo busca un poco más allá. La comprensión en su comportamiento y límites físicos (densidades de corriente máximas en conductores tradicionales, por ejemplo) de este tipo de máquinas.

Construir un prototipo sin elementos ferromagnéticos con un conductor por ranura y fase sobre el que se inyectará una corriente superior a la nominal, precisándose por tanto una refrigeración directa por el interior del conductor.

El prototipo tendrá una cabeza de bobina externa y otra interna. Se observarán los efectos de cabezas de bobina externa e interna sobre un rotor conductor con forma de disco.

Consolidar la conexión en paralelo entre bobinas como la más efectiva para la obtención de efectos de repulsión, atracción entre el estátor y el rotor de la máquina. La finalidad es ir construyendo el camino hacia el autoequilibrado del rotor.

Se queda a puertas de iniciar un estudio a mayores frecuencias, a pesar de que se realiza alguna prueba a frecuencias superiores a los 50 Hz, queda por estudiar a fondo el comportamiento de los prototipos presentados a frecuencias de órdenes de magnitud superior a la industrial (500 Hz o 5000 Hz).

Constatación de la necesidad de una etapa de intermedia entre la red y la máquina alimentada por corriente. Esta etapa intermedia realiza las veces de adaptador de impedancias. Es el conjunto trafo-máquina.

Construir conjuntos trafo-máquina de diversos aspectos, y por lo tanto con diferentes efectos finales, que generen campos magnéticos axiales.

Realizar conexiones en monofásico o bifásico para optimizar la construcción del conjunto trafo-máquina.

El camino desarrollado lleva al punto final, que es la obtención de un campo magnético a partir de

elementos no ferromagnéticos que produce la rotación de un rotor conductor con forma de disco con una conexión en bifásico.

1.5.-ESTRUCTURA DEL ESTUDIO

Este trabajo se sitúa en auténtica interacción con otros¹ (tesis doctorales de Josep Prat, Lluís Massagués, Joan Pallarés, Ramón Grau,... y proyectos final de carrera como los de de Elisenda Vives e Iván Flotats). Su lectura rápida puede producir la sensación de trabajo disperso, pero se intentará justificar en cada punto la motivación que ha llevado a escoger uno u otro camino.

El objetivo final del equipo es muy ambicioso y humildemente creo que supera con creces el alcance de una tesis doctoral. Los pasos seguidos han sido tomados en función del material y medios de los que se disponía y, a pesar de ello, se ha avanzado bastante rápido.

Se parte de un prototipo existente como inicio del estudio, dando pie a la primera fase con varios prototipos construidos y unos resultados que recomiendan una segunda fase en la que la geometría de cada conjunto es drásticamente diferente a la utilizada hasta ese instante.

¹ Ver bibliografía y futuras líneas de trabajo