

Modelado de máquinas de alterna para control de accionamientos eléctricos

Javier Martínez Román | Ángel Sapena Bañó
Jordi Burriel Valencia

Javier Martínez Román
Ángel Sapena Bañó
Jordi Burriel Valencia

Modelado de máquinas de alterna para control de accionamientos eléctricos

Colección *Académica*

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita:

Martínez Román, Javier; Sapena Bañó, Ángel; Burriel Valencia, Jordi (2021). *Modelado de máquinas de alterna para control de accionamientos eléctricos*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València

© Javier Martínez Román
Ángel Sapena Bañó
Jordi Burriel Valencia

© 2021, Editorial Universitat Politècnica de València
Venta: www.lalibreria.upv.es / Ref.: 0278_03_01_01

Imprime: Byprint Percom, S. L.

ISBN: 978-84-9048-941-3
Impreso bajo demanda

Si el lector detecta algún error en el libro o bien quiere contactar con los autores, puede enviar un correo a edicion@editorial.upv.es

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo edicion@editorial.upv.es

Impreso en España

Índice

| | |
|---|-----------|
| Capítulo 1. Introducción | 1 |
| Capítulo 2. Capa de corriente y fasor espacial de corriente | 5 |
| 2.1. Capa de corriente producida por un conductor | 6 |
| 2.2. Fasores espaciales de capa de corriente de un único conductor | 7 |
| 2.3. Capa de corriente producida por una fase de constitución arbitraria..... | 13 |
| 2.4. Capa de corriente producida por una fase simétrica de una máquina multipolar..... | 15 |
| 2.5. Capa de corriente producida por un devanado polifásico simétrico..... | 25 |
| 2.5.1. Aplicación al caso de sistemas polifásicos equilibrados: campo giratorio | 27 |
| 2.6. Fasor espacial de corriente de un devanado polifásico | 42 |
| Capítulo 3. Circuito magnético principal de las máquinas de corriente alterna..... | 45 |
| 3.1. Inducción magnética en el entrehierro | 46 |
| 3.1.1. Efecto del ranurado y de la permeabilidad finita del material ferromagnético | 55 |
| 3.1.2. Inducción en el entrehierro en máquinas de entrehierro no uniforme..... | 57 |
| 3.2. Flujo de corona..... | 60 |
| Capítulo 4. Enlaces de flujo y FF.EE.MM. en máquinas de corriente alterna | 69 |
| 4.1. Enlaces de flujo..... | 70 |
| 4.1.1. Enlaces de flujo principal y de dispersión | 70 |

| | |
|--|------------|
| 4.1.2. Enlaces de flujo principales o magnetizantes..... | 71 |
| 4.1.3. Fasores espaciales de enlaces de flujo | 77 |
| 4.2. FF.EE.MM. inducidas..... | 78 |
| 4.2.1. Análisis comparativo de la f.e.m. inducida por enlaces de flujo principales y de armónicos | 80 |
| Capítulo 5. Comportamiento dinámico de devanados polifásicos simétricos | 83 |
| 5.1. Aplicación a máquinas asíncronas..... | 85 |
| 5.2. Aplicación a máquinas de imanes permanentes y f.e.m. senoidal..... | 97 |
| Capítulo 6. Par electromagnético en máquinas de corriente alterna | 99 |
| 6.1. Aplicación a máquinas asíncronas | 101 |
| 6.2. Aplicación a máquinas asíncronas de imanes permanentes..... | 108 |
| Referencias..... | 111 |

Capítulo 1

Introducción

El objetivo final de este manual es ayudar al lector para que conozca, comprenda el significado y sepa aplicar modelos dinámicos de funcionamiento de máquinas de corriente alterna que le permitan desarrollar su aprendizaje en control de accionamientos eléctricos. Esta orientación, la aplicación al estudio del control de accionamientos eléctricos, plantea un par de necesidades básicas:

- Los modelos utilizados deben ser relativamente simples, de forma que puedan integrarse en sistemas de control embebidos con prestaciones de procesado que no sean excesivos. En este sentido, a lo largo del desarrollo, se introducirá una serie de hipótesis simplificadoras, de forma progresiva y justificada, que permitan conseguir la simplicidad requerida manteniendo un nivel de precisión en el análisis adecuado a las tareas de control.
- Los modelos a aplicar deben ser efectivos, es decir, deben establecer relaciones claras y lo más directas posibles entre las magnitudes a controlar en el funcionamiento de la máquina (que en, en las situaciones más importantes de control de accionamientos eléctricos son el par interno y el flujo en el circuito magnético principal de la máquina) y las magnitudes sobre las que el sistema de control puede actuar y controlar: tensiones de alimentación.

Como se acaba de señalar, el objetivo principal busca relaciones entre las condiciones de funcionamiento y las de alimentación. Para alcanzar ese objetivo hay dos vertientes principales [1] disponibles en la literatura técnica que conviene conocer para poder contrastar sus ventajas e inconvenientes. Por una parte los modelos basados en inductancias propias y mutuas de los devanados, que normalmente vienen

acompañados por una serie de transformaciones muy extendidas (Clarke [2] para poder trabajar con vectores planos en lugar de tres magnitudes trifásicas y Park [3] para facilitar en análisis al trabajar sobre las direcciones magnéticas principales de la máquina). Por otra parte, modelos basados en la distribución espacial de magnitudes electromagnéticas en el entrehierro de la máquina [4] que permiten establecer relaciones sencillas entre las m magnitudes de fase de un devanado polifásico con las mencionadas distribuciones espaciales y también caracterizar de forma clara el comportamiento de la máquina (la formación del par y la inducción de ff.ee.mm.) en relación a esas mismas distribuciones espaciales. En este texto utilizaremos esta segunda vía ya que permite al lector construir una visión del funcionamiento de la máquina de cara a plantear su control más directa que la que proporciona el análisis en base a las inductancias propias y mutuas.

El proceso que seguiremos para alcanzar ese objetivo principal se resume en los siguientes puntos, cuya numeración se corresponde con los siguientes capítulos de este documento:

2. Estudio de la relación entre las corrientes en las fases de la máquina, la disposición de los devanados y la capa de corriente que ambos producen en el entrehierro de la máquina.
3. Análisis del circuito magnético principal de la máquina, es decir de las relaciones entre capa de corriente en el entrehierro (la excitación del circuito magnético), inducción en el entrehierro (efecto puntual del campo magnético en la zona en que se ubican los conductores) y flujo en la corona del estator y del rotor (efecto acumulado en superficies que conecta con el cálculo de enlaces de flujo y de ff.ee.mm.).
4. Cálculo de las ff.ee.mm. inducidas asociadas al circuito magnético principal de la máquina, indispensables para plantear el comportamiento eléctrico de cada una de las fases que constituye la máquina.
5. Planteamiento de comportamiento eléctrico de un devanado completo (conjunto de fases) polifásico en régimen dinámico, es decir, de la relación en régimen transitorio, representativa para el conjunto del devanado, de las relaciones entre tensiones aplicadas, corrientes circulantes y ff.ee.mm. inducidas. Este punto refleja una de las vertientes del objetivo global: relacionar las magnitudes de actuación (tensiones) con las corrientes y su efecto en el circuito magnético principal.
6. Planteamiento del comportamiento mecánico y, en especial, la determinación del par interno por interacción de las corrientes y del campo magnético existente en el entrehierro de la máquina.

Este proceso de análisis se irá particularizando para adaptarlo a las principales variantes de máquinas de corriente alterna desde el punto de vista del control electrónico de accionamientos: máquinas asíncronas y máquinas síncronas de imanes permanentes.

Respecto a las máquinas asíncronas, su análisis, al contar con un doble devanado polifásico (estator y rotor), es, en principio, más complejo por comparación con las máquinas de imanes permanentes, que cuentan con una excitación en el rotor que se puede considerar fija y cuya evolución, por lo tanto, no es necesario analizar. Las máquinas asíncronas, en sus dos variantes constructivas en el rotor (rotor de jaula y rotor bobinado) suponen una elección muy extendida en la industria hasta el nivel de potencia nominal de unos pocos MW aproximadamente. Esto se debe a su robustez y precio contenido, aunque a potencias superiores a algún MW los mejores rendimientos de las máquinas síncronas de excitación bobinada hacen que sean las más adecuadas. El tipo más habitual entre las máquinas asíncronas es, con diferencia, la máquina de jaula, por su bajo coste de fabricación y robustez, aunque en el rango más alto de potencias las máquinas de rotor bobinado, más caras de fabricar y de mantener, tienen un nicho de actuación muy claro en los accionamientos controlados en un margen estrecho de velocidades: en estos casos la conexión directa del estator a la red y el control del funcionamiento mediante un convertidor electrónico en el rotor permite plantear accionamientos de velocidad variable con un coste asociado a la electrónica de potencia muy inferior que otras alternativas, ya que el convertidor sólo tiene que trasegar una fracción (el deslizamiento) de la potencia que intercambia el estator con la red por conexión directa.

En el rango de potencias intermedias y bajas, las máquinas asíncronas de jaula compiten en los accionamientos controlados electrónicamente con las máquinas de imanes permanentes, fundamentalmente por el hecho de que, para este último tipo de máquinas, es menos costoso diseñar e implementar un control de altas prestaciones (tiempos de control de par interno muy cortos, en el rango de las décimas de ms). Este extremo se puede entender fácilmente al pensar que en las máquinas de imanes permanentes no hace falta controlar el comportamiento del rotor, al estar integrado por imanes permanentes, al contrario de lo que sucede en las máquinas asíncronas, en las que el comportamiento del rotor juega un papel básico. Sin embargo, precisamente la necesidad de utilizar imanes permanentes, especialmente si se trata de imanes de tierras raras con una alta densidad de energía, hace que su coste sea elevado (a menudo 5 y 10 veces o más que el de una máquina de jaula de ardilla de la misma potencia), por lo que su rango de aplicación se limita habitualmente a accionamientos de hasta alguna decena de kW. Dentro de las máquinas de imanes permanentes encontramos dos tipologías básicas según sea la forma de onda de f.e.m. inducida por el rotor en las fases del estator en régimen permanente:

- Senoidal, reciben habitualmente el nombre de Brushless AC o máquinas de corriente alterna sin escobillas. Su control comparte algunos aspectos con el de las máquinas asíncronas, ya que el efecto del imán permanente del rotor en cuanto a la inducción de ff.ee.mm. y a la generación de par es equivalente al de las corrientes del rotor de una máquina asíncrona, sólo que constante.
- Trapezoidal, reciben habitualmente el nombre de Brushless DC o máquinas de corriente continua sin escobillas. Su control es muy específico ya que reproducen en cierta medida el funcionamiento de las máquinas de corriente continua en las que se ajusta la tensión como parámetro principal del control y el convertidor electrónico juega un papel de conmutador estático con un control de corriente mucho más simplificado que en las Brushless AC. Aun así, se consigue un control de altas prestaciones con medios relativamente sencillos, lo que hizo que tuvieran una implantación significativa en accionamientos de fabricación automatizada y que, hoy en día, formen el núcleo, por ejemplo, de muchísimas aplicaciones de movilidad personal.

Capítulo 2

Capa de corriente y fasor espacial de corriente

Como se ha indicado en la introducción, el punto de partida para el análisis de las máquinas eléctricas rotativas de alterna será la distribución de conductores recorridos por corriente en las periferias interior del estator y exterior del rotor. Este análisis empieza por el estudio de la capa de corriente producida por la unidad básica de la que se constituyen los devanados, el conductor [5], [6], y tiene como objetivo describir esa capa de corriente mediante su desarrollo en serie de Fourier y sus fasores espaciales asociados. Una vez definida la contribución de un conductor, por agregación, estudiaremos la capa de corriente producida por una fase completa, caso que contemplaremos primero en su vertiente más general para una fase de constitución arbitraria, para centrarnos luego en la situación común y habitual de máquinas industriales: fases de constitución simétrica, tanto bipolares como multipolares. En este análisis aparece el concepto de factor de devanado, tanto en su forma compleja como su valor real (que coincide con el de la teoría clásica de máquinas eléctricas), marcando la importancia relativa de los armónicos dependiendo de la constitución de la fase. Establecida la contribución de una fase se aborda el estudio de la capa de corriente producida por un devanado polifásico simétrico, desarrollando con detalle el caso de interés en régimen permanente de alimentación por un sistema polifásico equilibrado de corrientes, situación que da lugar a la necesaria excitación giratoria en el entrehierro de la máquina y de la que deberemos analizar el comportamiento (velocidad de giro y amplitud) tanto del fundamental como de los principales armónicos. Por último, con el objetivo de caracterizar de forma sencilla la excitación magnética introducida en el entrehierro de la máquina por un devanado completo, se introduce el concepto de fasor espacial de corriente del devanado, paso funda-

mental en el establecimiento de un conjunto efectivo de ecuaciones dinámicas válidas para régimen transitorio de la máquina.

2.1. Capa de corriente producida por un conductor

Consideremos un conductor en la cara interior del estator cilíndrico de una máquina rotativa, [4] (el análisis es igualmente válido para el rotor, si es cilíndrico, como sucede en las máquinas asíncronas, pero, para el caso del estator, es importante notar que es indiferente que el rotor sea cilíndrico o no). Esta condición nos permite definir la ubicación en la cara interior del estator simplemente por la coordenada angular α , ya que el radio interior del estator es constante. Aunque el conductor, ubicado en α_A , presenta una sección transversal finita, a efectos de la determinación de la capa de corriente sólo hemos de tener en cuenta su dimensión tangencial, $\Delta D/2$ y la corriente que lo recorre $i(t)$, Fig. 1.

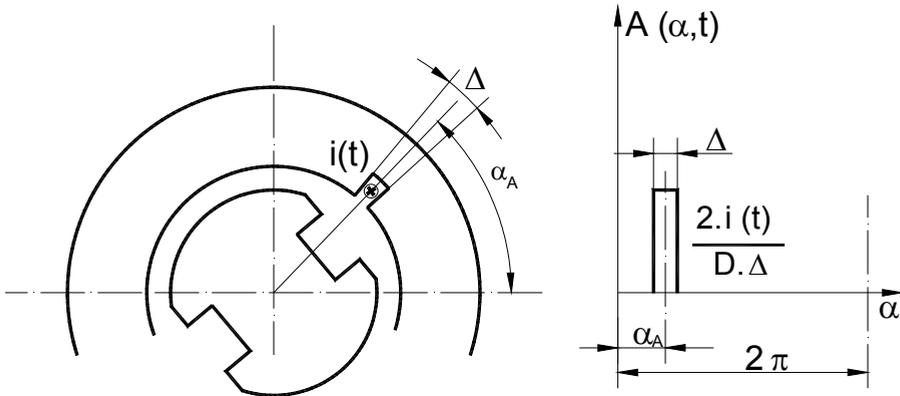


Fig. 1 Capa de corriente producida por un conductor

La capa de corriente producida por el conductor es de amplitud constante:

$$\hat{A} = \frac{2i(t)}{D\Delta}$$

a lo largo de la citada dimensión tangencial. El desarrollo en serie de Fourier de dicha función es:

$$A(\alpha, t) = \frac{i(t)}{\pi D} + \sum_{v=1}^{\infty} \left[\frac{2i(t)}{\pi D} \frac{\text{sen}\left(\frac{v\Delta}{2}\right)}{\frac{v\Delta}{2}} \cos(v(\alpha - \alpha_A)) \right] \quad (1)$$

El primer término de dicho desarrollo corresponde al valor medio de la capa de corriente y, para el estudio de devanados de máquinas eléctricas carece de interés, ya que la corriente neta entrante para el conjunto de cualquier devanado será nula por tener el mismo número de lados de ida que de vuelta.

Los siguientes términos tienen de amplitud:

$$A_v = \frac{2i(t)}{\pi D} \frac{\text{sen}\left(\frac{v\Delta}{2}\right)}{\frac{v\Delta}{2}} \quad (2)$$

En la práctica, salvo para armónicos muy grandes, dado que la dimensión tangencial para un conductor es muy pequeña en comparación con el periodo del armónico, la amplitud es prácticamente igual para todos ellos y de valor aproximado:

$$A_v \cong \frac{2i(t)}{\pi D} \quad (3)$$

2.2. Fasores espaciales de capa de corriente de un único conductor

Es importante notar cómo, para un único conductor, para el que el concepto de pares de polos no tiene sentido, la distribución en serie de Fourier representa un conjunto de ondas senoidales todas ellas de la misma amplitud (aproximada, excepto para armónicos elevados) y todas ellas centradas (su máximo positivo) en la ubicación angular del conductor, α_A . Para esta primera magnitud para la que encontramos un conjunto de distribuciones senoidales en el entrehierro (cada una de las componentes de su descomposición de Fourier) vamos a introducir el concepto de fasor espacial.

Consideremos una distribución senoidal de u pares de polos de una magnitud cualquiera definible en el entrehierro de la máquina, F (en este primer caso, el término de orden u (letra griega nu , no confundir con la letra latina u) de la descomposición de Fourier de la capa de corriente de un conductor) que tiene un valor máximo instantáneo $F_u(t)$ que se repite u veces en el entrehierro de la máquina estando uno de ellos en la posición α_u : definimos el fasor espacial para esa distribución espacial como el número complejo:

$$\bar{F}_v = F_v(t) \cdot e^{jv \cdot \alpha_v} \quad (4)$$

El fasor espacial así definido permite caracterizar el valor asociado al término u de la distribución espacial de F en una posición angular α cualquiera del entrehierro de la máquina ya que, al tener la distribución espacial senoidal que se ha indicado, se puede aplicar:

$$\begin{aligned} F_v(\alpha, t) &= F_v(t) \cos(v\alpha - v\alpha_v) = \\ &= \text{Re}[F_v(t) \cdot e^{jv \cdot (\alpha - \alpha_v)}] = \text{proy}_{v\alpha} \bar{F}_v \end{aligned} \quad (5)$$

En el análisis de las máquinas eléctricas rotativas veremos que las interacciones de más interés (por ejemplo, la formación del par) se producen entre distribuciones espaciales del mismo nº de pares de polos. Por eso consideramos todos los fasores espaciales de un mismo nº de pares de polos u definidos en dominio fasorial u de forma que cualquier ángulo α en el entrehierro real de la máquina se *transforma* en un ángulo fasorial $u\alpha$ en dicho dominio fasorial, lo que equivale a poder representar los u máximos positivos de cualquier onda, que estarán ubicados en el entrehierro en las posiciones angulares $\alpha_u \pm k \cdot 2\pi/u$, mediante un único número complejo orientado en $u\alpha_u$, ángulo fasorial equivalente a la ubicación geométrica de *todos* los máximos positivos de la onda de u pares de polos. Así, por ejemplo, una distribución de inducción en el entrehierro de 3 pares de polos con sus tres máximos positivos en $\alpha_B, \alpha_B + 2\pi/3, \alpha_B + 4\pi/3$, Fig. 2, queda representada por un fasor espacial de argumento $3 \cdot \alpha_B$:

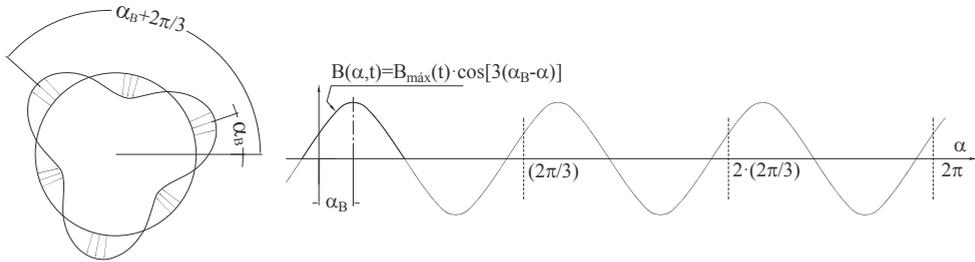


Fig. 2 Distribución espacial de una onda de inducción de 3 pares de polos

Esta representación de los términos de la distribución de Fourier presenta muchas ventajas en el análisis ya que, por ejemplo, como sucede con los fasores temporales, la suma de varias ondas del mismo nº de pares de polos es una onda del mismo nº de pares de polos cuyo valor máximo coincide con el módulo del fasor suma y uno de cuyos máximos se presenta en la posición del entrehierro asociada al argumento del fasor suma.

Así, cada una de las ondas de capa de corriente producidas por un único conductor admite una representación fasorial que simplifica el análisis de un devanado completo: el fasor espacial de capa de corriente para la componente armónica absoluta u tiene un módulo igual a la amplitud de la correspondiente onda senoidal, ec. (2), y una orientación que coincide con la ubicación geométrica de uno de sus máximos positivos, α_A convertido al dominio fasorial que le corresponde: $u\alpha_A$:

$$\bar{a}_{v,A} = \frac{2i(t)}{\pi D} \frac{\text{sen}\left(\frac{v\Delta}{2}\right)}{\frac{v\Delta}{2}} e^{jv\alpha_A} \quad (6)$$

**Para seguir leyendo, inicie el
proceso de compra, click aquí**