acadèmica

Generación, transporte y distribución de energía eléctrica

Manuel Alcázar Ortega | César S. Cañas Peñuelas | Guillermo Escrivá Escrivá | Vicente Fuster Roig | José Roger Folch

Editorial
Universitat Politècnica de València

Manuel Alcázar Ortega
César S. Cañas Peñuelas
Guillermo Escrivá Escrivá
Vicente Fuster Roig
José Roger Folch

Generación, transporte y distribución de energía eléctrica

Editorial
Universitat Politècnica
de València

Colección *Académica*

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: Alcázar Ortega, Manuel; Cañas Peñuelas, César S.; Escrivá Escrivá, Guillermo; Fuster Roig, Vicente; Roger Folch, José (2019). *Generación, transporte y distribución de energía eléctrica.* Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València

© Manuel Alcázar Ortega
César S. Cañas Peñuelas
Guillermo Escrivá Escrivá
Vicente Fuster Roig
José Roger Folch

© 2019, Editorial Universitat Politècnica de València
Venta: www.lalibreria.upv.es / Ref.: 6514_01_01_01

ISBN: 978-84-9048-771-6 (versión impresa)
ISBN: 978-84-9048-772-3 (versión electrónica)

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.

RESUMEN

Este libro pretende dar una visión general e integrada del sistema eléctrico de potencia con una orientación formativa para los estudiantes de master en ingeniería industrial. Los tres primeros temas forman un bloque que permite al estudiante tener una idea completa de la complejidad técnica que supone disponer de energía eléctrica de calidad en los diferentes puntos de consumo de una red eléctrica.

El último tema tiene por objeto describir el actual mercado de energía eléctrica, desgranándose cada uno de los términos que dan lugar al precio inal del kWh pagado por los consumidores.

BIODATAS

Manuel Alcázar Ortega

Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Valencia y Doctor Ingeniero Eléctrico por la Universidad del Sur de Florida (Estados Unidos). Ha sido profesor en las universidades "Miguel Hernández" y Estatal de Nueva York en Búfalo (Estados Unidos) y ha trabajado como ingeniero en la compañía RWE Deutschland AG (Alemania). Actualmente, es profesor en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica de Valencia. En esta institución forma parte desde el año 2004 del Instituto de Ingeniería Energética, donde trabaja en diferentes líneas de investigación relacionadas con el estudio de las redes inteligentes y microrredes, la caracterización de los patrones de demanda de los consumidores de energía y la participación activa de la demanda en mercados eléctricos.

César S. Cañas Peñuelas

Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Valencia, desde 1999. Ha trabajado como ingeniero de desarrollo en la empresa "Zacarés Numeradores". y actualmente es profesor titular de Universidad en la Universidad Politécnica de Valencia habiendo impartido docencia en las áreas de Máquinas Eléctricas, Tecnología Eléctrica (baja y alta tensión) y Teoría de Circuitos. La investigación la desarrolla en sistemas de protección de instalaciones eléctricas de alta tensión y modelización del terreno para altas descargas de energía eléctrica.

Guillermo Escrivá Escrivá

Ingeniero Industrial por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Valencia (1999) y Dr. Ingeniero Industrial por la Universitat Politècnica de València (2009).

Vicente Fuster Roig

Desde 2000 hasta 2005 trabajó en una gran empresa constructora como ingeniero de instalaciones. Desde febrero de 2005 es profesor en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universitat Politècnica de València, donde actualmente es Profesor Titular de Universidad.

Sus líneas de investigación incluyen la e iciencia energética, los mercados de energía y los problemas de calidad en los sistemas de potencia. Ha publicado varios libros docentes y es autor de más de treinta artículos o ponencias en revistas y congresos internacionales.

Doctor Ingeniero Industrial (Universitat Politècnica de València, 1996). Desde 1992 es profesor en el área de Ingeniería Eléctrica en la Universitat Politècnica de València, donde ha impartido diversas asignaturas relacionadas con la electrotecnia en general, máquinas eléctricas, tecnología eléctrica, instalaciones de alta tensión y usos de la electricidad. Es miembro del Instituto de Tecnología Eléctrica (ITE), donde ha participado en numerosos proyectos de investigación, tanto en convocatorias públicas como en contratos con empresas. Sus líneas de investigación se centran fundamentalmente en la calidad de la energía eléctrica, elementos para instalaciones eléctricas de alta tensión y *smartgrids*. Ha participado en varios libros en el ámbito de las perturbaciones eléctricas y su impacto en la industria.

José Roger Folch

Catedrático jubilado del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la UPV. Su dedicación principal tanto en docencia como en investigación fueron las Maquinas y las Instalaciones Eléctricas. Su actividad investigadora fundamentalmente se enfocó a la aplicación de métodos numéricos al diseño de máquinas y equipos eléctricos así como a la detección de averías (mantenimiento predictivo).

Contenidos

Introducción 7

1. Generación de energía eléctrica: introducción al generador síncrono 9

1.1. Principios de funcionamiento 9

1.1.1 Funcionamiento de la máquina rotativa elemental (m.e.r.) como máquina síncrona 9

1.1.1.1 Funcionamiento como generador 9

1.1.1.2 Funcionamiento como motor 11

1.1.2 Principios de funcionamiento de una máquina síncrona real 13

1.1.2.1 Funcionamiento como generador 14

1.1.2.2 Funcionamiento como motor 17

1.2. Constitución de las máquinas síncronas 18

1.2.1 Composición 18

1.2.1.1 Devanado inducido 18

1.2.1.2 Devanado inductor de excitación 19

1.2.1.3 Devanado amortiguador 21

1.2.2 Refrigeración de las máquinas síncronas 23

1.2.3 Utilización y clasificación de las máquinas síncronas 26

1.2.3.1 Turboalternadores 27

1.2.3.2 Generadores Hidráulicos 27

1.2.3.3 Generadores de usos varios (generadores industriales) 28

1.2.3.4 Motores 28

1.2.3.5 Compensadores Síncronos 28

1.2.3.6 Generadores Eólicos 29

1.2.4 El sistema de excitación 30

1.2.4.1 Definición 30

1.2.4.2 Funciones del sistema de excitación de la máquina (ver Norma UNE EN 60034-16-1) 30

1.2.4.3 Magnitudes y parámetros básicos 31

1.2.5 Descripción de los diferentes sistemas de excitación 32

1.2.5.1 Excitación con alternador y rectificador (b.2.1) 34
1.2.5.2 Autoexcitación derivación pura (b.3.2.1)..... 35
1.2.5.3 Excitación con diodos giratorios 35
1.3. Funcionamiento en vacío y en carga 37
1.3.1 Funcionamiento en vacío..... 38
1.3.2 Funcionamiento en carga 41
1.3.3 Circuito equivalente y diagrama fasorial de una MS ideal 45
1.3.4 Determinación de la reactancia síncrona..... 49
1.3.5 Introducción al análisis del funcionamiento de la ms real..... 52
1.3.6 Expresión de la impedancia en valores por unidad (pu) 53
1.4. Máquina síncrona en servicio 54
1.4.1 Modos de funcionamiento 54
1.4.2 Potencia activa y reactiva en máquinas síncronas de rotor cilíndrico..... 56
1.4.3 Curvas de potencia y par. Par sincronizante. Ángulo de par 58
1.5. Máquina Síncrona acoplada a una red de potencia infinita..... 63
1.5.1 Generalidades..... 63
1.5.2 Estudio del funcionamiento como motor y como generador 64
1.5.3 Límites de funcionamiento como generador 69
1.6. Bibliografía 71

2. Transporte y distribución de energía eléctrica..... 73
2.1. Tipos de líneas. Elementos que las componen 73
2.1.1 Introducción..... 73
2.1.2 Transporte y distribución. 74
2.1.3 Tipos de líneas 74
2.1.4 Conductores de líneas aéreas. 75
2.2. Introducción al modelo de línea. 79
2.2.1 Inductancia aparente. 81
2.2.2 Capacidad al neutro..... 82

2.2.3 Circuito monofásico equivalente. 83

2.3. Parámetros de líneas. 84

2.3.1 Resistencia. 84

2.3.2 Inductancia. 84

2.3.2.1 Inductancia interna unitaria de un conductor cilíndrico. 84

2.3.2.2 Inductancia unitaria de un tubo coaxial exterior a un conductor cilíndrico. 85

2.3.2.3 Inductancia unitaria de una línea monofásica. 86

2.3.2.4 Sistema de conductores cilíndricos paralelos. Inductancia aparente de un conductor. 88

2.3.2.5 Casos particulares. 90

2.3.2.6 Transposición de fases 93

2.3.3 Capacidad. 94

2.3.3.1 Potenciales creados por un conductor rectilíneo de longitud infinita cargado con q (c/m). 94

2.3.3.2 Capacidad de dos conductores cilíndricos coaxiales de radios R_1 y R_2 y cargados con +q C/m y –q C/m. Cable AT. . 95

2.3.3.3 Diferencia de potencial entre dos conductores paralelos cargados con +q C/m y –q C/m separados una distancia d .. 96

2.3.3.4 Capacidad de dos conductores rectilíneos paralelos de radios r y cargados con +q C/m y –q C/m. Línea monofásica. 97

2.3.3.5 Capacidades en líneas polifásicas. 98

2.3.3.6 Capacidad al neutro de líneas simétricas. 98

2.4. Modelos de líneas eléctricas. 101

2.4.1 Modelo serie. 101

2.4.2 Modelo en π. 104

2.4.3 Capacidad de transporte. 105

2.5. Regulación de tensión. 106

2.5.1 Condensadores en serie. Compensación de líneas aéreas. 108

2.5.2 Condensadores en paralelo. 109

2.5.3 Compensadores estáticos. 110

2.6. Proyectos tipo. 110

2.6.1 Proyecto tipo de línea aérea de media tensión, realizada en simple circuito con cable de aluminio acero 47'AL1/8ST1A(LA 56). MT 2.21.60 111

2.6.1.1 Cálculo eléctrico de una línea de MT utilizando el proyecto tipo MT.2.21.60 111

2.6.2 Proyecto tipo de línea subterránea de alta tensión hasta 30 kV. MT 2.31.01. 112

2.6.2.1 Cálculo eléctrico de una línea de MT utilizando el proyecto tipo MT.2.31.01. 112

2.7. Valores por unidad. 113

2.8. Bibliografía. 115

3. Flujo de cargas. 117

3.1. Introducción 117

3.2. Planteamiento del problema del flujo de carga 117

3.3. Planteamiento del problema 118

3.4. Resolución del problema de flujo de carga por Gauss-Seidel 120

3.4.1 Caso unidimensional del método de iterativo Gauss-Seidel 121

3.4.2 Caso n-dimensional del método de iterativo Gauss-Seidel 121

3.4.3 Aplicación del método de iterativo Gauss-Seidel a la resolución del flujo de carga 121

3.5. Resolución del problema de flujo de carga por Newton-Raphson 124

3.5.1 Caso unidimensional del método de iterativo Newton-Raphson 124

3.5.2 Caso n-dimensional del método de iterativo Newton-Raphson 125

3.5.3 Aplicación del método de iterativo Newton-Rapshon a la resolución del flujo de carga 125

3.5.4 Resolución del flujo de carga por el método iterativo Newton-Rapshon desacoplado 130

3.6. Bibliografía 132

4. Introducción al Mercado Ibérico de Electricidad 133
4.1. Introducción 133
4.1.1 Tipos de mercado 135
4.1.1.1 Mercado mayorista 136
4.1.1.2 Mercado minorista 138
4.2. El Mercado Ibérico de Electricidad 138
4.2.1 Tipos de mercado 140
4.2.2 Agentes del Mercado Ibérico de Electricidad 142
4.2.2.1 Agentes participantes en el MIBEL 142
4.2.2.2 Otros sujetos no participantes en el MIBEL 144
4.2.3 Mercados a corto plazo (mercado "Spot") 148
4.2.3.1 Mercado diario ("Pool") 148
4.2.3.2 Mercados intradiarios 162
4.2.4 Mercados a medio y largo plazo (mercado de futuros) 165
4.2.4.1 La gestión técnica del mercado de futuros: OMIP 165
4.2.4.2 La gestión económica del mercado de futuros: OMICLEAR .. 166
4.2.4.3 Participantes en el mercado a plazo 166
4.2.4.4 Funcionamiento del mercado a plazo 167
4.2.4.5 Tipos de producto en el mercado de a plazo 170
4.2.4.6 Características de los contratos de futuros 171
4.2.4.7 Precio de referencia 173
4.2.5 Mercados de operación: servicios de ajuste del Operador del Sistema 175
4.2.5.1 Solución de restricciones técnicas 176
4.2.5.2 Asignación de servicios complementarios 177
4.2.5.3 Gestión de desvíos 180
4.2.6 Precio final del mercado: ¿qué pagan los consumidores? 180
4.2.6.1 Liquidación de los desvíos 181
4.2.6.2 Pérdidas en la red 183
4.2.6.3 Pagos por capacidad 184
4.2.6.4 Pagos a los operadores del mercado y del sistema 184
4.2.6.5 Pagos por el servicio de interrumpibilidad 185

4.2.6.6 Tasa municipal 185
4.2.7 Precio horario que paga el consumidor por la energía 186
4.3. Facturación y contratación de la electricidad en España 188
4.3.1 Estructura general de la factura eléctrica 188
4.3.2 Contrato regulado: Facturación en PVPC 190
4.3.2.1 Término de potencia 190
4.3.2.2 Término de energía 191
4.3.2.3 Bono social 193
4.3.2.4 Ejemplo de factura en tarifa regulada (PVPC) 195
4.3.3 Contrato en mercado libre: facturación en mercado liberalizado 196
4.3.3.1 Ejemplo de factura en mercado liberalizado 198
4.3.4 Tarifas de Acceso 200
4.3.4.1 Tipos de tarifa de acceso 201
4.3.4.2 Precios vigentes de las tarifas de acceso para el año 2019 .. 209
4.3.4.3 Cálculo de los términos de la tarifa de acceso 211
4.3.5 Ejemplo de cálculo de una factura eléctrica 220
4.3.5.1 Características del contrato de suministro 220
4.3.5.2 Cálculo del coste de la energía 222
4.3.5.3 Cálculo de la tarifa de acceso 224
4.3.5.4 Cálculo de la factura total 229
4.4. Bibliografía 230

Introducción

Los contenidos de este libro pretenden dar una visión general e integrada del sistema eléctrico de potencia.

Se ha dividido la materia en cuatro bloques:

1. Máquinas síncronas. Son aquellas en las que la velocidad de giro es igual a la velocidad de giro del campo magnético giratorio generado en el inducido.
2. Transporte y distribución de Energía Eléctrica. Tiene por objeto el estudio de la red de distribución cuya función principal es la transmisión de energía eléctrica desde las redes de transporte hasta los puntos de consumo
3. Flujos de carga. Mediante la resolución del problema del flujo de carga de un sistema eléctrico se obtienen las condiciones de operación
4. Introducción al mercado Ibérico de la electricidad. Se describen los mecanismos que se utilizan para negociar y ejecutar la compra - venta de energía eléctrica.

Los tres primeros temas forman un bloque que permite al estudiante tener una idea completa, de la complejidad técnica que supone disponer de energía eléctrica de calidad en los diferentes puntos de consumo de una red eléctrica.

El último tema tiene por objeto describir el actual mercado de energía eléctrica, desgranándose cada uno de los términos que dan lugar al precio final del kWh pagado por los consumidores.

Valencia noviembre de 2018

1. Generación de energía eléctrica: introducción al generador síncrono

1.1. Principios de funcionamiento

Dentro de los convertidores electromecánicos, las máquinas síncronas, (MS), son aquellas en las que para que se produzca conversión de energía en cualquiera de los dos sentidos, es decir, para que el funcionamiento sea como motor o generador, es imprescindible que en régimen permanente la velocidad de giro sea igual a la velocidad de sincronismo (n_s), es decir, a la velocidad del campo giratorio generado por la corriente del inducido de la máquina. En este apartado, se va a comentar el principio de funcionamiento de las máquinas síncronas como generador o motor, partiendo de una máquina eléctrica elemental.

1.1.1 *Funcionamiento de la máquina rotativa elemental (m.e.r.) como máquina síncrona*

1.1.1.1 Funcionamiento como generador

La Figura 1.1.A. Máquina rotativa elemental.a muestra una máquina eléctrica rotativa (m.e.r.) elemental bipolar, con dos polos formados por imanes en el estator, una espira diametral colocada en el rotor cilíndrico de material magnético de alta permeabilidad, y unida a dos anillos colocados sobre el eje. Al hacer girar el rotor a una velocidad constante, como muestra la Figura 1.1.A. Máquina rotativa elemental, se obtiene entre los anillos una f.e.m. inducida. (Figura 1.1.A. Máquina rotativa elemental.b y c).

Si el rotor gira a n_1 vueltas por minuto (r.p.m.), la frecuencia f_2 de la f.e.m generada en la espira vale:

$$f_2=\frac{p_1 n_1}{60} \qquad \text{(eq. 1.1)}$$

Siendo p_1 el número de pares de polos de la máquina (en el ejemplo de la Figura 1.1.A. Máquina rotativa elemental, p_1 sería igual a 1).

De acuerdo con el teorema de la semejanza, la forma de onda de la f.e.m. en el tiempo se corresponderá con la forma de onda espacial de tensión magnética en el entrehierro de la máquina.

A partir de la (eq. 1.1) se observa que si se quiere mantener constante la frecuencia que da la máquina, se debe hacer girar el rotor a una velocidad también constante ya que p es invariable en la máquina. De aquí el nombre de

Máquina Síncrona (M S). Su utilización fundamental es como generador que ha de proporcionar una tensión alterna, senoidal a frecuencia constante.

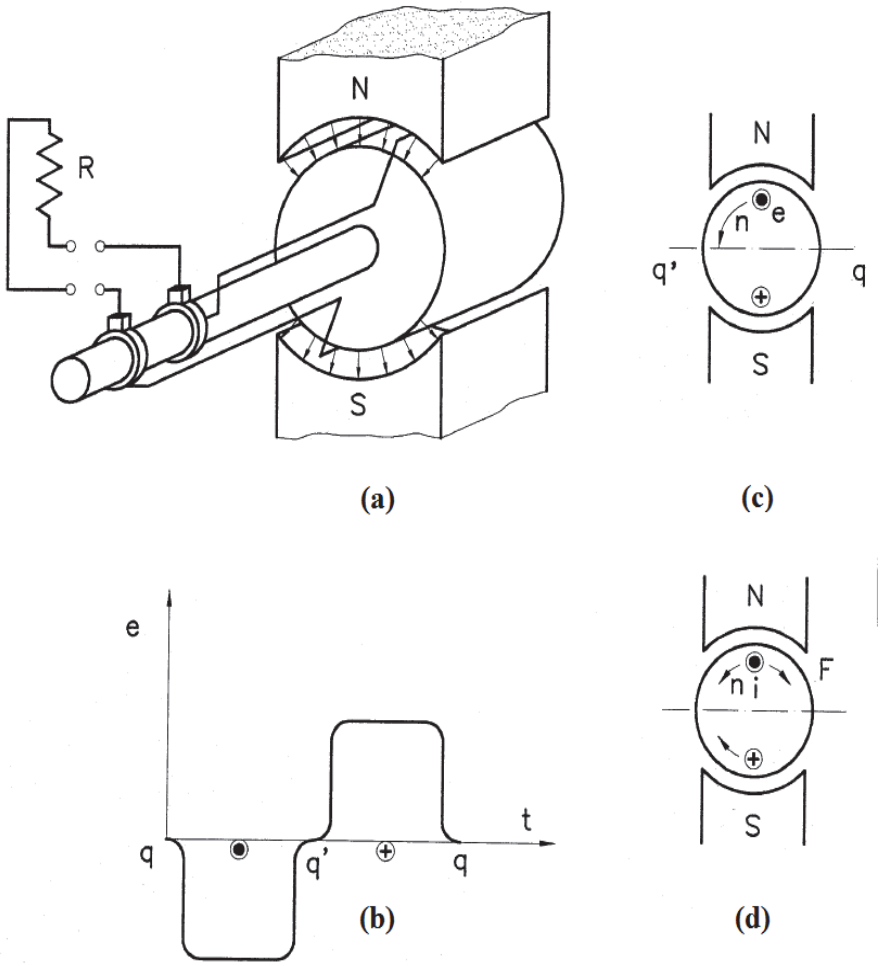


Figura 1.1. A. Máquina rotativa elemental.

Obsérvese que si se coloca una carga resistiva en bornes de la máquina elemental, (la conexión se hace con dos delgas fijas de carbón especial que frotan sobre los anillos) la corriente generada $i=e/r$ estará en fase con la f.e.m.

(e) y el par mecánico producido tiene un sentido contrario al del movimiento del rotor ya que la máquina produce un par resistente, (Figura 1.1.A. Máquina rotativa elemental.d). Para ver los sentidos de las fuerzas electromotrices (f.e.m) generadas y las fuerzas mecánicas se aplican respectivamente las conocidas reglas nemotécnicas de la mano derecha e izquierda.

En las figuras 1.1.A. c y d los puntos representan f.e.m o corrientes salientes y las cruces sentidos entrantes.

1.1.1.2 Funcionamiento como motor

Siguiendo con la máquina de la Figura 1.1.A Máquina rotativa elemental, si se quiere que funcione como motor, se debe inyectar corriente alterna a la espi-ra por medio de las delgas. Para que la fuerza ejercida sobre el conductor mantenga su sentido, la corriente de cada uno de los conductores del rotor debe cambiar de sentido cada vez que el conductor recorre un paso polar, es decir, cada vez que un conductor pasa de estar bajo un polo Norte a un polo Sur, la corriente debe de cambiar de sentido. La condición anterior puede observarse en la máquina elemental de la Figura 1.1.B, de 8 polos y con una bobina elemental (a-á) que abarca 90º eléctricos. En esta figura, los "puntos" (·) y "cruces" (x) representan corrientes, y darán lugar a fuerzas que hacen girar a la máquina según la flecha.

Así pues, si la frecuencia de las corrientes del rotor es f_2, la velocidad de giro del rotor en r.p.m. ha de ser:

$$n_s = \frac{60 f_2}{p} \qquad \text{(eq. 1.2)}$$

por lo tanto, si la frecuencia de alimentación es constante, la velocidad de giro ha de serlo también.

La (eq. 1.2) se deduce fácilmente considerando que el tiempo en segundos empleado por el conductor (a) en recorrer un paso polar:

$$t = \frac{1}{n_s/60} \cdot \frac{1}{2p} \qquad \text{(eq. 1.3)}$$

ha de ser igual a un semiperiodo o tiempo empleado en producirse una inversión del sentido de la corriente.

$$t=\frac{1}{2}\cdot\frac{1}{f_2} \qquad \text{(eq. 1.4)}$$

De las (eq. 1.3) y (eq. 1.4), se obtiene la (eq. 1.2).

En la deducción anterior, se ha supuesto que durante todo el recorrido de un conductor, bajo un paso polar, la corriente tiene el mismo sentido. El proceso deductivo no cambia si se supone que durante el recorrido del conductor bajo un paso polar, la corriente lleva un sentido que durante un tramo es punto (·) y el sentido contrario, cruz (x), durante el resto del recorrido bajo el mismo paso polar. El sentido de la fuerza cambiará durante el recorrido del conductor en el paso polar, pero habrá una fuerza media resultante siempre que la longitud de los tramos "punto" y "cruz" se mantenga en cada paso polar. La máquina está en sincronismo, lo que ha variado ha sido la fase de la corriente respecto a la f.e.m inducida en el devanado. Por el contrario, si los tramos "punto" y "cruz" varían en longitud en cada ciclo, quiere decir que la máquina no está en sincronismo y la fuerza media tras un gran número de ciclos es cero.

Es evidente que la fuerza máxima o par máximo se tiene cuando el sentido de la corriente no cambia durante el recorrido de un paso polar.

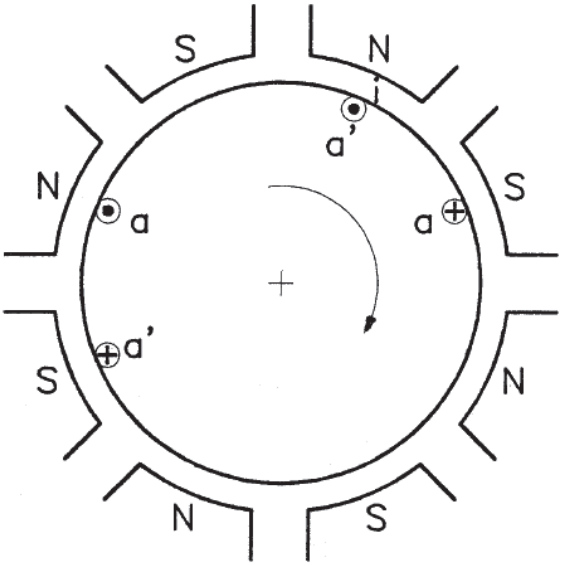


Figura 1.1.B. Máquina síncrona elemental de 8 polos.

1.1.2 *Principios de funcionamiento de una máquina síncrona real*

La mayoría de las máquinas síncronas utilizadas industrialmente adoptan una disposición diferente a la máquina eléctrica elemental. En ellas, los polos (inductores) se colocan en el rotor y el inducido en el estator, que está devanado de forma conceptualmente idéntica al de una máquina asíncrona, con las tres fases cuyos ejes están desfasados entre sí 120º eléctricos.

La Figura 1.2 representa esquemáticamente una máquina síncrona trifásica con una sola bobina por fase, alojada en dos ranuras con paso diametral o bien una máquina síncrona "real" en la que las bobinas (aa'), (bb'), (cc') representan las bobinas eléctricamente equivalentes a los devanados distribuidos de cada una de las fases, según definición del libro "Serrano Iribarnegaray L. 1989 *Fundamentos de máquinas eléctricas*. Barcelona. Marcombo"

Aunque se cambie la posición del inducido (estator) e inductor (rotor), la (eq. 1.1) sigue siendo válida, siendo n_1 y p_1 la velocidad y número de pares de polos del rotor y f_2 la frecuencia generada en el inducido.

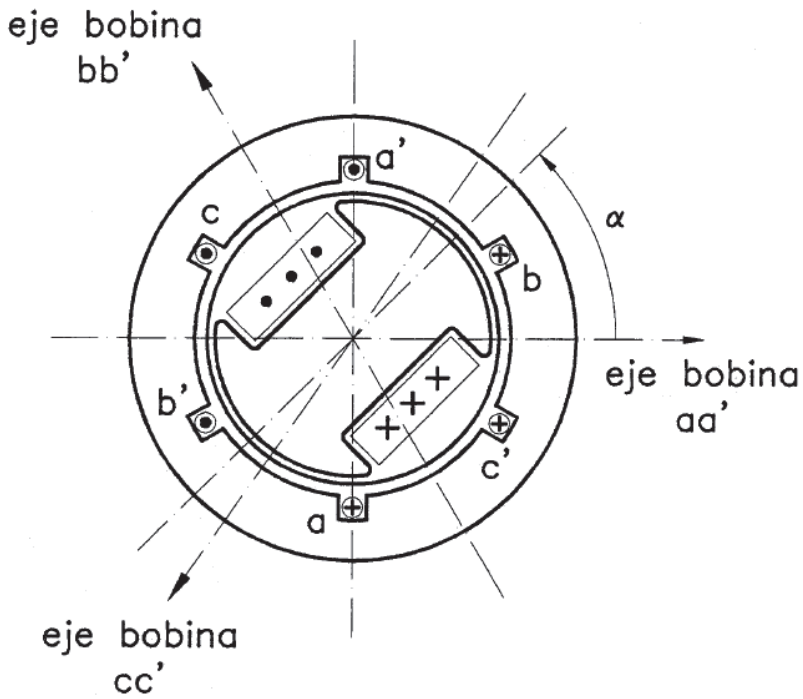


Figura 1.2 Corte transversal máquina síncrona trifásica.

1.1.2.1 Funcionamiento como generador

Se considera la máquina de la Figura 1.2, con origen de ángulos en el eje de aa', tal que el eje polar forma un ángulo $a = \Omega_1 t$ con el eje aa'. Se toma t=0 cuando a = 0.

Considerando una distribución del campo magnético (B) en el entrehierro senoidal, (Figura 1.3), el flujo por polo total que concatena una bobina (aa') para una posición a, del inductor es:

$$\Psi_{aa}=\Psi_0 \cos a = \Psi_0 \cos(\Omega_1 t) \qquad con \qquad \Omega_1=2\pi f=\frac{2\pi n p}{60} \qquad \text{(eq. 1.5)}$$

en donde Ψ_0 es el flujo máximo concatenado por la bobina o fase, si se ha reducido la fase a su bobina equivalente.

En la (eq. 1.5) y para una máquina ideal (entrehierro uniforme, sin ranuras), con 2 pares de polos, se cumple:

$$\Psi_0=\frac{B_M l D}{p} \qquad con \qquad B_a=B_M \cos a \qquad y \qquad B_a=F_a \frac{\mu_0}{\delta} \qquad \text{(eq. 1.6)}$$

B_M se tiene para a = 0.

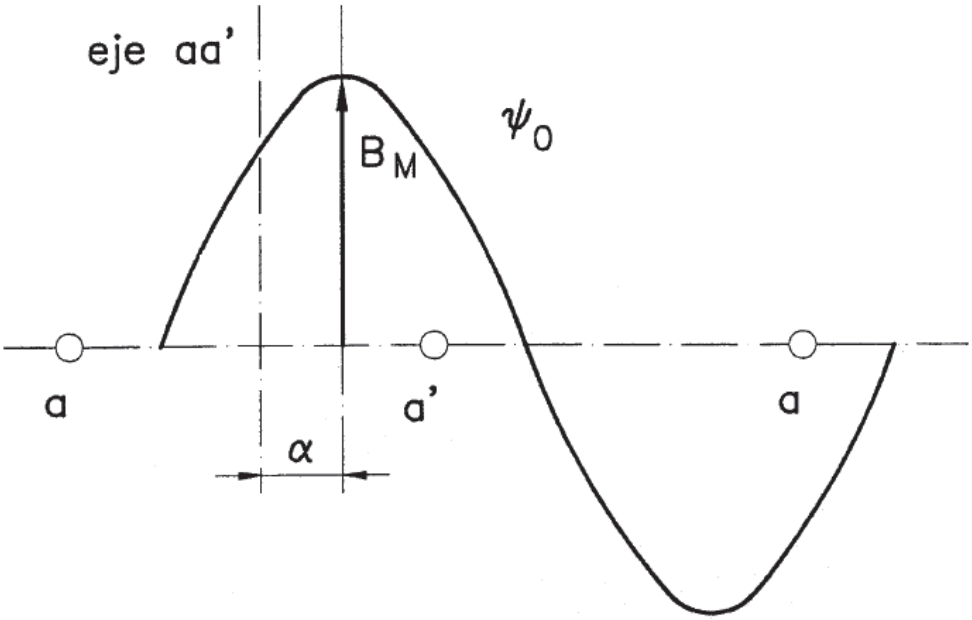


Figura 1.3 Onda de campo magnético en el entrehierro.

La justificación de estas expresiones se puede encontrar en el libro "Máquinas Eléctricas" de Luis Serrano y Javier Martínez (Serrano Iribarnegaray L. Martinez Román J.A. 2017 [4ªed] Máquinas Eléctricas. Valencia. Ed. Universitat Politècnica de València.).

Nótese que α es el desfase medido en ángulos eléctricos. A partir de aquí y en el resto del desarrollo, los ángulos que se toman son ángulos eléctricos, haciendo abstracción del número de polos. Ω_1 se expresa en radianes eléctricos por segundo.

La fuerza electromotriz inducida en esta bobina, es por tanto:

$$e_a=\frac{-\partial\Psi_a}{\partial t}=\sqrt{2}E_0\,\text{sen}\,(\Omega_1 t)=\sqrt{2}E_0\cos\left(\Omega_1 t-\pi/2\right) \qquad \text{(eq. 1.7)}$$

y en donde E_0, toma el valor eficaz:

$$E_0=4{,}44\,\xi_2 f_2 N\Phi_0 \qquad \text{(eq. 1.8)}$$

Análogamente, en las otras dos bobinas, decaladas 120º, se tiene

$$\Psi_{ab}=\Psi_0\cos\left(\Omega_1 t-\pi/3\right)$$
$$\Psi_{ac}=\Psi_0\cos\left(\Omega_1 t-2\pi/3\right) \qquad \text{(eq. 1.9)}$$

y las f.e.m. correspondientes son:

$$e_b=\sqrt{2}E_0\cos\left(\Omega_1 t-\pi/3-\pi/2\right)$$
$$e_c=\sqrt{2}E_0\cos\left(\Omega_1 t-2\pi/3-\pi/2\right) \qquad \text{(eq. 1.10)}$$

Así pues, en bornes del generador, un sistema trifásico equilibrado de f.e.m. Si se conecta una carga trifásica equilibrada, se presenta un sistema trifásico equilibrado de corrientes que da lugar a un campo giratorio a una velocidad en r.p.m. de:

$$n_2=\frac{60f_2}{p_2} \qquad \text{(eq. 1.11)}$$

Donde f_2 es la frecuencia de las f.e.m. y corrientes del inducido (estator) y p_2 es el número de pares de polos del inducido.

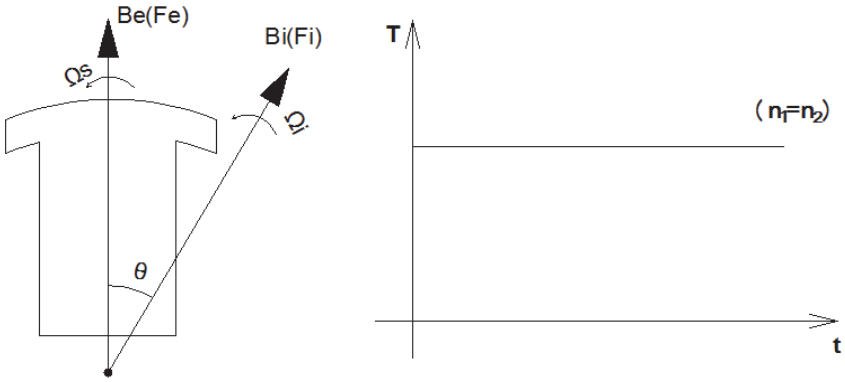
Como la frecuencia f_2 depende del número de pares de polos del rotor (p_1) y de su velocidad (n_1) según la (eq. 1.1), para que la velocidad del campo giratorio (n_2) sea igual a la velocidad del rotor (n_1) es imprescindible que el número de pares de polos del inducido (p_2) sea igual al del inductor (p_1) ($p_1 = p_2$).

Esto último se puede ver fácilmente si en la (eq. 1.11) se sustituye f_2 por su valor:

$$n_2=\frac{60f_2}{p_2}=\frac{60}{p_2}\cdot\frac{p_1n_1}{60}=n_1 \quad ; \quad si \quad p_1=p_2 \qquad \text{(eq. 1.12)}$$

A partir de aquí, en el texto, a la velocidad $n_1 = n_2$ se le denomina velocidad de sincronismo (n_s).

En las condiciones anteriores citadas, el ángulo que forman los fasores espaciales de inducción de estator y rotor (B_e y B_r), es constante y el par electromagnético interno (T_e) instantáneo en régimen permanente, también lo será:



$$T_e=K(B_e\times B_i)=KB_eB_i\,\text{sen}(\theta) \qquad \text{(eq. 1.13)}$$

Figura 1.4. Par electromagnético.

Este par electromagnético tiene el carácter de par resistente, igual y opuesto al par motor mecánico producido por la turbina o cualquier otro sistema que accione al alternador.

Nota: En todo el razonamiento de este apartado se ha considerado, de forma ideal, la onda de inducción senoidal y, por tanto, solo aparecen componentes fundamentales de B.

1.1.2.2 Funcionamiento como motor

Se va a analizar el comportamiento como motor de una máquina síncrona de la Figura 1.2. Supóngase que la máquina está parada y se pretende arrancar, para ello el devanado trifásico del estator es alimentado por un sistema de tensiones senoidales equilibradas, por lo que dan lugar a un campo magnético giratorio (B_i) a una velocidad que depende de la frecuencia de la tensión de alimentación (eq. 1.11).

Por otro lado, los polos del rotor crean, mediante imanes o bobinas alimentadas con corriente continua, un campo magnético senoidal (B_e) fijo en el espacio (Figura 1.5).

Así pues se tiene un campo magnético senoidal fijo en el espacio (B_e , n_1=0) y uno giratorio (B_i) a una velocidad n_2.

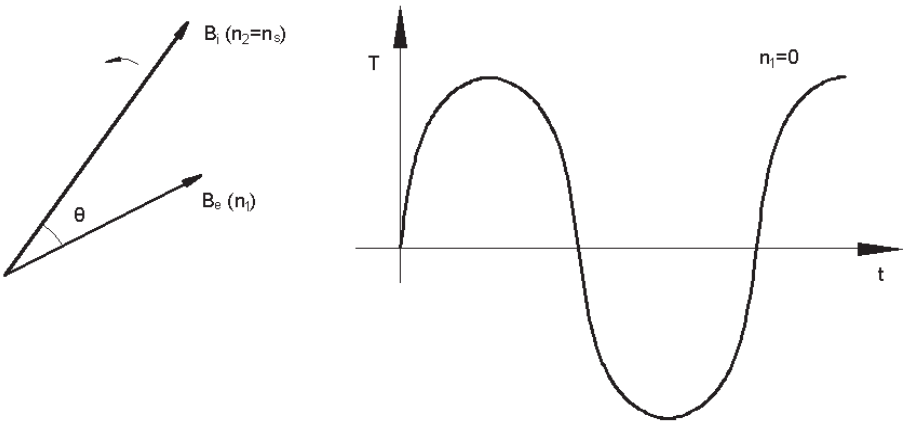


Figura 1.5. Par electromagnético

Según la (eq. 1.13) se tiene un par electromagnético, cuya magnitud varía con el tiempo entre 0 y 2π a la frecuencia de la red de alimentación. Por lo tanto, el par varía periódicamente tomando valores positivos y negativos y su valor medio es cero (Figura 1.5). En estas condiciones la máquina no puede comenzar a girar.

Solamente si el rotor, y por lo tanto el campo magnético que producen sus polos, gira a la misma velocidad que el campo magnético del estator, se

Para seguir leyendo haga click aquí