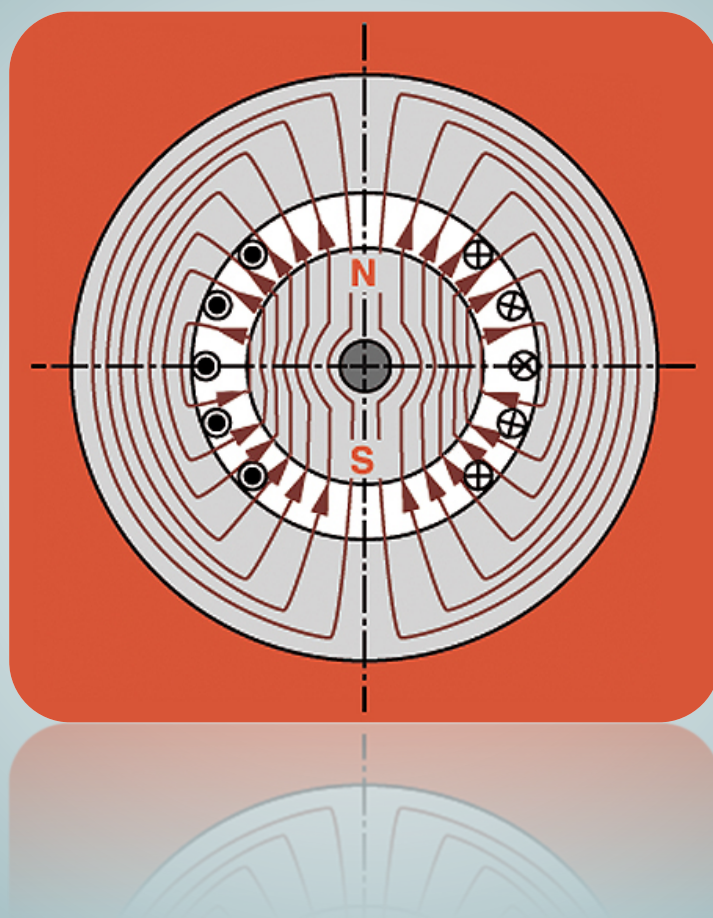


Máquinas Eléctricas I - G862

Tema 4. Máquinas Síncronas



Miguel Ángel Rodríguez Pozueta

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

En este documento las referencias a páginas, figuras, ecuaciones, tablas, notas al pie, citas bibliográficas y sitios web en el texto actúan como *hipervínculos*. Al hacer clic en ellas se accede al elemento a que se refieren.

Este documento está diseñado para que se obtenga un texto impreso bien organizado si decide ahorrar papel imprimiéndolo a tamaño reducido, de forma que se incluyan dos páginas por cada hoja de papel A4 apaisado.

© 2015, Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Universidad de Cantabria (España)

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.



Está permitida la reproducción total o parcial de este documento bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Unported que incluye, entre otras, la condición inexcusable de citar su autoría (Miguel Angel Rodríguez Pozueta - Universidad de Cantabria) y su carácter gratuito.

Puede encontrar más documentación gratuita en la página web del autor:

<http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>

ÍNDICE

MÁQUINAS SÍNCRONAS

Descripción y principio de funcionamiento	1
Sistemas de excitación.....	11
Excitación mediante excitatrices de corriente continua.....	11
Excitación mediante excitatrices de corriente alterna con rectificador.....	12
Excitación sin escobillas	13
Excitación sin escobillas con autoexcitación indirecta.....	14
Autoexcitación directa.....	15
Funcionamiento en vacío. Característica de vacío.....	16
Valores por unidad (p.u.).....	21
Funcionamiento en carga. Regulación de tensión.....	23
Fuerzas magnetomotrices	25
Fasor espacial de f.m.m.....	26
Diagrama fasorial espacial de f.m.m.s	27
Diagrama fasorial temporal de flujos. Correlación fasorial	28
Diagrama fasorial de una máquina síncrona de rotor cilíndrico. Reacción de inducido	30
Consideraciones sobre la característica de vacío. Factor de saturación	35
Análisis lineal de una máquina síncrona de rotor cilíndrico. Método de Behn-Eschenburg	36
Característica de cortocircuito. Reactancias síncronas no saturada y saturada. Relación de cortocircuito.....	41
Análisis lineal mejorado de una máquina síncrona de rotor cilíndrico	45
Método de Potier o del factor de potencia nulo.....	49
Característica reactiva.....	49
Triángulo de Potier	50
Método de Potier	53
Método ASA.....	55

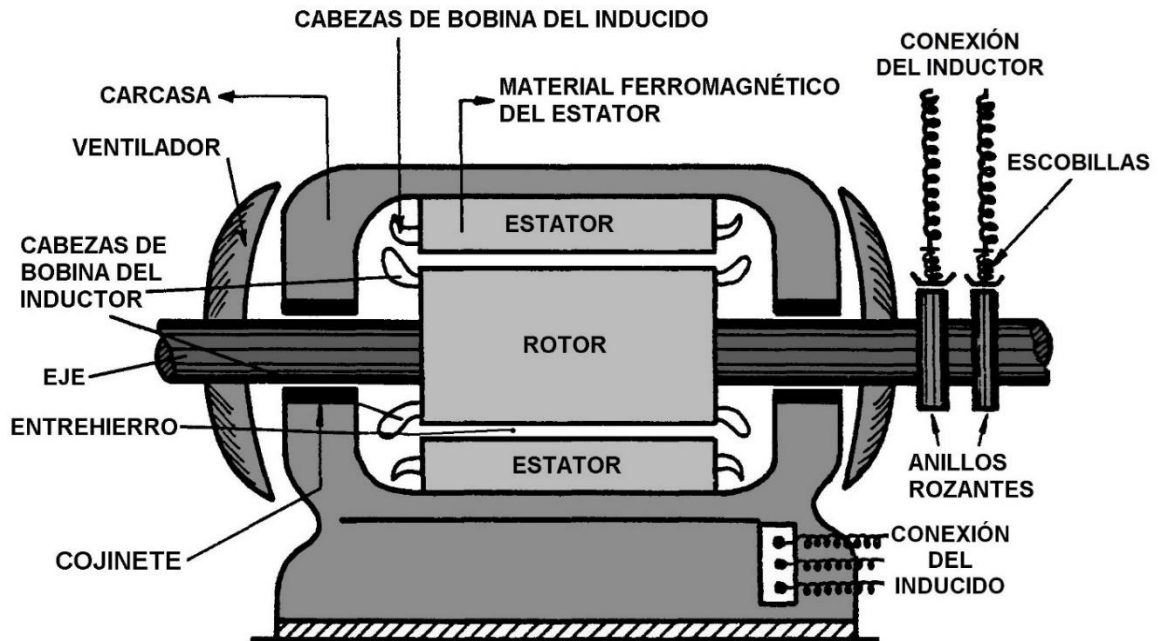
ÍNDICE

La máquina síncrona de polos salientes	58
Teoría de las dos reacciones o de Blondel	58
Método de Blondel. Diagrama fasorial de Doherty y Nickle	60
Reactancias síncronas en la máquina de polos salientes	63
Análisis lineal con polos salientes mejorado	64
<u>FUNCIONAMIENTO COMO ALTERNADOR AISLADO</u>	67
Reguladores de una máquina síncrona	67
Características exterior y de regulación	68
Regulador de velocidad (governor)	71
Regulador centrífugo de Watt	71
Curva de estatismo	73
Regulación secundaria	76
Formas de funcionamiento de un alternador síncrono	77
Funcionamiento en una red aislada	77
Funcionamiento acoplado a una red de potencia infinita	78
Funcionamiento acoplado en paralelo con otro alternador de potencia similar	78
Resumen	79
Bibliografía	80
<u>ANEXO: MÁQUINAS SÍNCRONAS ESPECIALES</u>	81
Alternador de garras o de Lundell	81
Máquina síncrona de imanes permanentes	83
Consideraciones sobre el par	85
Motor de histéresis	86
Motores de reluctancia	87
Motores paso a paso	89
Máquinas lineales	92

MÁQUINAS SÍNCRONAS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

DESCRIPCIÓN Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO



Fuente: "El fenómeno electromagnético" de José Antonio de Gurrutxaga Ruiz

Fig. 1: Constitución general de una máquina síncrona de rotor cilíndrico



Fig. 2: Estator de un alternador trifásico

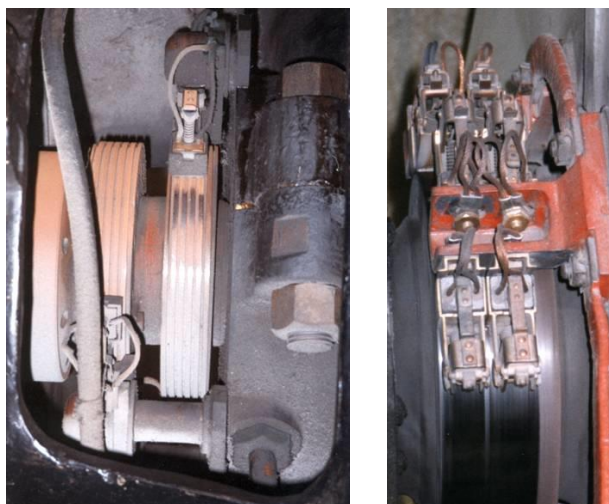


Fig. 3: Colectores de dos anillos

Las máquinas síncronas (Fig. 1) son máquinas de corriente alterna, lo cual quiere decir que su inducido (Fig. 2) es un devanado de corriente alterna, mono o polifásico, similar al de una máquina de inducción. Por el contrario, el devanado inductor¹ de esta máquina funciona con corriente continua. Ambos devanados tienen el mismo número de polos (2p). Salvo en máquinas pequeñas, de menos de 10 kVA, lo habitual es que el inducido esté situado en el estator y el inductor esté ubicado en el rotor y se alimente a través de un colector de dos anillos (Fig. 3). Se construyen así porque interesa que las tensiones y las corrientes en el rotor y, sobre todo, en el colector de anillos sean lo más pequeñas posible y, además, así se necesitan dos anillos y no tres. Algunas máquinas pequeñas carecen de devanado inductor y de colector porque se sustituyen por unos imanes permanentes. El entrehierro de estas máquinas suele ser mayor que en las de inducción.

De momento, salvo indicación en sentido contrario, este texto se va a referir a máquinas síncronas polifásicas, concretamente trifásicas; por lo que su inducido será trifásico y se le supondrá ubicado en el estator. Cuando este devanado esté recorrido por un sistema trifásico equilibrado de corrientes, el Teorema de Ferraris dice que aparecerá en el entrehierro un campo magnético giratorio que se mueve a la velocidad de sincronismo. En estas máquinas el rotor -que es donde se encuentra el devanado de excitación- gira también a la velocidad de sincronismo, por lo que el campo magnético parece inmóvil visto desde él y, en consecuencia, el rotor está sometido a un campo magnético constante y no tiene pérdidas en el hierro (por histéresis y por corrientes de Foucault). Esto permite que el núcleo magnético del rotor pueda fabricarse de hierro macizo. Sin embargo, el estator sí que está sometido a un campo magnético variable -pues dicho campo gira a la velocidad de sincronismo visto desde el estator- que da lugar a pérdidas en el hierro; lo que obliga a que su núcleo magnético tenga que construirse apilando chapas magnéticas.

Cuando la máquina síncrona actúa como **generador de corriente alterna** o **alternador**, una máquina motriz (o motor) externa hace girar su rotor y con él gira el campo magnético inductor. Este campo está generado por una corriente continua, luego visto desde el rotor es un campo estático. Sin embargo, al girar el rotor las fases del estator “ven” un campo magnético móvil. Esto da lugar a que estas fases estén sometidas a un flujo variable en el tiempo y se induzcan en ellas unas fuerzas electromotrices (f.e.m.s) alternas.

¹ Recuérdese que el devanado *inductor* también se denomina *de excitación* o *de campo*. Por otra parte, el devanado *inducido* también se denomina *de armadura*. Por último, las palabras *devanado*, *bobinado* y *arrollamiento* son sinónimos.

Cuando una máquina síncrona polifásica actúa como **motor**, su estator está recorrido por un sistema equilibrado de corrientes. Estas corrientes dan lugar a un campo magnético giratorio que, al interactuar con el campo magnético inductor, hace girar al rotor a su misma velocidad, es decir, a la velocidad de sincronismo. El problema del motor síncrono es que carece de par de arranque; sólo cuando el rotor gira a la velocidad de sincronismo o a una velocidad muy próxima a ella esta máquina puede ejercer un par motor sobre su eje.

Como se acaba de ver, cuando esta máquina actúa de motor gira a la velocidad de sincronismo. Por otra parte, cuando la máquina actúa como alternador y se quieren obtener unas tensiones de frecuencia f , la velocidad n^2 de la máquina también debe ser igual a la velocidad de sincronismo correspondiente a dicha frecuencia f :

$$n = \frac{60 f}{p} \quad (1)$$

Luego, estas máquinas giran siempre a la velocidad de sincronismo, de ahí su nombre de síncronas.

A partir de ahora, salvo que se indique otra cosa, este texto se va a referir a la máquina síncrona actuando como generador de corriente alterna o alternador.

Es evidente por (1) que cuando un alternador síncrono gira a una velocidad de n r.p.m. aparecen en el inducido unas f.e.m.s de frecuencia

$$f = \frac{n p}{60} \quad (2)$$

Tabla I: Velocidades de giro de un alternador para obtener una frecuencia de 50 Hz

Nº de polos (2p)	Velocidad (n) (r.p.m.)	Nº de polos (2p)	Velocidad (n) (r.p.m.)
2	3000	20	300
4	1500	24	250
6	1000	28	214
8	750	32	188
10	600	36	167
12	500	40	150
16	375	50	120

² La velocidad de giro de la máquina se denomina n cuando se mide en r.p.m. y Ω cuando se mide en rad/s.

De todo esto se deduce que, para conseguir una frecuencia f , se debe escoger una máquina síncrona que gire a una velocidad n en correspondencia con su número de polos ($2p$) tal que se verifique la relación (2). Si lo que se desea es que la frecuencia sea de 50 Hz, la Tabla I indica las velocidades (n) a las que debe girar el alternador en función de su número de polos ($2p$).

Siempre que sea posible se intenta que el acoplamiento mecánico entre el motor de accionamiento y el alternador síncrono sea directo y, por consiguiente, ambos -motor y alternador- giren a la misma velocidad. En efecto, si se colocara entre ambos un tren de engranajes, los dos podrían girar a velocidades distintas, pero se introducirían más pérdidas (lo que reduciría el rendimiento del conjunto) y, además, un tren de engranajes es un elemento ruidoso y delicado que requiere un mantenimiento metódico.

De lo anterior resulta que se debe escoger la velocidad de giro de la máquina motriz (o motor) y el número de polos del alternador conjuntamente para que, al final, proporcionen la frecuencia deseada (ver la Tabla I).

Como indican la ecuación (1) y la Tabla I las máquinas síncronas que van acopladas a motores rápidos deben tener pocos polos mientras que las que se acoplen a motores lentos han de tener muchos polos. Esto hace que haya dos diseños básicos para las máquinas síncronas: *de polos salientes* y *de rotor cilíndrico* (que también se denomina *de polos lisos* o *de rotor liso*) (Fig. 4).

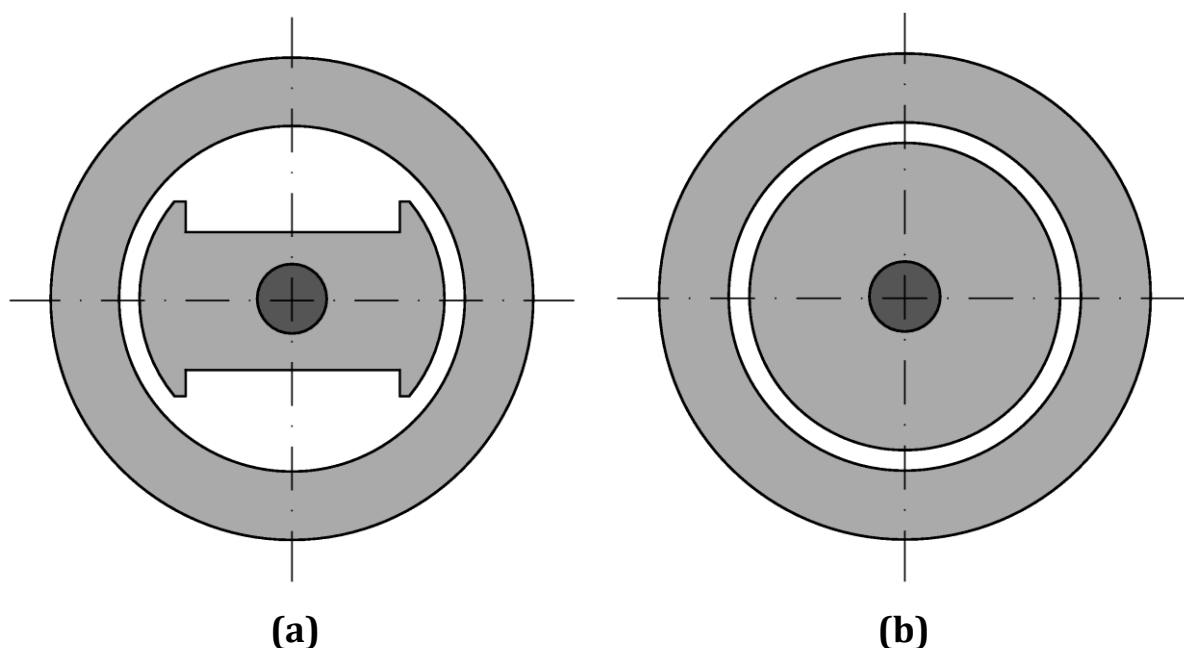


Fig. 4: Formas constructivas de una máquina síncrona:

a) de polos salientes

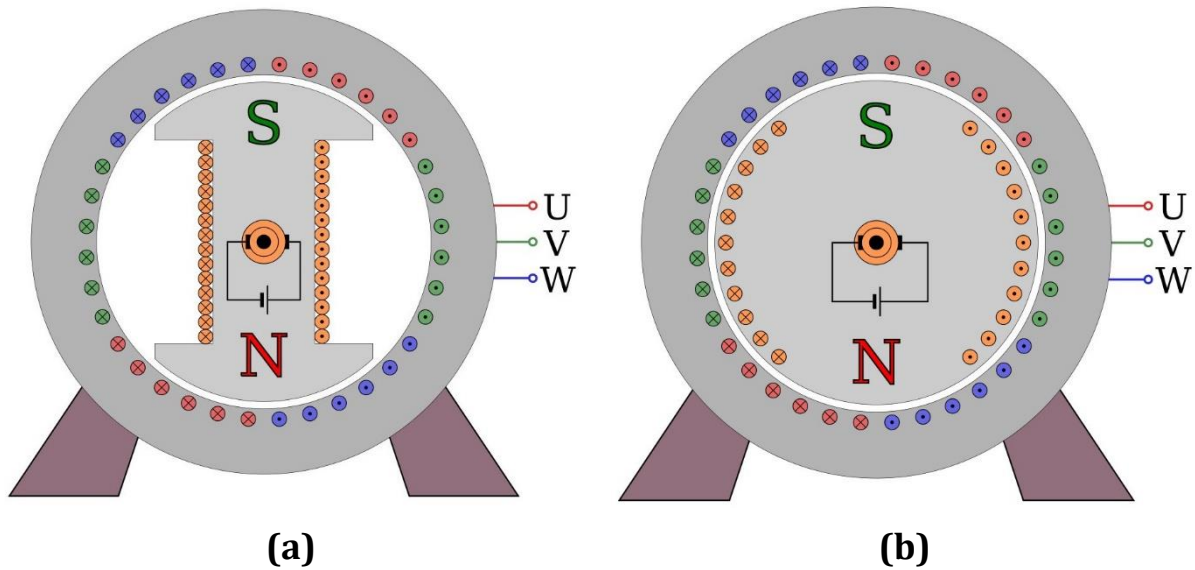
b) de rotor cilíndrico

Las **máquinas de polos salientes** (Fig. 5a, Fig. 7, Fig. 8 y Fig. 9) tienen muchos polos (más de 4 polos) y baja velocidad. Su estator es cilíndrico y su rotor tiene polos salientes. Como alternadores se usan acopladas a turbinas hidráulicas

(hidroalternadores) o a motores Diesel. Son máquinas de gran diámetro -así cabe un número elevado de polos- y, comparativamente, de pequeña longitud axial. Como el rotor está sometido a un campo magnético constante se puede fabricar de hierro macizo; aunque lo habitual es que, si bien el resto del rotor es de hierro macizo, los polos se construyan apilando chapas magnéticas.

En las máquinas con polos salientes el entrehierro es variable para conseguir que el campo magnético se distribuya sinusoidalmente a lo largo del entrehierro (Fig. 6).

Estas máquinas pueden ser de eje horizontal o vertical.



Fuente: Wikimedia Commons. Autor: Biezl

Fig. 5: a) Máquina de polos salientes; b) Máquina de rotor cilíndrico

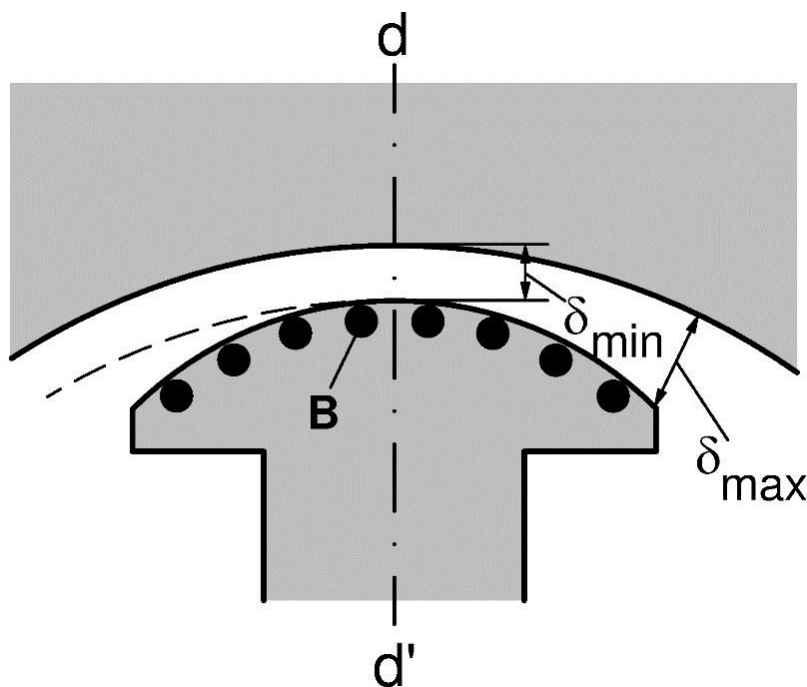


Fig. 6: Corte de un polo saliente con entrehierro variable y con devanado amortiguador

B: Barra del devanado amortiguador

Las **máquinas de rotor cilíndrico** (Fig. 1, Fig. 5b y Fig. 10) tienen pocos polos (2 o 4 polos) y alta velocidad. En estas máquinas tanto el estator como el rotor son cilíndricos, por lo que su entrehierro es uniforme. Como alternadores se usan acopladas a turbinas térmicas (*turboalternadores*). Al girar muy rápido los conductores del rotor sufren una fuerte fuerza centrífuga. Por esta razón, los conductores del rotor se colocan en ranuras -donde están mejor sujetos que en las bobinas de los polos salientes- y el diámetro del rotor es pequeño, lo que disminuye la fuerza centrífuga sobre estos conductores. Además, el hecho de que tengan pocos polos hace que estos quepan en un rotor de diámetro reducido. Por lo tanto, son máquinas de pequeño diámetro y gran longitud axial. Estas máquinas son de eje horizontal y su rotor se fabrica de hierro macizo, lo que le da una mayor resistencia mecánica.

Además del devanado inductor, en el rotor se aloja otro devanado: el **devanado amortiguador**. Este consiste en un devanado de jaula de ardilla o de trozos de jaula.

En las máquinas de polos salientes este devanado consiste en unas barras colocadas axialmente en la zapata (la parte del polo más ancha y cercana al entrehierro) de cada polo (ver la Fig. 6). Sendos segmentos conductores unen las barras de un polo por ambos extremos formando un trozo de jaula de ardilla. En algunos casos lo que se hace es utilizar aros de cortocircuito completos, uno a cada lado de la máquina, que unen entre sí las barras de todos los polos.

En las máquinas de rotor cilíndrico la propia masa de hierro macizo del rotor -donde se pueden inducir corrientes de Foucault- actúa como devanado amortiguador. En algunos casos, para reforzar el efecto de devanado amortiguador, en las ranuras del rotor -cuya misión principal es alojar al bobinado inductor- se colocan además unas tiras o unas barras conductoras que actúan como barras de una jaula de ardilla.

Puede parecer que el devanado amortiguador no tendría que ejercer ningún efecto, ya que, al estar en el rotor, se debería ver sometido a un campo magnético constante que no tendría que inducir f.e.m.s sobre él y, en consecuencia, tampoco deberían circular corrientes por él. La misión de este devanado es, precisamente, el conseguir que la máquina funcione en esta situación ideal en la que el campo magnético tiene una amplitud y una velocidad constantes y el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético. Por lo tanto, este devanado sirve para:

- Reducir los armónicos de la f.e.m. inducida. En efecto, el campo magnético creado por los devanados de la máquina no es perfecto y, además de un primer armónico (o armónico fundamental) que gira a la velocidad de sincronismo, la distribución espacial del campo magnético a lo largo del entrehierro realmente tiene otros armónicos que también giran, pero a una velocidad diferente a la del armónico fundamental. Vistos desde el rotor estos armónicos no están quietos, pues giran a diferente velocidad que el rotor, e inducen f.e.m.s sobre el devanado amortiguador. Estas f.e.m.s dan lugar a corrientes en este devanado, las cuales reducen estos campos magnéticos armónicos. Por lo tanto, gracias al devanado amortiguador el contenido armónico del campo magnético es mucho menor y esto hace que las f.e.m.s que este campo origina en el devanado inducido prácticamente carezcan de armónicos.

- Ayudar a la máquina a conservar la velocidad de sincronismo. Durante algunas maniobras o en algunos procesos transitorios el rotor puede perder temporalmente la velocidad de sincronismo. En esos momentos el campo magnético tiene una velocidad relativa no nula respecto al rotor e induce corrientes sobre el devanado amortiguador. Por lo tanto, el devanado amortiguador empieza a actuar como la jaula de un motor de inducción y origina un par que ayuda a la máquina a volver a la velocidad de sincronismo.
- Amortiguar las variaciones bruscas del campo magnético. Cualquier variación brusca del campo magnético, tanto en amplitud como en velocidad de giro, hace que dicho campo se vea variable desde el rotor y origine corrientes en el devanado amortiguador, las cuales se oponen a dichas variaciones.
- Arrancar los motores síncronos. Ya se mencionó que un motor síncrono carece de par de arranque. Se puede utilizar el devanado amortiguador para arrancar la máquina haciéndola funcionar como un motor de jaula de ardilla. Posteriormente, cuando la máquina alcanza una velocidad próxima a la de sincronismo, se la hace funcionar como síncrona y pasa a girar a la velocidad de sincronismo.

En este texto se va a estudiar a la máquina funcionando en régimen permanente ideal; es decir, sin armónicos del campo magnético y con el rotor girando a la velocidad de sincronismo. En estas circunstancias el rotor no “ve” variaciones del campo magnético, no se inducen f.e.m.s sobre el devanado amortiguador y no circula ninguna corriente por él. Por esta razón, en este estudio no interviene el devanado amortiguador.

Los alternadores síncronos pueden generar tensiones de hasta 30 kV. En las grandes centrales eléctricas se utilizan turboalternadores de hasta 1800 MVA e hidroalternadores de hasta 824 MVA.

En el otro extremo, ciertas máquinas síncronas especiales -como, por ejemplo, los motores paso a paso- pueden ser extremadamente pequeñas. Estas máquinas están controladas electrónicamente y se usan en dispositivos como los relojes de pulsera de cuarzo.

El alternador en su funcionamiento tiene pérdidas que se transforman en calor y elevan su temperatura. Para limitar la temperatura que puede alcanzar la máquina y así evitar que los aislamientos de sus devanados queden dañados, se utilizan varios *sistemas de refrigeración* (ver [13]).

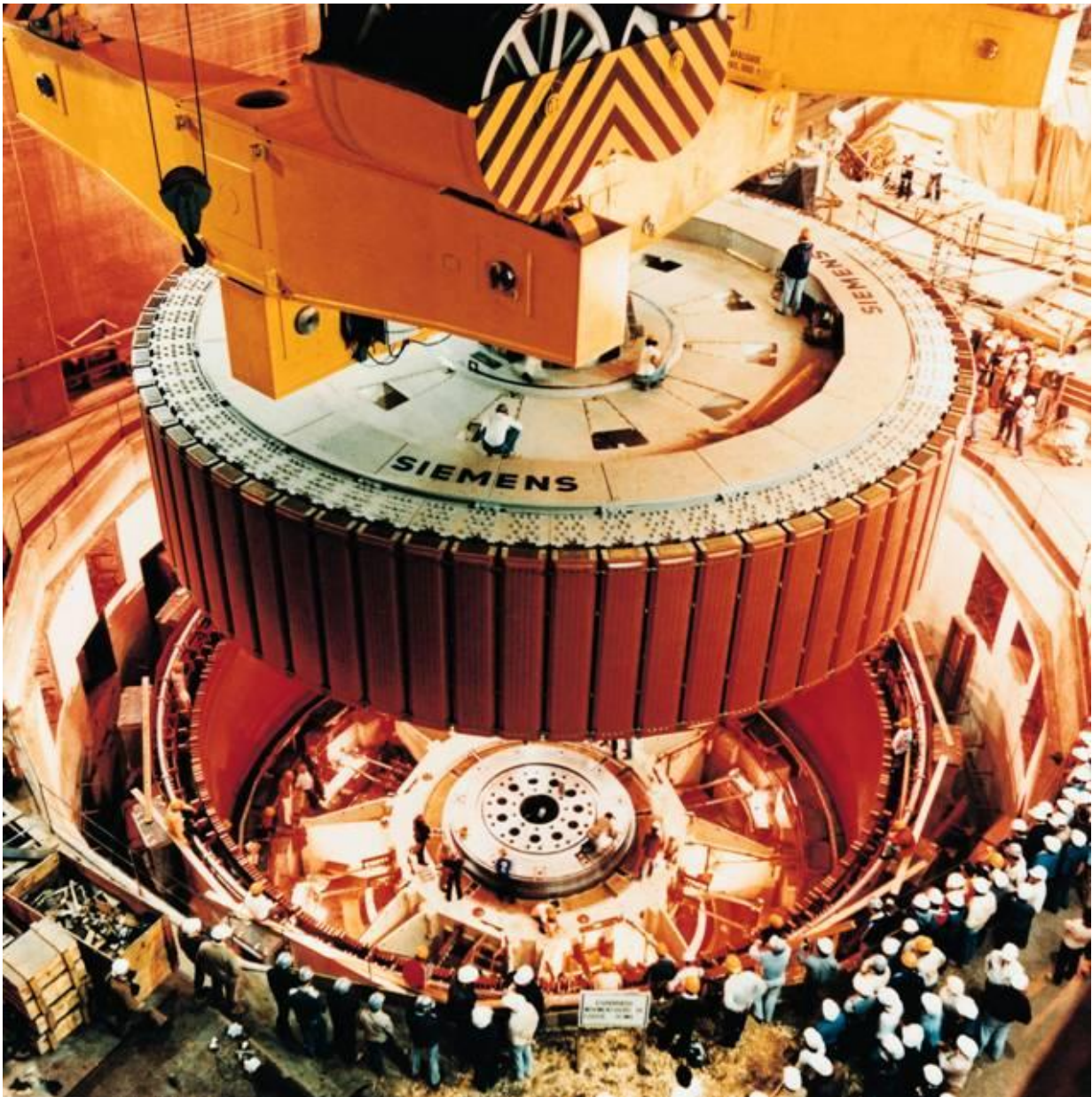
Para refrigerar los alternadores pequeños basta con hacer circular el aire ambiente por el interior de la máquina mediante ventiladores acoplados a su eje. En máquinas más grandes el aire se refrigera con agua mediante un intercambiador de calor. De esta manera el aire es el *refrigerante primario* -es decir, el fluido refrigerante que circula por el interior de la máquina- y el agua es el *refrigerante secundario*; es decir, el fluido que enfría al refrigerante primario.

Los grandes generadores necesitan un sistema de refrigeración muy eficiente. Estos alternadores utilizan hidrógeno como refrigerante primario, el cual es enfriado a su vez por agua (que es el refrigerante secundario) mediante un intercambiador de

calor. Además, la refrigeración de los conductores de los devanados es directa; esto es, los conductores son huecos y el fluido refrigerante circula por su interior, por lo que está en contacto directo con ellos.

El hidrógeno presenta varias ventajas frente al aire en su uso como fluido refrigerante:

- Tiene una densidad más baja (del orden de $1/14$ de la del aire), lo que disminuye el gasto de energía necesario para su circulación y, además, reduce el ruido.
- Tiene un calor específico más alto (14 veces el del aire), por lo que puede almacenar más calor.
- Tiene conductividad térmica mayor (7 veces la del aire), lo que reduce los gradientes de temperatura. La temperatura es más homogénea dentro de la máquina.
- Aumenta la vida de los aislantes al carecer de oxígeno.



Fuente: Revista ABB, nº 1, 1992

Fig. 7: Hidroalternador trifásico de la central de Itaipú (824 MVA, 90 r.p.m., 60 Hz)

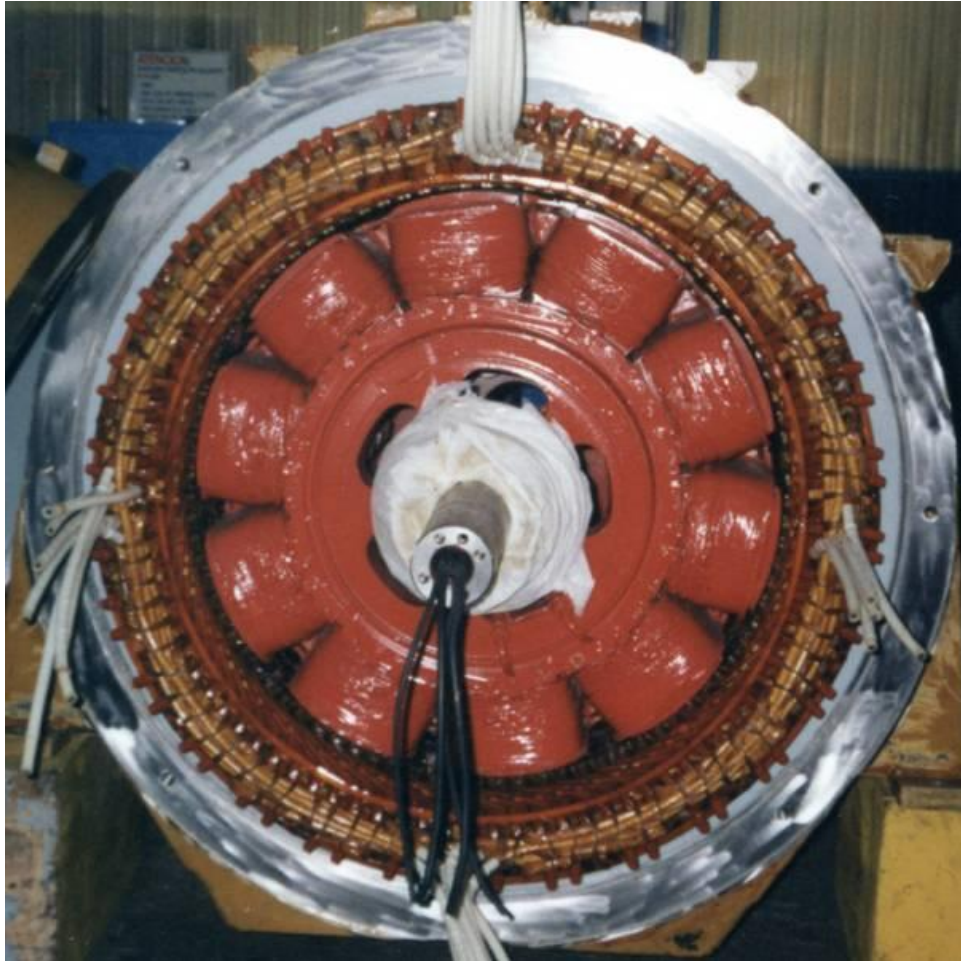


Fig. 8: Máquina síncrona de polos salientes

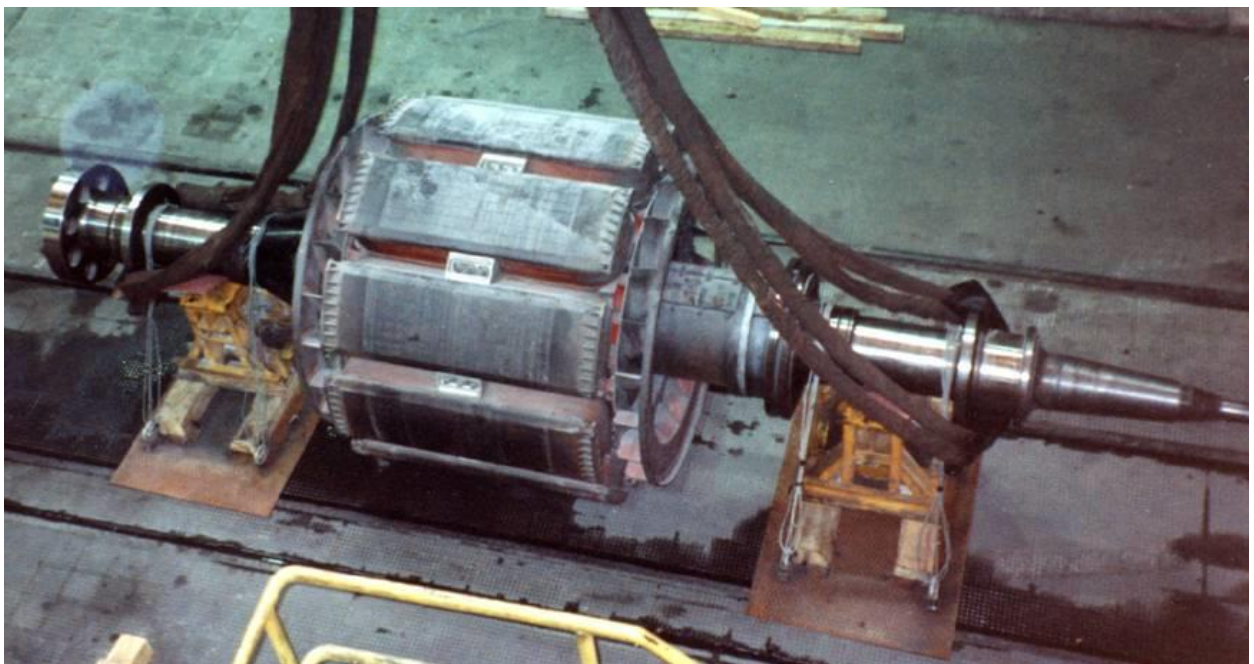
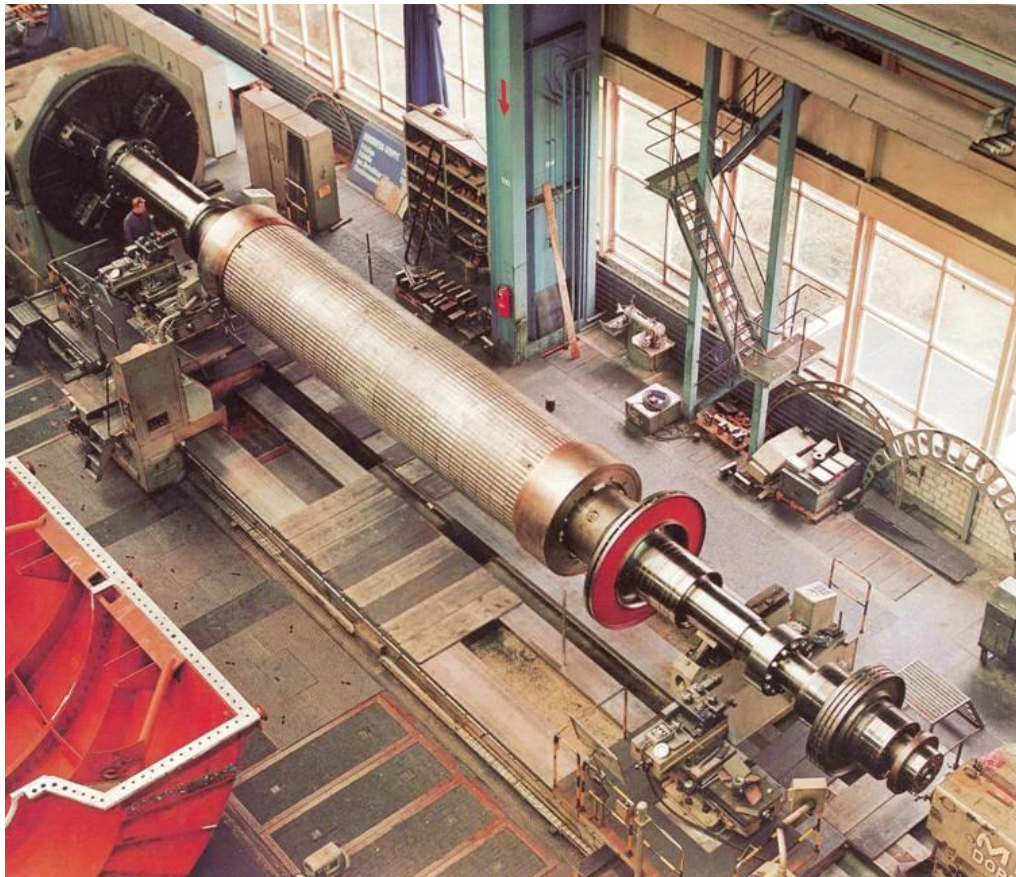


Fig. 9: Rotor de un hidroalternador



Fuente: Wikimedia Commons. Autor: Jorts



Fuente: Revista ABB, nº 1, 1992

***Fig. 10:** Rotores cilíndricos*

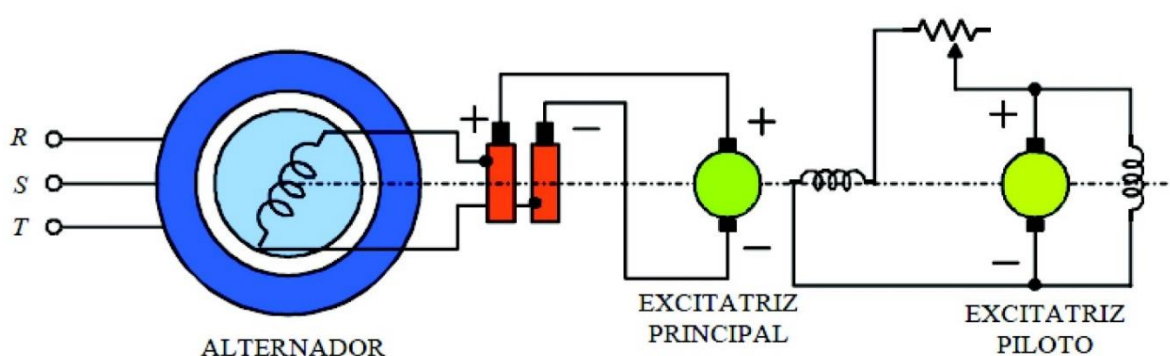
SISTEMAS DE EXCITACIÓN

El *sistema de excitación* es el que suministra la corriente continua que la máquina síncrona necesita para poder funcionar, ya que su inductor es un devanado de corriente continua.

El sistema de excitación no sólo debe proporcionar corriente continua al inductor de la máquina síncrona, sino que también debe ser capaz de regular dicha corriente. En efecto, como se estudiará más adelante, un alternador síncrono necesita de un sistema de control de la corriente de excitación que le permita ajustar la tensión alterna a los valores deseados. Este sistema se denomina *regulador automático de la tensión* (RAT), que en inglés se convierte en *automatic voltage regulator* (AVR).

Seguidamente se van a describir algunos de los sistemas de excitación que se utilizan para las máquinas síncronas.

Excitación mediante excitatrices de corriente continua



Fuente: OCW de la Universidad de la Laguna. "Fundamentos de Ingeniería Eléctrica. Tema 9: Máquinas síncronas". José Francisco Gómez González y otros

Fig. 11: Excitación mediante excitatrices de corriente continua

El método clásico de excitación de una máquina síncrona está representado en la Fig. 11. La fuente de corriente continua (c.c.) es una **excitatriz**; es decir, un generador acoplado al mismo eje que la máquina síncrona y que el motor de accionamiento.

En este caso la excitatriz es una máquina de corriente continua de excitación independiente cuyo inductor (alimentado con corriente continua) está en el estator y cuyo inducido está en el rotor y se conecta eléctricamente con el exterior mediante un colector de delgas.

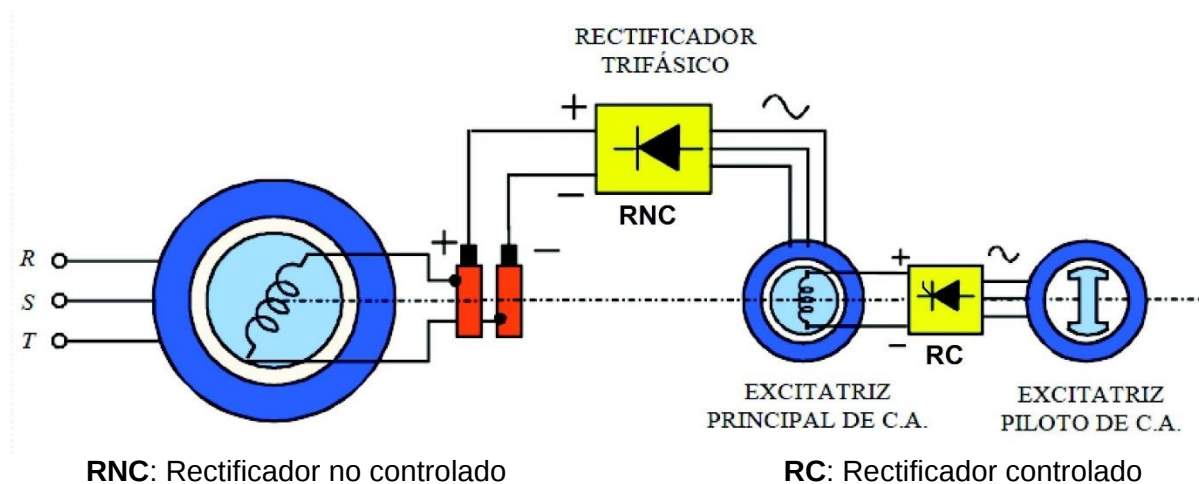
Sucede que esta excitatriz, a su vez, necesita que su inductor esté alimentado con corriente continua por una segunda excitatriz más pequeña. Así pues, tenemos la **excitatriz principal** y la **excitatriz auxiliar** o **excitatriz piloto** (Fig. 11), ambas acopladas al mismo eje que la máquina síncrona. La excitatriz piloto es una máquina de corriente continua *shunt*, es decir, su inductor está conectado en paralelo con su inducido. Por lo tanto, se trata de una máquina *autoexcitada*, ya que su inductor está alimentado por la tensión que se genera en su propio inducido y no necesita de ningún generador externo.

En máquinas síncronas de pequeña potencia basta con utilizar una única excitatriz shunt y, por lo tanto, autoexcitada.

Controlando la corriente de excitación de la excitatriz principal -por ejemplo, mediante una simple resistencia variable (Fig. 11)- se controla la tensión que proporciona su inducido. Esto, a su vez, regula la corriente de excitación de la máquina síncrona. Es decir, controlando una corriente pequeña, que es la del inductor de la excitatriz principal, se controla una corriente más grande que es la de excitación de la máquina síncrona.

El principal inconveniente de este sistema es que precisa de tres colectores: el colector de anillos de la máquina síncrona y los de delgas de las excitatrices de c.c. Los colectores, especialmente los de delgas, son elementos delicados que son fuente de averías y requieren un mantenimiento cuidadoso que obliga a mantener parada la máquina durante su realización.

Excitación mediante excitatrices de corriente alterna con rectificador



Fuente: OCW de la Universidad de la Laguna. "Fundamentos de Ingeniería Eléctrica. Tema 9: Máquinas síncronas". José Francisco Gómez González y otros

Fig. 12: Excitación mediante excitatrices de corriente alterna con rectificador

Para evitar los colectores de delgas se pueden utilizar excitatrices de corriente alterna (c.a.) con rectificador (Fig. 12).

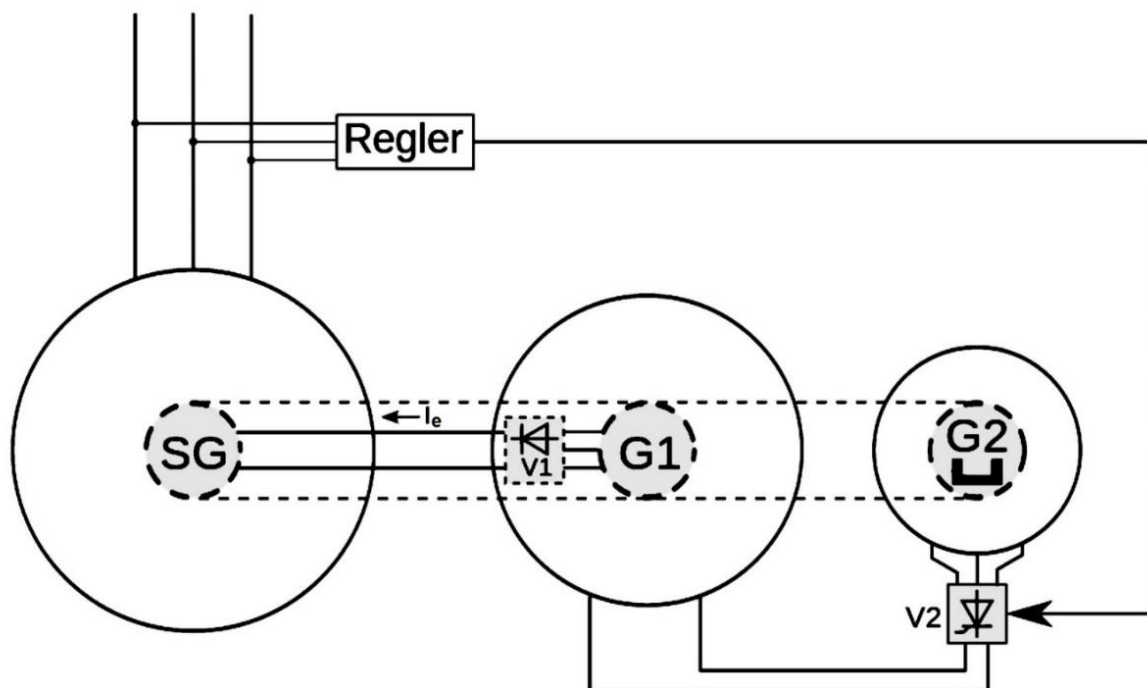
Un *rectificador* es un elemento electrónico que rectifica una tensión alterna; es decir, la transforma en una tensión continua. El rectificador es *no controlado* cuando no permite regular la tensión continua que produce y es *controlado* cuando sí puede controlar electrónicamente el valor de la tensión continua que suministra. Los rectificadores no controlados están fabricados con *diodos* y los controlados incluyen *tiristores* o *transistores*.

En este sistema (Fig. 12) la excitatriz principal es un alternador síncrono cuyo inducido se conecta a un rectificador de diodos (no controlado) y la excitatriz piloto es una máquina síncrona de imanes permanentes -por lo que carece de colector de anillos- cuyo inducido está conectado a un rectificador controlado.

Para regular la corriente de excitación de la máquina síncrona se actúa sobre el rectificador controlado de la excitatriz piloto. Este regula la tensión continua con que se alimenta al inductor de la excitatriz principal; lo que, a su vez, controla la tensión alterna que esta última produce. La tensión continua con que se alimenta el inductor de la máquina síncrona controla su corriente de excitación y es proporcional a la tensión alterna que procede de la excitatriz principal. Por lo tanto, con el rectificador controlado de la excitatriz piloto se consigue un control electrónico de la excitación de la máquina síncrona que presenta varias ventajas respecto al método anterior: mejor rendimiento, ajuste más fino, posibilidad de utilizar un sistema electrónico de control,...

En este sistema sólo hay dos colectores de anillos, el de la máquina síncrona y el de la excitatriz principal, y no interviene ningún colector de delgas. Por lo tanto, aunque todavía sigue habiendo colectores, es un sistema más fiable que el anterior, el cual empleaba generadores de c.c. y, por tanto, con colectores de delgas.

Excitación sin escobillas



Fuente: Wikimedia Commons. Autor: Dermartinrockt

SG: Máquina síncrona

G1: Excitatriz principal

V1: Rectificador no controlado

Regler: Regulador automático de la tensión

G2: Excitatriz piloto o auxiliar

V2: Rectificador controlado

Fig. 13: Excitación sin escobillas

Este sistema de excitación (Fig. 13) proviene del anterior. La diferencia está en la excitatriz principal que ahora tiene una constitución inversa a la habitual, con el inductor en el estator y el inducido en el rotor. El rectificador no controlado de la excitatriz principal se coloca en el rotor y gira con él.

La excitatriz piloto es de imanes permanentes y carece de colector. Su inducido está en el estator donde también está su rectificador controlado que alimenta al inductor de la excitatriz principal, que está en su estator. Por lo tanto, hasta ahora no ha hecho falta ningún colector, pues todos estos elementos -inducido de la excitatriz piloto, su rectificador controlado e inductor de la excitatriz principal- están situados en elementos fijos, sin movimiento. El inducido de la excitatriz principal está en el rotor, donde también está su rectificador no controlado. Luego, la conexión eléctrica entre los dos no precisa de colectores, ya que ambos elementos giran con el rotor y no hay movimiento relativo entre ellos. Finalmente, la tensión continua producida por el rectificador no controlado se suministra al inductor de la máquina síncrona que está ubicado en su rotor. Por lo tanto, la conexión eléctrica entre estos dos elementos que giran conjuntamente -rectificador no controlado e inductor de la máquina síncrona- tampoco precisa de ningún colector. Se tiene, pues, un sistema de excitación “sin escobillas” (*brushless* en inglés), es decir, sin ningún colector.

Al igual que en el método anterior, el control de la excitación de la máquina síncrona se realiza electrónicamente mediante el rectificador controlado de la excitatriz piloto.

Excitación sin escobillas con autoexcitación indirecta

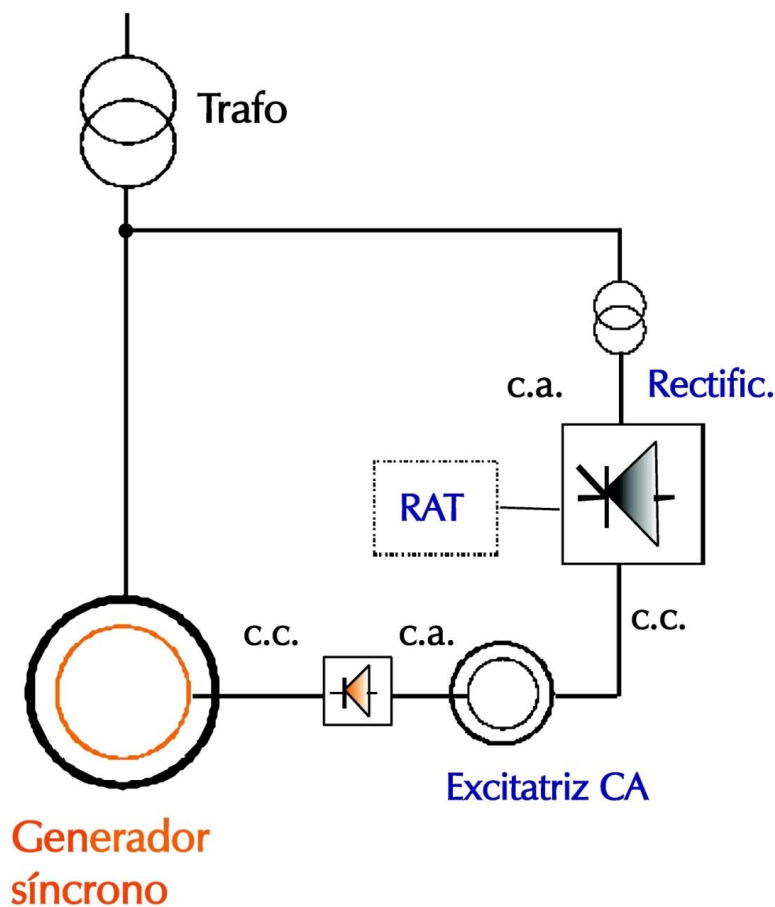


Fig. 14: Excitación sin escobillas con autoexcitación indirecta

RAT: Regulador automático de la tensión

Fuente: OCW de la Universidad Carlos III. “Máquinas eléctricas de corriente alterna. Capítulo 3: Máquina Síncrona”. David Santos Martín

Este sistema (Fig. 14) se puede considerar una modificación del anterior. Sigue utilizando una excitatriz con el inductor en el estator y el inducido en el rotor, donde también está el rectificador no controlado. Esta es la única excitatriz, ya que se suprime la excitatriz piloto de imanes permanentes.

En este sistema el inductor de la excitatriz se alimenta a partir de la tensión alterna que genera la máquina síncrona. Esta tensión alterna se reduce mediante un transformador y se convierte en continua mediante un rectificador controlado, el cual permite, en última instancia, controlar la corriente de excitación de la máquina síncrona.

En este sistema tampoco se utilizan colectores de ningún tipo, es un sistema “sin escobillas”.

Autoexcitación directa

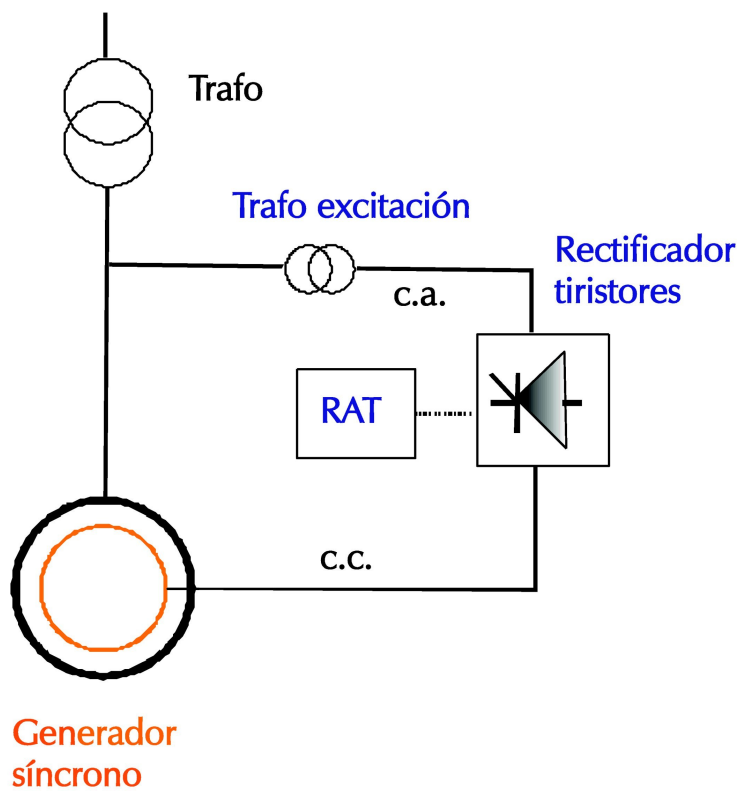


Fig. 15: Autoexcitación directa

RAT: Regulador automático de la tensión

Fuente: OCW de la Universidad Carlos III. "Máquinas eléctricas de corriente alterna. Capítulo 3: Máquina Síncrona".
David Santos Martín

En este sistema (Fig. 15) no se utilizan excitatrices. La tensión de excitación de la máquina síncrona se obtiene directamente de la tensión alterna que su inducido genera. Esta tensión alterna se reduce mediante un transformador y se convierte en tensión continua mediante un rectificador controlado, el cual permite regular la corriente de excitación de la máquina síncrona.

Este es un sistema que presenta una respuesta muy rápida, aunque vuelve a requerir que la máquina síncrona tenga un colector de dos anillos.

En los sistemas con autoexcitación, ya sea directa (Fig. 15) o indirecta (Fig. 14), es preciso disponer de un sistema de apoyo (baterías) para alimentar al devanado inductor durante el arranque, cuando el alternador aún no ha empezado a producir tensión alterna. Otro problema de estos sistemas con autoexcitación es que un cortocircuito en las inmediaciones de la máquina síncrona provoca una reducción importante en la tensión alterna en bornes de su inducido y, en consecuencia, en el sistema de excitación. Para prevenirlo lo que se hace es añadir un circuito de compensación que actúe en función de la corriente del inducido. El circuito de compensación no aparece representado en los esquemas de la Fig. 14 y de la Fig. 15, pero en la Fig. 16 se ha representado un sistema con autoexcitación indirecta que sí lo incluye.

Esta compensación se puede implementar empleando como transformador de excitación uno especial denominado *transformador de compoundaje*. Este transformador tiene dos devanados primarios, uno de tensión y otro de corriente, que se conectan respectivamente en paralelo y en serie con el inducido.

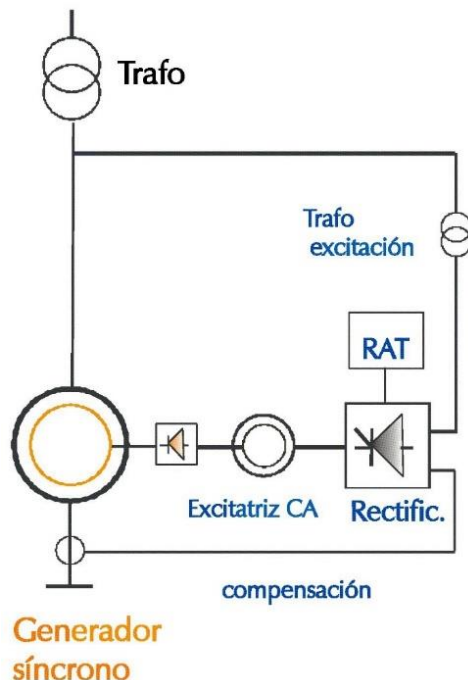


Fig. 16: Excitación sin escobillas con autoexcitación indirecta y compensación

Fuente: OCW de la Universidad Carlos III. "Máquinas eléctricas de corriente alterna. Capítulo 3: Máquina Síncrona". David Santos Martín

FUNCIONAMIENTO EN VACÍO. CARACTERÍSTICA DE VACÍO

Un alternador síncrono funciona en vacío cuando gira a su velocidad de sincronismo y su circuito inducido está abierto. Es evidente que en estas condiciones, tanto la corriente en el inducido como la potencia generada son nulas.

En el funcionamiento en vacío el único devanado por el que circula alguna corriente es el devanado inductor o de excitación. En consecuencia, en este caso el campo magnético de la máquina es debido únicamente a la corriente de excitación I_e . El flujo por polo debido a este campo magnético en vacío se va a denominar Φ_{eM} .

Cuando el rotor gira a la velocidad de sincronismo el campo magnético creado por la corriente continua que circula por el inductor gira con él; es decir, este campo rota también a la velocidad de sincronismo. Por lo tanto, las fases del inducido, que está ubicado en el estator, ven un campo magnético variable en el tiempo que induce sobre ellas unas fuerzas electromotrices (f.e.m.s) equilibradas cuya frecuencia f viene dada por la relación (2) y cuyo valor eficaz E_0 se puede calcular mediante la relación siguiente (para más detalles sobre esta fórmula puede consultar mi texto [12]):

$$E_0 = 4,44 N \xi_b f \Phi_{eM} \quad (3)$$

Los parámetros que aparecen en la fórmula (3) son:

- N : Número de espiras efectivas de una fase del inducido.
- ξ_b : Factor de bobinado del inducido (es un factor que depende de la geometría del devanado y su valor es ligeramente inferior a 1).

Dado que en vacío no circula ninguna corriente por el inducido, en este devanado no se producen caídas de tensión y, en consecuencia, en cada una de sus fases la tensión en bornes tiene un valor eficaz V que es igual al de la f.e.m. inducida E_0 :

$$V = E_0 = 4,44 N \xi_b f \Phi_{eM} \quad (4)$$

Como se explica en mi texto [14] y como se verá con más detalle más adelante en la página 25, la fuerza magnetomotriz (f.m.m.) en el entrehierro $\mathcal{F}$ de un devanado es una magnitud que sólo depende de la geometría del bobinado y de la corriente que lo recorre. Esta magnitud es una función periódica de la coordenada angular α , ya que se repite cada par de polos. La fuerza magnetomotriz (f.m.m.) producida por el bobinado inductor se va a denominar $\mathcal{F}_e$ y varía linealmente con la corriente de excitación I_e . Es decir, $\mathcal{F}_e$ e I_e son directamente proporcionales.

Aceptando que se puede despreciar el efecto de la histéresis magnética de las piezas de hierro de la máquina, se obtiene que el flujo por polo Φ_{eM} está relacionado unívocamente con la corriente I_e . Es decir, para un valor de I_e se obtiene siempre un mismo valor del flujo por polo Φ_{eM} . Si la máquina siempre gira a la velocidad de sincronismo, la frecuencia f es siempre la misma (ver (2)), lo que hace que, por (3), las magnitudes Φ_{eM} y E_0 sean directamente proporcionales. En consecuencia, también E_0 e I_e están relacionados unívocamente.

El **ensayo de vacío** de una máquina síncrona consiste en hacerla funcionar en vacío siempre a la velocidad de sincronismo, ir variando el valor de la corriente de excitación I_e y medir para cada I_e la f.e.m. E_0 que le corresponde. Si se representan las medidas obtenidas en este ensayo sobre unos ejes de coordenadas, de forma que el eje de abscisas representa a la corriente de excitación I_e y el eje de ordenadas al valor eficaz E_0 de la f.e.m. inducida, se obtiene la **curva de vacío** o **característica de vacío** (Fig. 17).

Dada la relación lineal entre E_0 y Φ_{eM} la forma de la curva de vacío (Fig. 17) es lógica, ya que es de la misma forma que la curva Φ_{eM} - I_e del circuito magnético de la máquina.

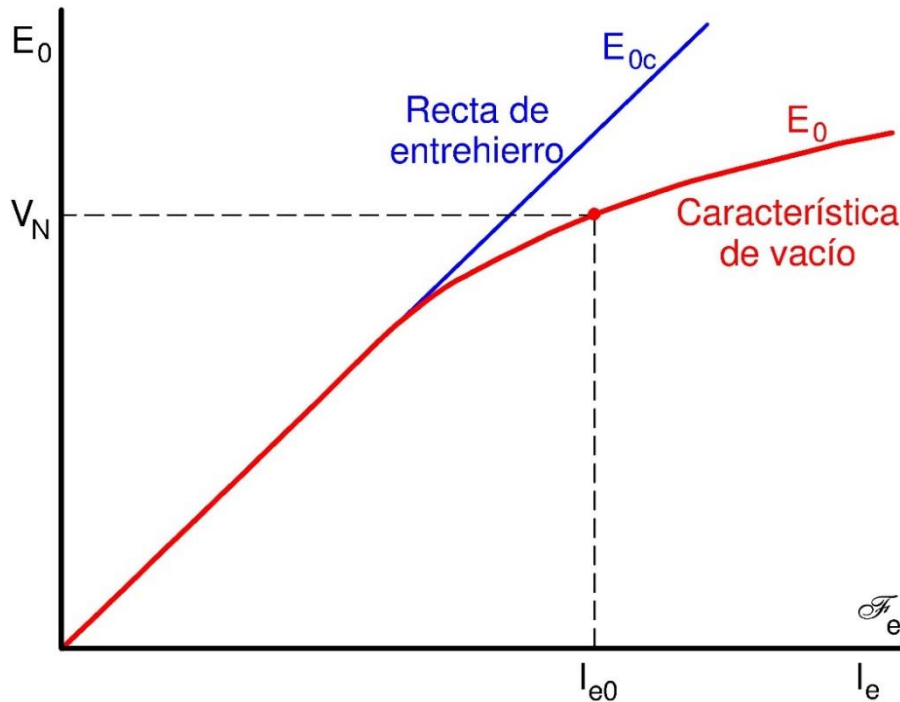


Fig. 17: Característica de vacío de un alternador síncrono

La curva de vacío (Fig. 17) es lineal para bajos valores de I_e , cuando las piezas de hierro no están saturadas, mientras que para valores más altos de la corriente I_e la máquina empieza a saturarse y el flujo por polo Φ_{eM} y, por tanto, la f.e.m. E_0 empiezan a crecer más lentamente con I_e . Si la máquina tuviera un circuito magnético ideal, que no se saturase, la característica de vacío seguiría siendo lineal para todos los valores de la corriente I_e . Esta característica de vacío ideal, sin saturación magnética, se denomina **recta de entrehierro** y se obtiene prolongando la parte inicial rectilínea de la característica de vacío (Fig. 17).

Con una corriente de excitación I_e en vacío se induce una f.e.m. real E_0 en las fases del inducido, la cual se obtiene de la característica de vacío (Fig. 17), y se induciría una f.e.m. E_{0c} si no hubiera saturación, la cual se obtiene de la recta de entrehierro (Fig. 17).

Dada la relación lineal existente entre la corriente de excitación I_e y la f.m.m. correspondiente $\mathcal{F}_e$, muchas veces se considerará que el eje de abscisas representa la f.m.m. $\mathcal{F}_e$ en lugar de la corriente I_e que la origina, como se muestra en la Fig. 17. Esto simplemente equivale a un cambio de escala en el eje horizontal.

Se va a denominar como I_{e0} a la corriente de excitación que hace que en vacío aparezca la tensión asignada V_N en bornes del inducido (Fig. 17):

$$\text{Si } I_e = I_{e0} \rightarrow E_0 = V_N \quad (5)$$

La característica de vacío es un dato que proporciona el fabricante del alternador síncrono y se va a suponer que siempre se dispone de ella. Esto quiere decir, que conocida una de estas dos magnitudes, I_e o E_0 , se va a poder conocer inmediatamente la otra.

Las características de vacío de diferentes máquinas síncronas son muy distintas si las magnitudes de sus ejes se miden en amperios y voltios, respectivamente. Pero, si estas magnitudes se expresan en forma de valores relativos, es decir en *valores por unidad (p.u.)* (de los cuáles se va a tratar con más extensión en el siguiente apartado (página 21)), resulta que las características de vacío de máquinas síncronas del mismo tipo son prácticamente iguales, aunque sus potencias y tensiones asignadas sean muy diferentes. Los valores relativos (por unidad) de la corriente de excitación I_e y de la f.e.m. de vacío E_0 se obtienen dividiéndolas por sus magnitudes de referencia o magnitudes base, las cuales son, respectivamente, la corriente I_{e0} y la tensión asignada V_N :

$$I_e(\text{p.u.}) = \frac{I_e}{I_{e0}} \quad E_0(\text{p.u.}) = \frac{E_0}{V_N} \quad (6)$$

La Fig. 18 muestra la característica de vacío de un alternador síncrono expresada en valores relativos (p.u.).

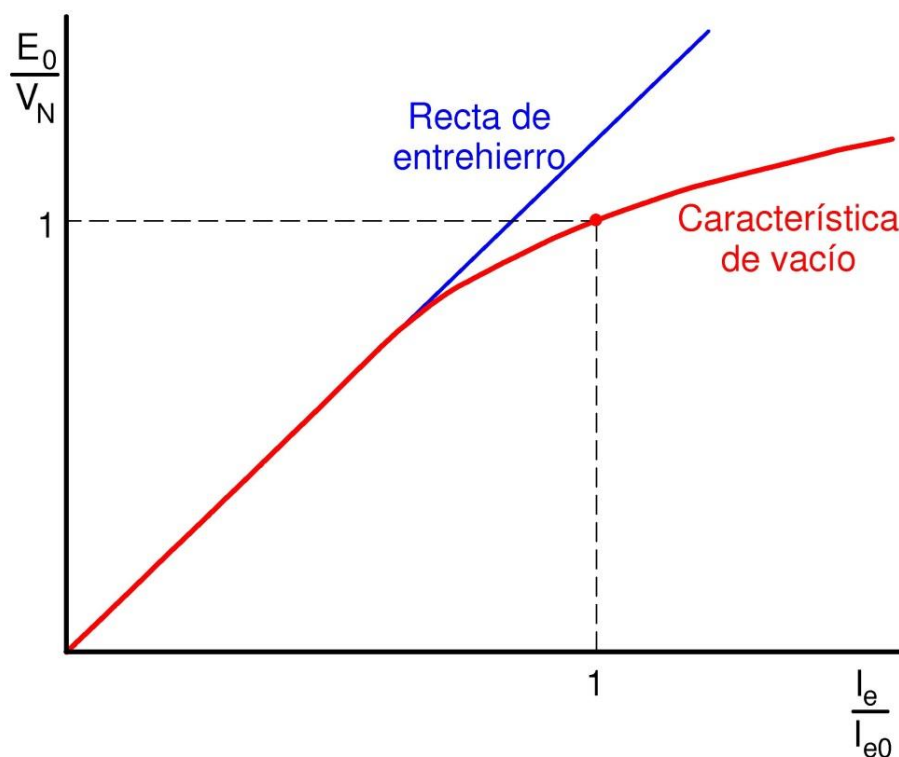


Fig. 18: Característica de vacío de un alternador síncrono en valores relativos (valores p.u.)

En la Fig. 17 se observó que cuando la corriente de excitación era I_{e0} , la f.e.m. en vacío era igual a la tensión asignada V_N . Si se expresan estos valores en por unidad (p.u.), según las relaciones (6) se obtiene que cuando la corriente de excitación en p.u. $I_e(\text{p.u.})$ vale 1 la f.e.m. en vacío por unidad $E_0(\text{p.u.})$ vale también 1. Luego, el punto (1, 1) pertenece a la curva de vacío en valores p.u. (Fig. 18).

El uso de valores p.u. permite emplear una curva de vacío genérica cuando no se dispone de la característica de vacío real de una máquina síncrona dada. Así, en la Fig. 19 se muestra una característica de vacío que se puede aplicar a turboalternadores.

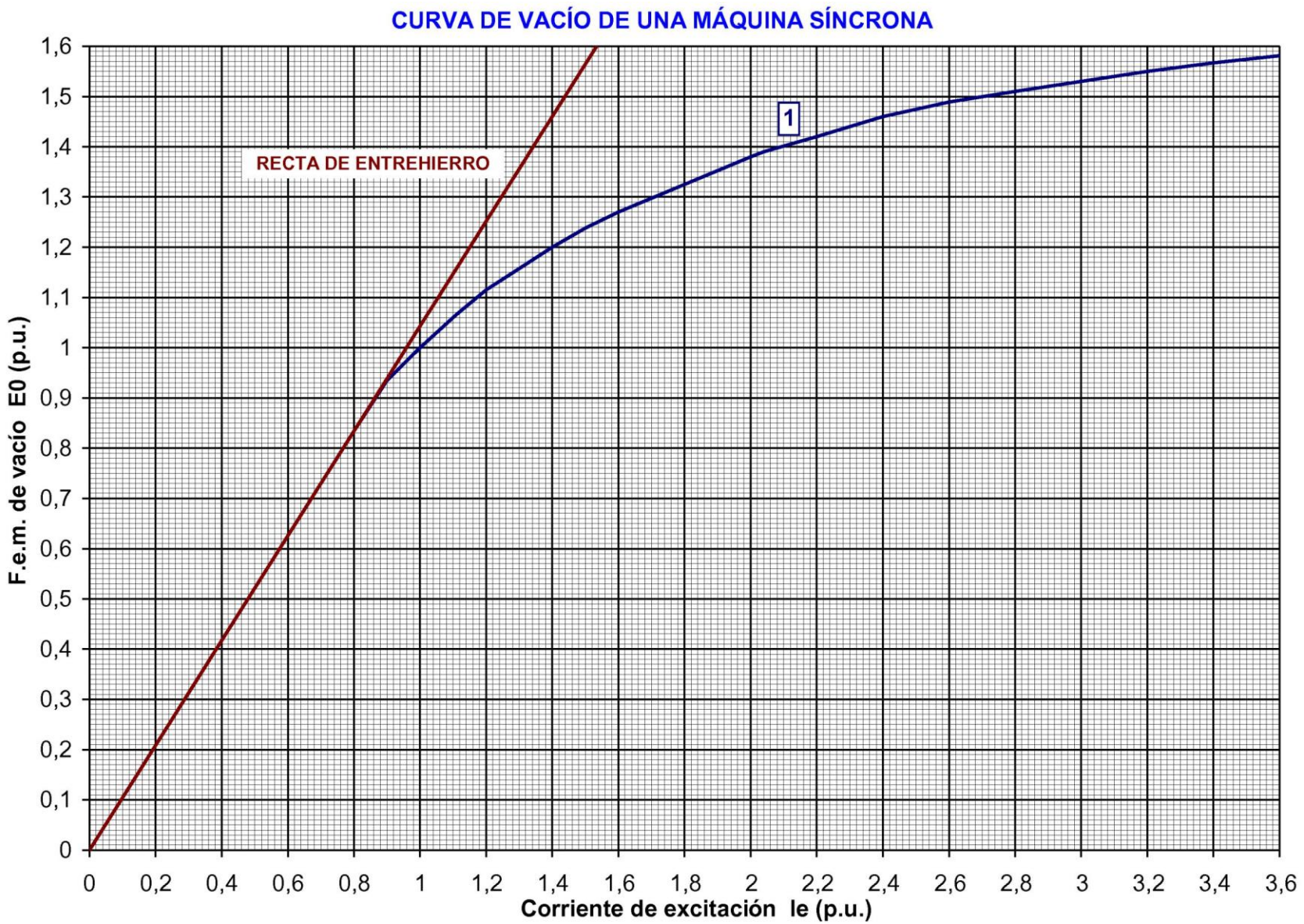


Fig. 19. Característica de vacío genérica en valores p.u. para un alternador de rotor cilíndrico

VALORES POR UNIDAD (P.U.)

La resolución de muchos problemas en ingeniería se simplifica si las magnitudes se expresan en forma relativa respecto a una referencia que se denomina **magnitud base**. Así tenemos que una magnitud física se expresa **por unidad (p.u.)** cuando se divide su valor por la magnitud base correspondiente, la cual debe tener las mismas dimensiones que dicha magnitud física. Por lo tanto, los valores p.u. son adimensionales.

En el caso de un circuito de corriente alterna trifásica, como es el inducido de una máquina síncrona, se necesitan las siguientes magnitudes base:

- S_b *Potencia base*. Se utiliza para expresar en p.u. las potencias activa, reactiva y aparente.
- V_{bL} *Tensión de línea base*. Se utiliza para expresar en p.u. las tensiones y f.e.m.s de línea (entre fases).
- V_b *Tensión de fase base*. Se utiliza para expresar en p.u. las tensiones, caídas de tensión y f.e.m.s de fase.
- I_{bL} *Corriente de línea base*. Se utiliza para expresar en p.u. las corrientes de línea.
- I_b *Corriente de fase base*. Se utiliza para expresar en p.u. las corrientes de fase.
- Z_b *Impedancia base*. Se utiliza para expresar en p.u. las impedancias, resistencias y reactancias.

Las magnitudes base no se puede elegir de forma totalmente arbitraria, pues están relacionadas entre sí por las fórmulas de los circuitos eléctricos:

$$\left. \begin{array}{lll} \text{Conexión estrella:} & V_b = V_{bL}/\sqrt{3} & I_b = I_{bL} \\ \text{Conexión triángulo:} & V_b = V_{bL} & I_b = I_{bL}/\sqrt{3} \\ S_b = \sqrt{3} \cdot V_{bL} \cdot I_{bL} = 3 \cdot V_b \cdot I_b & & Z_b = V_b/I_b \end{array} \right| \quad (7)$$

Por lo tanto, en un sistema trifásico se escogen dos magnitudes base, usualmente la potencia S_b y la tensión de línea V_{bL} , y las demás magnitudes base se deducen de ellas mediante las relaciones (7).

Para expresar en por unidad (p.u.) las magnitudes de un circuito trifásico se emplearán estas relaciones:

$$\left. \begin{array}{lll} V(\text{p.u.}) = \frac{V_L}{V_{bL}} = \frac{V}{V_b} & E(\text{p.u.}) = \frac{E_L}{V_{bL}} = \frac{E}{V_b} & I(\text{p.u.}) = \frac{I_L}{I_{bL}} = \frac{I}{I_b} \\ P(\text{p.u.}) = \frac{P}{S_b} & Q(\text{p.u.}) = \frac{Q}{S_b} & S(\text{p.u.}) = \frac{S}{S_b} \\ R(\text{p.u.}) = \frac{R}{Z_b} & X(\text{p.u.}) = \frac{X}{Z_b} & Z(\text{p.u.}) = \frac{Z}{Z_b} \end{array} \right| \quad (8)$$

Nótese que se obtiene el mismo resultado al expresar una tensión en p.u. tanto si se calcula partiendo de las tensiones de fase como de las de línea. Esto es fácil comprobarlo, ya que para calcular una tensión de línea a partir de una de fase se multiplica esta por la misma constante, tanto se trate de la tensión a expresar como si es la tensión base. Por lo tanto, el cociente que calcula la tensión en p.u. a partir de las tensiones de línea se obtiene multiplicando por la misma constante el numerador y el denominador del cociente que calcula $V(\text{p.u.})$ a partir de las tensiones de fase. Las f.e.m.s se expresan en p.u. de igual manera que las tensiones. Con las corrientes en p.u. sucede lo mismo que con las tensiones y las f.e.m.s.: se obtiene el mismo resultado partiendo de las corrientes de fase que de las corrientes de línea.

La ley de Ohm no se modifica cuando se utilizan valores p.u.:

$$V = Z \cdot I \rightarrow V(\text{p.u.}) = \frac{V}{V_b} = \frac{Z \cdot I}{V_b} = \frac{Z \cdot I}{Z_b \cdot I_b} \rightarrow V(\text{p.u.}) = \frac{Z}{Z_b} \cdot \frac{I}{I_b}$$

$$\boxed{V(\text{p.u.}) = Z(\text{p.u.}) \cdot I(\text{p.u.})} \quad (9)$$

Aunque se trate de un circuito trifásico, para el cálculo de las potencias activa, reactiva y aparente en valores p.u. se utilizan las fórmulas de los circuitos monofásicos. Así, por ejemplo, para la potencia activa se tiene que:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \rightarrow P(\text{p.u.}) = \frac{P}{S_b} = \frac{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi}{S_b}$$

$$P(\text{p.u.}) = \frac{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi}{\sqrt{3} \cdot V_{bL} \cdot I_{bL}} = \frac{V_L}{V_{bL}} \cdot \frac{I_L}{I_{bL}} \cdot \cos \varphi$$

$$\boxed{P(\text{p.u.}) = V(\text{p.u.}) \cdot I(\text{p.u.}) \cdot \cos \varphi} \quad (10)$$

La magnitud del inductor que nos va a interesar en este texto es la corriente de excitación y su magnitud base se denominará I_{eb} . Luego:

$$I_e(\text{p.u.}) = \frac{I_e}{I_{eb}} \quad (11)$$

Cuando un fabricante proporciona los parámetros de una máquina síncrona en valores p.u. se sobreentiende que las magnitudes base del inducido son los valores asignados y que la corriente de excitación base es igual a I_{e0} (excitación que origina la tensión asignada en vacío). Estos también serán los valores base que se usarán en este texto.

$$\left. \begin{array}{llll} V_{bL} = V_{NL} & V_b = V_N & I_{bL} = I_{NL} & I_b = I_N \\ S_b = S_N & & Z_b = V_N / I_N & \\ & I_{eb} = I_{e0} & & \end{array} \right| \quad (12)$$

FUNCIONAMIENTO EN CARGA. REGULACIÓN DE TENSIÓN

Cuando una máquina síncrona funciona en carga circulan corrientes tanto por el devanado de excitación como por el bobinado inducido. En consecuencia, el campo magnético principal de la máquina es la resultante de los efectos de todas estas corrientes; es decir, ahora el campo magnético no es debido sólo acción de la corriente de excitación I_e , sino también a las corrientes en las fases del inducido. El efecto de estas últimas depende de su valor eficaz I y de su factor de potencia $\cos \varphi$.

Este campo magnético resultante gira a la velocidad de sincronismo, da lugar a un flujo por polo Φ_{rM} y, al actuar sobre las fases del inducido, origina sobre ellas unas f.e.m.s equilibradas de valor eficaz E_r . De modo análogo a la expresión (3) se deduce la siguiente fórmula:

$$E_r = 4,4,4 N \xi_b f \Phi_{rM} \quad (13)$$

Además de este campo magnético principal, originado conjuntamente por los devanados del estator y del rotor, el inducido está sometido también a su campo magnético de dispersión. El efecto de este campo de dispersión se puede analizar de una manera análoga a como se ha hecho en los transformadores y en las máquinas de inducción; es decir, asimilándolo a una *inductancia de dispersión* L_σ puesta en serie con cada fase del inducido. La **reactancia de dispersión** X_σ es la debida a la inductancia L_σ :

$$X_\sigma = 2 \pi f L_\sigma \quad (14)$$

Por último, las fases del inducido tienen una resistencia R (que muchas veces se va a despreciar). Todo esto hace que cada fase del inducido se comporte como el circuito de la Fig. 20.

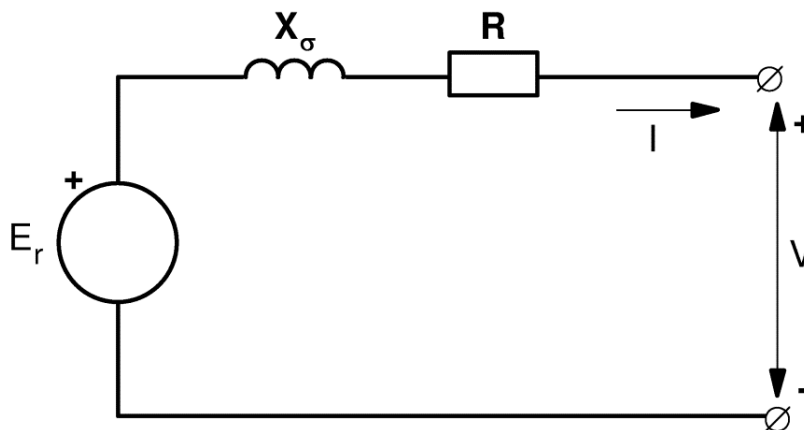


Fig. 20: Circuito equivalente de una fase del inducido de un alternador síncrono en carga

Por consiguiente, en cada fase del estator se cumple la siguiente relación:

$$\bar{E}_r = \bar{V} + \bar{I}(R + jX_\sigma) \quad (15)$$

Lo cual queda reflejado en el diagrama fasorial de la Fig. 21.

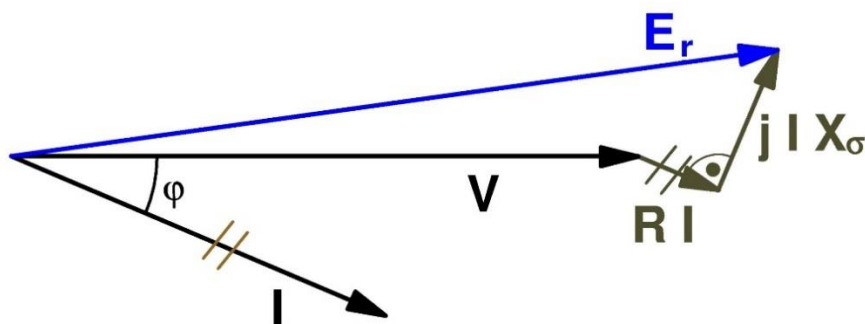


Fig. 21: Diagrama fasorial de una fase del inducido de un alternador síncrono en carga

De lo anterior se deduce que la corriente del inducido influye sobre la tensión V de dos formas. Primero por las caídas de tensión que produce en la resistencia R y en la reactancia de dispersión X_σ y segundo, y en mayor cuantía, por su efecto sobre el campo magnético principal y, consiguientemente, sobre la f.e.m. resultante E_r .

Para compensar las variaciones de la tensión V con la carga conectada al inducido, el regulador de tensión actúa sobre la corriente de excitación I_e -lo que modifica la f.e.m. E_r - hasta conseguir la tensión V deseada.

Los efectos de la corriente del inducido -tanto de su valor eficaz como de su factor de potencia- sobre la tensión quedan reflejados en un coeficiente denominado **regulación de tensión ε** . Supóngase un estado de carga de un alternador síncrono girando a la velocidad síncrona con una excitación I_e y con una corriente de inducido de valor eficaz I y factor de potencia $\cos \varphi$ que hacen que la tensión en bornes del inducido sea V . Si se mantiene la velocidad de sincronismo y la excitación I_e y ahora se deja la máquina en vacío, la tensión pasa a ser igual a la f.e.m. en vacío E_0 , la cual se puede determinar a partir de la corriente de excitación I_e mediante la característica de vacío. La regulación de tensión ε , en tanto por ciento, para este estado de carga se calcula mediante este cociente:

$$\varepsilon = \frac{E_0 - V}{V} 100(\%) \quad (16)$$

En los siguientes apartados de este texto se van a estudiar varios métodos de análisis de la máquina síncrona que van a permitir el determinar su regulación de tensión para una carga dada. Estos métodos pueden ser lineales o no lineales.

En un **análisis lineal** de la máquina síncrona se sustituye su característica de vacío por una ideal rectilínea, la cual puede ser la recta de entrehierro u otra recta elegida adecuadamente. Los análisis lineales permiten obtener circuitos equivalentes de la máquina síncrona. En este texto se va a tratar de estos métodos de análisis lineal: el *método de Behn-Eschenburg* y el *análisis lineal mejorado* para turboalternadores y el *método de Blondel* y el *análisis lineal con polos salientes mejorado* en las máquinas con polos salientes.

En un **análisis no lineal** se usa la característica de vacío real. Esto, en principio, le hace más preciso que un análisis lineal, pero no permite definir un circuito equivalente. En este documento se van a estudiar dos análisis no lineales: el *método de Potier* y *método ASA*. Aunque estos métodos, en principio, se desarrollaron para las máquinas de rotor liso, dan resultados suficientemente precisos si se utilizan en máquinas de polos salientes.

El problema de determinar la regulación de tensión de una máquina síncrona con una carga conocida (especificada de tal manera que se puedan saber el valor eficaz I y el factor de potencia $\cos \varphi$ de la corriente del inducido) presenta dos variantes:

- Se quiere obtener la tensión V de la máquina cuando se conoce la corriente de excitación I_e (o la f.e.m. de vacío E_0 , puesto que con ella se puede calcular I_e mediante la característica de vacío).
- Se quiere calcular la corriente de excitación I_e (o la f.e.m. de vacío E_0 , puesto que con ella se puede calcular I_e mediante la característica de vacío) que es necesaria para conseguir que la tensión V tenga el valor que se desee.

En este texto, al estudiar los diferentes métodos de análisis se va a hacer mayor énfasis en la segunda variante: conocidas la carga y la tensión a obtener se va a calcular la corriente de excitación I_e necesaria.

FUERZAS MAGNETOMOTRICES

En los siguientes apartados se van a analizar los campos magnéticos en el entrehierro producidos por la actuación por separado de cada devanado de una máquina síncrona, así como el campo magnético resultante de la acción conjunta de todos sus devanados. Aquí se va a tratar exclusivamente de una máquina síncrona cilíndrica (de rotor cilíndrico) y, por lo tanto, con entrehierro uniforme. Se supone que la máquina trabaja en régimen permanente ideal, lo que significa que tanto los campos magnéticos en el entrehierro como el rotor giran a la velocidad de sincronismo.

En una máquina síncrona en régimen permanente el campo magnético común o magnetizante es debido a la acción conjunta de los devanados inductor (o de excitación) e inducido. Del campo magnético común sólo nos interesa su distribución a lo largo del entrehierro, la cual es una función periódica de la coordenada angular α , ya que se repite cada par de polos. Es sabido que se pueden analizar las máquinas de corriente alterna con suficiente precisión considerando sólo el primer armónico (o armónico fundamental) de la descomposición en serie de Fourier de esta función periódica (ver mi texto [14]). Por lo tanto, en nuestro estudio todas las magnitudes relativas al campo magnético en el entrehierro (inducción magnética y fuerza magnetomotriz (f.m.m.)) se considera que varían en el espacio de forma perfectamente sinusoidal con la coordenada α .

La fuerza magnetomotriz en el entrehierro $\mathcal{F}$ de un devanado es una magnitud que sólo depende de la geometría del bobinado y de la corriente que lo recorre. En cada punto del entrehierro esta magnitud es igual a la mitad de las corrientes en los conductores del devanado abrazadas por la línea de inducción que pasa por dicho punto. En las máquinas que tienen entrehierro uniforme y en las que, además, se puede despreciar el efecto de la histéresis magnética se cumple que los primeros armónicos de las distribuciones espaciales de la inducción y de la f.m.m. en el entrehierro (recuérdese que los demás armónicos se desprecian) están en fase. En consecuencia, en las máquinas síncronas cilíndricas estas dos magnitudes tienen sus valores máximos en el espacio en el mismo punto del entrehierro.

En el estudio del alternador síncrono se utilizan tres f.m.m.s las cuáles son funciones perfectamente sinusoidales de la coordenada angular α y giran a la velocidad síncrona:

- La *f.m.m. inductora o de excitación* $\mathcal{F}_e$ debida a la corriente continua I_e que circula por el devanado inductor.
- La *f.m.m. de reacción de inducido*, o simplemente, la *f.m.m. del inducido* $\mathcal{F}_i$ debida a la corriente alterna trifásica equilibrada de valor eficaz I que circula por el devanado inducido.
- La *f.m.m. resultante* $\mathcal{F}_r$ debida al efecto conjunto de todas las corrientes de la máquina y que se puede calcular aplicando el principio de superposición a las f.m.m.s $\mathcal{F}_e$ y $\mathcal{F}_i$.

Cuando la máquina está funcionando en vacío la f.m.m. del inducido $\mathcal{F}_i$ es nula y entonces sólo actúa la f.m.m. del inductor $\mathcal{F}_e$ que, en este caso, es igual a la f.m.m. resultante $\mathcal{F}_r$.

Cuando la máquina está en carga, además de $\mathcal{F}_e$ aparece la f.m.m. de reacción de inducido $\mathcal{F}_i$. El valor de esta f.m.m. es proporcional a la corriente del inducido y el ángulo entre las distribuciones espaciales de $\mathcal{F}_e$ y $\mathcal{F}_i$ depende del factor de potencia de dicha corriente.

FASOR ESPACIAL DE F.M.M.

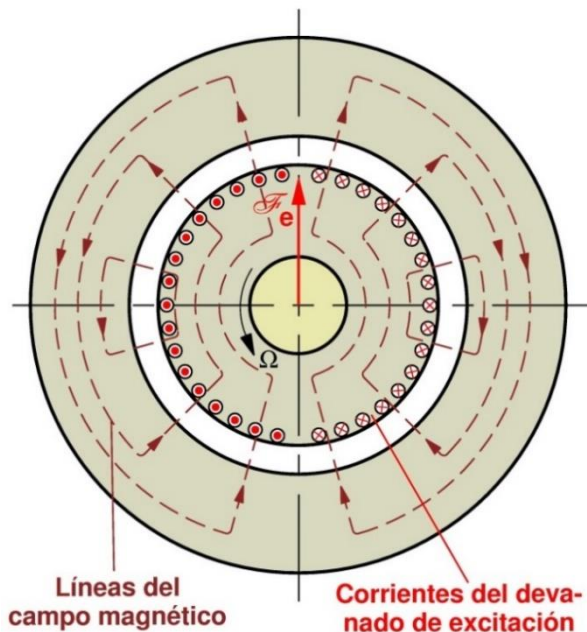


Fig. 22: Fasor espacial de f.m.m. inductora y campo magnético de una máquina síncrona de rotor cilíndrico en vacío

En la Fig. 22 se muestra una máquina síncrona de rotor cilíndrico de dos polos funcionando en vacío; la cual, por lo tanto, tiene un campo magnético que sólo es debido a las corrientes del devanado de excitación. En esta figura se muestra el instante en que las corrientes tienen una distribución tal que dan lugar a -tal como se aprecia aplicando la regla del sacacorchos- una f.m.m. inductora y un campo magnético en el entrehierro que toman su valor máximo positivo en la posición vertical superior. Dado que el rotor, que aloja al devanado inductor alimentado con corriente continua, gira a una velocidad igual a la de sincronismo, todas estas magnitudes están girando a la velocidad sincronismo. Es decir, la

Fig. 22 es como una fotografía de lo que sucede en un momento dado y en instantes posteriores la situación será idéntica pero girada un ángulo respecto a la mostrada en la Fig. 22.

En el estudio de circuitos de corriente alterna es habitual el asociar magnitudes variables sinusoidalmente con el tiempo a unos vectores, llamados *fasores temporales*, situados en el plano de Gauss. Estos fasores se operan mediante números complejos cuya parte real es la componente horizontal del fasor y la parte imaginaria es la componente vertical.

Aplicando el mismo procedimiento matemático, se asocian magnitudes que varían sinusoidalmente en el espacio según la coordenada angular α a unos vectores llamados *fasores espaciales*. Un fasor espacial tiene como módulo el valor máximo en el espacio de la magnitud que representa y como argumento el ángulo eléctrico correspondiente a la posición espacial donde dicha magnitud es máxima.

En este texto se va a emplear la técnica de los fasores espaciales con las f.m.m.s., ya que se trata de magnitudes que se acepta que varían de forma sinusoidal a lo largo del entrehierro (porque se desprecian los demás armónicos y sólo se tiene en cuenta su armónico fundamental). Cuando una máquina es de dos polos, en ella los ángulos mecánicos y eléctricos son iguales y se pueden dibujar los fasores espaciales superpuestos a una sección de la máquina. Por esta razón en la Fig. 22 se puede incluir el fasor $\vec{F}_e$ de la f.m.m. inductora.

DIAGRAMA FASORIAL ESPACIAL DE F.M.M.S

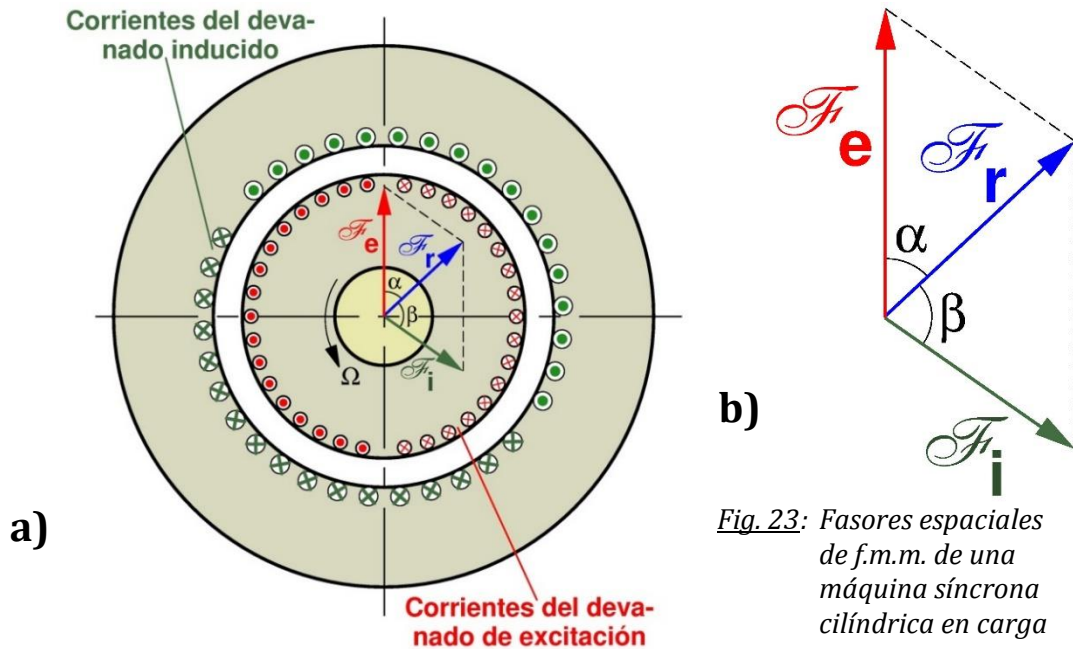


Fig. 23: Fasores espaciales de f.m.m. de una máquina síncrona cilíndrica en carga

La Fig. 23a muestra la distribución de corrientes en el inductor y en el inducido de una máquina síncrona cilíndrica de dos polos en un momento dado de su funcionamiento en carga. Estas distribuciones están girando a la velocidad de sincronismo. En el rotor, donde está el devanado inductor, esto sucede porque este devanado está alimentado con corriente continua y gira a una velocidad igual a la velocidad de sincronismo. En el caso del estator, donde se aloja el devanado inducido, su distribución de corrientes (que

representa el efecto conjunto de las corrientes de las tres fases) gira a la velocidad de sincronismo porque se trata de un devanado trifásico inmóvil alimentado con sistema trifásico equilibrado de corrientes que origina un campo magnético giratorio (Teorema de Ferraris). Por lo tanto, la Fig. 23a se puede asimilar a una fotografía de lo que sucede en un momento dado y en otro instante de tiempo la situación será idéntica pero girada un ángulo respecto a la mostrada en la Fig. 23a.

En dicha Fig. 23a se han mostrado también los respectivos fasores espaciales de f.m.m. $\overline{\mathcal{F}}_e$, $\overline{\mathcal{F}}_i$ y $\overline{\mathcal{F}}_r$. De esto se deduce que el correspondiente diagrama fasorial de f.m.m.s es el mostrado en la Fig. 23b. Dado que se puede aplicar el principio de superposición a las f.m.m.s, se cumple que:

$$\overline{\mathcal{F}}_r = \overline{\mathcal{F}}_e + \overline{\mathcal{F}}_i \rightarrow \overline{\mathcal{F}}_e = \overline{\mathcal{F}}_r - \overline{\mathcal{F}}_i \quad (17)$$

Todos estos fasores giran a la velocidad de sincronismo por lo que, en un régimen permanente, van cambiando de posición pero conservando siempre los mismos módulos y los mismos ángulos $-\alpha$ y β - de desfase entre ellos. Así, en la Fig. 24 se muestran estas magnitudes y sus fasores espaciales en tres instantes sucesivos.

DIAGRAMA FASORIAL TEMPORAL DE FLUJOS. CORRELACIÓN FASORIAL

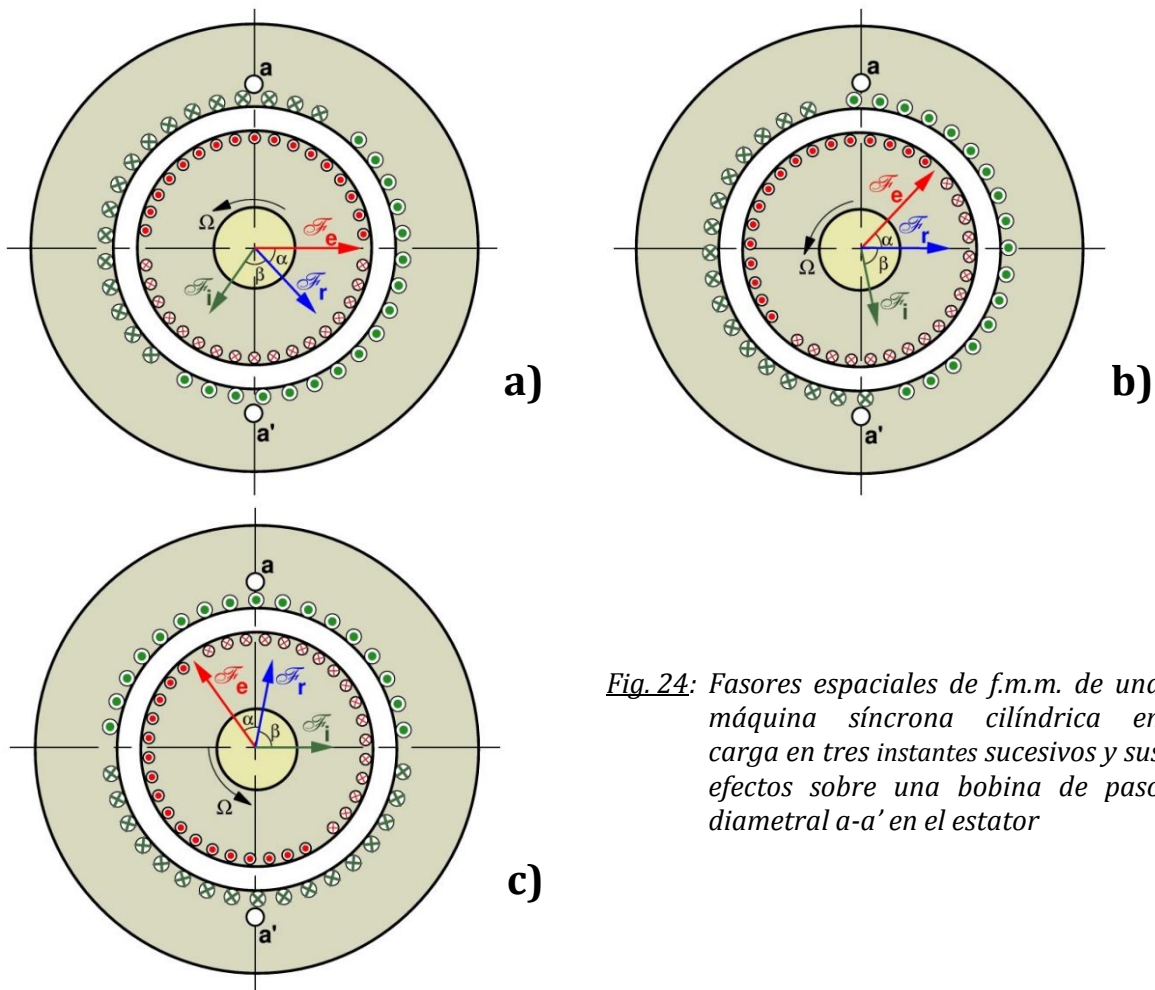


Fig. 24: Fasores espaciales de f.m.m. de una máquina síncrona cilíndrica en carga en tres instantes sucesivos y sus efectos sobre una bobina de paso diametral a-a' en el estator

Se puede demostrar que en una fase de un devanado de tambor -como es el devanado inducido de una máquina síncrona- los enlaces de flujo ψ de dicha fase cuando está bajo la acción de un campo magnético que varía sinusoidalmente a lo largo del entrehierro se pueden calcular así:

$$\psi = N \xi_b \Phi \quad (18)$$

En esta relación,

- N es el número de espiras efectivas de la fase.
- ξ_b es el factor de devanado de la fase, el cuál es un coeficiente ligeramente inferior a 1 que depende de la geometría del devanado.
- Φ es el flujo que atraviesa a una espira diametral colocada en el centro de la fase. Es decir, una espira diametral colocada de forma sus ejes de simetría (magnético y de devanado) coincidan con los de la fase.

De la expresión (18) se deduce que los enlaces de flujo de una fase ψ varían en el tiempo de la misma manera que el flujo Φ de la espira central de la fase.

En la Fig. 24 se ha dibujado una espira a-a' diametral situada en el estator. Es fácil apreciar que en la Fig. 24a se muestra el momento que dicha espira se ve sometida al máximo flujo originado por la f.m.m. $\mathcal{F}_e$. Un poco más tarde, en la Fig. 24b, la máquina ha girado un ángulo eléctrico α en sentido antihorario y sucede que la espira a-a' se ve sometida al máximo flujo debido a la f.m.m. $\mathcal{F}_r$. Más tarde, cuando la máquina ha girado adicionalmente el ángulo eléctrico β , la espira la espira a-a' se ve sometida al máximo flujo debido a la f.m.m. $\mathcal{F}_i$ (Fig. 24c).

En consecuencia, los valores máximos de los flujos Φ_e , Φ_r y Φ_i , debidos respectivamente a los campos magnéticos inductor, resultante e inducido, se producen con un desfase temporal equivalente a los tiempos que tardan en girar los campos magnéticos (a velocidad de sincronismo) los ángulos eléctricos α y β , respectivamente.

Esto significa que los flujos Φ_e , Φ_r y Φ_i en la espira a-a' están desfasados en el tiempo los mismos ángulos $-\alpha$ y β - que tienen en el espacio las f.m.m.s que los originan, que son respectivamente $\mathcal{F}_e$, $\mathcal{F}_r$ y $\mathcal{F}_i$.

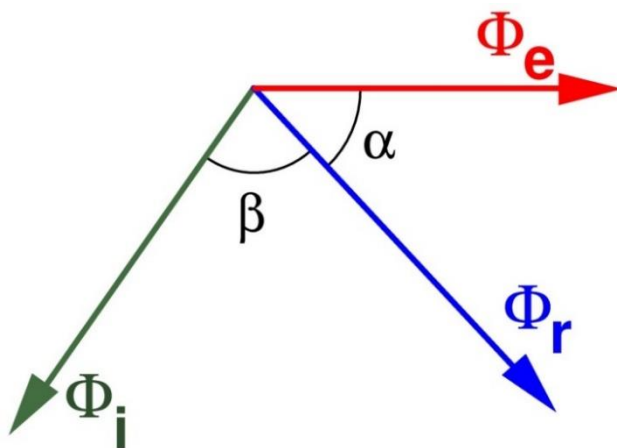


Fig. 25: Diagrama fasorial temporal de flujos

Luego, al representar los fasores temporales de flujo - $\bar{\Phi}_e$, $\bar{\Phi}_r$ y $\bar{\Phi}_i$ - se obtiene un diagrama fasorial (Fig. 25) en el que estos fasores temporales tienen entre sí unos ángulos de desfase $-\alpha$ y β - idénticos a los ángulos de desfase entre los respectivos fasores espaciales de f.m.m. que los originan (Fig. 23b). Esto es lo que se denomina **correlación fasorial**.

Los campos magnéticos -inductor, resultante e inducido- que giran a la velocidad de sincronismo inducen sobre una fase del estator una fuerza electromotriz (f.e.m.) de rotación que está desfasada en el tiempo 90° con respecto a su respectivo flujo. Estas f.e.m.s y sus valores eficaces son:

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_e &\rightarrow \Phi_e \rightarrow E_0 ; & \mathcal{F}_r &\rightarrow \Phi_r \rightarrow E_r ; & \mathcal{F}_i &\rightarrow \Phi_i \rightarrow E_p \\ \text{F.e.m. de vacío (debida a } \mathcal{F}_e\text{):} & & E_0 &= 4,44 N \xi_b f \Phi_{eM} \\ \text{F.e.m. resultante (debida a } \mathcal{F}_r\text{):} & & E_r &= 4,44 N \xi_b f \Phi_{rM} \\ \text{F.e.m. de reacción de inducido (debida a } \mathcal{F}_i\text{):} & & E_p &= 4,44 N \xi_b f \Phi_{iM} \end{aligned} \quad (19)$$

En estas relaciones, Φ_{eM} , Φ_{rM} y Φ_{iM} son los valores máximos de los flujos Φ_e , Φ_r y Φ_i ; es decir, son los flujos por polo debidos, respectivamente, a los campos magnéticos de excitación, resultante e inducido.

DIAGRAMA FASORIAL DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA DE ROTOR CILÍNDRICO. REACCIÓN DE INDUCIDO

Para analizar el funcionamiento de una máquina síncrona se va a dibujar un diagrama fasorial con sus fasores temporales (de corriente, de tensión, de f.e.m.s y de flujos) junto con los fasores espaciales de f.m.m. Dado que existe la correlación entre los fasores espaciales de f.m.m. y temporales de flujo, en este diagrama los fasores espaciales de f.m.m. se van colocar con la mismas dirección y sentido que los fasores de flujo correspondientes. Por lo tanto, estos fasores se colocarán así:

- $\bar{\mathcal{F}}_e$ es un fasor en fase y paralelo a $\bar{\Phi}_e$ y perpendicular a $\bar{E}_0$.
- $\bar{\mathcal{F}}_r$ es un fasor en fase y paralelo a $\bar{\Phi}_r$ y perpendicular a $\bar{E}_r$.
- $\bar{\mathcal{F}}_i$ es un fasor en fase y paralelo a $\bar{I}$ y $\bar{\Phi}_i$ perpendicular a $\bar{E}_p$.

Esto permite comprobar cómo es la **reacción de inducido** en función del factor de potencia (Fig. 26 a Fig. 30):

- Cuando la reacción de inducido es de tipo resistivo (más concretamente, cuando $\bar{E}_0$ e $\bar{I}$ están en fase (Fig. 26b y Fig. 28)) la f.m.m. de reacción de inducido $\bar{\mathcal{F}}_i$ es perpendicular a la f.m.m. inductora $\bar{\mathcal{F}}_e$. Se tiene pues una *reacción de inducido transversal*.
- Cuando la reacción de inducido es de tipo inductivo (más concretamente, cuando $\bar{I}$ está retrasada 90° con respecto a $\bar{E}_0$ (Fig. 26c y Fig. 29)) la f.m.m. de reacción de inducido $\bar{\mathcal{F}}_i$ es paralela y de sentido contrario a la f.m.m. inductora $\bar{\mathcal{F}}_e$. Se tiene pues una *reacción de inducido desmagnetizante*.

- Cuando la reacción de inducido es de tipo capacitivo (más concretamente, cuando $\bar{I}$ está adelantada 90° con respecto a $\bar{E}_0$ (Fig. 26d y Fig. 30)) la f.m.m. de reacción de inducido $\bar{F}_i$ es paralela y del mismo sentido que la f.m.m. inductora $\bar{F}_e$. Se tiene pues una *reacción de inducido magnetizante*.

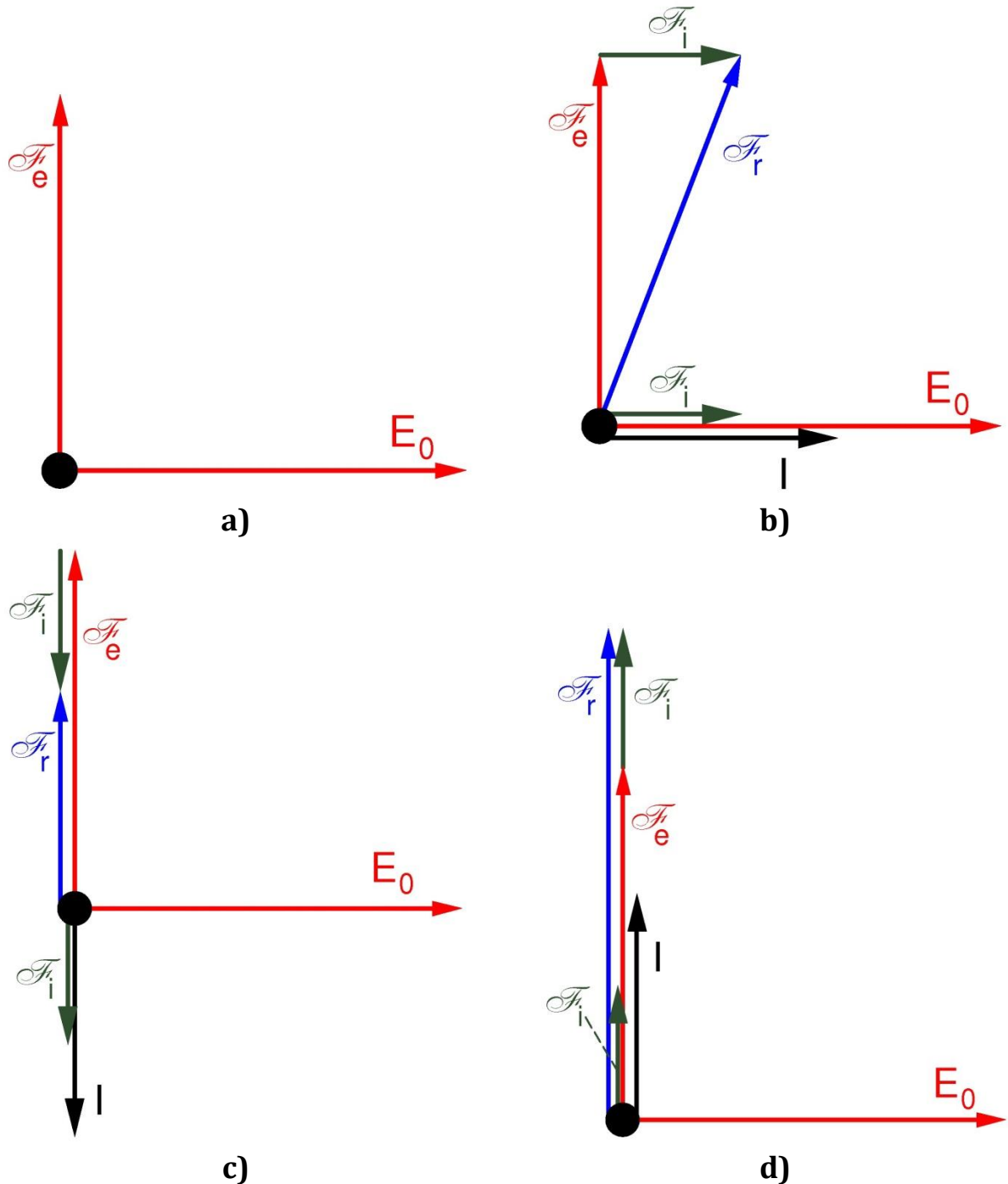


Fig. 26: Visualización en el diagrama fasorial de la reacción de inducido según el factor de potencia:

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| a) Funcionamiento en vacío. | b) Factor de potencia resistivo. |
| c) Factor de potencia inductivo. | d) Factor de potencia capacitivo. |

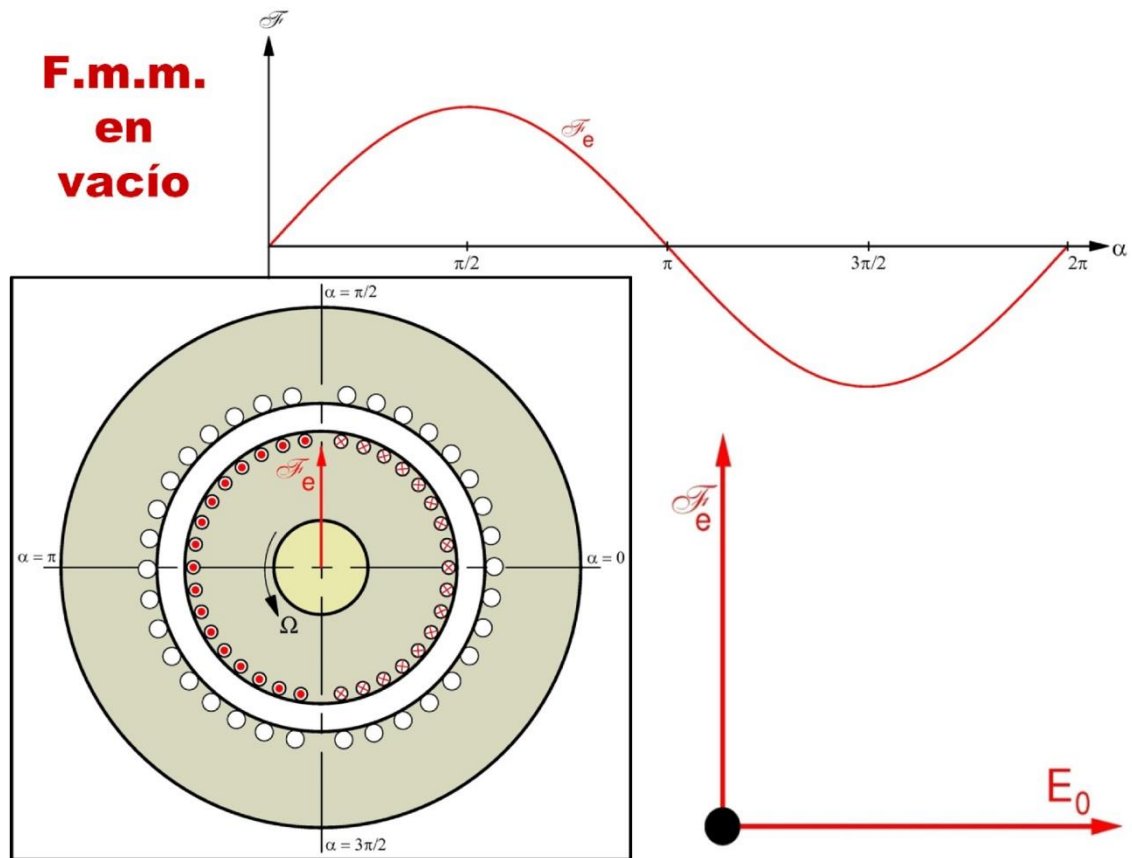


Fig. 27: F.m.m. en vacío ($\mathcal{F}_e$)

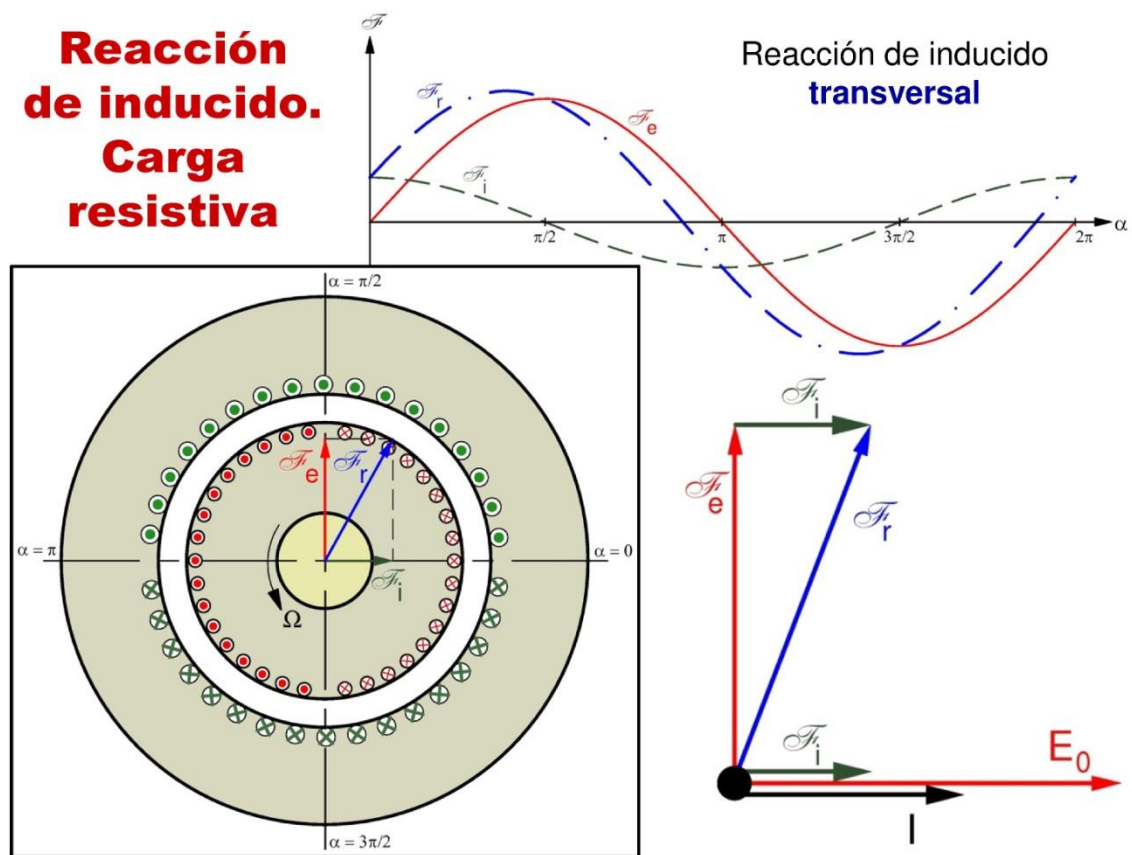


Fig. 28: F.m.m. de reacción de inducido ($\mathcal{F}_r$) con carga resistiva

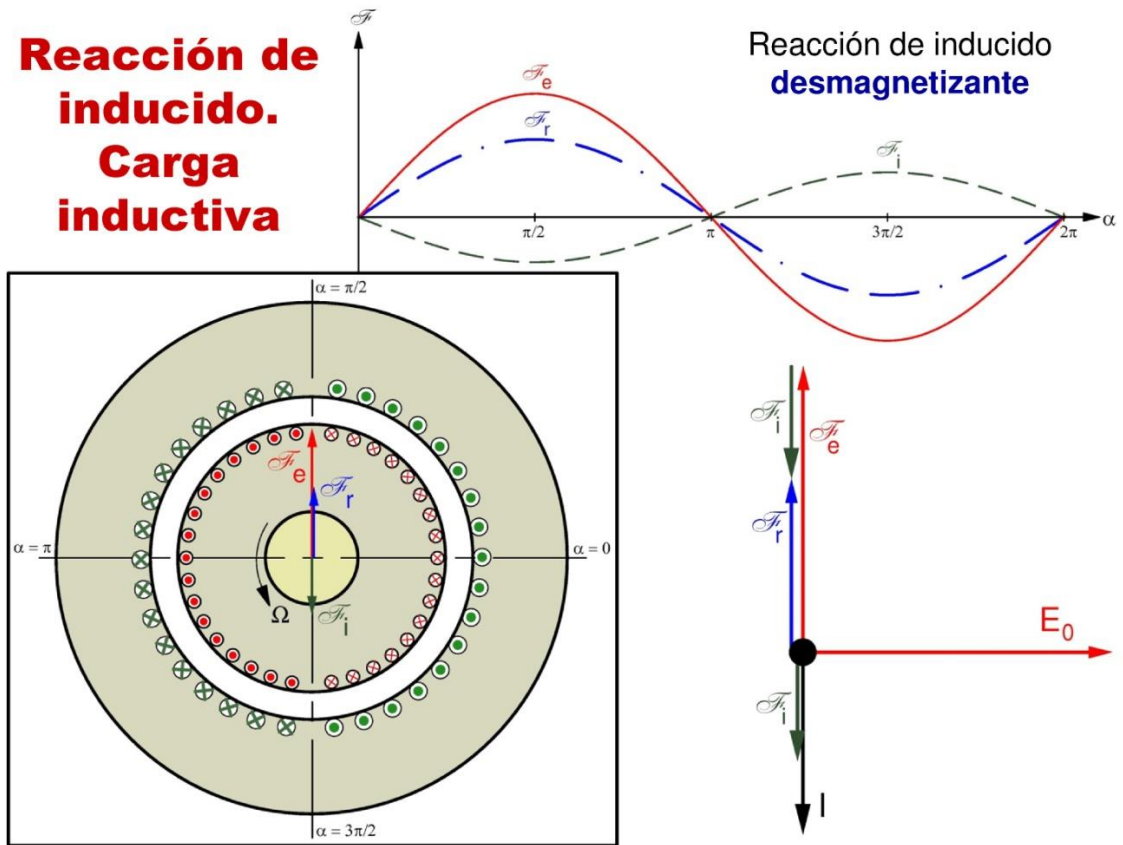


Fig. 29: F.m.m. de reacción de inducido ($\mathcal{A}$) con carga inductiva

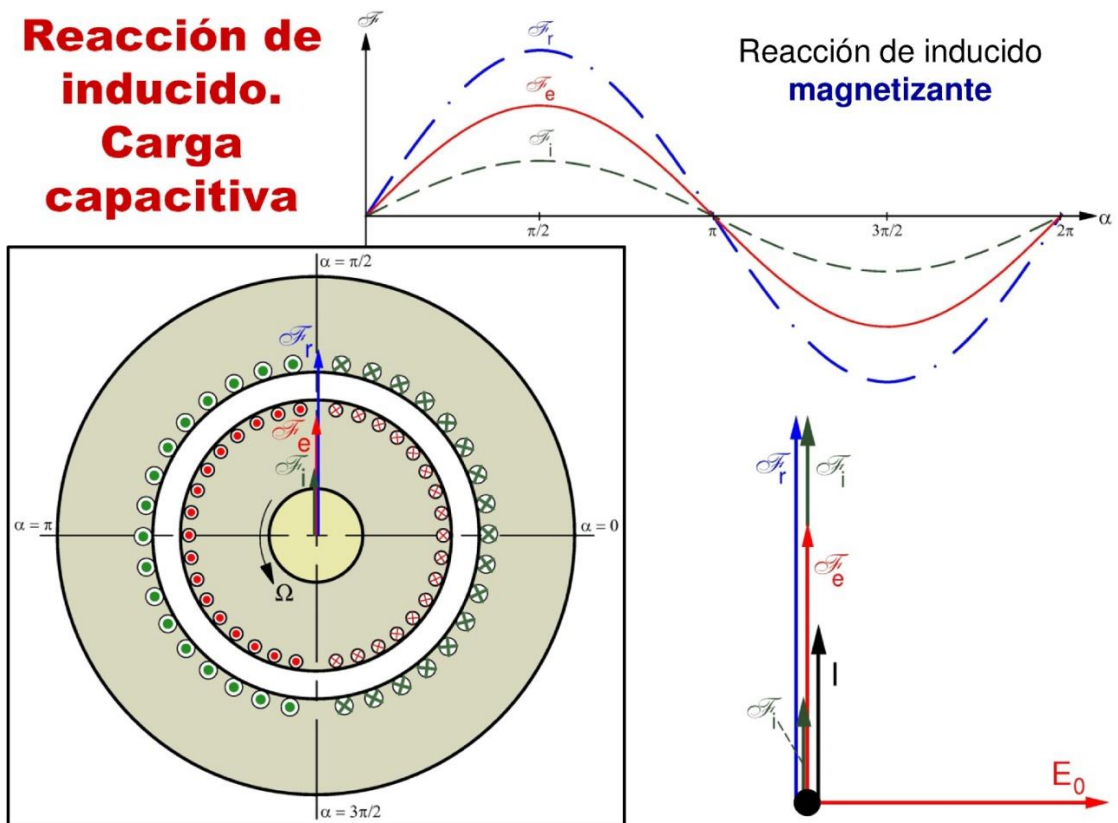


Fig. 30: F.m.m. de reacción de inducido ($\mathcal{A}$) con carga capacitiva

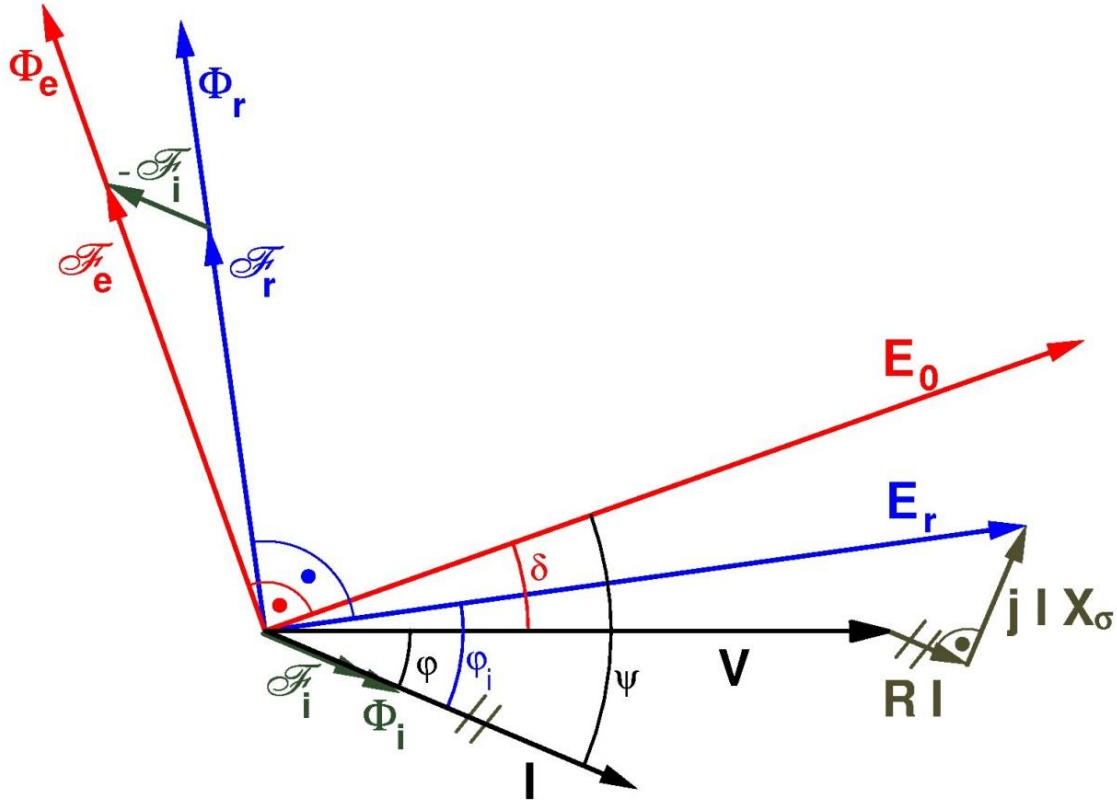


Fig. 31 : Diagrama fasorial de un alternador de rotor cilíndrico (diagrama de Potier)

El *diagrama fasorial* (*diagrama de Potier*) de la máquina síncrona se representa en la Fig. 31. En él se tiene en cuenta que se cumple el principio de superposición de f.m.m.s indicado por la relación (17) y que, como estudió en la página 23, la Fig. 20 y la Fig. 21, también se cumple esta relación entre los fasores temporales de una fase del inducido:

$$\bar{E}_r = \bar{V} + \bar{I} (R + j X_\sigma) \quad (20)$$

El ángulo δ entre los fasores de f.e.m. de vacío $\bar{E}_0$ y de tensión $\bar{V}$ (Fig. 31) se denomina **ángulo de par** o también **ángulo de potencia** o **ángulo de carga**. Cuando la máquina síncrona actúa como generador $\bar{E}_0$ está adelantado respecto a $\bar{V}$ y δ es positivo.

Como un fasor de f.m.m. y su correspondiente fasor de flujo son paralelos y de igual sentido se pueden relacionar entre sí mediante un parámetro de reluctancia, el cual es un número real:

$$\bar{\Phi}_e = \frac{\bar{\mathcal{F}}_e}{\mathcal{R}_e} \quad \bar{\Phi}_i = \frac{\bar{\mathcal{F}}_i}{\mathcal{R}_i} \quad \bar{\Phi}_r = \frac{\bar{\mathcal{F}}_r}{\mathcal{R}_r} \quad (21)$$

Aunque los campos magnéticos inductor, inducido y resultante circulan a través del mismo circuito magnético -formado por el estator, el rotor y el entrehierro- el nivel de saturación de las piezas de hierro es, en general, diferente para cada uno de estos tres campos. Esto hace que las tres reluctancias respectivas - $\mathcal{R}_e$, $\mathcal{R}_i$ y $\mathcal{R}_r$ - sean diferentes:

$$\mathcal{R}_e \neq \mathcal{R}_i \neq \mathcal{R}_r \quad (22)$$

De esto se deduce que, aunque se pueda aplicar el principio de superposición (17) a las f.m.m.s no se puede aplicar dicho principio ni a los flujos ni a las f.e.m.s:

$$\begin{aligned} \overline{\mathcal{F}}_r &= \overline{\mathcal{F}}_e + \overline{\mathcal{F}}_i \\ \overline{\Phi}_r &\neq \overline{\Phi}_e + \overline{\Phi}_i \\ \overline{E}_r &\neq \overline{E}_0 + \overline{E}_p \end{aligned} \quad (23)$$

CONSIDERACIONES SOBRE LA CARACTERÍSTICA DE VACÍO. FACTOR DE SATURACIÓN

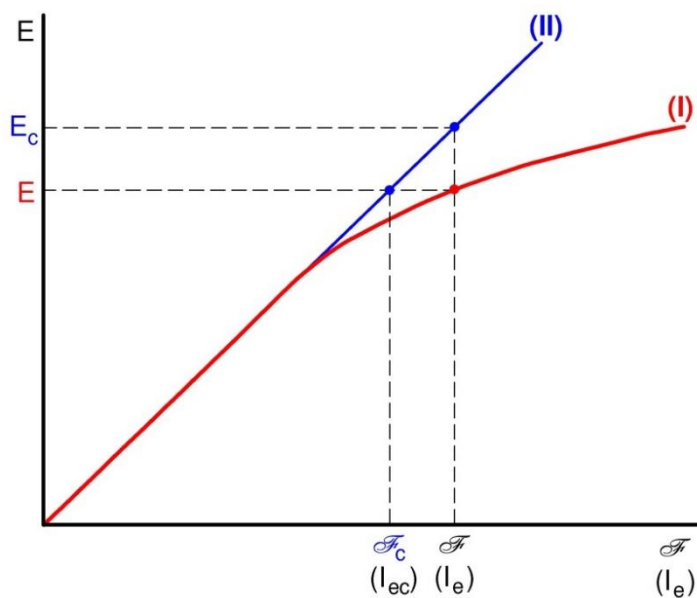


Fig. 32: Característica de vacío (I) y recta de entrehierro (II)

Como se indicó en la página 16, la característica de vacío (curva (I) en la Fig. 32) relaciona la f.e.m. inducida con la f.m.m. que la produce cuando la máquina está en vacío; es decir, relaciona E_0 con $\mathcal{F}_e$. Cuando actúan las otras f.m.m.s para producir sus respectivas f.e.m.s los campos magnéticos que producen circulan por el mismo circuito magnético que en vacío. Por esta razón se va a aceptar que tanto la f.e.m. de inducido E_p como la f.e.m. resultante E_r están relacionadas con las f.m.m.s que las originan - $\mathcal{F}_i$ y $\mathcal{F}_r$, respectivamente- también mediante la curva de vacío. Es decir, se va a usar la característica de vacío para relacionar una f.e.m. inducida con la f.m.m. que la origina.

Se puede objetar que, si bien el campo magnético principal circula por el mismo circuito magnético para las tres f.m.m.s, $\mathcal{F}_e$, $\mathcal{F}_i$ y $\mathcal{F}_r$, los campos magnéticos de dispersión son diferentes en los tres casos y no se debería usar la misma curva característica para todos. Esto es cierto, pero el efecto de la dispersión es lo suficientemente pequeño como para que se pueda utilizar la misma curva (la característica de vacío) para todos los casos sin cometer un error importante.

Por otra parte, aunque para analizar la máquina se considera que la coordenada horizontal de la característica de vacío es la f.m.m., la realidad es que en dicho eje lo que se indica es la corriente de excitación I_e que se mide mientras se efectúa el ensayo de

vacío. La f.m.m. $\mathcal{F}_e$ que origina el devanado de excitación es proporcional a la corriente I_e que circula por él, siendo esta constante de proporcionalidad función del número de espiras y de la geometría del devanado y también del número de polos de la máquina. Esta proporcionalidad señala que una forma de medir $\mathcal{F}_e$ es indicar la corriente continua I_e que la origina. Pues bien, se va a generalizar esto a todas las f.m.m.s. Así pues, se medirá una f.m.m. indicando el valor de la corriente que debería circular por el devanado inductor para originar una f.m.m. del mismo valor que la que se está analizando, independientemente que sea o no el devanado inductor el que realmente la esté produciendo. Por ejemplo, la f.m.m. $\mathcal{F}_1$ originada por el devanado inducido se va a medir indicando la corriente que debería pasar por el inductor para dar lugar a esta misma f.m.m. (aunque realmente la esté produciendo el inducido).

La *recta de entrehierro* (recta (II) en la Fig. 32) es la prolongación de parte inicial de la curva de vacío, cuando la máquina aún no está saturada. La recta de entrehierro sería la curva de vacío en el caso ideal de que la máquina no se llegase a saturar. Por lo tanto, para una misma f.m.m. la diferencia entre los valores de las f.e.m.s E_c , sobre la recta de entrehierro, y E , sobre la característica de vacío (Fig. 32), da una medida del nivel de saturación de la máquina. Cuanta mayor sea la diferencia entre estas dos f.e.m.s mayor será la saturación de la máquina.

El **factor de saturación** es un coeficiente adimensional que se obtiene por cociente entre los valores de f.e.m. obtenidas para una misma f.m.m. sobre la recta de entrehierro y la característica de vacío (Fig. 32):

$$k_s = \frac{E_c}{E} = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{F}_c} \quad (24)$$

$\mathcal{F}_c$ es la f.m.m. ficticia que da lugar a la misma f.e.m E sobre la recta de entrehierro que la f.m.m. $\mathcal{F}$ sobre la característica de vacío (Fig. 32).

Según su definición (24) y la Fig. 32 se deduce que el factor de saturación no es constante y que se puede expresar como función de la f.m.m. $\mathcal{F}$ o de la f.e.m. E . Este parámetro tiene valor unidad cuando la máquina no está saturada y valores superiores a 1 cuando lo está. Cuanto más saturada está la máquina mayor es el valor de k_s .

ANÁLISIS LINEAL DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA DE ROTOR CILÍNDRICO. MÉTODO DE BEHN-ESCHENBURG

Sólo en el caso de que se pueda suponer que la saturación de las piezas de hierro de la máquina permanece constante o es nula, es cuando las tres reluctancias - $\mathcal{R}_e$, $\mathcal{R}_i$ y $\mathcal{R}_r$ - son iguales y se puede aplicar el principio de superposición a los flujos y a las f.e.m.s., lo que permite realizar un análisis lineal de la máquina:

$$\begin{array}{ll} \mathcal{R}_e = \mathcal{R}_i = \mathcal{R}_r \rightarrow \bar{\Phi}_r = \bar{\Phi}_e + \bar{\Phi}_i \text{ y } \bar{E}_r = \bar{E}_0 + \bar{E}_p & (a) \\ \mathcal{R}_e = \mathcal{R}_i = \mathcal{R}_r \rightarrow \bar{\Phi}_e = \bar{\Phi}_r - \bar{\Phi}_i \text{ y } \bar{E}_0 = \bar{E}_r - \bar{E}_p & (b) \end{array} \quad (25)$$

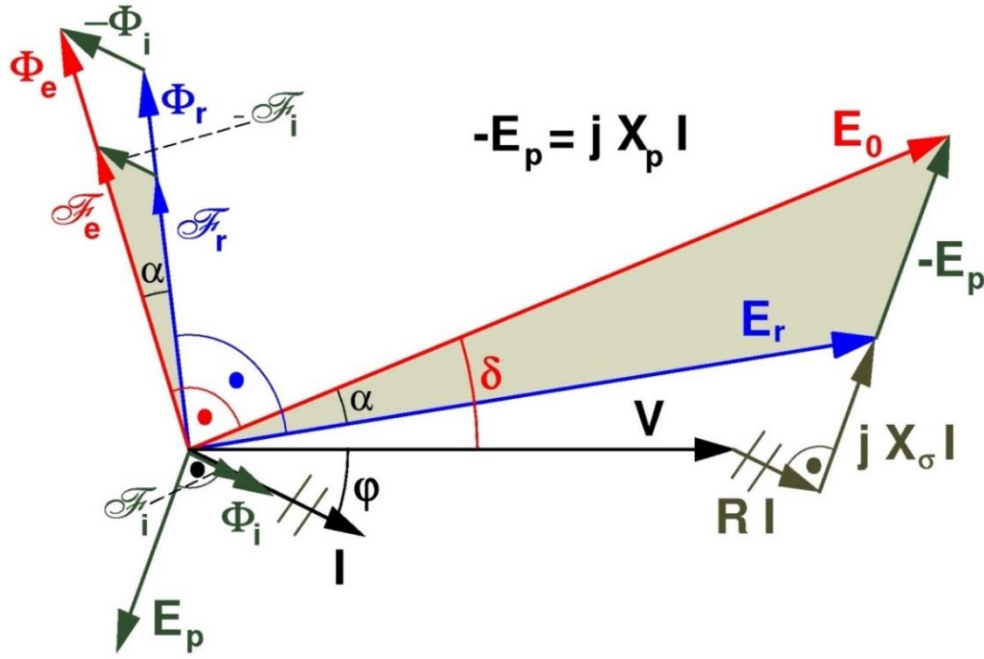


Fig. 33: Diagrama fasorial de Behn-Eschenburg

El método de Behn-Eschenburg consiste en realizar el análisis lineal de la máquina síncrona de rotor cilíndrico suponiendo que las piezas de hierro no se saturan. Esto significa el aceptar que ahora la máquina funciona con una característica de vacío lineal e igual a la recta de entrehierro. En este caso, puesto que se cumplen las relaciones (25) el diagrama fasorial de la máquina pasa a ser el representado en la Fig. 33.

En la Fig. 33 los dos triángulos sombreados son semejantes (tienen los mismos ángulos entre sus lados) y son perpendiculares entre sí. Luego, los fasores temporales $\bar{E}_p$ e $\bar{I}$ son perpendiculares. Por otra parte el valor eficaz E_p de la f.e.m. de inducido es proporcional al valor eficaz I de la corriente del inducido. De esto se deduce que el fasor de la f.e.m. de reacción de inducido cambiada de signo ($-\bar{E}_p$) equivale a una caída de tensión en una reactancia X_p (reactancia de reacción de inducido):

$$-\bar{E}_p = j X_p \bar{I} \quad (26)$$

En consecuencia, combinando las relaciones (20), (25) y (26) se deduce que

$$\begin{aligned} \bar{E}_0 &= \bar{E}_r - \bar{E}_p = [\bar{V} + \bar{I} (R + j X_\sigma)] + j \bar{I} X_p \\ \bar{E}_0 &= \bar{V} + \bar{I} [R + j (X_\sigma + X_p)] \\ \bar{E}_0 &= \bar{V} + \bar{I} (R + j X_s) = \bar{V} + \bar{I} \bar{Z}_s \end{aligned} \quad (27)$$

La reactancia obtenida por suma de las reactancias de dispersión X_σ y de reacción de inducido X_p se denomina *reactancia síncrona* X_s :

$$X_s = X_\sigma + X_p \quad (28)$$

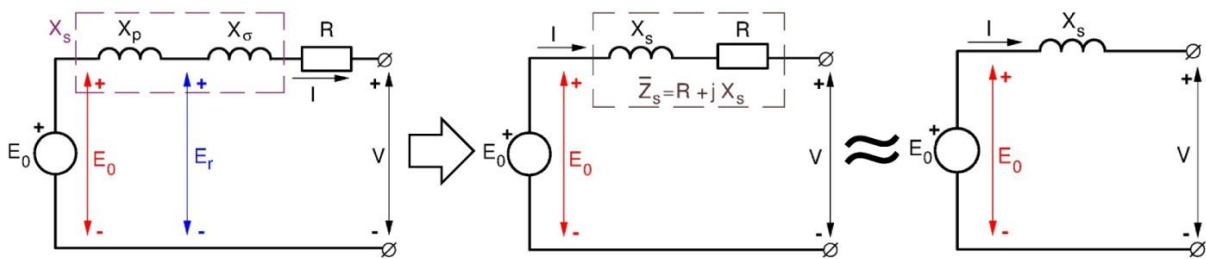
La impedancia formada por la resistencia de una fase del inducido y la reactancia síncrona es la *impedancia síncrona*:

$$\bar{Z}_s = R + j X_s \quad (29)$$

Normalmente la resistencia R se puede despreciar y la impedancia y reactancia síncronas son iguales:

$$R \ll X_s \rightarrow \bar{Z}_s \approx j X_s; Z_s \approx X_s \quad (30)$$

La reactancia síncrona permite obtener un circuito equivalente para esta máquina (Fig. 34 y Fig. 35) donde se manifiestan por separado los efectos del inductor (mediante la f.e.m. E_0) y del inducido (mediante la impedancia Z_s).



Circuitos equivalentes

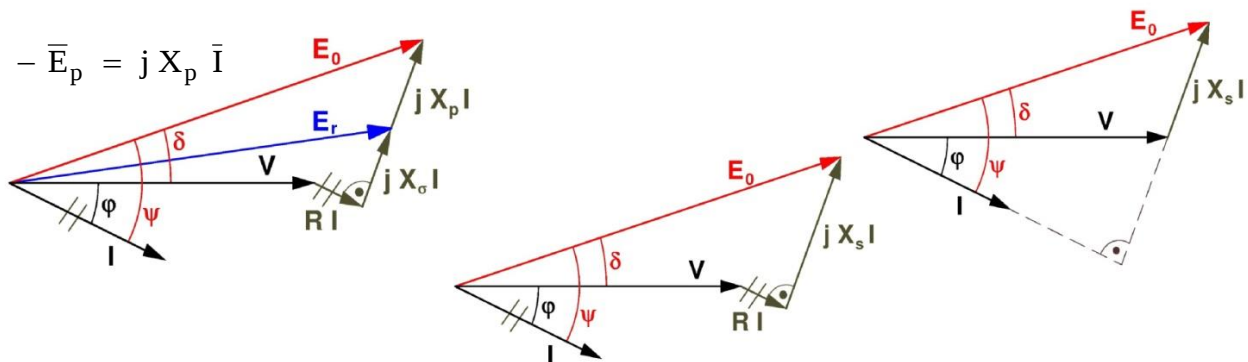


Fig. 34: Deducción del circuito equivalente de Behn-Eschenburg

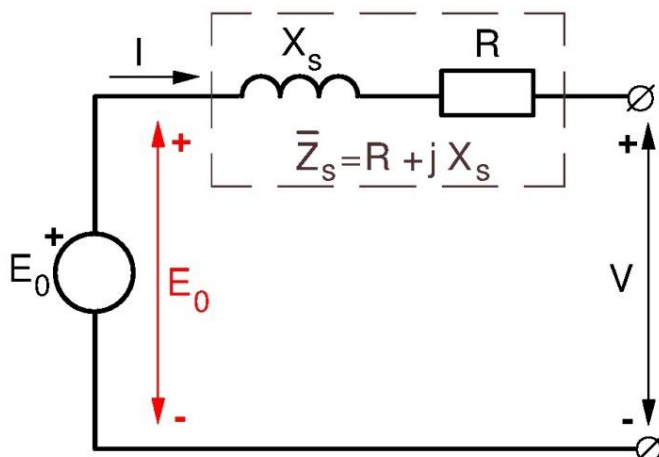


Fig. 35: Circuito equivalente de Behn-Eschenburg

El método de Behn-Eschenburg en rigor sólo se podría aplicar cuando la máquina funcionara siempre dentro de la zona lineal de la característica de magnetización, que es la zona en la que esta curva se confunde con la recta de entrehierro. Esto es lo que sucede con f.m.m.s muy pequeñas, pero no es lo que habitualmente pasa en la realidad. Para comprender lo que ocurre se va a afinar la nomenclatura y se va a distinguir entre las f.e.m.s E_0 , E_p y E_r , que las tres f.m.s inducen realmente y que se obtienen mediante la característica de vacío (Fig. 36), y las f.e.m.s ideales E_{0c} , E_{pc} y E_{rc} , que se inducirían si no hubiera saturación y que se obtienen mediante la recta de entrehierro (Fig. 36).

Es evidente que no se puede aplicar el principio de superposición a las f.e.m.s E_0 , E_p y E_r de la curva de vacío (se verifican las relaciones (23)), pero sí a las f.e.m.s E_{0c} , E_{pc} y E_{rc} de la recta de entrehierro. Por lo tanto, las relaciones (25) se deben aplicar a estas últimas y ahora sucede que

$$\bar{E}_{rc} = \bar{E}_{0c} + \bar{E}_{pc} \quad \bar{E}_{0c} = \bar{E}_{rc} - \bar{E}_{pc} \quad (31)$$

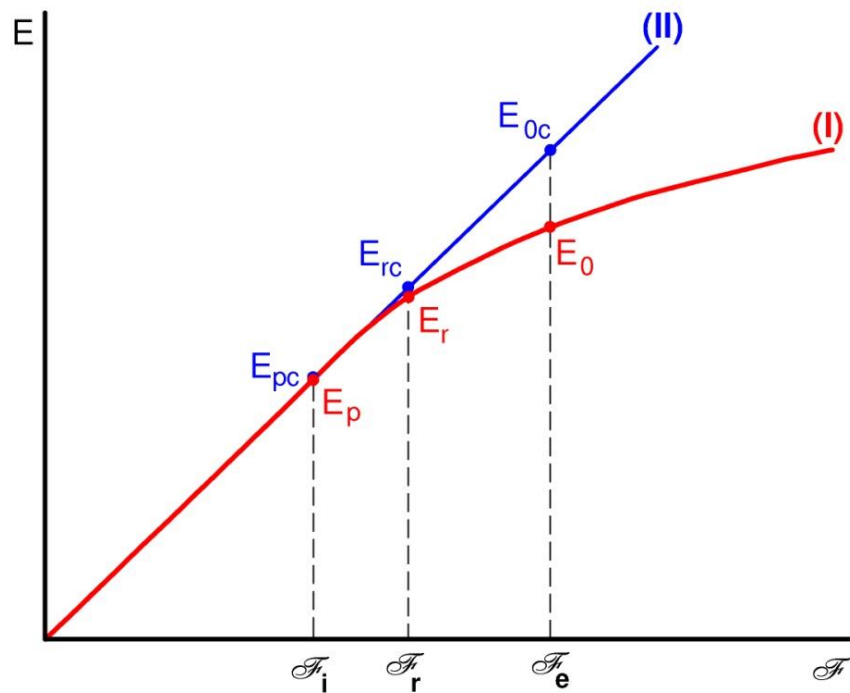


Fig. 36: Característica de vacío (I) y recta de entrehierro (II) en el método de Behn-Eschenburg para una máquina síncrona poco saturada

En la Fig. 36 se muestra lo que sucede en un alternador antiguo en condiciones asignadas. Cuando están proporcionando su tensión asignada en estos alternadores ocurre que para todas las cargas hay una f.m.m. resultante $\mathcal{F}_r$ que hace que la máquina esté poco saturada. Sin embargo, en la mayoría de las cargas se precisa una f.m.m. de excitación $\mathcal{F}_e$ que hace que la máquina alcance una saturación apreciable. Luego,

$$E_{rc} \approx E_r \quad E_{0c} \neq E_0 \quad (32)$$

Al igual que en la relación (26), la f.e.m. E_{pc} se puede calcular mediante la reactancia de reacción de inducido no saturada $X_p(\text{no sat})$:

$$-\bar{E}_{pc} = j \bar{I} X_p(\text{no sat}) = j \bar{I} [X_s(\text{no sat}) - X_\sigma] \quad (33)$$

Además, según (32) se puede aceptar, admitiendo cierto error, que E_{rc} es igual a la f.e.m. E_r , la cual se puede calcular mediante la relación (20). De (32) también se deduce que la f.e.m. de vacío que se obtiene mediante este método es E_{0c} , sobre la recta de entrehierro, y no la f.e.m. real de vacío E_0 .

Esto significa que en máquinas poco saturadas, en las que $E_{rc} \approx E_r$, la ecuación (27) puede reescribirse así:

$$\begin{aligned} \bar{E}_r &\approx \bar{E}_{rc} = \bar{E}_{0c} + \bar{E}_{pc} \rightarrow \bar{E}_{0c} = \bar{E}_r - \bar{E}_{pc} = \bar{E}_r + (-\bar{E}_{pc}) \\ \bar{E}_{0c} &= (\bar{V} + \bar{I} [R + j X_\sigma]) + (j \bar{I} [X_s(\text{no sat}) - X_\sigma]) \\ \bar{E}_{0c} &= \bar{V} + \bar{I} [R + j X_s(\text{no sat})] = \bar{V} + \bar{I} \bar{Z}_s(\text{no sat}) \end{aligned} \quad (34)$$

La *reactancia síncrona no saturada*, $X_s(\text{no sat})$, es constante y es la que se calcula suponiendo que la máquina no llega a saturarse. Esta magnitud se determina experimentalmente a partir de los ensayos de vacío y de cortocircuito como se explicará más adelante en la página 41.

De esto se deduce, cuando la saturación es pequeña, se puede usar la variante del circuito equivalente de Behn-Eschenburg representada en la Fig.37, en la que intervienen E_{0c} y $X_s(\text{no sat})$.

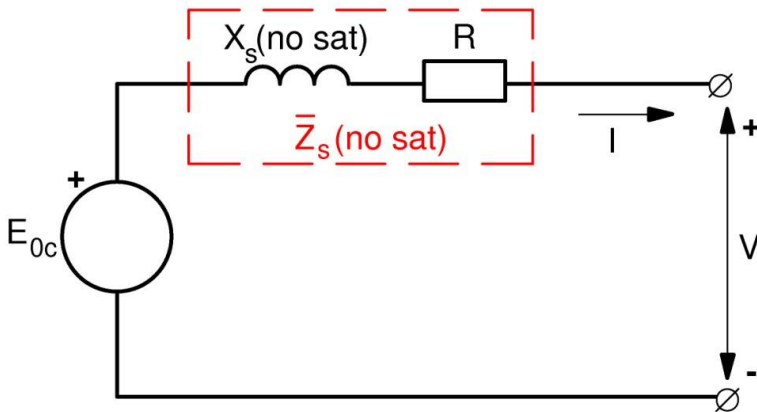


Fig. 37: Circuito equivalente de Behn-Eschenburg con la reactancia síncrona no saturada para máquinas poco saturadas

En la actualidad los alternadores modernos trabajan con una saturación apreciable y el empleo de la reactancia síncrona no saturada daría lugar a errores importantes. Es posible encontrar una *reactancia síncrona saturada*, $X_s = X_s(\text{sat})$, que permite calcular directamente el valor real de E_0 con algo más de precisión aunque la máquina esté saturada. Más adelante (página 41) se explicará cómo se calcula este parámetro a partir de los ensayos de vacío y de cortocircuito.

Nótese que a partir de ahora se reservará la notación X_s para la reactancia síncrona saturada y se usará la notación $X_s(\text{no sat})$ para la reactancia síncrona no saturada.

X_s no es constante y es función de I_e o de E_0 . Usando la reactancia síncrona saturada se puede aceptar que la relación (27) vuelve a ser correcta y se puede utilizar el circuito equivalente de la Fig. 35.

El hecho de que X_s sea función de E_0 obligaría a usar un proceso iterativo cuando se quiere utilizar el método de Behn-Eschenburg para calcular la f.e.m. de vacío. Este proceso consiste en suponer un valor inicial de X_s , con él se calcula E_0 mediante la relación (27), se determina el valor de X_s correspondiente (siguiendo el procedimiento que se indica en el siguiente apartado (página 41)) y se compara con el que se adoptó inicialmente. Si la diferencia es pequeña se da por resuelto el problema y, si no es así, se reinicia el cálculo usando el nuevo valor de X_s hasta que la diferencia entre los valores inicial y final de X_s sea pequeña.

En la práctica se suele omitir el proceso iterativo anterior y se trabaja con un valor fijo X_{s0} de la reactancia síncrona saturada, que es el correspondiente a un valor de E_0 igual a la tensión nominal V_N o, lo que equivalente, para una corriente de excitación igual a I_{e0} . Esto hace que se trabaje con una reactancia síncrona saturada algo superior a la que corresponde. Por esta razón y por los errores inherentes al método de Behn-Eschenburg, en máquinas saturadas con este método se obtienen valores de E_0 superiores al real (por esto se dice que este es un *método pesimista*). Por lo tanto, el método de Behn-Eschenburg no es muy preciso para máquinas saturadas.

CARACTERÍSTICA DE CORTOCIRCUITO. REACTANCIAS SÍNCRONAS NO SATURADA Y SATURADA. RELACIÓN DE CORTOCIRCUITO

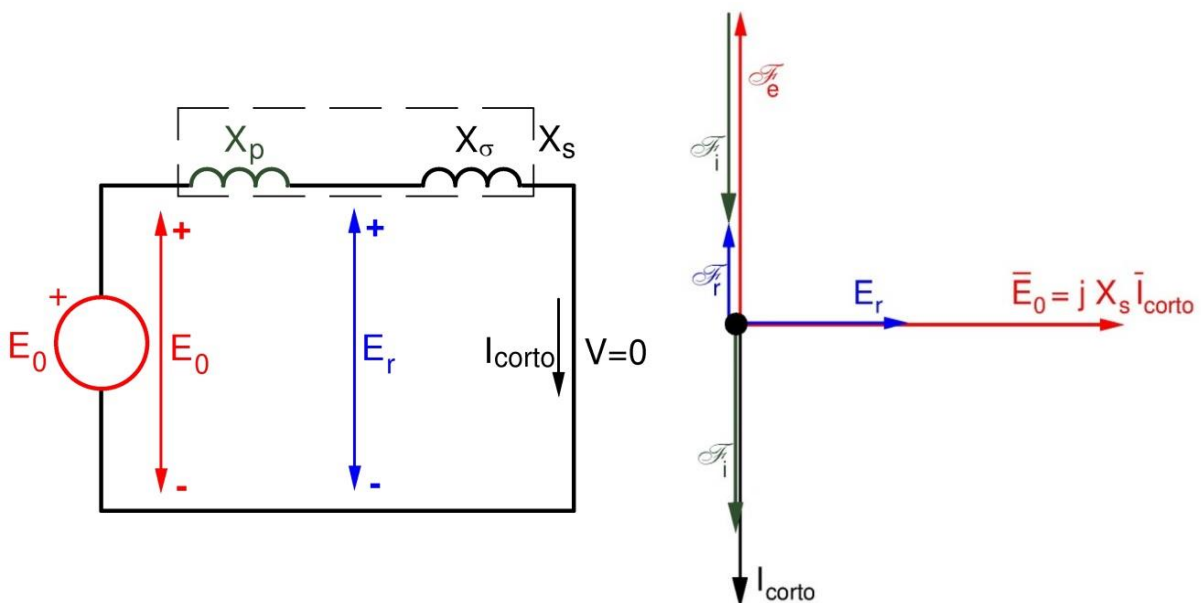


Fig. 38: Circuito equivalente y diagrama fasorial en el ensayo de cortocircuito (si se desprecia R)

El **ensayo de cortocircuito** de una máquina síncrona consiste en cortocircuitar las tres fases del inducido, hacerla girar a la velocidad de sincronismo y suministrarle una corriente de excitación que consiga que por las fases del inducido circulen corrientes cuyo valor eficaz sea el que se desee (normalmente la corriente asignada).

El circuito equivalente y el diagrama fasorial de la máquina síncrona durante el ensayo de cortocircuito, suponiendo que la resistencia R es despreciable, son los mostrados en la Fig. 38. En ella se aprecia que durante este ensayo la f.m.m. de reacción de inducido es desmagnetizante por lo que, salvo para corrientes de excitación muy elevadas, la máquina no llega a saturarse durante este ensayo ($\mathcal{F}_r$ es pequeña).

Si se realiza el ensayo de cortocircuito con diferentes valores de I_e y se representan los valores obtenidos de I_{corto} en función de I_e sobre unos ejes coordenados, lo que se obtiene es la denominada **característica de cortocircuito**. Dado que la máquina no se satura durante este ensayo (salvo que I_e alcance valores muy grandes) esta característica es lineal. En la Fig. 39 se muestran superpuestas la característica de vacío y la recta de entrehierro, cuyo eje de ordenadas está a la izquierda, junto con la característica de cortocircuito, cuyo eje de ordenadas es el de la derecha.

Como la característica de cortocircuito es lineal y pasa por el origen de coordenadas, para obtenerla no hace falta el efectuar varios ensayos de cortocircuito con diferentes valores de I_e . Basta con realizar un solo ensayo de cortocircuito, normalmente con la corriente asignada del inducido, para obtener un punto de esta característica; el cual, al unirlo con el origen de coordenadas, permite dibujarla.

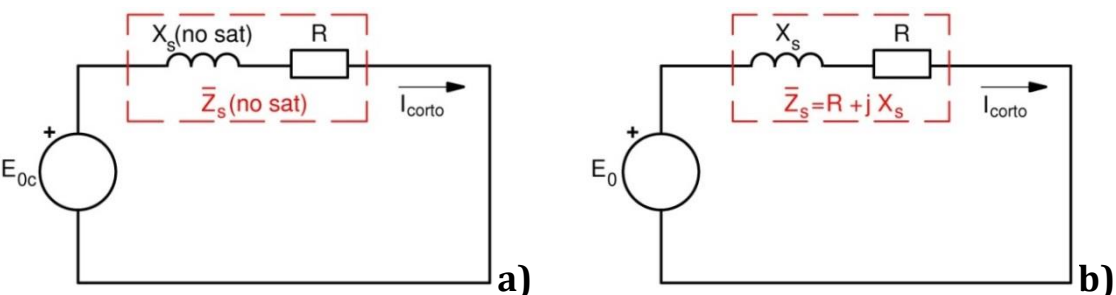
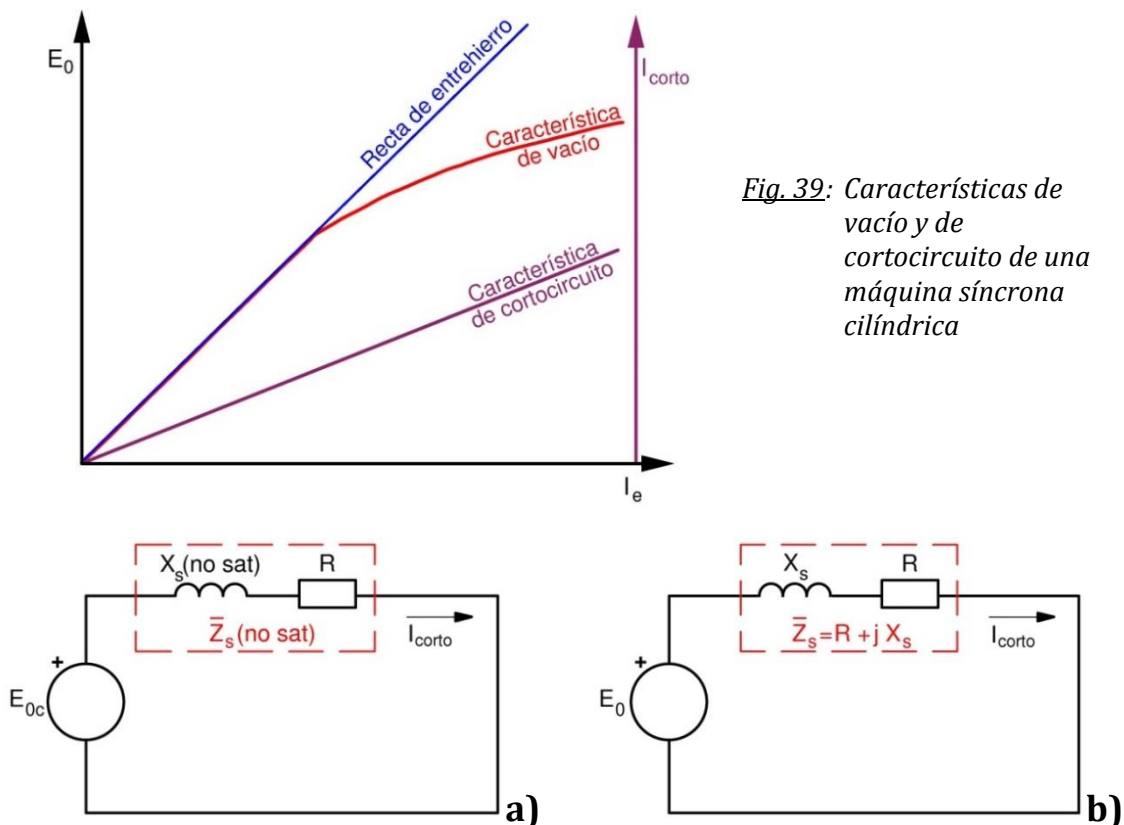


Fig. 40: Circuitos equivalentes en el ensayo de cortocircuito:
a) usando la reactancia síncrona no saturada. b) usando la reactancia síncrona saturada

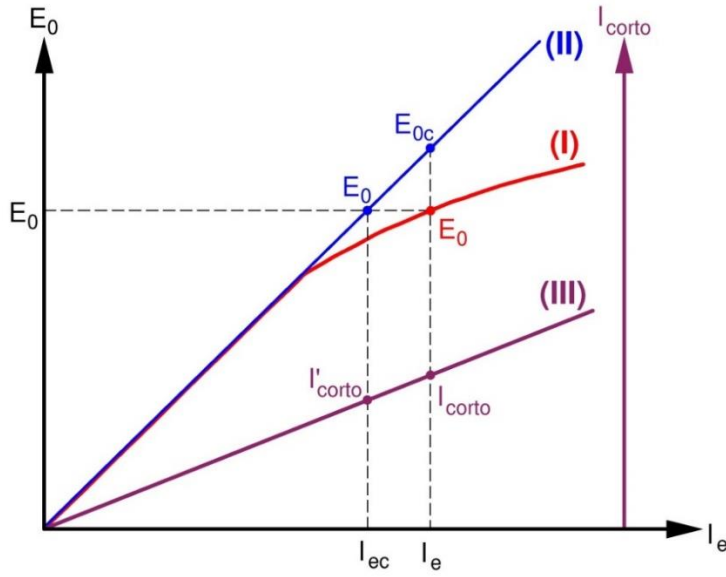


Fig. 41: Cálculo de las impedancias síncronas a partir de los ensayos de vacío y de cortocircuito

- (I) Característica de vacío
- (II) Recta de entrehierro
- (III) Característica de cortocircuito

Como en el ensayo de cortocircuito la máquina no se satura es posible analizarlo utilizando las dos versiones (Fig. 35 y Fig. 37) del circuito equivalente de Behn-Eschenburg (ver la Fig. 40).

Aplicando la Ley de Ohm al circuito de la Fig. 40a se deduce que

$$\bar{Z}_s(\text{no sat}) = \frac{\bar{E}_{0c}}{\bar{I}_{corto}} \quad (35)$$

Trabajando con los módulos de los fasores temporales de la relación (35), los cuáles se obtienen de las curvas representadas en la Fig. 41, se obtiene finalmente que:

$$Z_s(\text{no sat}) = \frac{E_{0c}}{I_{corto}} = \frac{E_0}{I'_{corto}} \quad (36)$$

$$X_s(\text{no sat}) = \sqrt{(Z_s(\text{no sat}))^2 - R^2} \quad (37)$$

El valor de la impedancia síncrona no saturada $Z_s(\text{no sat})$ es constante y no depende del valor de E_0 (o de I_e) utilizado para entrar en las curvas de la Fig. 41.

Repitiendo el mismo proceso ahora en el circuito de la Fig. 40b y las curvas de la Fig. 41 se obtiene que

$$Z_s = Z_s(\text{sat}) = \frac{E_0}{I_{corto}} \quad (38)$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R^2} \quad (39)$$

La impedancia síncrona saturada $Z_s = Z_s(\text{sat})$ varía en función del valor de E_0 (o de I_e). Normalmente se trabaja con la impedancia síncrona saturada Z_{s0} obtenida para un valor de E_0 igual a la tensión asignada V_N o, lo que es equivalente, para una corriente de excitación igual a I_{e0} (Fig. 42):

$$Z_{s0} = \frac{V_N}{I_{\text{corto}0}} \quad (40)$$

Si se expresa esta impedancia en valores por unidad (p.u.) se obtiene que

$$Z_{s0}(\text{p.u.}) = \frac{Z_{s0}}{Z_b} = \frac{\frac{V_N}{I_{\text{corto}0}}}{\frac{V_N}{I_N}} \rightarrow Z_{s0}(\text{p.u.}) = \frac{I_N}{I_{\text{corto}0}} \quad (41)$$

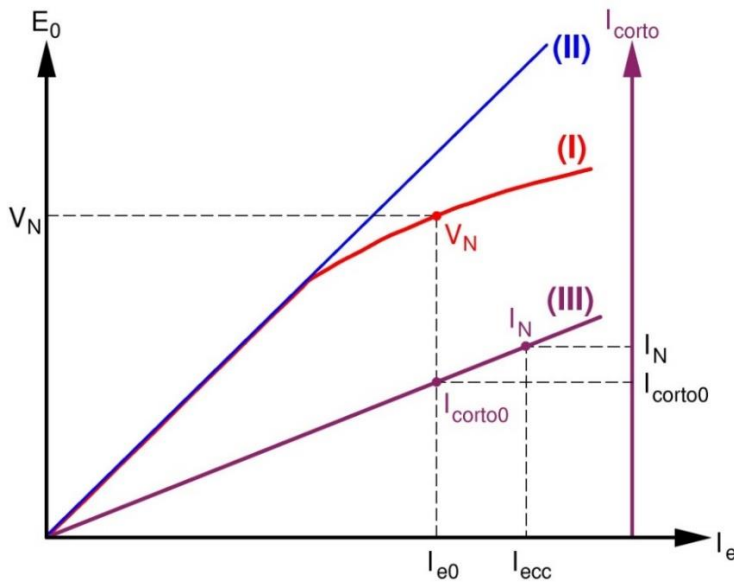


Fig. 42: Cálculo de la relación de cortocircuito (SCR) y de la impedancia síncrona saturada Z_{s0} a partir de las características de vacío y de cortocircuito

- (I) Característica de vacío
- (II) Recta de entrehierro
- (III) Característica de cortocircuito

Examinado las relaciones (36) y (38) y, además, la (24) se advierte lo siguiente:

$$\frac{Z_s(\text{no sat})}{Z_s} = \frac{\frac{E_{0c}}{I_{\text{corto}}}}{\frac{E_0}{I_{\text{corto}}}} = \frac{E_{0c}}{E_0} = k_{se}$$

$$\frac{Z_s(\text{no sat})}{Z_s} = k_{se} \rightarrow Z_s = \frac{Z_s(\text{no sat})}{k_{se}} \quad (42)$$

La relación (42) muestra que la impedancia síncrona saturada Z_s se puede calcular dividiendo la reactancia síncrona no saturada $Z_s(\text{no sat})$ por el factor de saturación k_{se} correspondiente a la f.m.m. $\mathcal{F}_e$ o, lo que es equivalente, a la f.e.m. E_0 .

La **relación de cortocircuito (SCR)** es un parámetro adimensional que se obtiene por cociente de las corrientes de excitación I_{e0} , que da lugar a la tensión asignada V_N en el ensayo de vacío, e I_{ecc} , que da lugar a la corriente asignada I_N en el ensayo de cortocircuito. Por lo tanto, observando la Fig. 42 y la relación (41) se deduce la siguiente relación:

$$SCR = \frac{I_{e0}}{I_{ecc}} \rightarrow SCR = \frac{I_{corto0}}{I_N} = \frac{1}{Z_{s0}(p.u.)} \quad (43)$$

Luego, la relación de cortocircuito SCR es igual a la inversa de la impedancia síncrona saturada Z_{s0} en valores p.u.

Este parámetro está influenciado por el tamaño de la máquina y por el número de espiras del inducido. Para alternadores con rotor cilíndrico SCR suele tomar valores entre 0,5 y 0,8 y para alternadores con rotor de polos salientes toma valores próximos a 1,5.

ANÁLISIS LINEAL MEJORADO DE UNA MÁQUINA SÍNCRONA DE ROTOR CILÍNDRICO

Existe un análisis lineal de la máquina síncrona con el que se obtiene una mejor precisión que con el método de Behn-Eschenburg. Para ello no se supone que la máquina no se satura, sino que está saturada; pero con nivel de saturación constante e igual al que tiene la máquina realmente para la f.m.m. resultante $\mathcal{F}_r$. Es decir, se va a suponer que la reluctancia de la máquina para las f.m.m.s $\mathcal{F}_e$ y $\mathcal{F}_i$ es igual la reluctancia $\mathcal{R}_r$ que tiene realmente para la f.m.m. $\mathcal{F}_r$.

En consecuencia, mediante este análisis se va a suponer que la máquina va a funcionar con una característica de vacío ideal y lineal que es la *recta de saturación constante* que corta a la característica de vacío en el punto de f.e.m. E_r y que se designa como (III) en la Fig. 43. Nótese que para cada estado de la máquina la f.e.m. E_r es distinta, lo que, en rigor, obligaría a usar una recta de saturación constante diferente para cada estado de funcionamiento de la máquina.

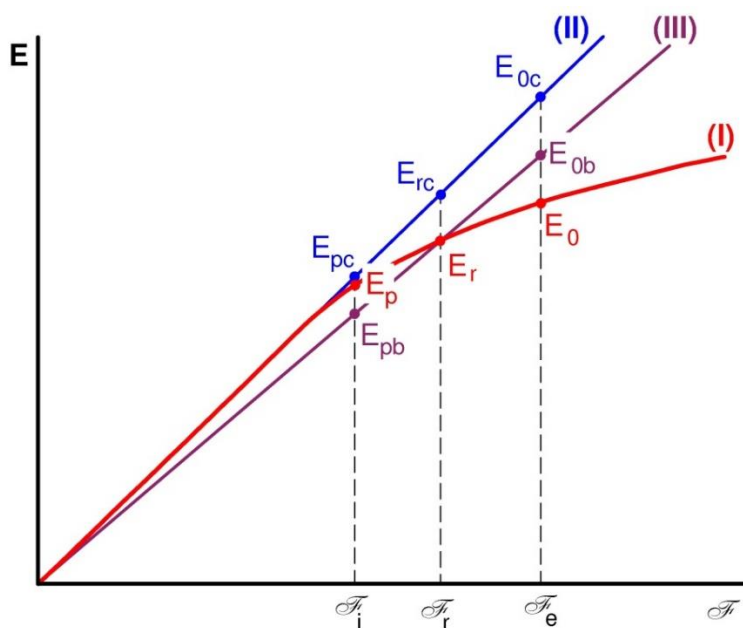


Fig. 43: Curvas para el análisis lineal mejorado de una máquina síncrona

- (I) Característica de vacío
- (II) Recta de entrehierro
- (III) Recta de saturación constante

En lo que sigue se van a designar E_{0b} , E_{pb} y E_r (Fig. 43) a las f.e.m.s inducidas sobre la recta de saturación constante por las f.m.m.s $\mathcal{F}_e$, $\mathcal{F}_i$ y $\mathcal{F}_r$, respectivamente. Nótese que la f.e.m. debida a $\mathcal{F}_r$ es la verdadera f.e.m. E_r de la máquina porque este punto es común con la característica de vacío.

Sea k_{sr} el factor de saturación para la f.e.m. E_r :

$$k_{sr} = \frac{E_{rc}}{E_r} \quad (44)$$

Es fácil comprobar que, puesto que la recta de entrehierro ((II) en la Fig. 43) y la recta de saturación constante ((III) en la Fig. 43) son líneas rectas, sucede que:

$$E_{0b} = \frac{E_{0c}}{k_{sr}} \quad E_{pb} = \frac{E_{pc}}{k_{sr}} \quad E_r = \frac{E_{rc}}{k_{sr}} \quad (45)$$

Es evidente que a las f.e.m.s E_{0b} , E_{pb} y E_r se les puede aplicar el principio de superposición. Por lo tanto, se les pueden aplicar las relaciones (25):

$$\bar{E}_r = \bar{E}_{0b} + \bar{E}_{pb} \quad \bar{E}_{0b} = \bar{E}_r - \bar{E}_{pb} \quad (46)$$

En este análisis lineal, en el que se usa la recta de saturación constante, el diagrama fasorial queda como se indica en la Fig. 44, lo que permite deducir las siguientes relaciones:

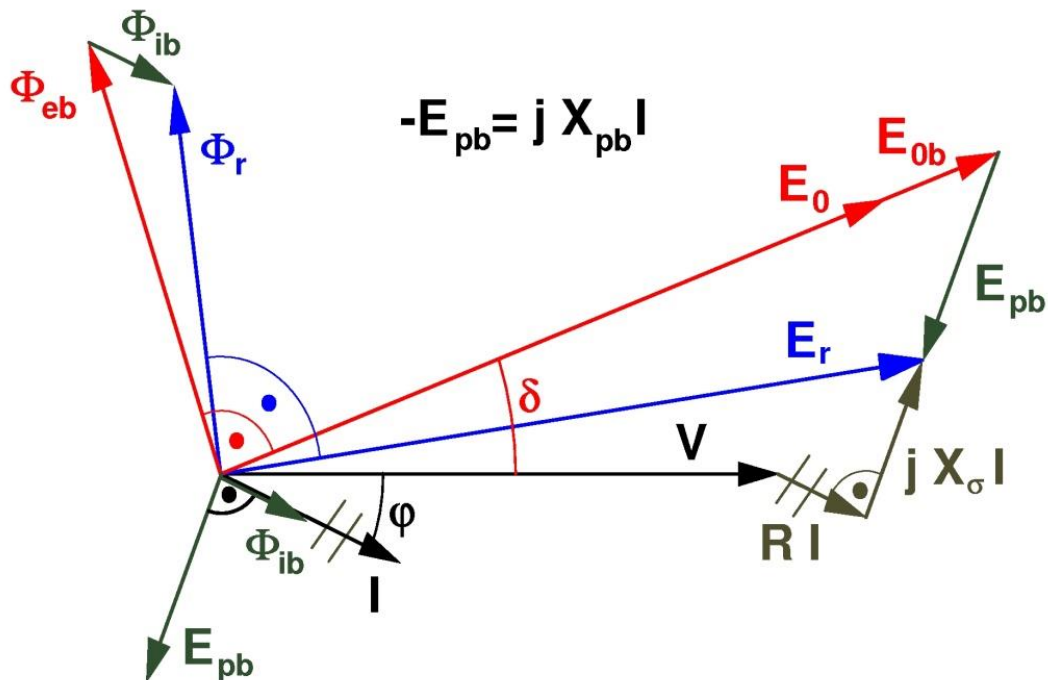


Fig. 44: Diagrama fasorial de una máquina síncrona usando la recta de saturación constante

$$-\bar{E}_{pb} = j X_{pb} \bar{I} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \bar{E}_{0b} &= \bar{E}_r - \bar{E}_{pb} = [\bar{V} + \bar{I} (R + j X_{\sigma})] + j \bar{I} X_{pb} \\ \bar{E}_{0b} &= \bar{V} + \bar{I} [R + j (X_{\sigma} + X_{pb})] \\ \bar{E}_{0b} &= \bar{V} + \bar{I} (R + j X_{sb}) = \bar{V} + \bar{I} \bar{Z}_{sb} \quad (48) \\ (\bar{Z}_{sb} &= R + j X_{sb}) \end{aligned}$$

En la Fig. 45 se muestra como de estas ecuaciones se puede deducir el circuito equivalente de la Fig. 46.

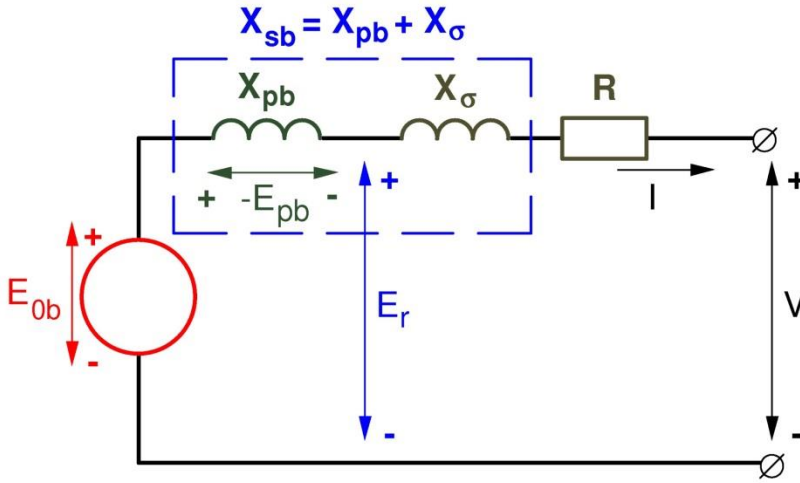


Fig. 45: Deducción del circuito equivalente de una máquina síncrona cilíndrica funcionando sobre una recta de saturación constante

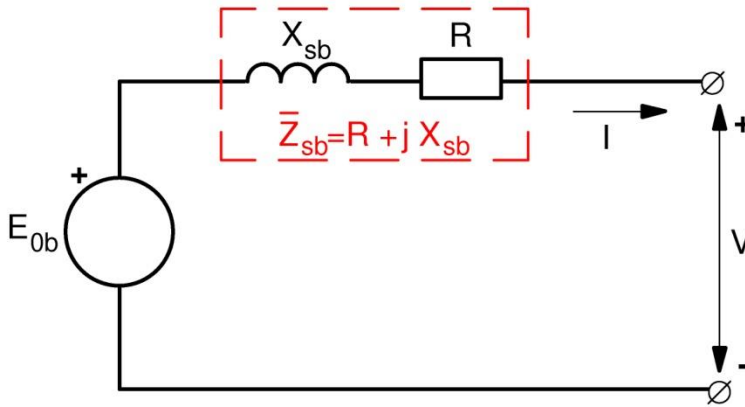


Fig. 46: Circuito equivalente de una máquina síncrona cilíndrica funcionando sobre una recta de saturación constante

Combinando la relación (47) con las (33) y (45) es fácil deducir que:

$$-\bar{E}_{pb} = \frac{-\bar{E}_{pc}}{k_{sr}} = \frac{j \bar{I} X_p(\text{no sat})}{k_{sr}} \rightarrow X_{pb} = \frac{X_p(\text{no sat})}{k_{sr}} = \frac{X_s(\text{no sat}) - X_{\sigma}}{k_{sr}} \quad (49)$$

Luego, la reactancia síncrona X_{sb} que se utiliza ahora se puede obtener así:

$$X_{sb} = X_{\sigma} + X_{pb} = X_{\sigma} + \frac{X_s(\text{no sat}) - X_{\sigma}}{k_{sr}} \quad (50)$$

Esta reactancia síncrona X_{sb} es variable con la f.e.m. resultante E_r . Dado que la f.e.m. E_r varía menos con la carga que la f.e.m. de vacío E_0 , la reactancia síncrona X_{sb} varía menos con la carga que la reactancia síncrona saturada X_s usada en el método de Behn-Eschenburg.

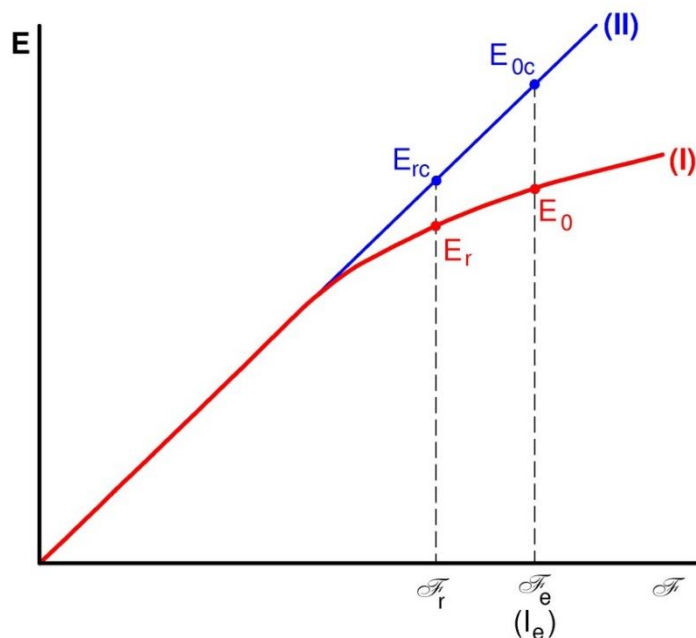


Fig. 47: Curvas utilizadas para el cálculo de E_0 mediante el análisis lineal mejorado

- (I) Característica de vacío
- (II) Recta de entrehierro

Realmente, las relaciones (45) permiten utilizar este método sin necesidad de llegar a dibujar la recta de saturación constante. Así, para el cálculo de la f.e.m. E_0 partiendo de la tensión V , la corriente del inducido I y su factor de potencia, bastará con conocer la recta de entrehierro y la característica de vacío (Fig. 47) y, además, los parámetros constantes R , X_σ y X_s (no sat). El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Se calcula la f.e.m. E_r utilizando la relación (20) (que es igual a la (15)), la cual está reflejada en el diagrama fasorial de la Fig. 21.
- Entrando con E_r al eje vertical de la característica de vacío ((I) en la Fig. 47) se obtiene E_{rc} sobre la recta de entrehierro ((II) en la Fig. 47).
- Ahora ya se puede proceder a calcular el factor de saturación k_{sr} mediante la fórmula (44).
- Seguidamente se obtiene la reactancia síncrona X_{sb} empleando la relación (50).
- Ahora se calcula la f.e.m. E_{0b} mediante la relación (48).
- Con la f.e.m. E_{0b} y el factor de saturación k_{sr} se obtiene la f.e.m. E_{oc} despejándola de la primera de las relaciones (45).
- Finalmente, entrando con la f.e.m. E_{oc} en el eje vertical de la recta de entrehierro ((II) en la Fig. 47), en la característica de vacío ((I) en la Fig. 47) se obtiene la f.e.m. de vacío E_0 y en el eje horizontal se determina la corriente de excitación I_e que la máquina necesita (ver la Fig. 47).

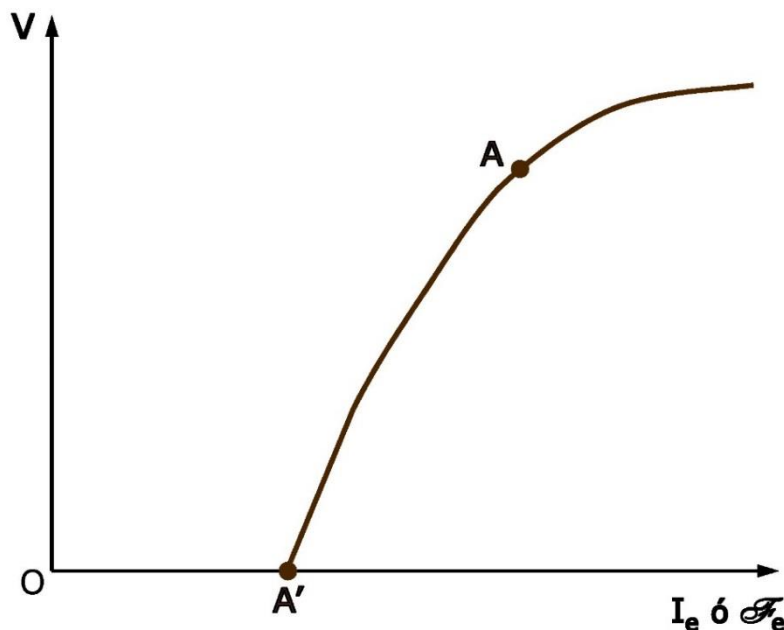
MÉTODO DE POTIER O DEL FACTOR DE POTENCIA NULO**Característica reactiva**

Fig. 48: Característica reactiva

En el *ensayo con carga inductiva pura* o *ensayo de carga reactiva* se conecta en bornes del inducido una carga puramente inductiva regulable que da lugar a una corriente con un factor de potencia nulo. Se hace girar el alternador a la velocidad de sincronismo y se van modificando tanto la corriente de excitación I_e como la carga inductiva, de tal manera que la tensión y la corriente del inducido tengan los valores eficaces que se deseen, que habitualmente serán los valores asignados V_N e I_N . En este ensayo se miden las siguientes magnitudes: la tensión V y la corriente I del inducido y la corriente de excitación I_e .

La representación gráfica sobre unos ejes de coordenadas de las tensiones obtenidas en varios ensayos de carga inductiva pura para diferentes corrientes de excitación manteniendo siempre las mismas corriente de inducido (normalmente la asignada I_N) y velocidad síncrona da lugar a la **característica reactiva** (Fig. 48). En esta curva el eje de ordenadas indica la tensión V y el eje de abscisas la corriente de excitación I_e , la cual (como ya se indicó en la página 35 para la característica de vacío) también se puede interpretar como la fuerza magnetomotriz (f.m.m.) de excitación $\mathcal{F}_e$.

El punto **A'** (Fig. 48), de corte de la curva reactiva con el eje de abscisas, corresponde a un ensayo con tensión V nula. Esto significa que en este punto la máquina tiene su inducido conectado en cortocircuito. Por lo tanto, el punto **A'** de la característica reactiva se puede obtener experimentalmente mediante un ensayo de cortocircuito en el que la corriente del inducido tenga el mismo valor que en los demás puntos de la curva.

Normalmente la resistencia R de las fases del inducido es despreciable. En este caso el diagrama fasorial de un alternador síncrono durante el ensayo con carga inductiva pura es el mostrado en la Fig. 49.

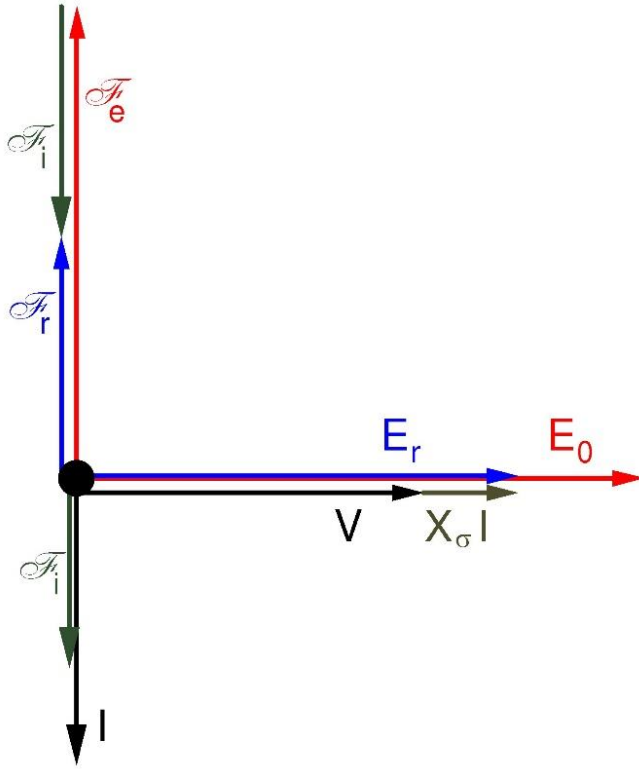


Fig. 49: Diagrama fasorial en el ensayo con carga inductiva pura (si se desprecia R)

En la Fig. 49 se observa que de la relación (15) se deduce que los fasores de tensión $\bar{V}$ y de f.e.m. resultante $\bar{E}_r$ están en fase y que se cumple la siguiente relación entre sus módulos:

$$\bar{E}_r = \bar{V} + j\bar{I}X_\sigma \rightarrow E_r = V + IX_\sigma \rightarrow \boxed{V = E_r - IX_\sigma} \quad (51)$$

En la Fig. 49 también se advierte que de la relación (17) se deduce que todos los fasores de f.m.m. tienen la misma dirección y que se cumple esta relación entre sus módulos:

$$\bar{\mathcal{F}}_e = \bar{\mathcal{F}}_r - \bar{\mathcal{F}}_i \rightarrow \boxed{\mathcal{F}_e = \mathcal{F}_r + \mathcal{F}_i} \quad (52)$$

Como el fasor de f.e.m. de vacío $\bar{E}_0$ es perpendicular al fasor de f.m.m. de excitación $\bar{\mathcal{F}}_e$, sucede que la tensión $\bar{V}$ y la f.e.m. de vacío $\bar{E}_0$ están en fase. Por consiguiente, la corriente $\bar{I}$ no sólo es perpendicular a la tensión $\bar{V}$, sino también a la f.e.m. $\bar{E}_0$ (Fig. 49).

Triángulo de Potier

La característica reactiva representa un comportamiento de la máquina en el que la corriente en el inducido I permanece constante. Por lo tanto, la f.m.m. de reacción de inducido $\mathcal{F}_i$ también es la misma en todos los puntos de una característica reactiva. Teniendo en cuenta esto y las relaciones (51) y (52) se deduce que es posible obtener la característica reactiva partiendo de la característica de vacío si se conocen la f.m.m. $\mathcal{F}_i$ y la reactancia de dispersión X_σ .

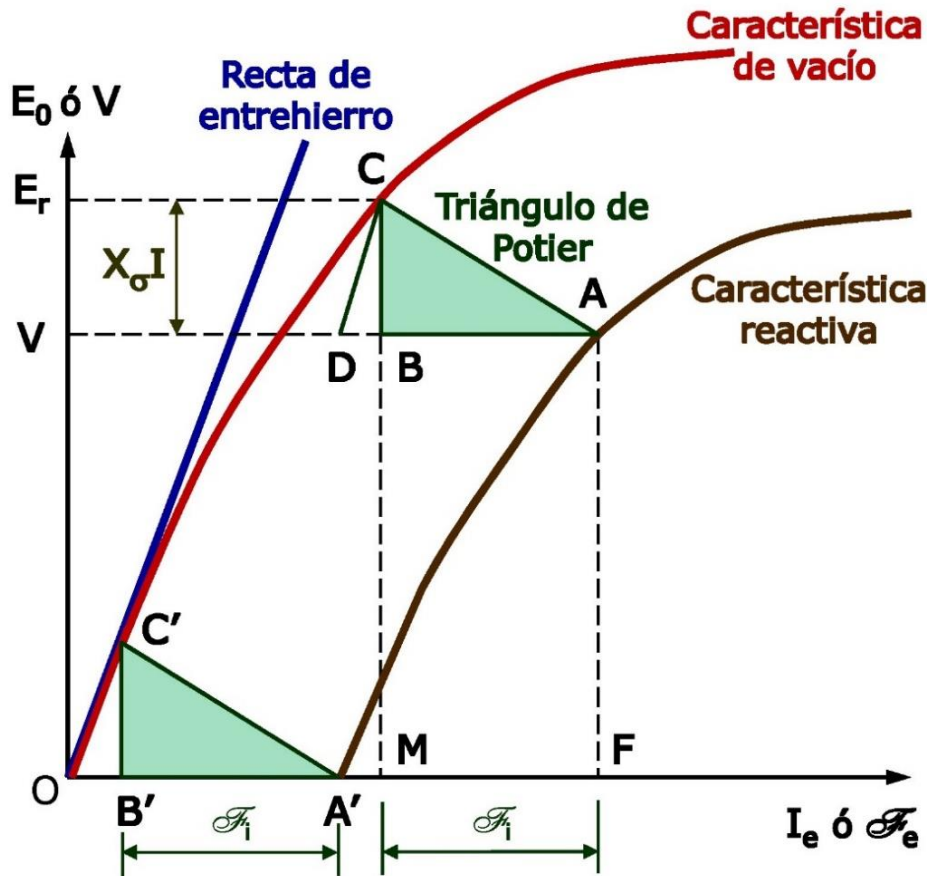


Fig. 50: Triángulo de Potier

Como ya se ha mencionado anteriormente (página 35), la característica de vacío también se puede considerar que relaciona la f.e.m. E_r con la f.m.m. $\mathcal{F}_r$. Así pues, según las relaciones (51) y (52), si se parte de un punto C de la característica de vacío (cuyas coordenadas son $(\mathcal{F}_r, E_r)$) se puede obtener el punto A (de coordenadas $(\mathcal{F}_e, V)$) correspondiente de la característica reactiva si se resta la cantidad $X_\sigma I$ en el eje vertical y si se suma la f.m.m. $\mathcal{F}_1$ en el eje horizontal (Fig. 50). Luego, si se va desplazando el vértice C del triángulo ABC a lo largo de la curva de vacío, el vértice A va dibujando la curva reactiva. El triángulo rectángulo ABC , cuya base es la f.m.m. $\mathcal{F}_1$ y cuya altura es la caída de tensión $X_\sigma I$ en la reactancia de dispersión, es el **triángulo de Potier**. Este triángulo aparece sombreado en la Fig. 50.

Se acaba de ver que si se conoce el triángulo de Potier se puede obtener la característica reactiva a partir de la de vacío; pero normalmente va a ser más interesante realizar el proceso inverso: obtener el triángulo de Potier partiendo de las características de vacío y reactiva.

Para ello en la Fig. 50 se advierte que la característica reactiva también se obtiene desplazando el vértice C del triángulo ADC a lo largo de la curva de vacío. Este triángulo se convierte en el $A'OC'$ cuando se ha desplazado a su posición inferior, de lo cual se deduce que el lado DC (o el OC') es paralelo a la recta del entrehierro y que la base DA (o OA') es igual a la corriente de excitación I_{ecorto} en el ensayo de cortocircuito.

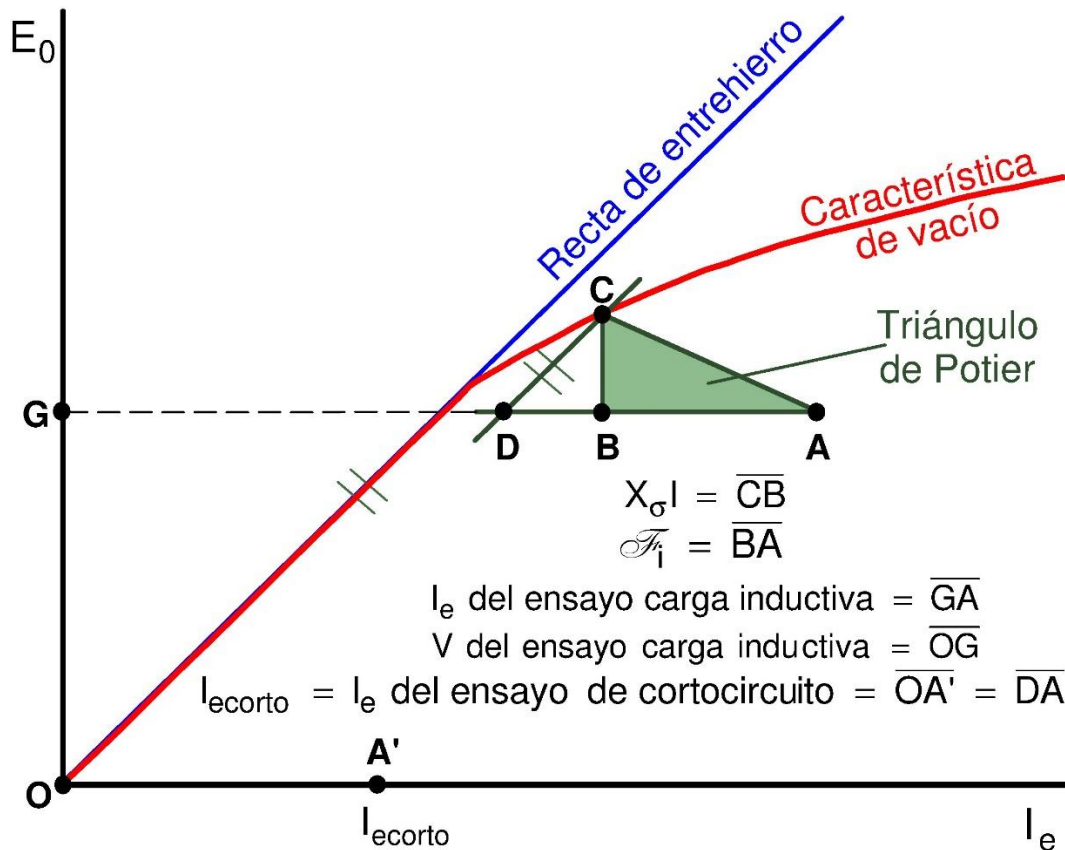


Fig. 51: Obtención del triángulo de Potier

Para determinar el triángulo de Potier basta con conocer la característica de vacío y sólo dos puntos de la característica reactiva (Fig. 51). Uno de ellos es el punto **A'** donde la tensión es nula y que se determina experimentalmente mediante un ensayo de cortocircuito. El otro es el punto **A** en el que la máquina ya está saturada y que se obtiene de un ensayo con carga inductiva pura. Es decir, para obtener el triángulo de Potier es preciso haber realizado el ensayo de vacío y los ensayos de cortocircuito y de carga inductiva, ambos con la misma corriente de inducido. Normalmente esta corriente es la asignada I_N y el ensayo con carga inductiva pura se elige para que corresponda, además, a la tensión asignada V_N . Nótese que sólo es preciso realizar un ensayo con carga inductiva pura con un único valor de I_e , ya que no se precisa disponer de todos los puntos de la característica reactiva.

El proceso para dibujar el triángulo de Potier aparece reflejado en la Fig. 51 y es así:

- Se marcan los puntos **A** (V e I_e del ensayo con carga inductiva pura) y **A'** (I_e del ensayo de cortocircuito).
- Por el punto **A** se dibuja una recta horizontal.
- Desde **A** se lleva hacia la izquierda una distancia **DA** igual a la **OA'**. Así se obtiene el punto **D**.
- Por **D** se traza una paralela a la recta de entrehierro, que corta a la característica de vacío en el punto **C**.
- Se dibuja una vertical por el punto **C** que corta a la horizontal **AD** en el punto **B**.
- El triángulo rectángulo **ABC** es el triángulo de Potier.

Si se dispone de ensayos de cortocircuito y con carga inductiva pura con distintas corrientes de inducido, se procede teniendo en cuenta que la característica de cortocircuito es lineal. Conocido un ensayo de cortocircuito para una corriente de inducido dada, por interpolación lineal se puede calcular la corriente de excitación de otro ensayo de cortocircuito en el que la corriente de inducido sea la misma que se ha utilizado para el ensayo con carga inductiva pura.

La base del triángulo de Potier obtenido es la f.m.m. $\mathcal{F}_i$ originada por el inducido cuando lo recorre una corriente I igual a la usada en los ensayos de cortocircuito y con carga inductiva pura. La altura del triángulo de Potier dividida por la corriente de inducido I utilizada en los ensayos de cortocircuito y de carga reactiva da la **reactancia de Potier**, que es prácticamente igual a la reactancia de dispersión X_σ (es ligeramente mayor que X_σ). En este texto se va a considerar que ambas reactancias, de Potier y de dispersión, son iguales y a ambas se las denominará X_σ .

Método de Potier

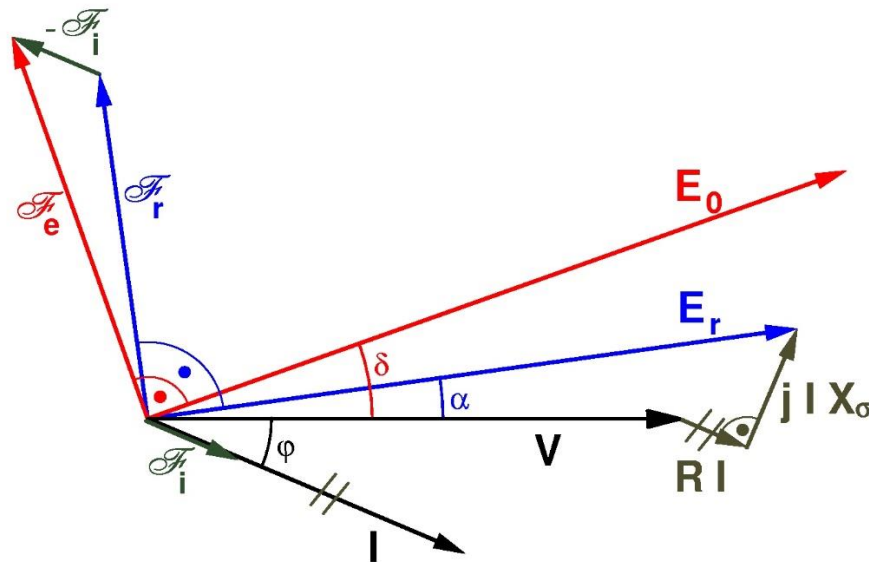


Fig. 52: Diagrama fasorial de un alternador de rotor cilíndrico (diagrama de Potier)

El método de Potier es un método de análisis de máquinas síncronas no lineal que se basa en el diagrama fasorial de Potier que se mostró en la Fig. 31 y que también se representa en la Fig. 52. En este diagrama se calcula la f.m.m. de excitación $\mathcal{F}_e$ aplicando el principio de superposición a las f.m.m.s, lo que está reflejado en la relación (17).

Aunque este método se desarrolló inicialmente para máquinas de rotor cilíndrico, en la práctica también proporciona resultados suficientemente precisos cuando se aplica en máquinas de polos salientes.

En lo que sigue se va a distinguir entre la corriente y la f.m.m. de inducido cuando el alternador alimenta la carga a analizar y la corriente y la f.m.m. de inducido en los ensayos de cortocircuito y con carga inductiva pura. En el primer caso (carga a analizar) se usará la nomenclatura I y $\mathcal{F}_i$ y en el segundo caso (ensayos) se usará la designación I' y $\mathcal{F}'_i$.

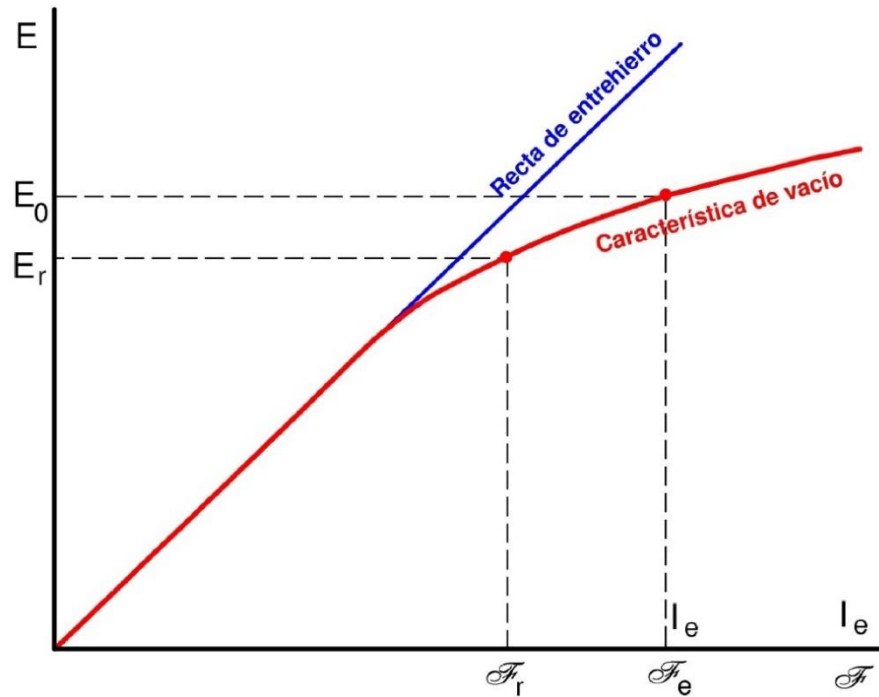


Fig. 53: Uso de la característica de vacío en el método de Potier

Es evidente que la amplitud $\mathcal{F}_i$ de la f.m.m. de reacción de inducido es proporcional a la corriente I del inducido. Esto permite obtenerla por proporción lineal con la base del triángulo de Potier, la cual es el valor de la f.m.m. $\mathcal{F}_i'$ cuando la corriente es la de los ensayos I' .

Teniendo en cuenta todo esto y tomando al fasor de tensión $\bar{V}$ como referencia del diagrama fasorial (Fig. 52), a continuación se va explicar cómo el método de Potier permite obtener la corriente de excitación I_e necesaria para conseguir que el alternador síncrono tenga la tensión V en bornes del inducido cuando tiene conectada una carga que da lugar a una corriente de inducido I con un factor de potencia $\cos \varphi$:

- Se empieza dibujando el triángulo de Potier mediante el método explicado en el apartado anterior (página 50). De este triángulo se obtienen la reactancia de Potier X_σ y la f.m.m. de reacción de inducido $\mathcal{F}_i'$ cuando la corriente es la de los ensayos I' .
- Se calculan la f.e.m. resultante E_r y el ángulo α como se indica en la Fig. 21, en la Fig. 52 y en la relación (15), que se repite seguidamente:

$$\bar{E}_r = E_r \angle \alpha = \bar{V} + \bar{I} (R + j X_\sigma) \quad (53)$$

- Se obtiene la amplitud $\mathcal{F}_r$ de la f.m.m. resultante entrando con el valor eficaz E_r de la f.e.m. resultante en el eje vertical de la característica de vacío (Fig. 53).
- La f.m.m. de reacción de inducido $\mathcal{F}_i$ para la corriente I se calcula a partir de la f.m.m. $\mathcal{F}_i'$ obtenida mediante el triángulo de Potier:

$$\mathcal{F}_i = \frac{I}{I'} \cdot \mathcal{F}_i' \quad (54)$$

- El fasor de f.m.m. resultante $\overline{\mathcal{F}}_r$ está adelantado 90° ($\pi/2$ radianes) respecto al fasor de f.e.m. resultante $\overline{E}_r$ y el fasor de f.m.m. de reacción de inducido $\overline{\mathcal{F}}_i$ está en fase con el de corriente $\bar{I}$. Luego, queda que:

$$\overline{\mathcal{F}}_r = \mathcal{F}_r \left| \alpha + \frac{\pi}{2} \right. \quad \overline{\mathcal{F}}_i = \mathcal{F}_i \left| \mp \varphi \right. \quad (55)$$

-: inductivo; +: capacitivo

En la segunda de las expresiones (55) se usa el signo – con cargas de factor de potencia inductivo y el signo + para cargas capacitivas.

- El fasor de f.m.m. de excitación $\overline{\mathcal{F}}_e$ se obtiene aplicando el principio de superposición:

$$\overline{\mathcal{F}}_e = \mathcal{F}_e \left| \delta + \frac{\pi}{2} \right. = \overline{\mathcal{F}}_r - \overline{\mathcal{F}}_i \quad (56)$$

- El módulo de $\overline{\mathcal{F}}_e$ es la f.m.m. $\mathcal{F}_e$ del inductor, la cual está medida como corriente de excitación I_e (ver la explicación de la página 35 y siguientes). Es decir, este módulo es directamente el valor de la corriente de excitación I_e buscada.

Por otra parte, el fasor $\overline{\mathcal{F}}_e$ es perpendicular al fasor $\overline{E}_0$ de la f.e.m. de vacío (Fig. 52), por lo que su argumento es igual a $(\delta + \pi/2)$. De ahí se puede obtener el ángulo de par δ que define la dirección de $\overline{E}_0$.

- Si también se desea conocer el valor eficaz E_0 de la f.e.m. de vacío basta con entrar con la corriente de excitación I_e en el eje de abscisas de la característica de vacío, como se muestra en la Fig. 53.

MÉTODO ASA

El método ASA³ es un método de análisis no lineal con una precisión similar al método de Potier.

Si se desea que una máquina síncrona proporcione una tensión V cuando tiene conectada una carga que da lugar a una corriente I con un factor de potencia $\cos \varphi$, el método ASA asume que la f.m.m. de excitación necesaria si la máquina no se saturase es igual a la combinación de la f.m.m. que da lugar a la corriente I cuando la tensión es nula y de la f.m.m. que origina la tensión V cuando la corriente de inducido es nula. La

³ ASA es el acrónimo de la *American Standard Association* que actualmente es el *ANSI American National Standards Institute*.

primera de estas f.m.m.s se obtiene de la característica de cortocircuito (pues en el ensayo de cortocircuito la máquina no se satura) y la segunda se obtiene de la recta de entrehierro. Como la máquina sí que se satura, para obtener el mismo campo magnético en el entrehierro que cuando no hay saturación hay que añadir una f.m.m. adicional.

Como ya se ha citado varias veces en este texto, las f.m.m.s se miden como corrientes de excitación (ver la página 35 y siguientes), por lo que ASA habla directamente de corrientes de excitación y no menciona f.m.m.s.

Por lo tanto, el método ASA se basa en combinar tres corrientes de excitación: I_{ecorto} , que da lugar a la corriente I si la tensión es nula y la máquina no se satura; I_{evc} , que origina la tensión V si la corriente es nula y no hay saturación e I_{es} , que es la corriente de excitación adicional para tener en cuenta el efecto de la saturación magnética.

Aunque en la explicación de este método se va a trabajar sobre la característica de cortocircuito, realmente no hace falta dibujarla. Ya que se trata de una recta que pasa por el origen, un punto cualquiera de ella se puede determinar analíticamente por interpolación lineal con el punto obtenido en el ensayo de cortocircuito. En lo que sigue se usará la siguiente nomenclatura para las magnitudes medidas en el ensayo de cortocircuito: la corriente del inducido es I'_{corto} y la de excitación es I'_{ecorto} .

Así pues, si se adopta el fasor de tensión $\bar{V}$ como referencia del diagrama fasorial (Fig. 54), el método ASA dice que para determinar la corriente de excitación I_e necesaria para obtener la tensión V cuando por las fases del inducido circulan corrientes equilibradas de valor eficaz I y factor de potencia $\cos \varphi$ hay que seguir el siguiente procedimiento:

- Se calcula la f.e.m. resultante E_r como se indica en la Fig. 21, en la Fig. 54 y en la relación (15), que se repite seguidamente:

$$\bar{E}_r = \bar{V} + \bar{I}(R + jX_\sigma) \quad (57)$$

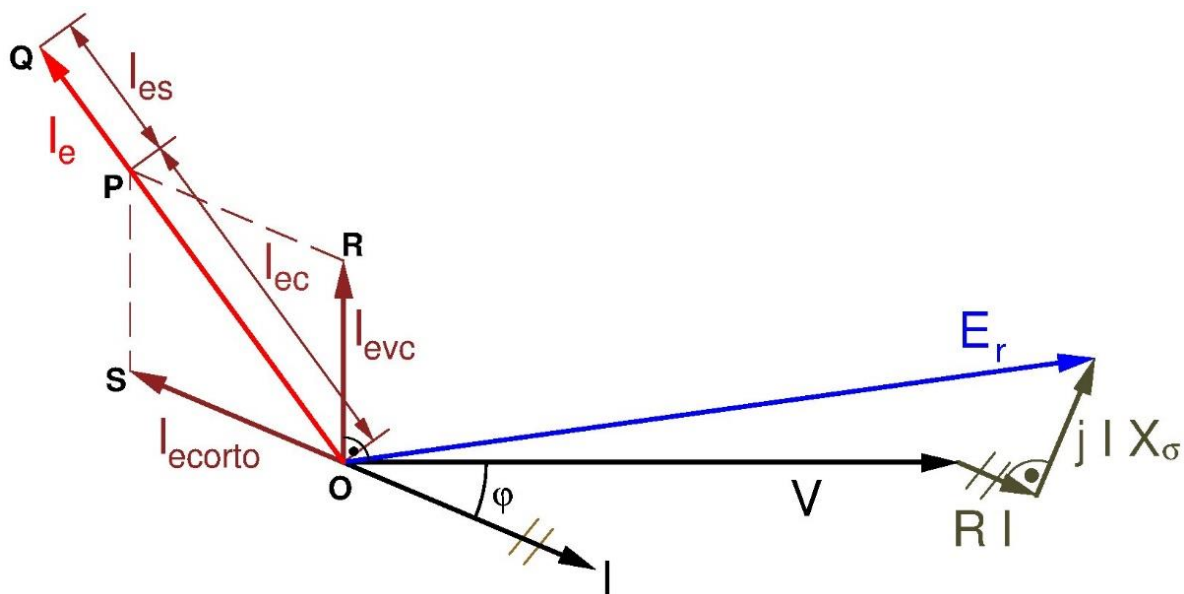


Fig. 54: Diagrama fasorial de un alternador de rotor cilíndrico según ASA

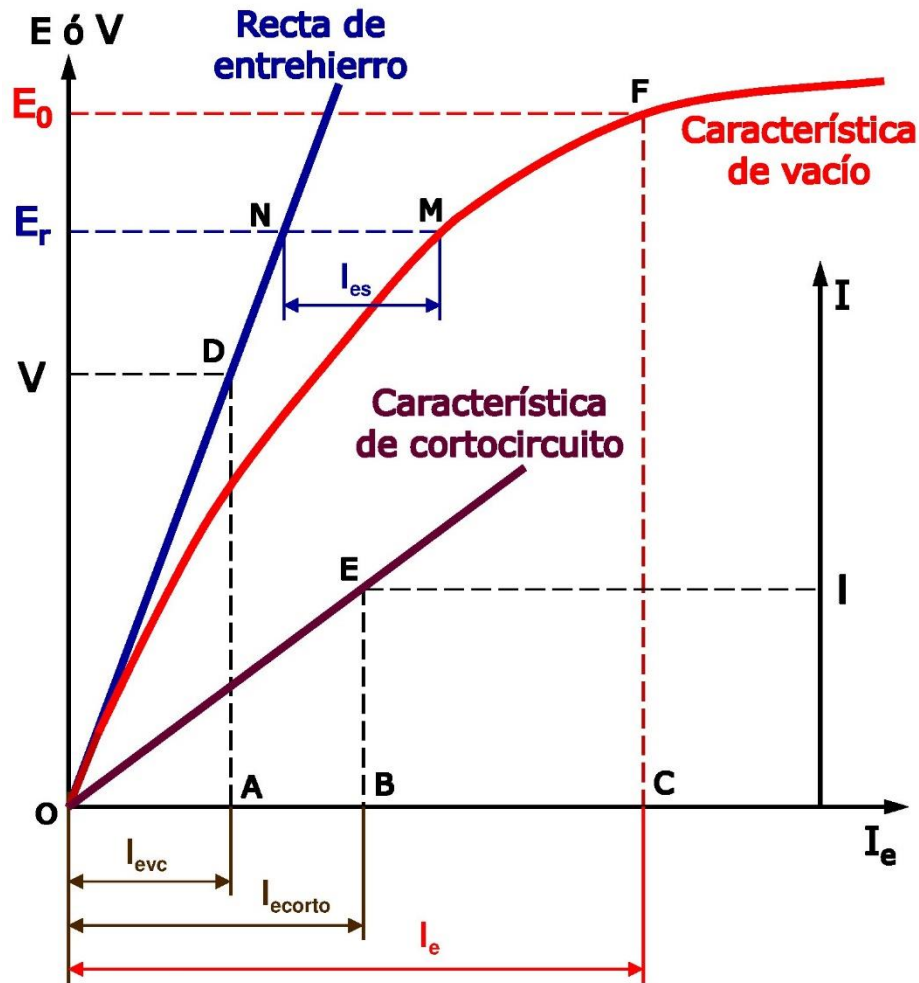


Fig. 55: Uso de las características de vacío y de cortocircuito en el método ASA

- Se obtiene la corriente de excitación I_{evc} necesaria para producir la tensión V cuando la corriente es nula y no hay saturación entrando con el valor eficaz V de la tensión en el eje vertical de la recta de entrehierro (punto **D** de la Fig. 55).
- La corriente de excitación I_{ecorto} necesaria para producir la corriente I cuando la tensión es nula y no hay saturación se obtiene de la característica de cortocircuito (punto **E** de la Fig. 55).

Dado que la característica de cortocircuito es una línea recta, esta corriente I_{ecorto} también se puede calcular analíticamente partiendo de los datos del ensayo de cortocircuito (I'_{corto} e I'_{ecorto}):

$$I_{ecorto} = \frac{I}{I'_{corto}} \cdot I'_{ecorto} \quad (58)$$

- El fasor $\bar{I}_{evc}$ se dibuja adelantado 90° ($\pi/2$ radianes) respecto al fasor de tensión $\bar{V}$ y el fasor $\bar{I}_{ecorto}$ se coloca en oposición de fase con el de corriente $\bar{I}$. Luego, si se toma al fasor de tensión $\bar{V}$ como referencia del diagrama fasorial (Fig. 54), queda que:

$$\bar{I}_{\text{evc}} = I_{\text{evc}} \left| \frac{\pi}{2} \right| \quad \bar{I}_{\text{ecorto}} = I_{\text{ecorto}} \left| \pi \mp \varphi \right| \quad (59)$$

-: inductivo; +: capacitivo

En la segunda de las expresiones (59) se usa el signo – con cargas de factor de potencia inductivo y el signo + para cargas capacitivas.

- La corriente de excitación que se necesitaría si no hubiera saturación se denomina I_{ec} . Su fasor $\bar{I}_{\text{ec}}$ se obtiene por superposición de los fasores $\bar{I}_{\text{evc}}$ e $\bar{I}_{\text{ecorto}}$ (Fig. 54):

$$\bar{I}_{\text{ec}} = \bar{I}_{\text{evc}} + \bar{I}_{\text{ecorto}} \quad (60)$$

- La corriente de excitación adicional para tener en cuenta la saturación, I_{es} , se calcula entrando con la f.e.m. resultante E_r (que ya se calculó al principio mediante la relación (57)) en el eje vertical de la característica de vacío y trazando una recta horizontal. La distancia, medida en la escala del eje de abscisas, entre los puntos donde esta horizontal corta a la recta de entrehierro y a la característica de vacío es I_{es} (distancia entre los puntos **N** y **M** en la Fig. 55).
- Por último, la corriente de excitación I_e necesaria teniendo en cuenta la saturación se obtiene sumando aritméticamente las corrientes I_{ec} e I_{es} (Fig. 54):

$$I_e = I_{\text{ec}} + I_{\text{es}} \quad (61)$$

- Si también se desea conocer el valor eficaz E_0 de la f.e.m. de vacío basta con entrar con la corriente de excitación I_e en el eje de abscisas de la característica de vacío, como se muestra en el punto **F** de la Fig. 55.

LA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES

Teoría de las dos reacciones o de Blondel

En los apartados anteriores de este texto se ha estudiado la máquina síncrona cilíndrica. Este apartado se dedica al análisis de la máquina de polos salientes.

Aunque se realice un análisis lineal de la máquina, en el que se acepta que las piezas de hierro no se saturan (o, a lo sumo, tienen una saturación constante), el hecho de que el entrehierro ahora es variable hace que la reluctancia con que se va a encontrar la f.m.m. $\mathcal{F}_i$ no sea constante y dependa de la dirección que tenga dicha f.m.m. La dirección de la f.m.m. $\mathcal{F}_i$ depende del factor de potencia de la corriente del inducido.

Además, el entrehierro variable provoca que las distribuciones espaciales de la f.m.m. y de la inducción magnética en el entrehierro no tengan la misma forma. El primer

armónico de f.m.m. da lugar a una distribución de la inducción en el entrehierro que no es perfectamente sinusoidal. Para el estudio de la máquina se despreciará esta deformación de la inducción con respecto a la f.m.m. y sólo se tendrán en cuenta los primeros armónicos de las distribuciones espaciales en el entrehierro de estas magnitudes. Por lo tanto, se considerará que la f.m.m. y la inducción magnética varían sinusoidalmente a lo largo del entrehierro.

Salvo en casos particulares, ahora los primeros armónicos de las distribuciones espaciales en el entrehierro de la f.m.m. de reacción de inducido $\mathcal{F}_i$ y de la inducción magnética que origina no están en fase. En efecto, las líneas de campo magnético tienden a orientarse hacia las zonas de menor reluctancia; es decir, hacia los polos salientes. Esto hace desviarse a las líneas de campo magnético de la dirección que, en principio, la f.m.m. $\mathcal{F}_i$ pretende que tengan. Por lo tanto, al no estar en fase la inducción y la f.m.m. del entrehierro, sucede que ya no se verifica la correlación fasorial entre los fasores espaciales de f.m.m. y los fasores temporales de flujo.

En resumen, en las máquinas de polos salientes existen dos fenómenos que complican su análisis: la variación de la reluctancia según la dirección espacial y la desviación de las líneas de campo respecto a la dirección que pretende darles la f.m.m.

Afortunadamente, existen dos direcciones particulares en las que la f.m.m. y la inducción magnética están en fase: la dirección de los polos salientes y la dirección a 90° eléctricos de la anterior, justo a mitad de camino entre dos polos salientes consecutivos. En el primer caso, tanto la f.m.m. como los polos salientes pretenden que las líneas de campo se dirijan según la dirección de los polos, por lo que ambas magnitudes, inducción magnética y f.m.m., están en fase (Fig. 56a). En el segundo caso, la f.m.m. pretende que las líneas de campo tengan una dirección equidistante de dos polos sucesivos, por lo que ambos polos anulan mutuamente su tendencia a desviar las líneas de campo hacia ellos y vuelve a suceder que la inducción magnética y la f.m.m. están en fase (Fig. 56b).

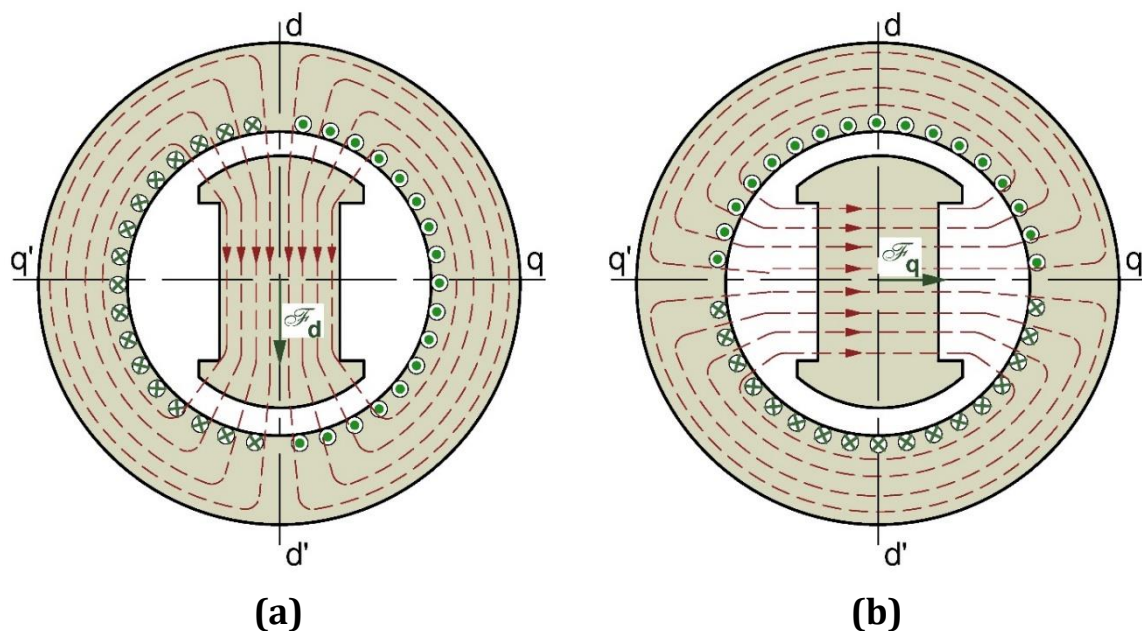


Fig. 56: Circuitos magnéticos en las máquinas de polos salientes:

a) Longitudinal

b) Transversal

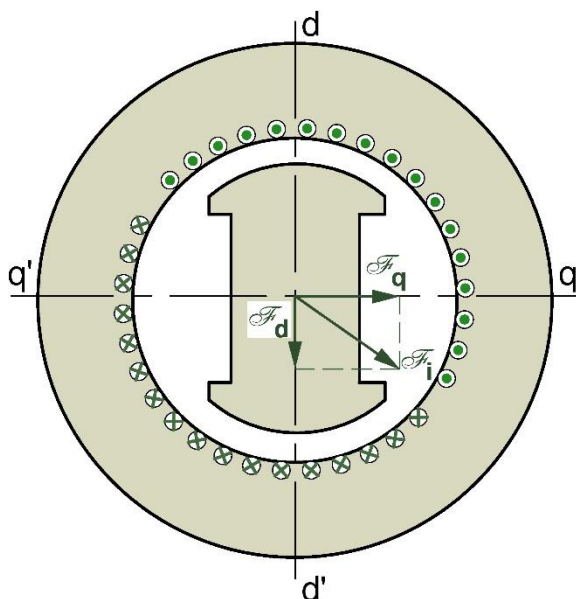


Fig. 57: Descomposición de la f.m.m. de reacción de inducido $\mathcal{F}_i$ en sus componentes $\mathcal{F}_d$ y $\mathcal{F}_q$, según los ejes d y q, respectivamente

Por esta razón, para cada par de polos se van a definir dos ejes fijos al rotor y, en consecuencia, girando a la velocidad de sincronismo: el **eje directo o longitudinal d-d'** en la dirección de los polos salientes y el **eje cuadratura o transversal q-q'** a 90° eléctricos del eje d-d' (Fig. 57).

Por lo tanto, el análisis de estas máquinas es más sencillo si las f.m.m.s se dividen en dos componentes según los ejes d y q. En esto se basa la **Teoría de las dos reacciones o de Blondel**.

En esta teoría, la corriente de inducido también se va a descomponer según los ejes d y q. La componente I_d es la que da lugar a la componente $\mathcal{F}_d$ según el eje d de la f.m.m. de inducido y la componente de la corriente I_q es la que origina la componte $\mathcal{F}_q$ de la f.m.m. de inducido.

Las f.e.m.s también se descompondrán según los ejes d y q según qué componente del campo magnético las origine.

Aún en el caso de un análisis lineal, donde se supone que la saturación es constante, las reluctancias según los ejes d y q son distintas (pero constantes si la saturación lo es), siendo mayor la reluctancia del eje q donde el entrehierro es más grande.

Método de Blondel. Diagrama fasorial de Doherty y Nickle

El método de Blondel es un método de análisis lineal de la máquina de polos salientes que es equivalente al método de Behn-Eschenburg en las máquinas de rotor liso.

Para aplicar este método se va a dibujar un diagrama fasorial de la máquina síncrona de polos salientes lineal, similar al de Behn-Eschenburg de la máquina cilíndrica (página 36), en el que todas las magnitudes se van a descomponer según los ejes longitudinal d y transversal q. Este es el **diagrama fasorial de Doherty y Nickle** (Fig. 58).

Recuérdese que en los diagramas fasoriales sucede que un fasor espacial de f.m.m. es paralelo al fasor temporal de la corriente que la origina y es perpendicular al fasor temporal de f.e.m. que genera.

La f.m.m. de excitación $\mathcal{F}_e$ siempre está orientada según el eje d, por lo que la f.e.m. E_0 que origina también corresponde al eje d.

Así, pues, en el diagrama fasorial (Fig. 58) los fasores se descompondrán así:

- Los fasores de f.m.m. $\mathcal{F}$ y de corriente de inducido $\bar{I}$ tienen sus componentes longitudinal y transversal perpendicular y paralela, respectivamente, al fasor de f.e.m. de vacío $\bar{E}_0$.
- Los fasores de f.e.m. $\bar{E}$ tienen sus componentes longitudinal y transversal paralela y perpendicular, respectivamente, al fasor de f.e.m. de vacío $\bar{E}_0$.

Trabajando de esta manera se cumplen las siguientes relaciones:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\mathcal{F}}_i &= \bar{\mathcal{F}}_d + \bar{\mathcal{F}}_q & \bar{\mathcal{F}}_r &= \bar{\mathcal{F}}_{rd} + \bar{\mathcal{F}}_{rq} & \bar{I} &= \bar{I}_d + \bar{I}_q \\ \bar{\mathcal{F}}_r &= \bar{\mathcal{F}}_e + \bar{\mathcal{F}}_i \rightarrow \bar{\mathcal{F}}_e = \bar{\mathcal{F}}_r - \bar{\mathcal{F}}_i \rightarrow \begin{cases} \bar{\mathcal{F}}_e = \bar{\mathcal{F}}_{rd} - \bar{\mathcal{F}}_d \\ \bar{\mathcal{F}}_{rq} = \bar{\mathcal{F}}_q \end{cases} \\ \bar{E}_r &= \bar{V} + \bar{I}(R + jX_\sigma) = \bar{V} + \bar{I}R + j\bar{I}_d X_\sigma + j\bar{I}_q X_\sigma \end{aligned} \right\} \quad (62)$$

De un modo similar al método de Behn-Eschenburg (página 36) se deduce que en este análisis lineal se puede aplicar el principio de superposición a las f.e.m.s y que el efecto de cada componente de la reacción de inducido equivale a la caída de tensión en una reactancia. En consecuencia, se obtiene que:

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_0 &= \bar{E}_r - \bar{E}_p = \bar{E}_r - \bar{E}_{pd} - \bar{E}_{pq} \\ -\bar{E}_{pd} &= jX_{pd} \bar{I}_d & -\bar{E}_{pq} &= jX_{pq} \bar{I}_q \\ \bar{E}_0 &= \bar{V} + \bar{I}R + j\bar{I}_d (X_\sigma + X_{pd}) + j\bar{I}_q (X_\sigma + X_{pq}) \end{aligned} \right\} \quad (63)$$

Luego se llega a una expresión equivalente a la (27) de la máquina cilíndrica:

$$\boxed{\bar{E}_0 = \bar{V} + \bar{I}R + j\bar{I}_d X_d + j\bar{I}_q X_q} \quad (64)$$

$$X_d = X_\sigma + X_{pd} \quad X_q = X_\sigma + X_{pq} \quad (65)$$

De estas expresiones se deduce que en las máquinas de polos salientes intervienen dos reactancias síncronas: la **reactancia síncrona longitudinal X_d** y la **reactancia síncrona transversal X_q** . De (64) también se deduce que el diagrama fasorial de la máquina de polos salientes es el de la Fig. 58.

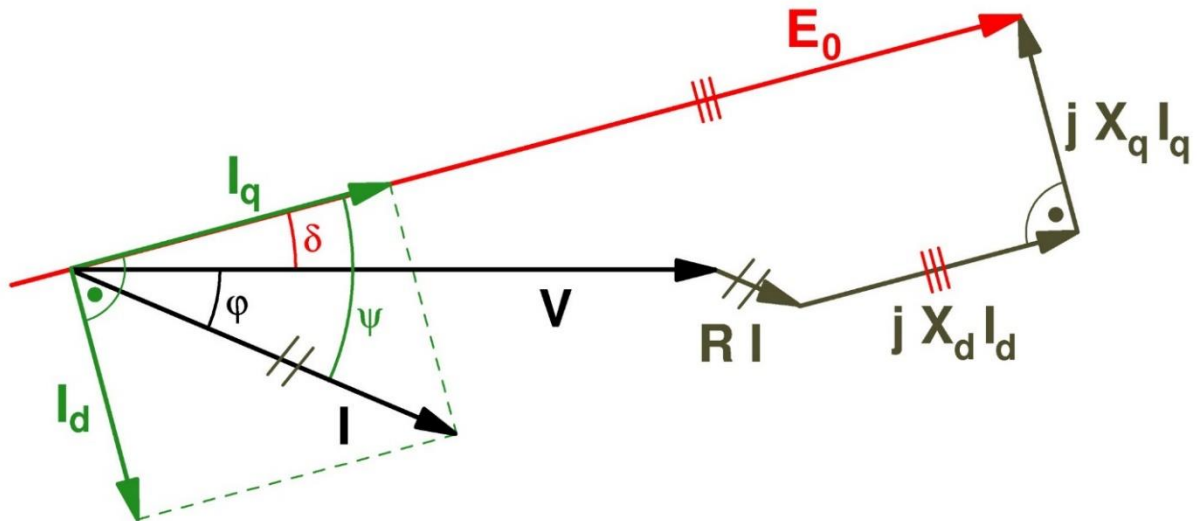


Fig. 58: Diagrama fasorial de Doherty y Nickle de una máquinas de polos salientes

En el caso de que la resistencia R de las fases del inducido sea despreciable, la proyección de la relación (64) sobre $\bar{E}_0$ da el siguiente resultado:

$$E_0 = V \cos \delta \pm I_d X_d \quad (66)$$

+: Inductivo; -: Capacitivo

En este expresión se utiliza el signo $+$ si la carga tiene un factor de potencia inductivo y el signo $-$ si es capacitiva.

Si no se desprecia la resistencia R , la proyección de (64) sobre $\bar{E}_0$ da el siguiente resultado:

$$E_0 = V \cos \delta + R I \cos (\delta \pm \varphi) \pm I_d X_d$$

+: Inductivo; -: Capacitivo

Para dibujar el diagrama fasorial de la Fig. 58 es preciso conocer de antemano el ángulo de par δ que define la dirección de la f.e.m. de vacío E_0 . Una vez conocido dicho ángulo es cuando se puede descomponer la corriente de inducido I en sus componentes I_d e I_q . Para determinar dicho ángulo δ antes de dibujar el diagrama fasorial de la Fig. 58 se usa la construcción gráfica mostrada en la Fig. 59.

En la construcción de la Fig. 59 se determina el segmento $\overline{OP}$, que si bien no es igual al fasor de f.e.m. de vacío $\bar{E}_0$, sí que tiene su misma dirección:

$$\overline{OP} = \bar{V} + \bar{I} R + j \bar{I} X_q \quad (67)$$

Nótese que en la Fig. 59 y en la expresión (67) no es preciso descomponer la corriente de I en sus componentes I_d e I_q , lo que no se podría hacer porque todavía no se conoce el ángulo de par δ .

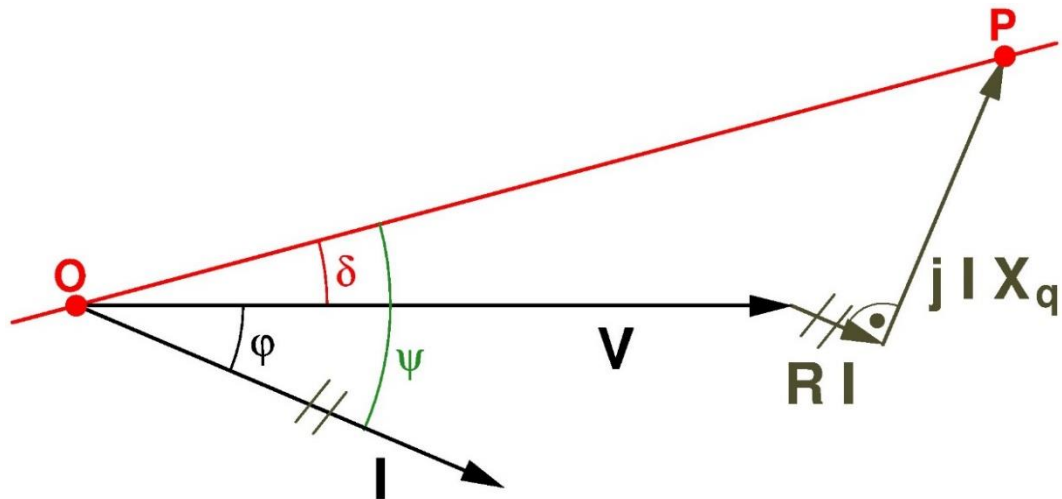


Fig. 59: Obtención del ángulo de par δ para conocer la dirección del fasor $\bar{E}_0$

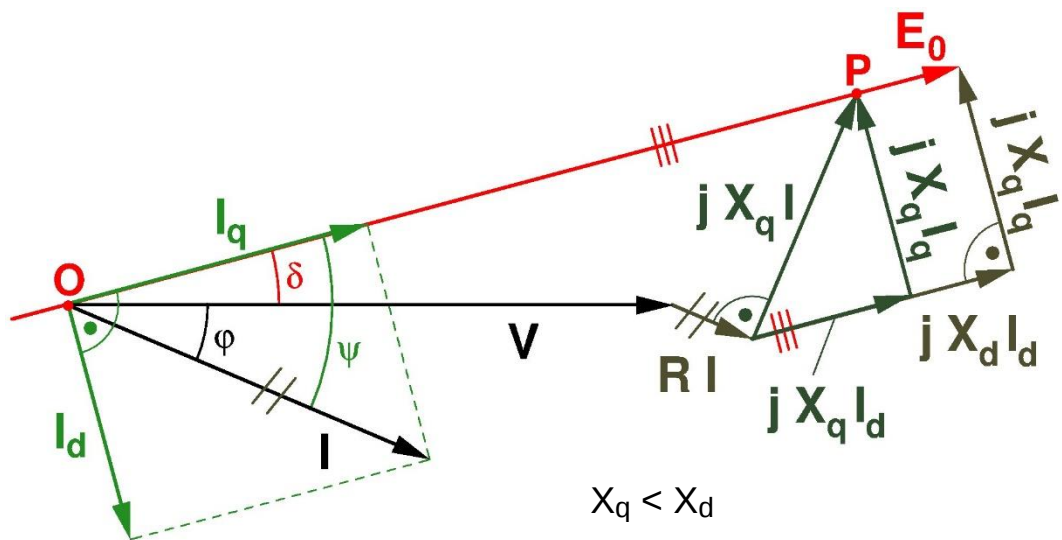


Fig. 60: Demostración de que el segmento $\overline{OP}$ y el fasor $\bar{E}_0$ tienen la misma dirección

La Fig. 60 demuestra que el segmento $\overline{OP}$ tiene la misma dirección que el fasor de f.e.m. de vacío $\bar{E}_0$.

Reactancias síncronas en la máquina de polos salientes

Se puede comprobar que en los ensayos de vacío, de cortocircuito y de carga reactiva el campo magnético está siempre en la dirección del eje longitudinal. Esto hace que en las máquinas de polos salientes la reactancia síncrona longitudinal X_d se pueda obtener mediante los mismos métodos que la reactancia síncrona X_s de las máquinas de rotor cilíndrico.

De hecho es habitual el usar también la nomenclatura X_d para referirse a la reactancia síncrona X_s de una máquina cilíndrica.

Por lo tanto, de un modo similar a lo que sucede en la máquina de rotor liso, habrá una **reactancia síncrona longitudinal no saturada $X_d(\text{no sat})$** , que es constante, y una **reactancia síncrona longitudinal saturada X_d** , variable en función de E_0 o de I_e . Estas reactancias se calculan a partir de los ensayos de vacío y de cortocircuito de la misma forma que se explicó en la página 41 para la reactancia síncrona X_s de las máquinas cilíndricas.

La reactancia síncrona transversal X_q se refiere a un circuito magnético con un entrehierro grande. Esto hace que la reactancia X_q sea menor que la reactancia X_d ($X_q < X_d$) y que a la reactancia síncrona transversal X_q apenas le influya el grado de saturación del circuito magnético y, por lo tanto, se la considere constante.

X_q se obtiene mediante unos ensayos específicos, como el ensayo de deslizamiento o el ensayo de máxima corriente reactiva (véanse los textos [1] y [3]), cuya descripción se sale del alcance de este texto.

Análisis lineal con polos salientes mejorado

Se puede realizar un análisis lineal de la máquina síncrona de polos salientes más preciso que el del método de Blondel que se acaba de explicar. Para ello se sigue un procedimiento similar al explicado para la máquina de rotor cilíndrico en la página 45 añadiéndole la descomposición de las magnitudes de la máquina según los ejes d y q.

Este método se basa en las siguientes hipótesis:

- En las máquinas síncronas de polos salientes el entrehierro según el eje q es grande por lo que se desprecia el efecto de la saturación magnética según este eje. Por lo tanto, se acepta que la reactancia X_q es constante.
- La saturación de la máquina según el eje d sólo depende de la componente d de la f.m.m. ($\mathcal{F}_{rd}$). Es decir, se desprecia el efecto de la componente q de la f.m.m. sobre la saturación de la máquina según el eje d. Por lo tanto, el campo magnético en el eje d sólo depende de la f.m.m. del eje d y no está afectado por la componente de la f.m.m. sobre el eje q.
- El campo magnético en el eje d se estudia mediante la característica de vacío, la cual se admite que relaciona f.m.m.s y f.e.m.s del eje d. En el método lineal mejorado se sustituye la característica de vacío por la **recta de saturación constante** que corta a la curva de vacío en el punto de coordenadas ($\mathcal{F}_{rd}$, E_{rd}), como se aprecia en la Fig. 62.

Así pues, según el análisis lineal con polos salientes mejorado para determinar la corriente de excitación I_e necesaria para obtener la tensión V cuando por las fases del inducido circulan corrientes equilibradas de valor eficaz I y factor de potencia $\cos \varphi$ hay que seguir el siguiente procedimiento:

- A partir de X_q , que es constante e independiente de la saturación, se determina la dirección del fasor de f.e.m. de vacío $\bar{E}_0$ de igual manera que en el método de Blondel; es decir, mediante la construcción gráfica de la Fig. 59 de la que se deduce la relación (67), que se repite seguidamente:

$$\overline{OP} = \overline{V} + \overline{I} R + j \overline{I} X_q \quad (68)$$

Esto permite conocer el ángulo de par δ .

- Seguidamente se obtienen las componentes I_d e I_q de la corriente del inducido de igual manera que en el método de Blondel (Fig. 58).
- Se calcula la f.e.m. resultante E_r como siempre. Esto es, mediante la Fig. 21 o la Fig. 61 y la fórmula (15), que se repite a continuación:

$$\overline{E}_r = \overline{V} + \overline{I} (R + j X_\sigma) \quad (69)$$

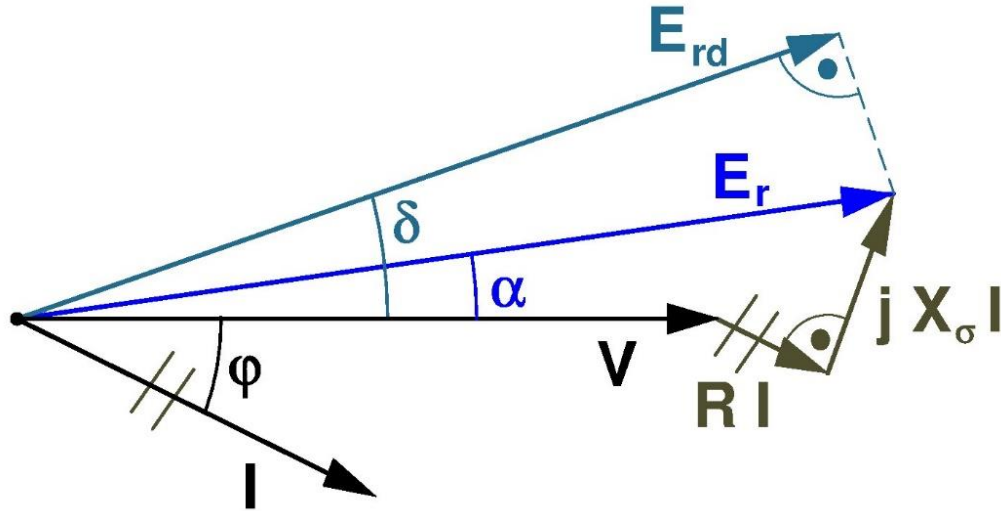


Fig. 61: Obtención de la f.e.m. resultante E_r y de su componente E_{rd} según el eje d

- Se obtiene la componente E_{rd} de la f.e.m. resultante E_r según el eje d (Fig. 61):

$$E_{rd} = E_r \cos(\delta - \alpha) \quad (70)$$

- Entrando con E_{rd} en la curva de vacío (Fig. 62) se obtiene E_{rdc} en la recta de entrehierro y se calcula el factor de saturación k_{srd} según el eje d :

$$k_{srd} = \frac{E_{rdc}}{E_{rd}} \quad (71)$$

- Ahora se obtiene la reactancia síncrona longitudinal X_{db} :

$$X_{db} = X_\sigma + X_{pdb} = X_\sigma + \frac{X_{pd}(\text{no sat})}{k_{srd}} = X_\sigma + \frac{X_d(\text{no sat}) - X_\sigma}{k_{srd}} \quad (72)$$

- Seguidamente se determina la f.e.m. de vacío en la recta de saturación constante E_{0b} (Fig. 62) de forma similar al método de Blondel de la página 60 y siguientes, pero empleando la reactancia síncrona longitudinal X_{db} que se acaba de calcular mediante la relación (72):

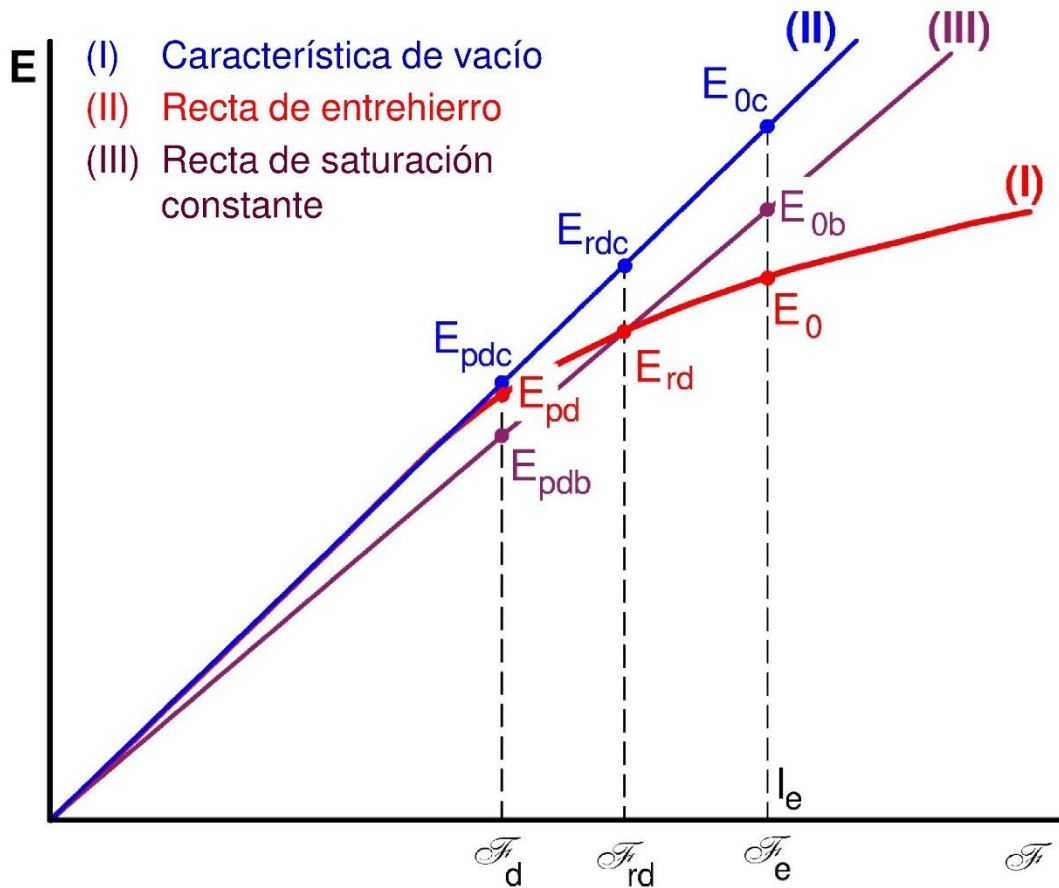


Fig. 62: Curvas para el análisis lineal mejorado de una máquina síncrona de polos salientes

$$\bar{E}_{0b} = \bar{V} + R \bar{I} + j X_{db} \bar{I}_d + j X_q \bar{I}_q \quad (73)$$

En el caso de que la resistencia R sea despreciable, proyectando la expresión anterior sobre el fador $\bar{E}_{0b}$ se obtiene esta relación de módulos:

$$E_{0b} = V \cos \delta \pm X_{db} I_d \quad (74)$$

+: Inductivo; -: Capacitivo

- A partir de la f.e.m. E_{0b} se puede obtener la f.e.m. E_{0c} sobre la recta de entrehierro (Fig. 62):

$$E_{0c} = k_{srd} \cdot E_{0b} \quad (75)$$

- Finalmente, entrando con E_{0c} en la recta de entrehierro se obtiene la f.e.m. de vacío E_0 (sobre la característica de vacío) y la corriente de excitación I_e (Fig. 62).

Adviértase que, aunque en la Fig. 62 se ha incluido la recta de saturación constante para explicar mejor este método, en realidad no hace falta dibujarla. Para aplicar el análisis lineal con polos salientes mejorado basta con utilizar una gráfica con la característica de vacío y la recta de entrehierro.

MÁQUINAS SÍNCRONAS.

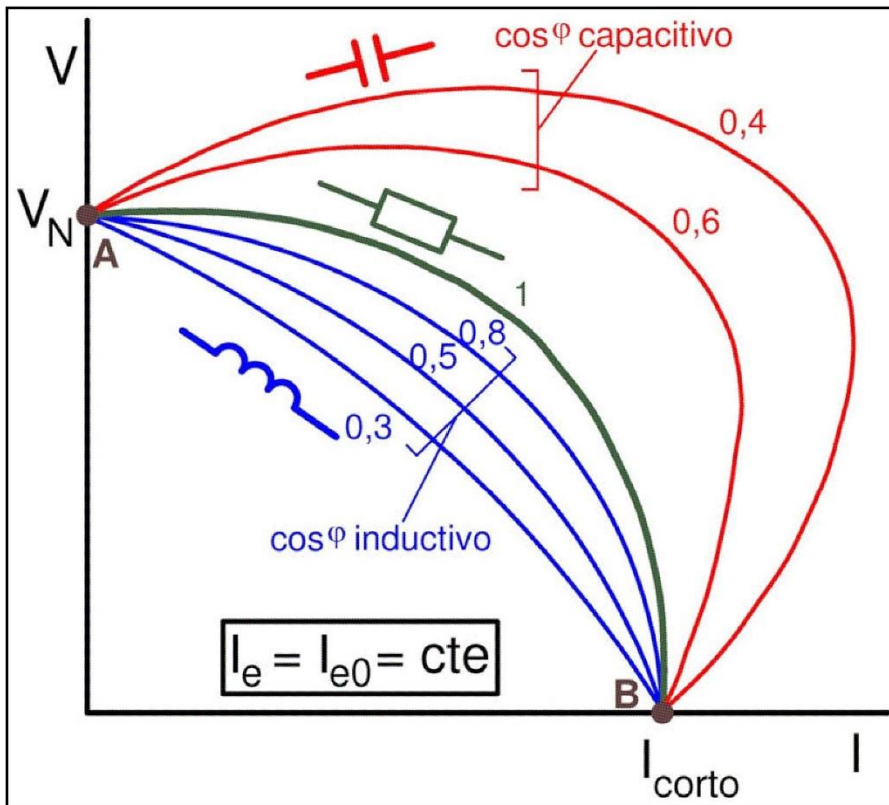
Funcionamiento como alternador aislado

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Reguladores de una máquina síncrona

- Un alternador síncrono dispone de dos controles básicos:
 - El **regulador de velocidad y potencia** del motor (turbina de vapor o hidráulica, motor diesel, etc.) que acciona al alternador.
 - El **regulador de la corriente de excitación I_e** con que se alimenta el inductor del alternador.
- En funcionamiento aislado, el regulador de velocidad mantiene constante la velocidad del grupo motor-alternador e igual a la de sincronismo. De esta manera se mantiene constante la frecuencia. La velocidad controla la frecuencia.
- El regulador de la excitación actúa para mantener constante la tensión V del inducido, aunque cambie la carga. Lo que hace este regulador es ir cambiando el valor de la f.e.m. E_0 (que se ajusta mediante I_e) de tal forma que la tensión V permanezca constante. La corriente I_e de excitación controla la tensión V del inducido.
- Las potencias activas y reactiva y, por lo tanto, el factor de potencia no lo controlan los reguladores del alternador. Estas magnitudes las impone la carga eléctrica que se conecte al alternador síncrono.

Características exteriores

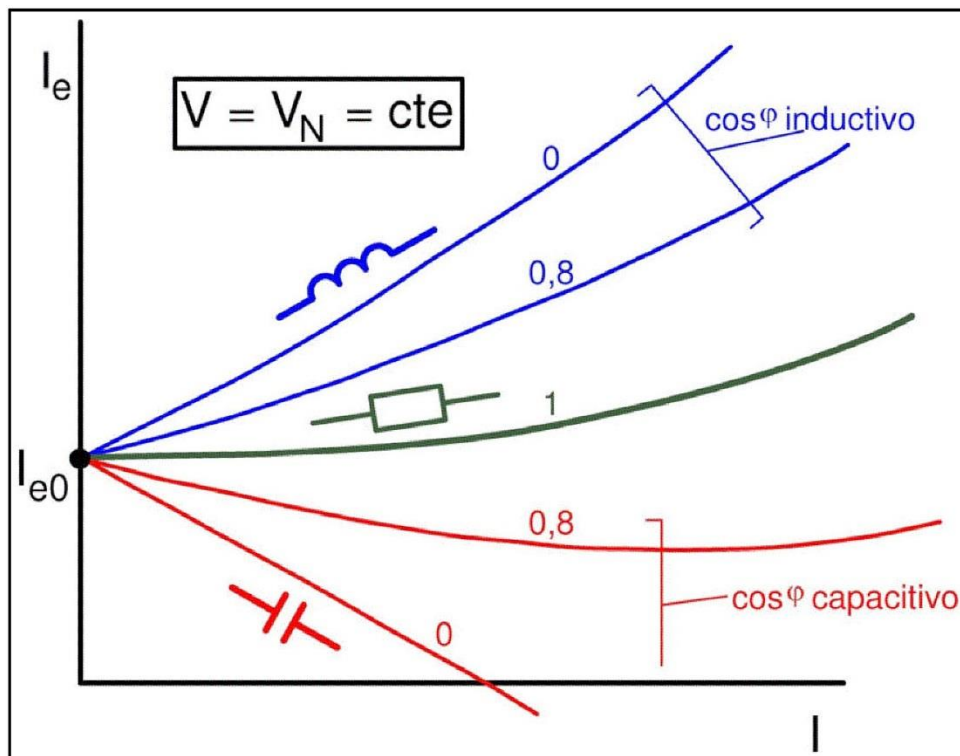


$$n = cte$$

$$I_e = cte$$

Cada curva es con $\cos \varphi$ constante y distinto al de las demás curvas.

Características de regulación



$$n = cte$$

$$V = cte$$

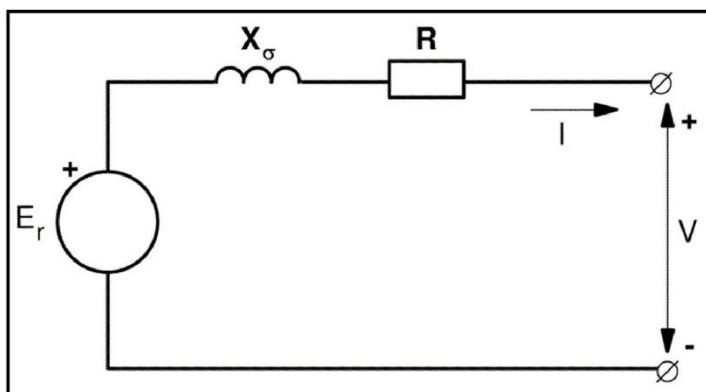
Cada curva es con $\cos \varphi$ constante y distinto al de las demás curvas.

Características exterior y de regulación (1)

- El comportamiento del regulador de la corriente de excitación de un alternador síncrono aislado se puede analizar mediante las características exterior y de regulación.
- La **característica exterior** es una curva que muestra cómo varía la tensión V del inducido en función de la corriente I del inducido cuando la velocidad n del rotor, el factor de potencia (f.d.p.) y la corriente de excitación I_e se mantienen constantes. Normalmente se representan juntas varias de estas características en una misma gráfica, todas para las mismas I_e y n , pero cada curva es para un f.d.p. diferente.
- La **característica de regulación** es una curva que indica cómo debe actuar el regulador de la corriente de excitación I_e para mantener la tensión V del inducido constante, aunque varíe la corriente de carga y/o su factor de potencia. Normalmente se representan juntas varias de estas características en una misma gráfica que muestran cómo debe variarse la corriente de excitación I_e para mantener constante la misma tensión V en función de la corriente I . En cada una de las curvas el f.d.p. se mantiene constante (pero distinto al de las demás curvas) y en todas ellas la velocidad n tiene el mismo valor constante.

Características exterior y de regulación (2)

- En las características exteriores representadas en este texto el valor constante de I_e es justamente I_{e0} , que es la I_e que hace que la tensión de vacío sea igual a la tensión asignada (o nominal) V_N .
- En las características de regulación mostradas en este texto el valor constante de la tensión V es justamente la tensión asignada V_N .
- Todas las características exteriores empiezan en el punto **A** (máquina en vacío) y terminan en el punto **B** (máquina en cortocircuito).



$$\bar{E}_r = \bar{V} + \bar{I} (R + jX_\sigma)$$

$$E_r = 4,44 N f \xi_b \Phi_{rM}$$

Características exterior y de regulación (3)

- Con cargas **resistivas** e **inductivas** las características exteriores muestran que la tensión V disminuye a medida que aumenta la corriente I del inducido. Esto se debe a la caída de tensión que la corriente I provoca en la resistencia R y en la reactancia de dispersión X_σ de las fases del inducido y, sobre todo, a la disminución en la f.e.m. resultante E_r debida la reacción de inducido, transversal (carga resistiva) o desmagnetizante (carga inductiva). Esta disminución de V con la I es tanto más acusada cuanto más bajo es el factor de potencia, porque entonces la reacción de inducido es más desmagnetizante.
- Por lo tanto, en las características de regulación se indica como, con cargas resistivas e inductivas, el regulador de la excitación debe actuar para oponerse al descenso de V debido a la corriente I . Se aprecia que la corriente de excitación I_e (y consecuentemente la f.e.m. de vacío E_0) debe aumentar a medida que aumenta I . Esta variación debe ser tanto más acusada cuanto más bajo sea el factor de potencia de la carga.

Características exterior y de regulación (4)

- Con cargas **capacitivas** las características exteriores muestran que la tensión V inicialmente aumenta a medida que crece la corriente I del inducido. Esto es debido sobre todo al aumento de la f.e.m. resultante E_r provocado por la reacción de inducido magnetizante de las cargas capacitivas.
- Para corrientes I elevadas la saturación del circuito magnético de la máquina hace que la f.e.m. E_r ya apenas pueda crecer. En este caso las caídas propias internas de la máquina hacen que la tensión del inducido V empiece a disminuir.
- En las características de regulación se aprecia que para mantener constante la tensión V con cargas capacitivas se debe actuar variando la f.e.m. de vacío E_0 en sentido contrario a como V pretende variar con I . Para ello la corriente de excitación I_e (y consecuentemente E_0) inicialmente debe disminuir a medida que aumenta I . Sin embargo, para corrientes de carga I altas la corriente de excitación I_e debe empezar a crecer con la carga. La variación de I_e con I debe ser tanto más acusada cuanto más bajo sea el factor de potencia de la carga.

Regulador de velocidad (*governor*)

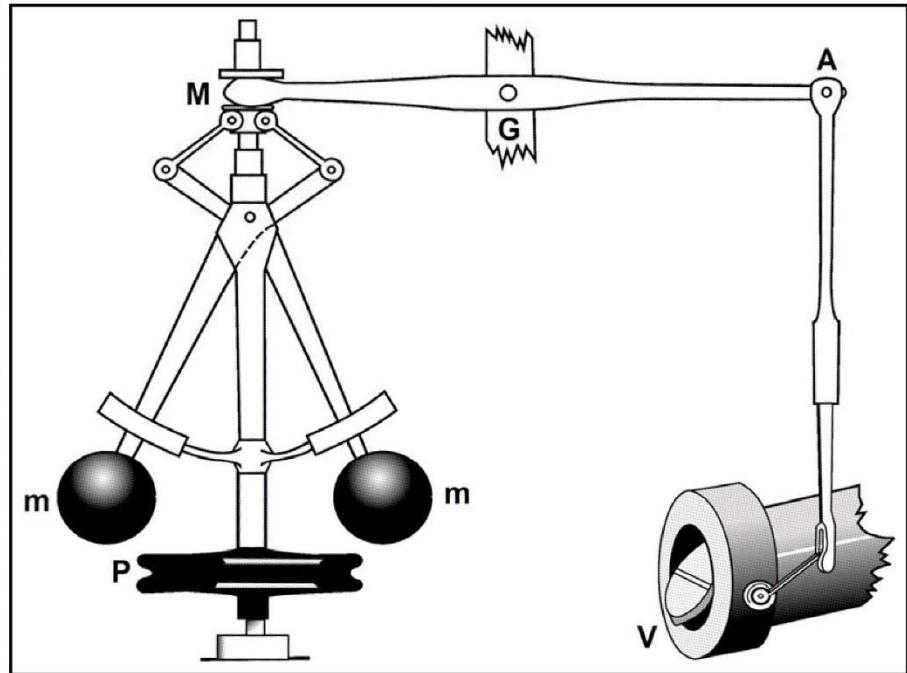
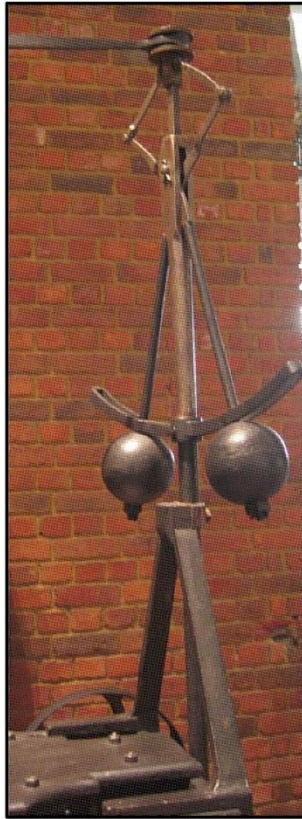
- El motor (turbina de gas, de vapor, hidráulica, motor Diesel, etc.) que acciona al alternador síncrono debe disponer de un regulador de velocidad que modifique la potencia suministrada por el motor para adaptarla a la que le demanda el alternador en función de la carga eléctrica conectada a sus bornes.
- Cuando se produce un aumento de la carga eléctrica, inicialmente el motor de accionamiento sigue proporcionando la misma potencia que estaba dando previamente (que ahora es inferior a la que le pide el alternador). Esto provoca que la velocidad empiece a disminuir, lo cual es detectado por el regulador de velocidad que aumenta la potencia del motor con lo que se vuelve a alcanzar el equilibrio entre las potencias suministrada por el motor y demandada por el alternador. Entonces la velocidad deja de variar y se estabiliza en un valor constante.
- A la inversa, cuando la carga eléctrica disminuye el sistema se acelera y aumenta su velocidad. El regulador de velocidad reacciona entonces reduciendo la potencia del motor de accionamiento y volviendo a equilibrar las potencias suministrada y demandada, lo que hace que la velocidad vuelva a estabilizarse en un valor constante.

Regulador centrífugo de Watt



(Fuente: Wikimedia Commons.
Foto tomada en el "Science
Museum" de Londres por
Mirko Junge)

Regulador centrífugo de Watt



(Fuente: Wikimedia Commons. Autor: M de Vicente)

(Fuente: Wikimedia Commons. Autor: Andy Dingley)

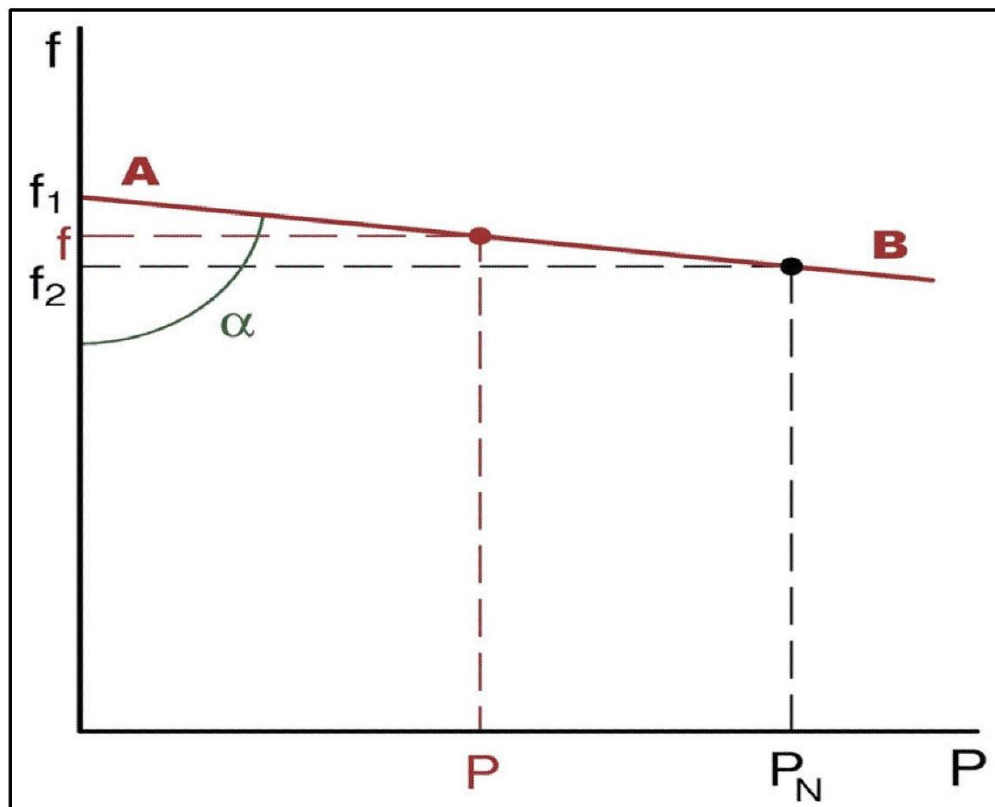
Regulador de Watt

- Uno de los reguladores de velocidad más conocidos es el **regulador de Watt**. En las figuras anteriores se muestran dos variantes de este regulador.
- En el regulador de Watt hay un cuadrilátero articulado con dos masas **m** que está girando a la misma velocidad que el sistema motor-alternador.
- La válvula **V** es la que suministra combustible, vapor, agua, etc. (según sea el caso) al motor de accionamiento y, por lo tanto, sirve para controlar la potencia de dicho motor.
- La fuerza centrífuga separa las dos masas **m**. Si la velocidad aumenta, las masas **m** se separan más, el punto **M** baja y mueve a la barra **M-A**, la cuál acciona la válvula **V** para que reduzca su paso. Esto disminuye la potencia suministrada por el motor.
- Si la velocidad se reduce las dos masas **m** se acercan y el extremo **M** sube y la barra **M-A** hace que la válvula **V** aumente su paso. Esto incrementa la potencia suministrada por el motor.

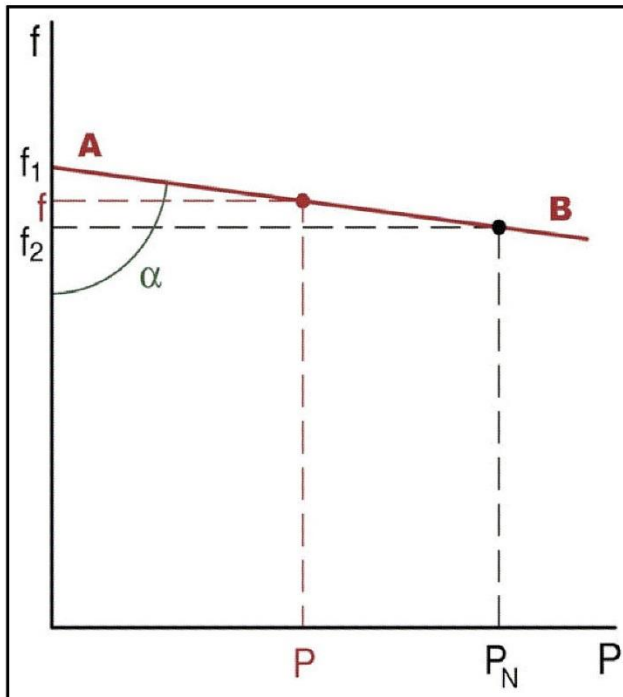
Curva de estatismo

- El comportamiento de un regulador de velocidad se puede representar mediante una gráfica que exprese la velocidad en función de la potencia en el eje.
- Para el análisis de máquinas síncronas interesa representar el comportamiento del regulador utilizando magnitudes eléctricas. En lugar de la velocidad se usa una magnitud que es proporcional a ella: la frecuencia f . En lugar de la potencia mecánica en el eje se utiliza la potencia activa suministrada P ya que son proporcionales y prácticamente tienen el mismo valor, pues la máquina síncrona tiene un rendimiento muy alto.
- Así pues, la **curva de estatismo** muestra el comportamiento de un regulador de velocidad indicando como varía la frecuencia en función de la potencia activa.
- La curva de estatismo es prácticamente lineal.

Curva de estatismo



Curva de estatismo de un regulador



Frecuencia asignada: $f_N = \frac{f_1 + f_2}{2}$

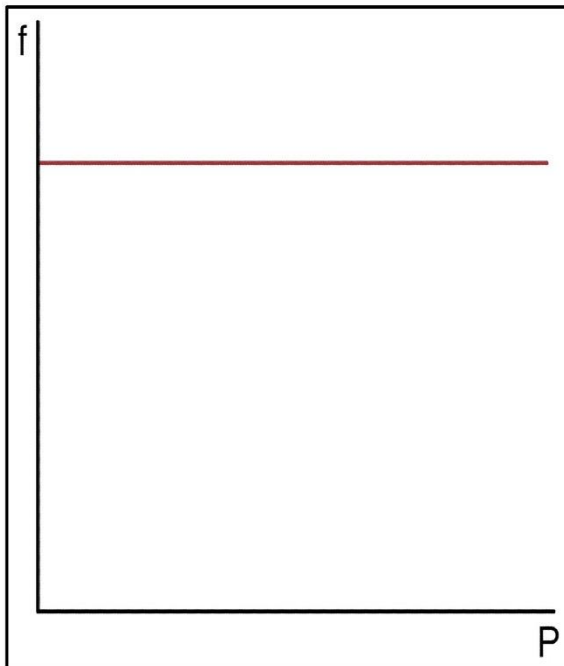
Estatismo: $\delta_r = \frac{f_1 - f_2}{f_N} = 2 \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2}$

Constante del regulador o potencia regulante:

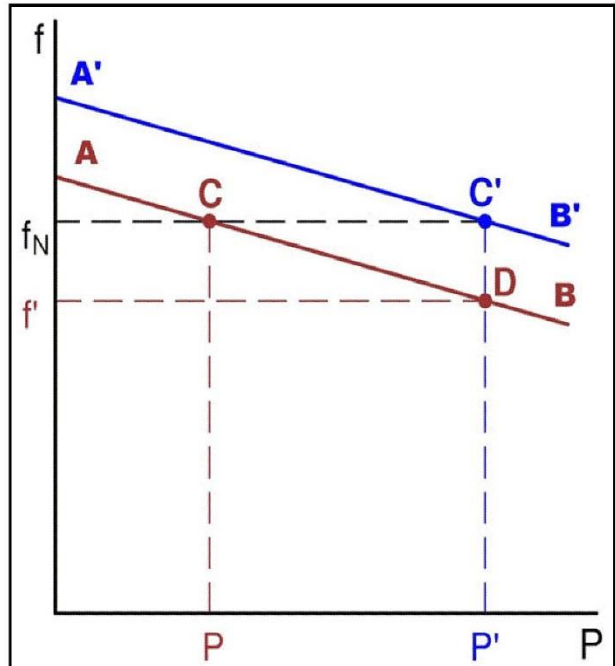
$$K = \operatorname{tg} \alpha = \frac{P_N}{f_1 - f_2} = \frac{P_N}{\delta_r f_N}$$

$$f = f_1 - \frac{1}{K} P$$

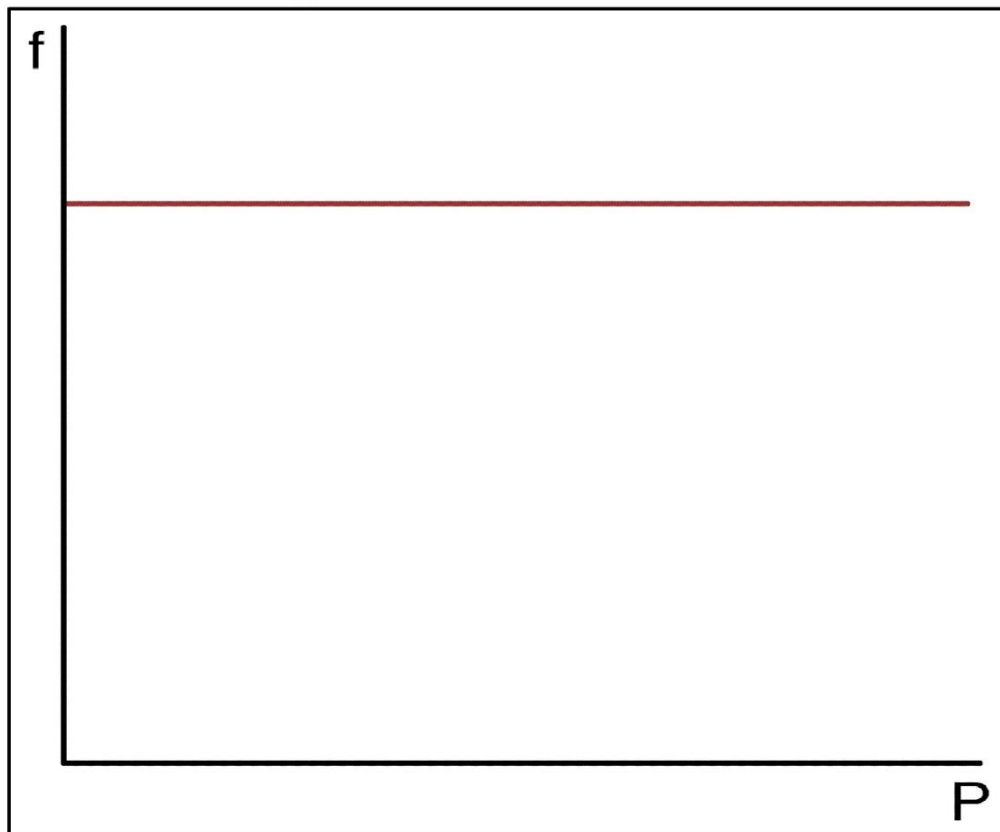
Regulador astático



Regulación secundaria



Regulador astático



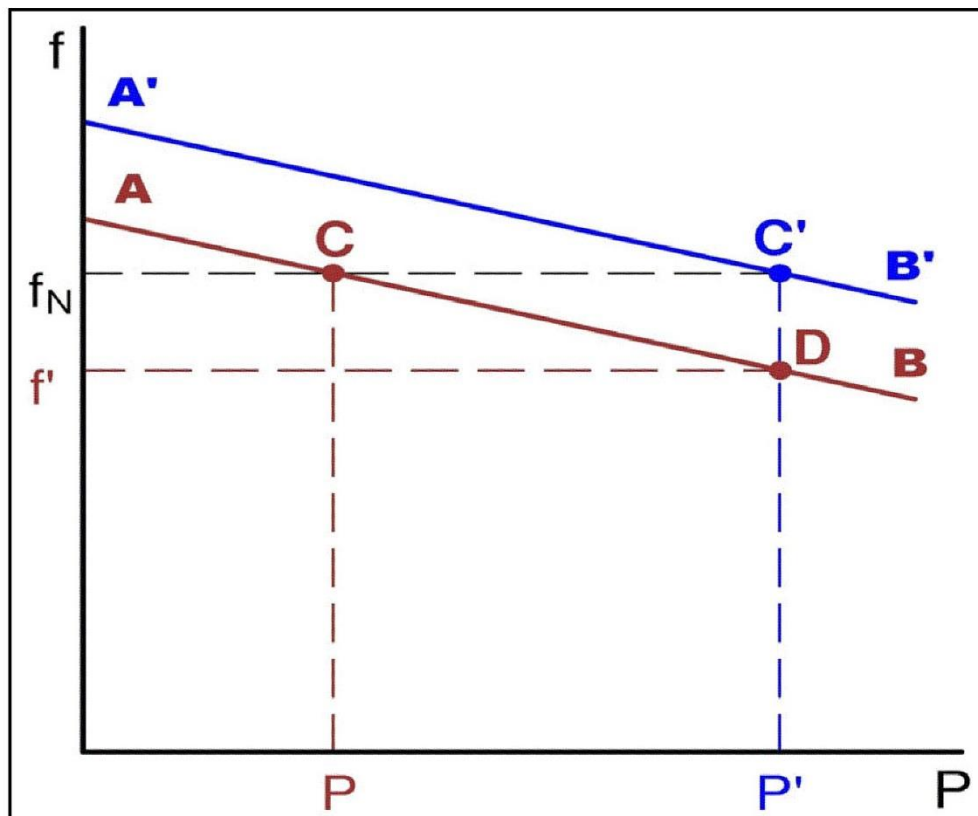
Regulador astático

- Cuando la máquina síncrona funciona como alternador aislado interesa que proporcione una tensión con siempre la misma frecuencia; es decir, interesa mantener la velocidad constante.
- Parece, pues, que en funcionamiento aislado interesa utilizar un regulador de velocidad **astático**; esto es, un regulador cuya curva de estatismo es horizontal.
- Sin embargo, como se estudiará más adelante, un regulador astático no permite un funcionamiento correcto de la máquina síncrona cuando funciona en paralelo con otros alternadores. Por eso se utilizan reguladores con algo de estatismo (usualmente $\delta_r < 4\%$).

Regulación secundaria

- Para un correcto funcionamiento de un alternador aislado con un regulador con estatismo se introduce una **regulación secundaria** que permite desplazar verticalmente la curva de estatismo y así mantener la frecuencia constante.
- Por ejemplo, inicialmente el regulador funciona con la curva **AB** y el sistema está en el punto **C** dando la potencia P a la frecuencia asignada f_N . Si la potencia aumenta a P' , la regulación primaria llevará al sistema al punto **D** con la frecuencia f' . Ahora interviene la regulación secundaria que desplaza paralelamente la curva de estatismo y esta pasa a ser la curva **A'B'**. El sistema termina en el punto **C'** suministrando la potencia P' a la frecuencia asignada f_N .

Regulación secundaria



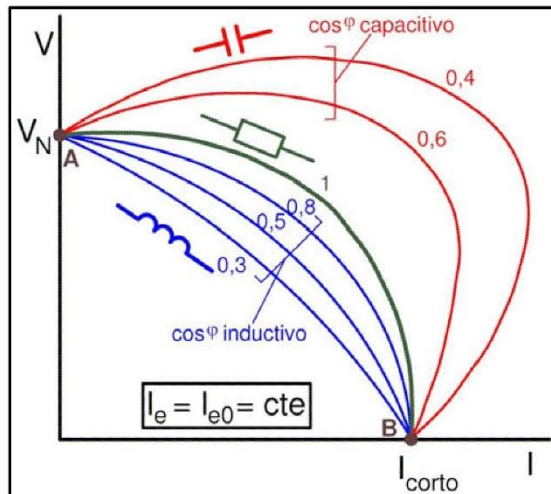
FORMAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN ALTERNADOR SÍNCRONO (1)

Funcionamiento en red aislada

En este caso el alternador síncrono alimenta el sólo a una carga eléctrica.

En este tipo de funcionamiento el regulador de la velocidad del motor que mueve al generador permite ajustar la frecuencia, mientras que la regulación de la corriente del inductor permite controlar el valor eficaz de la tensión suministrada. Las potencias activa y reactiva y, por consiguiente, el factor de potencia dependen de la carga eléctrica conectada al alternador y no las controla éste.

Esta forma de funcionamiento de la máquina síncrona queda reflejada en sus características exterior y de regulación.



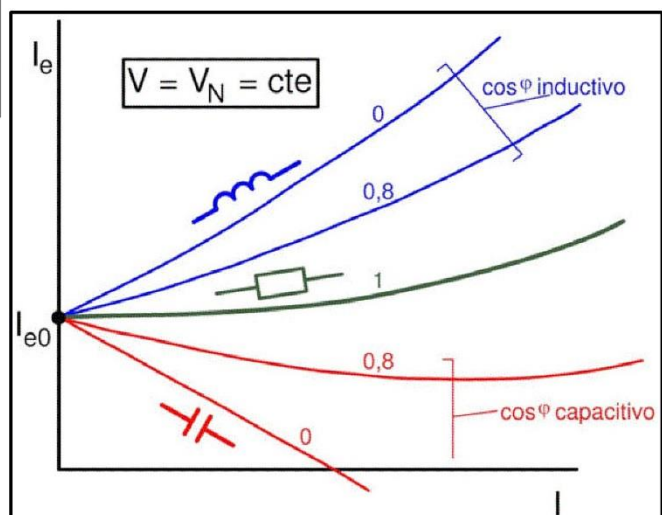
Características exteriores

$n = cte$

En estas gráficas cada curva es con $\cos \varphi$ constante

Características de regulación

Alternador síncrono en una red aislada:
Características exteriores y de regulación



FORMAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN ALTERNADOR SÍNCRONO (2)

Funcionamiento acoplado a una red de potencia infinita

Una red de potencia infinita es una red con una potencia tan grande comparada con la de la máquina síncrona que la red permanece inmutable ante los cambios que se realicen en los reguladores del alternador. Por lo tanto, el valor eficaz y la frecuencia de la tensión permanecen invariables y fijados por la red. Además, la red es capaz de consumir o de suministrar toda la potencia activa y toda la potencia reactiva que la máquina síncrona le envíe o le demande, respectivamente.

En este tipo de funcionamiento el alternador no puede modificar la tensión ni la frecuencia, como cuando estaba aislado, pues estas magnitudes las impone la red. Lo que sí se puede controlar es la potencia activa que suministra mediante la potencia que, a su vez, le proporciona el motor de accionamiento. Es decir, el regulador del motor que mueve al alternador ajusta la potencia activa. La potencia reactiva se controla mediante la corriente de excitación. Esto, a su vez, permite ajustar el factor de potencia.

FORMAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN ALTERNADOR SÍNCRONO (3)

Funcionamiento acoplado en paralelo con otro alternador de potencia similar

En este tipo de funcionamiento el ajuste de los reguladores de los motores de accionamiento de ambos alternadores permite controlar la frecuencia y el reparto de potencia activa entre ambas máquinas.

Los reguladores de la corriente de excitación de ambas máquinas síncronas permiten ajustar el valor eficaz de la tensión suministrada y el reparto de potencia reactiva entre ambas máquinas.

Las potencias activa y reactiva totales a proporcionar por ambos alternadores conjuntamente son las que demanda la carga eléctrica. Es el reparto de estas potencias entre ambos generadores lo que se puede ajustar mediante sus reguladores.

FORMAS DE FUNCIONAMIENTO DE UN ALTERNADOR SÍNCRONO. RESUMEN

Funcionamiento como generador aislado

- La frecuencia f se regula mediante la velocidad n .
- La tensión V se regula mediante la excitación I_e .
- P , Q y $\cos \varphi$ no se controlan, dependen de la carga conectada al alternador.

Funcionamiento acoplado a una red de potencia infinita

- La frecuencia f y la tensión V no se regulan, las impone la red.
- La red puede proporcionar o consumir toda la P y toda la Q que se desee.
- La potencia activa P se controla mediante el regulador del motor.
- La potencia reactiva Q (y el factor de potencia) se controlan mediante I_e .

Funcionamiento en paralelo con otro alternador de potencia similar

- La frecuencia f y el reparto de potencia activa P entre los dos alternadores se controla mediante los reguladores de los motores de ambas máquinas.
- La tensión V y el reparto de potencia reactiva Q entre ambos alternadores se ajusta mediante los reguladores de excitación de ambas máquinas.
- Las potencias totales activa P y reactiva Q no se controlan, dependen de qué carga se conecte al conjunto de los dos alternadores en paralelo.

BIBLIOGRAFÍA

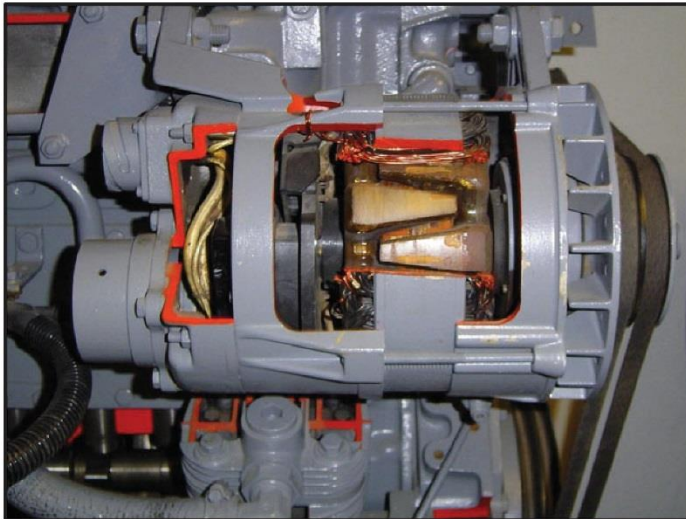
- [1] CENELEC. 2008. *EN 60034-4: Rotating electrical machines. Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests*. Madrid: AENOR.
- [2] CHAPMAN. 2005. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [3] CORTES CHERTA. 1994. *Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. 5 tomos*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- [4] FITZGERALD, KINGSLEY Y UMANS. 2004. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [5] FAURE BENITO. 2000. *Máquinas y accionamientos eléctricos*. Madrid: Colegio oficial de ingenieros navales y oceánicos.
- [6] FRAILE MORA y GARCÍA GUTIÉRREZ. *Prácticas de Electrotecnia*. Madrid: Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Madrid.
- [7] FRAILE MORA, J. 2015. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Ibergarceta Publicaciones, S.L.
- [8] IEEE. 2002. *IEEE Std. 1110: IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses*. Piscataway (USA). IEEE Power Engineering Society.
- [9] IVANOV-SMOLENSKI. 1984. *Máquinas eléctricas*. Moscú: Editorial Mir.
- [10] KOSTENKO y PIOTROVSKI. 1979. *Máquinas eléctricas*. Moscú: Editorial Mir.
- [11] LANGSDORF. 1968. *Teoría de las máquinas de corriente alterna*. Madrid. Editorial Castillo D.L.
- [12] RODRÍGUEZ POZUETA, M.A. 2009. *F.e.m.s inducidas en los devanados de las máquinas eléctricas*. Web del autor en la Universidad de Cantabria:
<http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm#Generales>
- [13] RODRÍGUEZ POZUETA, M.A. 2011. *Potencias, calentamiento, rendimiento y caracterización de las máquinas eléctricas*. Web del autor en la Universidad de Cantabria:
<http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm#Generales>
- [14] RODRÍGUEZ POZUETA, M.A. 2015. *Campo magnético en el entrehierro de las máquinas eléctricas*. Web del autor en la Universidad de Cantabria:
<http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm#Generales>
- [15] SANZ FEITO, JAVIER. 2002. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Pearson Education.
- [16] SERRANO IRIBARNEGARAY, L. 1989. *Fundamentos de máquinas eléctricas rotativas*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.
- [17] SERRANO IRIBARNEGARAY, L. 2001. *Teoría de los fasores espaciales: introducción y aplicaciones industriales*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.
- [18] SUÁREZ CREO, J.M. y MIRANDA BLANCO, B.N. 2006. *Máquinas eléctricas. Funcionamiento en régimen permanente*. Santiago de Compostela: Tórculo Edicións, S.L.
- [19] WILDI, T. 2007. *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. México: Pearson Educación.

ANEXO:
MÁQUINAS SÍNCRONAS ESPECIALES

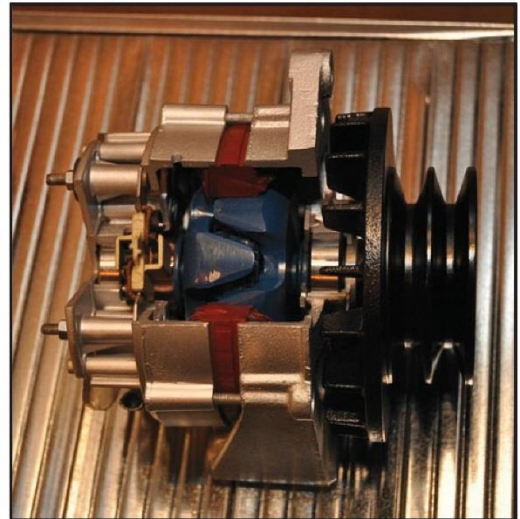
**MÁQUINAS
SÍNCRONAS
ESPECIALES**

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

ALTERNADOR DE GARRAS O DE LUNDELL

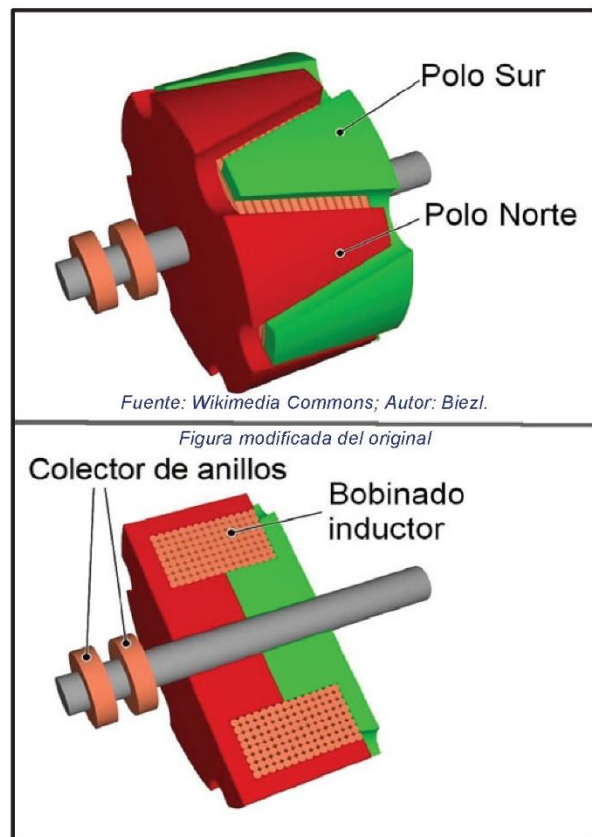


*Fuente: Wikimedia Commons.
Autor: Piero.*



*Fuente: Wikimedia Commons.
Autor: S.J. de Waard.*

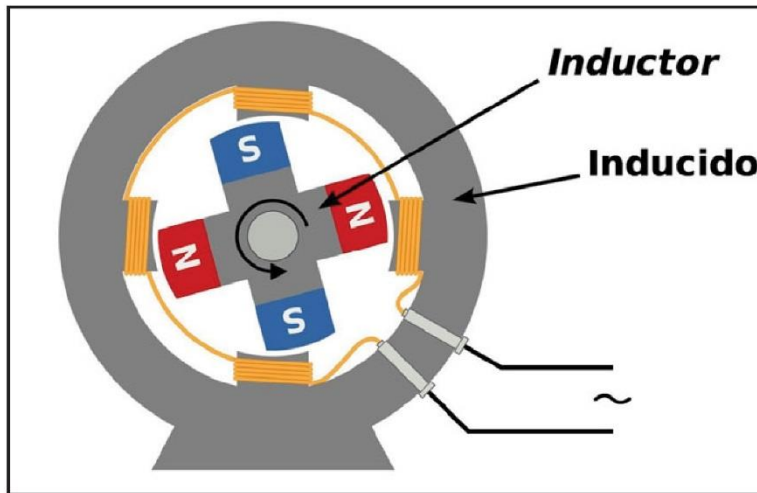
DESPIECE DE UN ALTERNADOR DE GARRAS



ALTERNADOR DE GARRAS

- Un alternador de garras es un alternador de polos salientes cuyo rotor tiene una forma especial.
- El rotor consta de dos piezas simétricas y enfrentadas. Cada una de estas piezas tiene la forma de un disco en cuya periferia salen en dirección axial varios polos de forma triangular (forma de "garra").
- Al montar las dos piezas resulta que en la periferia del rotor hay alternativamente polos triangulares de una pieza y de la otra.
- Los polos de una de estas piezas son los polos norte del inductor y los de la otra son los polos sur.
- Entre ambas piezas hay una única bobina inductora arrollada alrededor del eje de la máquina (bobina axial). Esta bobina genera todos los polos inductores y se alimenta con corriente continua a través de un colector de dos anillos.
- Esta máquina es muy compacta y robusta. Por ello se usa como generador para los automóviles. En este caso tiene entre 12 y 16 polos y el inducido se conecta a un rectificador de diodos trifásico de onda completa para que suministre la tensión continua que requiere el automóvil.

ALTERNADOR DE IMANES PERMANENTES

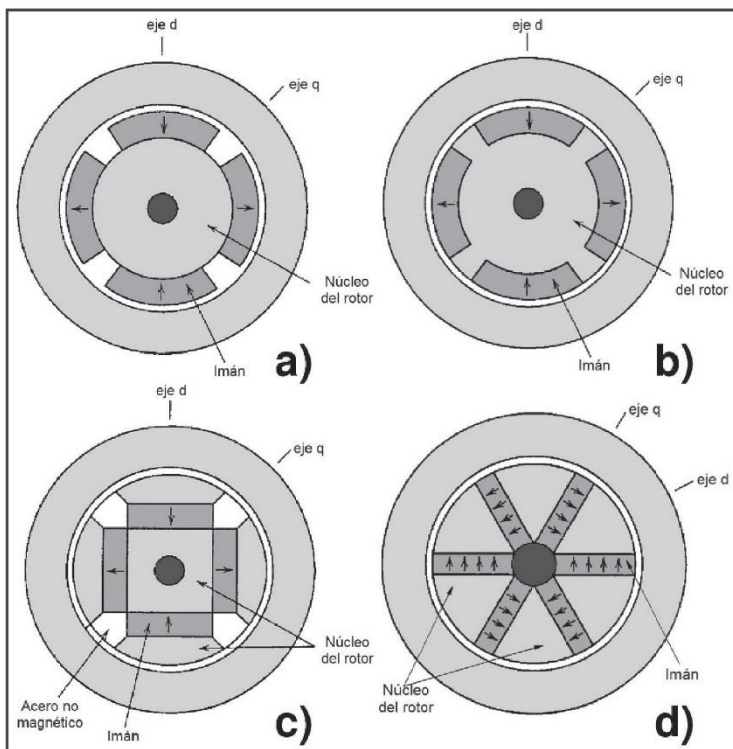


Fuente: Wikimedia Commons; Autor: Edoarado.

Esquema de un generador síncrono monofásico de dos pares de polos con inductor de imanes permanentes.

- En algunos alternadores síncronos el devanado inductor se sustituye por unos imanes permanentes.
- En la figura se muestra un generador monofásico de imanes permanentes. A diferencia de la figura, lo habitual es que el inducido -situado en el estator- sea cilíndrico y su devanado sea de tambor y esté colocado dentro de ranuras.

ALTERNADOR DE IMANES PERMANENTES

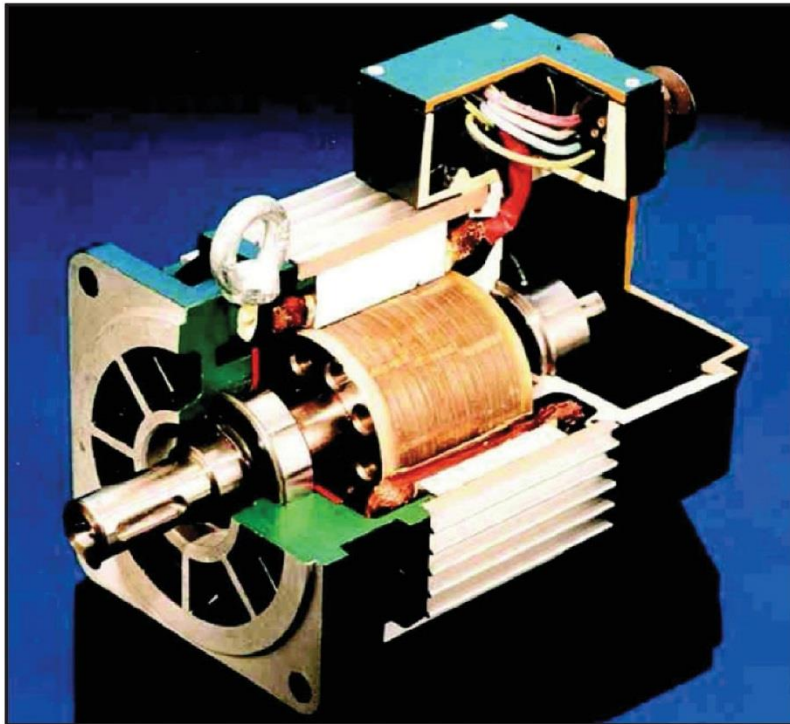


Figuras modificadas de las obtenidas de la OCW de la Delft University of Technology. Dr. ir. H. Polinder

Los imanes se pueden disponer en el rotor de diferentes maneras. Las más frecuentes son:

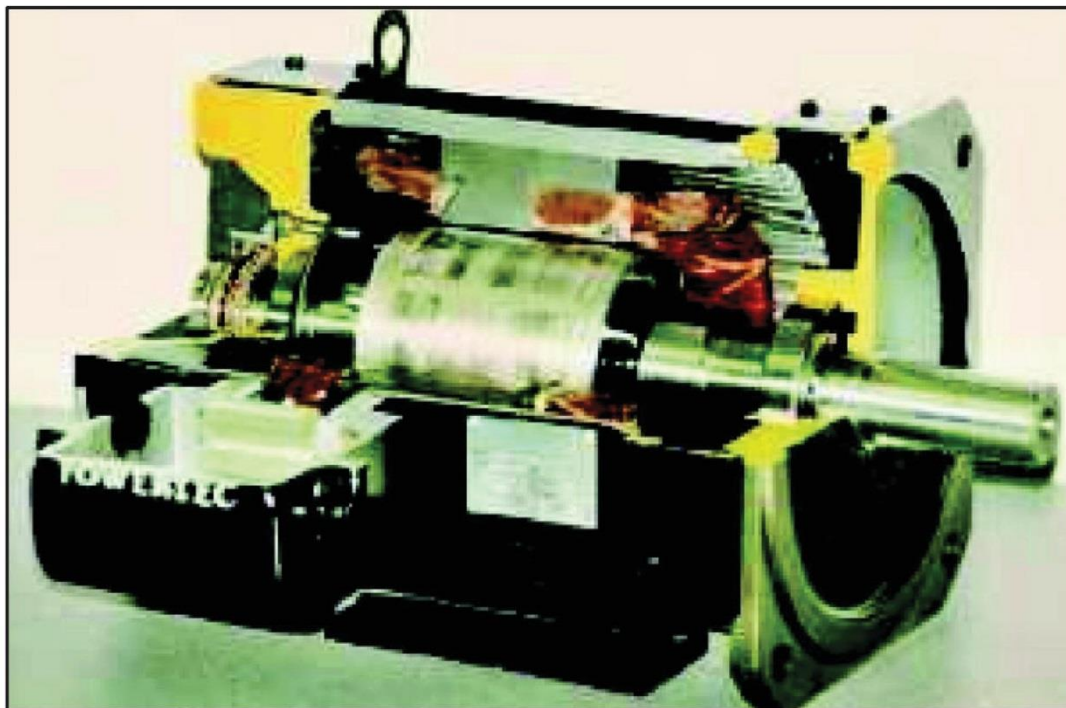
- Sobre la superficie del rotor (aumenta el entrehierro).
- Incrustados en la periferia del rotor.
- Embebidos en el interior del rotor con magnetización radial.
- Embebidos en el interior del rotor con magnetización circunferencial.

MÁQUINA SÍNCRONA DE IMANES PERMANENTES



*Fuente: OCW de la Delft
University of Technology.
Dr. ir. H. Polinder*

MÁQUINA SÍNCRONA DE IMANES PERMANENTES



Fuente: OCW de la Delft University of Technology. Dr. ir. H. Polinder

CONSIDERACIONES SOBRE EL PAR (1)

- En régimen permanente sucede que, en virtud del *principio de acción y reacción*, el par M que se ejerce sobre el rotor de una máquina eléctrica es de igual valor, pero de sentido contrario, al par que se ejerce sobre el estator, el cual se transmite a los apoyos de la máquina.
- En las máquinas síncronas usualmente el inducido está situado en un estator cilíndrico y de acero dulce (sin apenas histéresis). En estas circunstancias, el par sobre el estator se puede calcular como suma del efecto (*Fuerza de Laplace*) ejercido por el campo magnético de la máquina sobre los conductores del estator (que están recorridos por la corriente del inducido).
- De lo anterior se obtiene que en estas máquinas el par M es proporcional al producto de la inducción magnética en el entrehierro B por la fuerza magnetomotriz (f.m.m.) de reacción de inducido $\mathcal{F}_i$ y por el seno del ángulo entre las distribuciones espaciales de estas dos magnitudes.
- En consecuencia, para que pueda haber par, la inducción B y la f.m.m. $\mathcal{F}_i$ deben estar desfasados un ángulo no nulo. El par es máximo si dicho ángulo vale 90° .

CONSIDERACIONES SOBRE EL PAR (2)

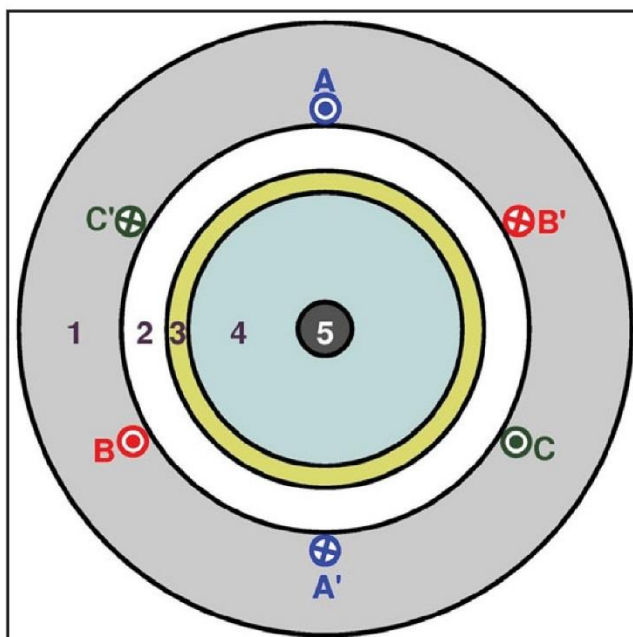
- Considérense máquinas síncronas de rotor cilíndrico cuyos núcleos magnéticos están contruidos con un acero dulce (sin apenas histéresis). Cuando la f.m.m. de reacción de inducido $\mathcal{F}_i$ actúa aisladamente en este tipo de máquinas da lugar a una inducción en el entrehierro B en fase con ella. En estos casos, la interacción de la f.m.m. $\mathcal{F}_i$ con la inducción B creada por ella misma no da par (el ángulo entre B y $\mathcal{F}_i$ es nulo). Es preciso que actúe también el devanado inductor para conseguir que la inducción en el entrehierro B (B es debida a la acción conjunta de las f.m.m.s de los devanados inductor e inducido) esté desfasada con respecto a la f.m.m. del inducido $\mathcal{F}_i$ y lograr que haya par y la máquina pueda funcionar.
- Sin embargo, es posible construir motores que proporcionen par disponiendo únicamente del devanado inducido (no tienen devanado inductor). En estos motores la inducción magnética en el entrehierro B es debida únicamente a la acción de la f.m.m. del inducido $\mathcal{F}_i$, pero consiguen que esta inducción esté desfasada con respecto a $\mathcal{F}_i$. Los **motores de histéresis** y **de reluctancia** son máquinas de este tipo.

MOTOR DE HISTÉRESIS (1)

- En estas máquinas el estator es cilíndrico y aloja al devanado inductor que es, o bien un bobinado trifásico o bien un bobinado similar al de un motor asíncrono monofásico con condensador. Estos devanados generan una fuerza magnetomotriz (f.m.m.) giratoria.
- En el rotor no hay ningún devanado y está rodeado por un cilindro liso de un material con un ciclo de histéresis importante.
- Durante el arranque el rotor todavía no gira a la velocidad de sincronismo por lo que está sometido a la acción de una f.m.m. giratoria que hace que el cilindro recorra su ciclo de histéresis. Esto provoca que la inducción en el entrehierro B esté desfasada con respecto a la f.m.m. del inducido $\mathcal{F}_i$ y exista un par. Este par es prácticamente constante durante todo el proceso de arranque.
- Cuando la máquina alcanza la velocidad de sincronismo el rotor deja de estar sometido a una magnetización variable y pasa a comportarse como un imán permanente (gracias a la magnetización que ha adquirido durante el arranque). Por lo tanto, la máquina pasa a comportarse como un motor síncrono normal.

MOTOR DE HISTÉRESIS (2)

- Estos motores son muy silenciosos y carecen de vibraciones (debido a que el rotor está perfectamente equilibrado al ser totalmente liso). Son de potencia reducida (hasta 100 W) y su rendimiento es bajo.



- 1: Núcleo magnético del estator.
- A-A', B-B', C-C': Fases del devanado inductor, el cual está situado en el estator (En la figura este devanado es trifásico).
- 2: Entrehierro.
- 3: Material con gran histéresis.
- 4: Cuerpo del rotor (no magnético).
- 5: Eje.

MOTORES DE RELUCTANCIA (1)

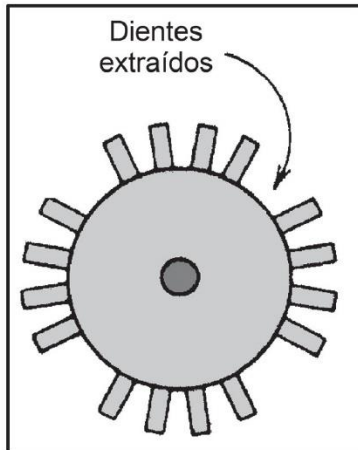
- En estas máquinas el rotor no presenta la misma reluctancia a lo largo del entrehierro. La reluctancia en la dirección de los polos del rotor (eje d) es inferior que en la dirección interpolar (eje q, a 90° eléctricos del eje d).
- El campo magnético intenta concentrarse en las zonas de menor reluctancia (eje d), por lo que la f.m.m. de reacción de inducido $\mathcal{F}_i$ genera en el entrehierro una inducción B que se desvía con respecto a $\mathcal{F}_i$ y, en consecuencia, aparece un par.
- Este fenómeno aparece también en las máquinas síncronas de polos salientes en las que, como ya se estudió anteriormente, el campo magnético creado por $\mathcal{F}_i$ se desvía con respecto a esta f.m.m. Por ello las máquinas de polos salientes hay que analizarlas descomponiendo su campo magnético en las direcciones de los ejes d y q. En estas máquinas aparece un par de reluctancia que se añade al par electromagnético y que sigue existiendo aunque no circule corriente por el inductor (pero sí en el inducido).

MOTORES DE RELUCTANCIA (2)

- En las máquinas de polos salientes el par de reluctancia se puede visualizar como la tendencia que tiene el campo magnético de circular por el camino de menor reluctancia, lo que hace que los polos salientes tiendan a orientarse en todo momento según la dirección de los polos del campo magnético del inducido.
- Del mismo modo, en los motores de reluctancia las zonas de menor reluctancia del rotor definen sus polos y estos tienden a orientarse en la dirección que en cada momento tiene el campo magnético giratorio (que es generado por el único devanado de estas máquinas: el inducido).
- El par producido por estas máquinas es tanto mayor cuanto mayor sea la diferencia entre las reluctancias según los ejes d y q, lo que equivale decir que el par de reluctancia aumenta al incrementar la diferencia entre las reactancias síncronas X_d y X_q .
- Existen varios tipos de máquinas síncronas cuyo único par es de reluctancia y que basan su funcionamiento en él.

MOTOR SÍNCRONO DE RELUCTANCIA (1)

- En su versión clásica este motor se puede considerar derivado de un motor asíncrono de jaula de ardilla, trifásico o monofásico con condensador, al que se le han hecho tantas muescas equidistantes en el rotor como polos tiene la máquina. (En la figura las muescas consisten en quitar dientes en el rotor de un motor de 4 polos).
- Las muescas definen las zonas interpolares (eje q) y entre cada dos muescas consecutivas queda un polo del rotor, por cuyo centro pasa el eje d.



- Esto hace que la jaula de ardilla quede subdividida en varios trozos. Esta jaula incompleta permite que la máquina arranque como una máquina asíncrona.
- Cuando la máquina, funcionando como asíncrona, alcanza una velocidad próxima a la de sincronismo el par de reluctancia hace que se sincronice con el campo magnético giratorio y pase a funcionar como máquina síncrona.

Figura modificada de la disponible en la OCW de la Delft University of Technology. Dr. ir. H. Polinder

MOTOR SÍNCRONO DE RELUCTANCIA (2)

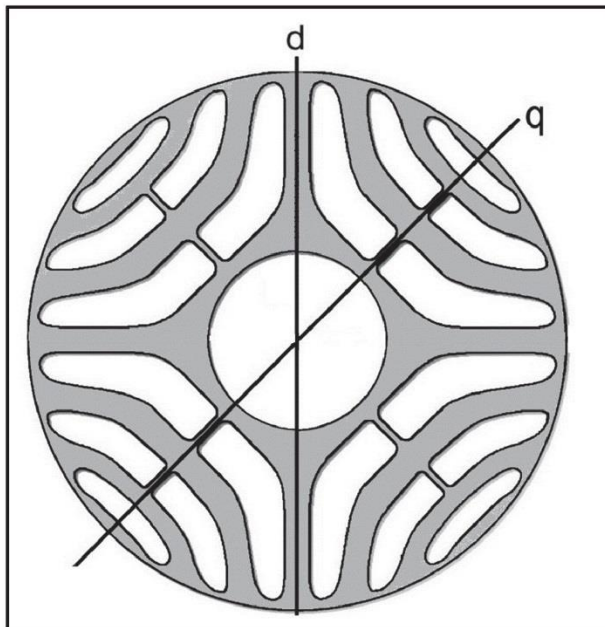


Figura modificada de la disponible en Wikimedia Commons. Autor: Ksb-t-aut15.

Rotor de un motor síncrono de reluctancia de 4 polos

- Se puede conseguir que la reluctancia de los ejes d y q sea diferente mediante unos cortes en las chapas del rotor como las que se muestran en la figura.
- En esta figura no hay jaula de ardilla. Esta máquina está alimentada a través de un variador electrónico de frecuencias. El arranque se realiza aumentando paulatinamente la frecuencia desde un valor casi nulo hasta la normal de funcionamiento. Esto hace que la velocidad de sincronismo aumente desde casi cero hasta la de funcionamiento y el motor arranca siguiendo esta velocidad de sincronismo variable gracias a su par de reluctancia.

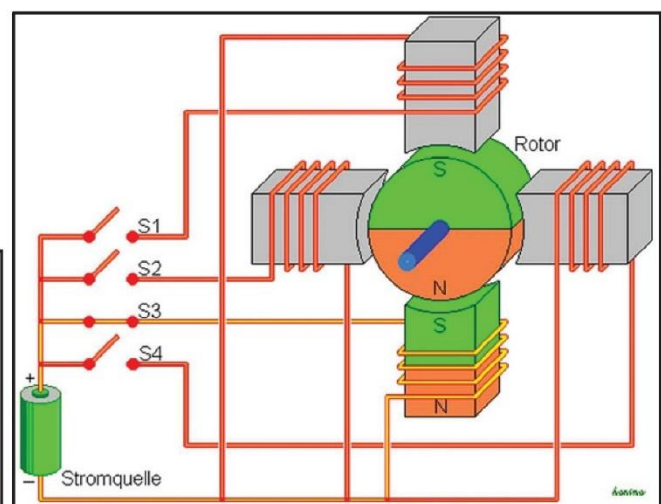
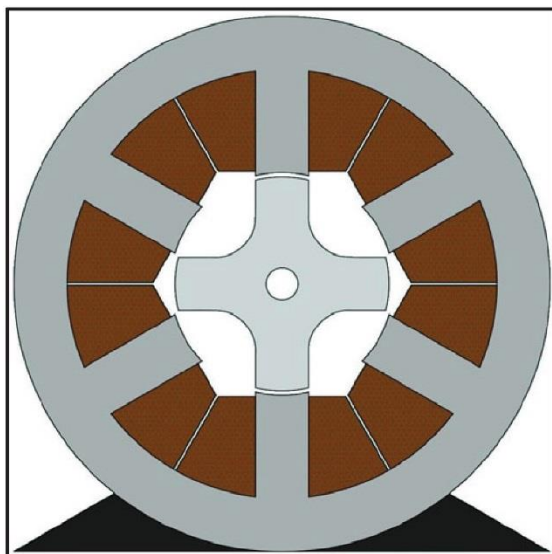
MOTORES PASO A PASO

- Son motores diseñados para estar alimentados siempre mediante un sistema electrónico. Giran un ángulo fijo (*paso*) a cada impulso de la señal de entrada.
- Son, pues, máquinas posicionadoras: permiten colocar su rotor en el ángulo deseado sin necesidad de un control en lazo cerrado.
- En estos motores se puede conseguir un movimiento de giro continuo suministrándole impulsos de señal de forma constante y regular. El motor gira como efecto de una sucesión continua de saltos de un paso.
- Hay diferentes tipos de motores paso a paso:
 - **De reluctancia variable**, también denominados **de reluctancia conmutada**.
 - **De imán permanente**.
 - **Híbridos**, que son una combinación de los dos anteriores.

MOTORES PASO A PASO

Motor paso a paso de reluctancia variable.

Fuente: Wikimedia Commons.
Autor: Vonvikken

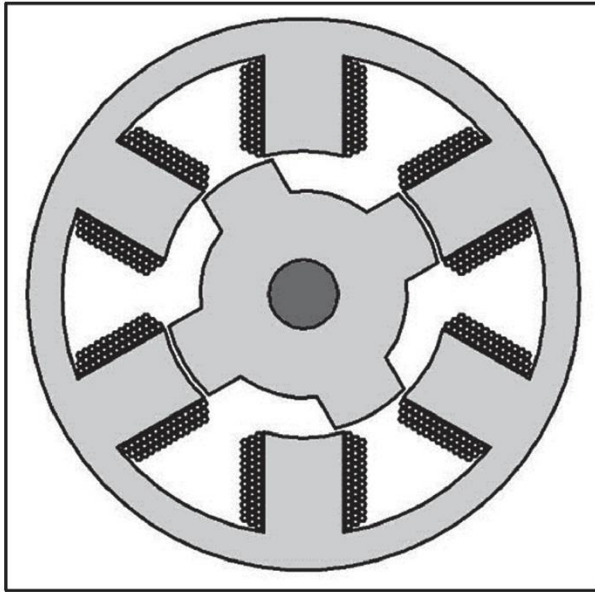


Fuente: Wikimedia Commons.

Principio de funcionamiento de un motor paso a paso de imán permanente.

MOTORES DE RELUCTANCIA VARIABLE

- Son motores de doble reluctancia; tienen reluctancia variable tanto en el estator como en el rotor.
- Consta de un número de polos distintos en el rotor y en el estator.

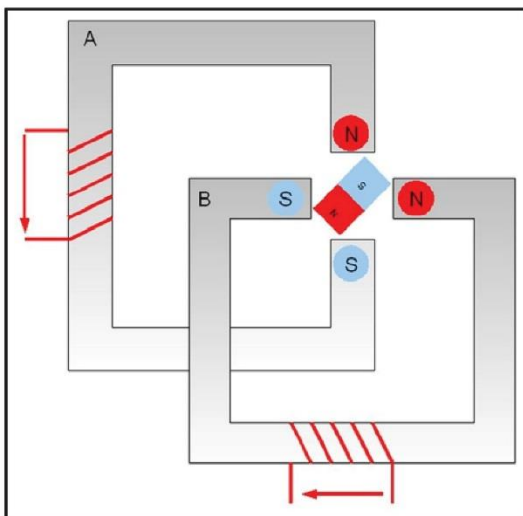


Fuente: Wikimedia Commons. Autor: Wolfgang

- Según la bobina o bobinas del estator que se alimenten en cada momento se consigue una dirección del campo magnético distinta y el polo de rotor más cercano a dicha dirección intentará moverse hacia ella para minimizar la reluctancia magnética. Como consecuencia de esto el rotor gira un paso.
- La figura muestra un motor cuyo paso es igual a 30° .

MOTORES PASO A PASO DE IMÁN PERMANENTE

- El estator de estos motores es similar al de los de reluctancia variable. En el rotor tienen imanes permanentes.
- Consiguen pares mayores que en los de reluctancia variable.
- Una vez alcanzada una posición del rotor la pueden mantener sin necesidad de alimentar ninguna bobina del estator.



Fuente: Wikimedia Commons.

- En la figura se muestra un motor de dos polos y de dos fases. El *paso* es de 90° y el *semipaso* (cuando se excitan dos bobinas) es de 45° .
- En las siguientes diapositivas se muestra la tabla de orden de fases, la cual explica las diferentes posiciones que puede alcanzar este motor según como se alimenten las bobinas del estator.

Paso	Terminal 1 Bobina A	Terminal 2 Bobina A	Terminal 1 Bobina B	Terminal 2 Bobina B	Imagen
Paso 1	+Vcc	-Vcc		-Vcc	
(Semi-)Paso 2	+Vcc	-Vcc	+Vcc	-Vcc	
Paso 3			+Vcc	-Vcc	
(Semi-)Paso 4	-Vcc	+Vcc	+Vcc	-Vcc	

**Secuencia
del
funciona-
miento de
un motor
paso a paso
de imán
permanente
(1)**

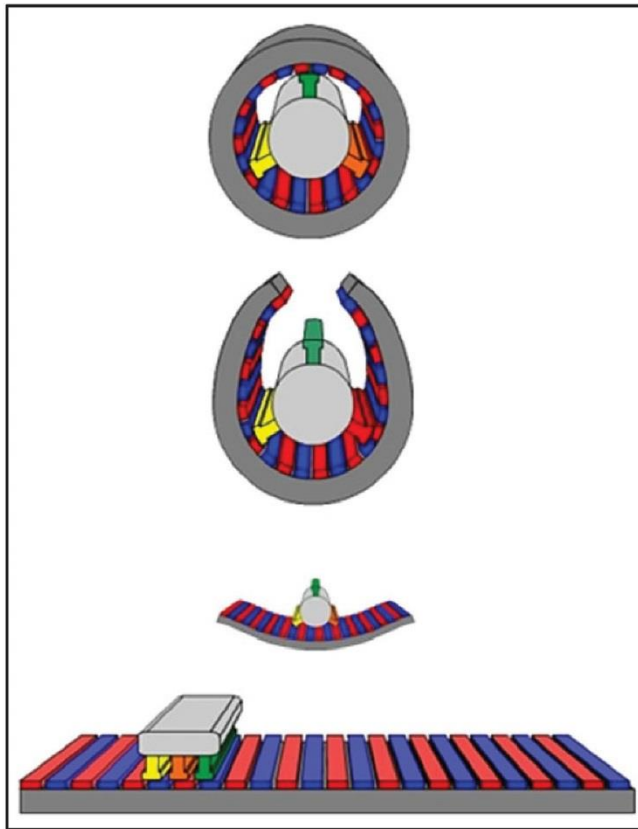
Fuente: Wikipedia

Paso	Terminal 1 Bobina A	Terminal 2 Bobina A	Terminal 1 Bobina B	Terminal 2 Bobina B	Imagen
Paso 5	-Vcc	+Vcc			
(Semi-)Paso 6	-Vcc	+Vcc	-Vcc	+Vcc	
Paso 7			-Vcc	+Vcc	
(Semi-)Paso 8	+Vcc	-Vcc	-Vcc	+Vcc	

**Secuencia
del
funciona-
miento de
un motor
paso a paso
de imán
permanente
(2)**

Fuente: Wikipedia

MÁQUINAS LINEALES

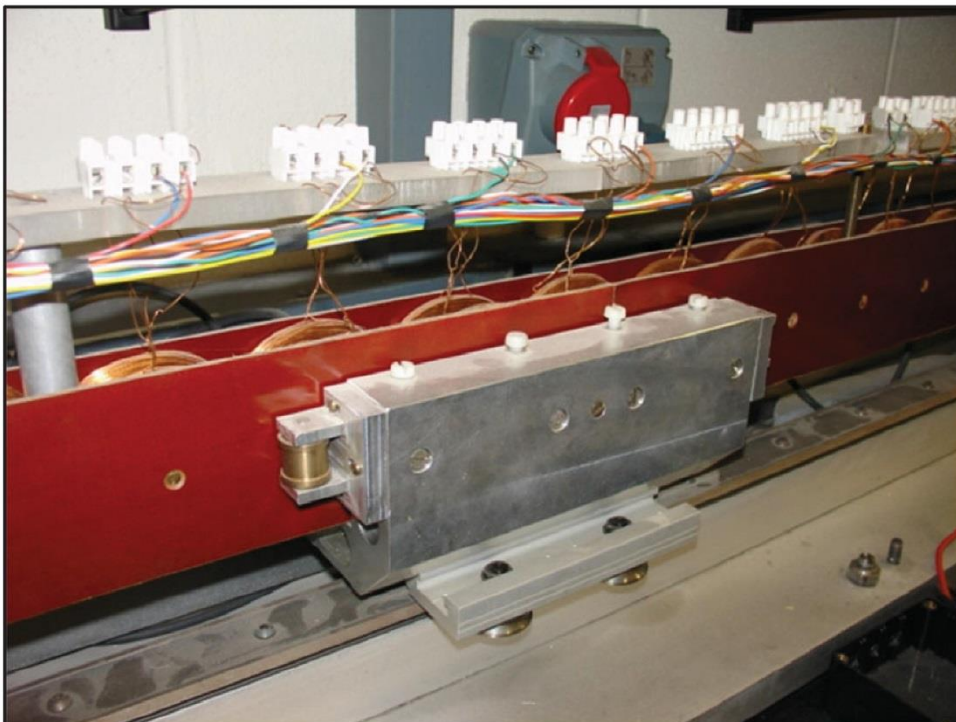


- En estas máquinas el movimiento no es rotativo sino lineal.
- Se puede obtener la versión lineal de cualquier máquina rotativa (sea síncrona o de otro tipo).
- Para ello se supone que se corta longitudinalmente a la máquina rotativa y luego se endereza (ver la figura).
- Habitualmente la parte fija y la parte móvil de una máquina lineal no son de igual longitud.

*Fuente: Wikimedia Commons
Autor: Schnibbi678*

MOTOR LINEAL DE IMANES PERMANENTES

La pieza móvil es de imanes permanentes. El estator tiene bobinas de cobre cuya alimentación se va conmutando electrónicamente.



*Fuente:
Wikimedia
Commons.
Autor: Zureks*