AECA, Alternador para generación (eólica, hidráulica)
Frecuencia fija a velocidad variable

Palabras clave: Alternador (frecuencia fija) sin escobillas, velocidad variable controlada. Excitatriz en cascada positiva de frecuencia.

NOTA. En Internet se encuentran con "DFIG brushless" soluciones de similar topología y aplicación. Evitamos aquí decir "doble alimentada". En el apartado final de Historia, explicamos nuestro punto de vista.

Resumen

El AECA está inspirado en algo tan conocido como un alternador sin escobillas. Las "dinamos" de excitación pasaron a ser alternadores trifásicos de rotor bobinado que con un conjunto de rectificadores en el eje hacen lo mismo que un colector: pasar la "alterna" a "continua".

La diferencia está en que en el AECA no hay rectificación de la corriente de excitación: sigue siendo alterna. Esto exige más a la máquina pero obtenemos ventajas por adecuadas disposiciones para suma de frecuencias: una especie de "mutiplicador eléctrico de velocidad".

La disposición de la excitatriz especial reduce la potencia de la electrónica de control.

Key words: *Alternator (fixed frequency), brushless, controlled variable speed. AC exciter, positive frequency cascade.*

NB. In Internet, it is easy to find "DFIG brushless" solutions with a similar topology and application. We here avoid to say "doubly fed". In the last paragraph, History, we try to explain our point of view.

Abstract:

The AECA is based in something so known like a bruhsless alternator. The old DC exciters are now AC three-phase, rotor wound, alternators with a rotating rectifiers set just making the same as a conmutator: changing AC on DC.

Here the difference is that in the AECA there is not current redressing: it continues AC.- This is not positive as exciter but we get other advantages thanks to adequate arrangements to make addition of frequencies: something like an electric gearbox.

The idea of a particular-special rotating machine for excitation reduces electronic control power.

Luis Odriozola Arteaga

Doctor Ingeniero del ICAI (1963).

Ha ejercido su profesión en Construcciones Electromecánicas INDAR, Ramón Vizcaíno S.A., Sociedad Industrial de Transmisiones (SIT), General Electric, (Taller de Servicio, Fierro S.A.) y en SARELEM, Grupo Framatone, (Francia). Desarrolla su actividad actual como SERTECOR.

Antecedentes

En el año 2004, en nuestra continua experiencia y relación con el mundo de la producción de energía eléctrica, fuimos escuchando y viviendo los problemas en los generadores eólicos: unos venían del multiplicador, otros de los anillos y escobillas y las averías eléctricas en devanados apuntaban al sistema de regulación (alimentación por el rotor). Además, dada la potencia manejada por éste, se comenzaba a prever la necesidad de reducirla para poder ir sin lastres a generadores de más capacidad (por ejemplo: 3 Mw).

En efecto, se había resuelto el funcionamiento a velocidad variable con las MIDA, "Máquinas de Inducción Doblemente Alimentadas" (como el objetivo era *generar,* algunos las llamaban GADA; ahora DFIG, en inglés). Pero el control por el rotor conllevaba altas frecuencias y picos por los disparos de tiristores (hemos comprobado y documentado averías por Descargas Parciales ¡en B.T!) y tenía que estar diseñado no sólo para dar reactiva, sino también para activa relativamente importante.

Como en definitiva teníamos generadores con campos ("por dentro") síncronos, se nos ocurrió dotarlos de una excitatriz controlada en su estator como en los familiares "sin escobillas". Se suprimían anillos y escobillas, se controlaba una máquina de menor potencia, las perturbaciones pasarían amortiguadas a la máquina principal y el número de polos se repartiría en dos máquinas.

Respecto a ideas similares, en el AECA destacan:

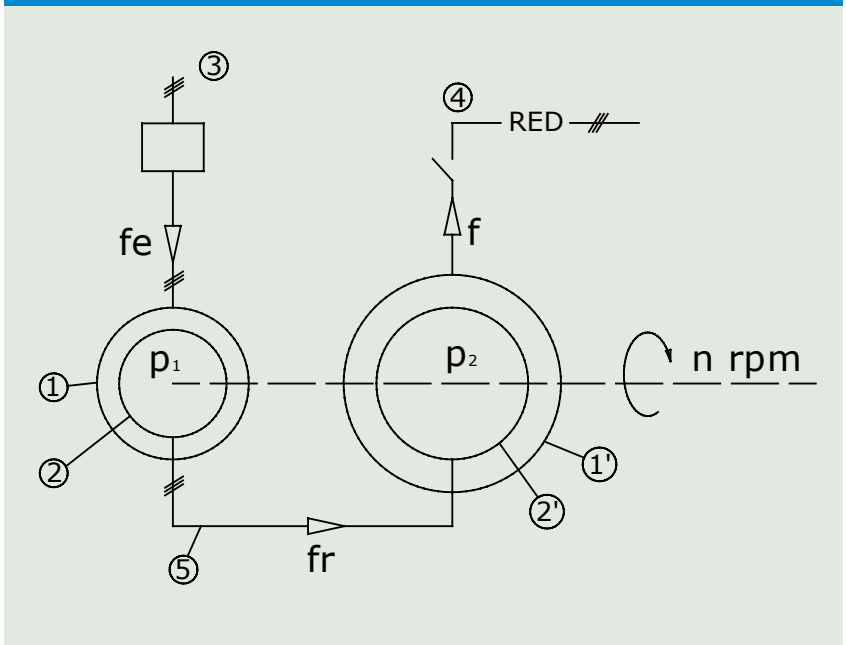
- El algoritmo de control que permite menos pares de polos (máquinas menores).
- La Excitatriz con devanado compensador: reduce la potencia electrónica de control.

Presentación

AECA es el acrónimo de Alternador Excitado por Corriente Alterna.

La idea expresada en Antecedentes se concretó en el Esquema fundamental (ver Figura 1).

Figura 1. Esquema fundamental



Descripción: La Figura1 propone un generador eléctrico compuesto por una primera etapa: la Excitatriz, con su estator (1) y su rotor (2); y una segunda etapa, El AECA propiamente dicho, con su estator (1') y su rotor (2'). Tanto el estator como el rotor de cada etapa, consisten en bobinados polifásicos. Según se aprecia en la Figura1, ambos rotores están unidos eléctricamente mediante una conexión (5), y también están unidos entre sí mecánicamente en virtud de su acoplamiento a un mismo eje de giro. El estator de la primera etapa tiene un número p_1 de pares de polos, y está alimentado por una corriente alterna de control a una frecuencia **fe** Hz inyectada según (3), mientras que desde el estator de la segunda etapa se vierte a la carga la energía generada (4) a una frecuencia **f**.

Para verlo, en la realización del Prototipo, tenemos la Excitatriz 1, el alternador AECA, 2 y la máquina motriz de velocidad de giro variable, 3. La construcción final tendría en una sola carcasa a 1 y 2. Pero atendiendo a costes y ensayos (mediciones en rotores), se han utilizado carcasas normalizadas y se han mantenido los anillos.

Entrando al detalle de funcionamiento, el eje que recibe la potencia mecánica, (turbina eólica o hidráulica), gira a una velocidad de n rpm, en sentido contrario al campo eléctrico giratorio que fijamos en el estator de la máquina 1 o excitatriz. La frecuencia de la C.A. del rotor (2), se deduce a partir de la expresión:

$$f_r = f_e + p_1 * n/60$$

Donde f_r es la frecuencia de C.A. de la corriente del rotor (2), y las demás referencias tienen el mismo significado indicado anteriormente.

Puesto que los rotores de ambas etapas están eléctricamente unidos, esta C.A. pasa directamente al rotor (2') de la segunda etapa, dotado de un número p_2 de pares de polos. La inversión de fases determina que el campo de este segundo rotor (2') gire en el mismo sentido que el eje. Con ello, la frecuencia **f** inducida en el estator (1') de la segunda etapa, responde a la expresión:

$$f = fr + p2*n/60 = fe + p1*n/60 + p2*n/60$$

Vemos que es la suma de pares de polos la que colabora a la generación de la **f** de salida.

Pero por otro lado, agrupando y despejando la velocidad mecánica resulta

$$n = 60*(f - f_e)/(p_1 + p_2)$$

Es decir que nos encontramos con un algoritmo de control que nos dice: para un valor de **f** de generación, y eligiendo la velocidad del eje (turbina) por rendimiento, por ejemplo, podemos lograr **fijar** dicho valor de n mediante ajuste de la frecuencia de control, **fe** (recordamos que los parámetros $\mathbf{p_1}$ y $\mathbf{p_2}$ son los pares de polos de excitatriz y alternador).

En resumen, nos encontramos con las siguientes peculiaridades:

Control de velocidad. Se trata básicamente de utilizar la primera etapa para producir una frecuencia de excitación **fr** en el rotor de la segunda etapa que, unida a su velocidad mecánica, aumente la velocidad del campo y por lo tanto la frecuencia y tensión generadas en esta segunda etapa. La resta de frecuencias (diferencia) se traduce en poder conseguir la frecuencia deseada (50Hz, por ejemplo) con un menor número de polos en el generador propiamente dicho.

Multiplicador eléctrico. En un alternador típico se cumple que $\boldsymbol{\omega} = \mathbf{p} \times \boldsymbol{\Omega}$ (donde $\boldsymbol{\omega}$ rad/seg es la velocidad con que el campo giratorio atraviesa las espiras, **p** es el nº de pares de polos y $\boldsymbol{\Omega}$ la velocidad angular mecánica).

En la idea expuesta se obtiene $\boldsymbol{\omega}$ por suma de velocidades de rotación mecánica y la de un campo giratorio adicional. Dicho de otro modo, en la segunda etapa aparece una velocidad de campo mayor de lo que aparecería en un alternador que girase a $\boldsymbol{\Omega}$ rpm. Esa mayor velocidad de campo resulta en un aumento de tensión (o sea mayor capacidad de generación).

Excitatriz. Es lo que hemos llamado la "primera etapa". Pensando en lo que hace una excitatriz y por tanto y con más razón, la ω_e adicional o de control (fuente externa) debería ser de magnetización, o sea, reactiva pura. La potencia mecánica se tomaría, toda, del eje. Este condicionante supone una importante dificultad. Para verlo mejor, supongamos eliminamos esta primera etapa (ver Figura 2):

Ahora nos queda $f = f_r + p_2 * n/60 = f_e + p_2 * n/60$; y donde pone RED, supongamos una carga resistiva. Lo que sucede se puede ver en el diagrama de Potier más simplificado:

Figura 2.

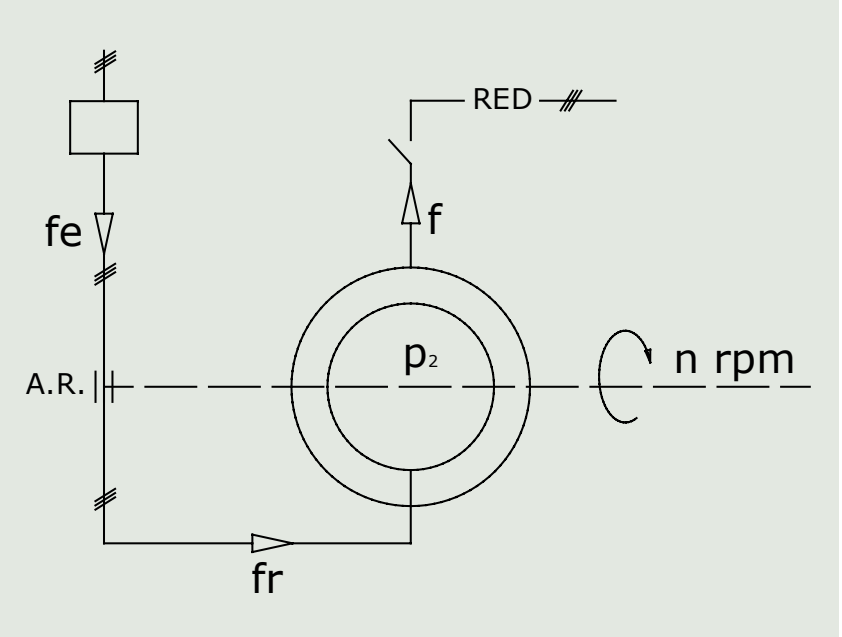
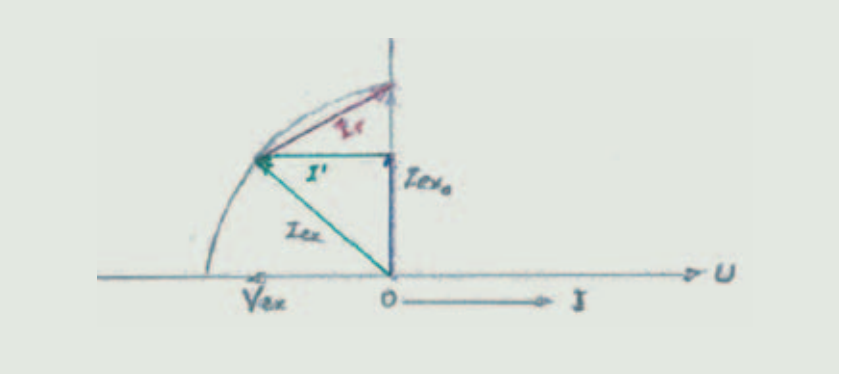


Figura 3.



En vacío: la fuente de intensidad de excitación proporciona la Iex0 para obtener la tensión nominal U a la frecuencia deseada (suma de la de excitación más la del giro) sin consumo de potencia activa.

Cuando entra la carga, deberá suministrar la intensidad Iex en el módulo exigido por la f.m.m. necesaria para mantener U (Diagrama Potier). Pero ahora el ángulo de fase entre Iex y Vex, ya no es 90º (reactiva pura). La aparición de la carga supone que el control entra a suministrar potencia activa (que según el concepto de Excitatriz, no queremos). En definitiva:

- Sobre el papel (diagrama anterior) aparece la idea de la adición de una Ir, de forma que la Iex quedara a 90º de Vex.
- O también de otra manera: compensar la reacción transversal de inducido motivada por la carga.

Y es esta segunda idea la que nos llevó a dotar a la excitatriz de un Devanado de Compensación.

Tras esta "particularidad", Única, de devanado de compensación en la primera etapa, vamos completar con algún comentario más.

- **M.Asíncrona versus Sincronismo**
  - Motor asíncrono de Tesla. Idea Básica: deslizamiento es el cociente entre la frecuencia inducida y la inductora. En un jaula de ardi-

lla, conectado a red, bloqueado, el campo del estator produce la corriente de arranque del rotor que si no gira es de la misma **f** (50Hz por ejemplo) y por tanto el deslizamiento es 100%. Si lo "soltamos", en pura teoría (no peor que las hipótesis de Park), se va al sincronismo de vacío perfecto: frecuencia y deslizamiento cero.

– Si el rotor es bobinado y lo dejamos abierto, tenemos 50 Hz, pero no corriente. Parece que el deslizamiento "s" (nosotros le llamábamos y llamaremos 'd') sea 100%. Pero no es así; es otro concepto: un transformador. Si cerramos el rotor, ya es como un jaula de ardilla y el deslizamiento va en función de la carga. Es el par resistente el que lo define (decíamos en Taller: el motor "resbala" y hasta se puede "caer", que es lo mismo que bloquearse).

- **Sincronismo.** El AECA, para empezar, difiere de lo anterior en que es un alternador y fijada una frecuencia de entrada y otra de salida, la carga no afecta a la velocidad sino que ésta es un número fijo:

$$n = 60*(f - f_e)/(p_1 + p_2).$$

– Por ejemplo: si desconectamos los rotores y a grupo parado alimentamos la excitatriz con f_e, esta será la frecuencia en el rotor, como en el caso M. Asíncrona rotor bobinado. Si lo ponemos a girar en sentido contrario al campo, la frecuencia será $f_r = f_e + p_1*n/60$.

– Si conectamos los rotores y AECA en vacío, las frecuencias no cambian.

– Si ponemos el AECA a plena carga resistiva, se ve afectado el cosφ, pero las frecuencias y velocidad del eje no cambian (supuesto un equilibrio cualquiera entre par del eje y carga eléctrica). *El comportamiento es de máquina síncrona.*

- **Más comparaciones.** Es muy útil para el cálculo de asíncronos (y bien exacto) el concepto de que la Potencia útil es la de a nivel del entrehierro multiplicada por (1-d); o sea que las pérdidas del rotor son

Pe x d. O hablando de *modelos,* que al final se puede llegar a un valor de cierta R que dividida por "d" indica la carga. Hay por ahí textos en inglés que parten de un "axioma" para el deslizamiento: velocidad síncrona menos velocidad del rotor dividido por velocidad síncrona. No es muy rigurosa (vale para un par de polos), pero bien entendida sigue dando los mismos números que la definición en M. Asíncrona.

Y es adecuada si consideramos una *cadena asíncrona* de dos máquinas como *puede parecer el AECA.* Se puede llegar al concepto de deslizamiento global S = S1/S2 o S1 x S2 y según como se mire, motor o generador, al final un cociente de frecuencias salida-entrada, sólo que en tal cadena una es "flexible" y aquí, en el AECA, las dos son "rígidas". En nuestro caso, la carga no cambia velocidades sino que el control es por excitación, inducciones o flujos (como se quiera), como en un alternador síncrono.

En resumen y *volviendo a marcar diferencias por el deslizamiento:*

- En la "doble alimentación" se obtiene **ω** (la frecuencia de salida), por suma de velocidades de rotación mecánica y la de un campo giratorio **fe,** o sea: $\boldsymbol{\omega = p\Omega + \omega_e}$. Como queda dicho, el generador "no lo sabe" y dará en bornas lo que le pidan. Y de forma intuitiva ('natural') diríamos que el eje dará la parte **pΩ** y el resto vendrá de la ayuda de frecuencia.
- En los miles de generadores eólicos que vemos en España, la base es la Máquina Asíncrona o de Inducción doblemente alimentada (MIDA) y las cosas tienen que ser así, o sea: "el eje dará la parte pΩ y el resto vendrá de la ayuda de frecuencia" porque el flujo de potencia activa, en un sentido u otro (hipo o hiper sincronismo) participa en el funcionamiento. Pero el AECA es una máquina síncrona y el objetivo que nos hemos fijado es que la potencia activa venga únicamente del eje y la reactiva del Control.
- Ello no es óbice para que la Excitatriz tome una parte en la activa. Pero en la idea de reducir la potencia en la electrónica de control proponemos "forzar" (controlar) que su par sea nulo (sólo las pérdidas *frenarían* el eje). En definitiva: es objetivo principal el que la potencia de control (a **fe,**) tenga un cosφ nulo. Y por y para eso se aporta un grado más de libertad (el devanado de compensación). Los Amperio-vueltas de vacío no cambian. Los necesarios en carga se aportan en un devanado a 90º, también a cosφ = 0.

Prototipo. Realización práctica

Se construye un conjunto en bancada:

- Para la máquina principal, y buscando costes razonables, se ha optado por un tamaño corriente de la serie CEI: un normalizado 225 de 8 polos (velocidad síncrona 750 rpm), o sea, 20 KVA, algo alargado (diríamos un L) para seguir obteniendo los 20 KVA (el estator sigue a 50 Hz, con el rotor a ~ 400 rpm) con un diseño nada extraordinario de ventilación. El cálculo resulta sencillo.
- Para la excitatriz, lo más especial, se opta por una máquina de dos polos con margen de tamaño para alojar el devanado de compensación, a 90º eléctricos del de excitación "principal".
- Para el accionamiento, un motor estándar alimentado con variador de frecuencia acoplado a las dos anteriores con la conveniente transmisión reductora.

Historia de esta tecnología. Situación actual del proyecto AECA

Hace ocho años, a través de internet, era fácil encontrar gran cantidad de información sobre máquinas doblemente alimentadas con los típicos acrónimos en inglés que indicaban sus pequeñas diferencias. En particular, había también *brushless, twin stator machines,* etc. etc. Pero se veía más un interés por el accionamiento a velocidad variable en corriente alterna ("la muerte de la corriente continua").

Y esto tiene su lógica histórica, tan antigua como el desarrollo de los motores asíncronos de rotor bobinado con el objetivo de conseguir velocidad variable regulable: el control del rotor. Y por supuesto, para lograrlo con pérdidas mínimas, alimentando con tensión adecuada y a la frecuencia del rotor (hace 50 años con "máquinas auxiliares"). Sin olvidar citar la conexión en cascada, que también hemos mencionado al hablar de deslizamientos.

Pues bien, de estas ideas el desarrollo de la electrónica consiguió las DFIM (MIDA) o sea, máquinas de inducción doble alimentadas que en principio seguían el objetivo de motores a velocidad variable y que después se aplicaron en la generación también a velocidad variable (eólica en particular) y que manejan potencias de alimentación o devolución a red según esté la máquina en hipo o hiper sincronismo. Sin embargo, la idea básica que tenemos de un generador, es proporcionar energía a la red. Siempre, salvo fallos o avería, se proporciona energía a red (nada de "doble alimentación"): se toma potencia mecánica de un eje para, mediante un campo magnético (*energía de condición*), transformarla en potencia eléctrica. Insistimos: un alternador no tiene doble alimentación. Por eso, en las palabras clave (*key words*) queda expuesto que evitamos el uso tan mal extendido y aplicado de "doubly fed", o sea "doble alimentada".

Contra esta sencilla idea, "la rutina" en inglés ha mantenido el DF (doubly fed) de manera que si queremos consultar lo publicado para Generación en solución similar al AECA tendremos que entrar en internet por DFIG (Generador Doble Alimentado) *brushless.* Ahora ya encontraremos mucha información, datada sobre todo 2008-2009 en adelante. Incluso alguna supuestamente desarrollada en 2011 con importante subvención (GBP).

Con el algoritmo de control podremos ver que en el numerador figura una suma de frecuencias, mientras en el AECA es una resta. O sea que a igualdad de número de pares de polos, la velocidad síncrona natural es más baja en el AECA (favorable para la aplicación eólica, por ejemplo, y además, menor tamaño de máquinas).

Esto último junto con la distintiva peculiaridad de Excitatriz con devanado de compensación motivó la solicitud y concesión de Patente en 2006.

Por diversas circunstancias, en 2008 no teníamos resuelta la regulación electrónica de control. En consecuencia, se suspendió la Patente y la situación a día de hoy es que tenemos comprobado el funcionamiento electromagnético del AECA, pero sigue pendiente la fundamental implementación electrónica.

Ante la avalancha de ideas ("los mismos problemas llevan a parecidas soluciones") parece no hay duda que, al igual que hemos deshechado la corriente contínua, las actuales MIDA serán reemplazadas por los "DFIG brushless", sea cual sea su "nombre correcto" o autoría. ∎