

Compensación práctica del factor de potencia mediante máquinas síncronas

Apellidos, nombre	Pérez Cruz, Juan (juperez@die.upv.es)
Departamento	Departamento de Ingeniería Eléctrica
Centro	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad Politécnica de Valencia

1 Resumen

En aquellas instalaciones (hoy en día, un gran número) que dispongan de una máquina eléctrica síncrona, bien utilizándola como motor o bien como generador, se puede regular el factor de potencia con una mayor precisión que con las baterías de condensadores convencionales.

En este trabajo se recoge de forma muy sencilla, la justificación y manejo apropiado para que los usuarios puedan conocer de forma básica como proceder para que el ajuste sea apropiado, además se le insta a que pueda estudiar (al disponer de este tipo de máquinas) una posible reducción del recibo de la energía eléctrica.

2 Introducción

La regulación del factor de potencia en las instalaciones eléctricas, es una de las causas más importantes de ahorro en el recibo de la energía eléctrica. Desde hace mucho tiempo este tipo de ahorro, ha preocupado en todo tipo de industrias, y a su vez a acarreado diversos estudios y modos de como y cuando hay que actuar.

Por otro lado, también es conocido que desde hace algo más de dos décadas, existen en multitud de industrias de unos determinados sectores (el de la cerámica fue pionera, pero hay más sectores) que para sus procesos productivos necesita del consumo de energía con un alto poder energético (a temperaturas muy altas), esto se consigue mediante la utilización de energía **primaria** de alto poder energético (fundamentalmente gas u otros derivados del petróleo), pero este tipo de industrias generaban una contaminación térmica importante con la salida a cielo abierto de los humos sobrantes, de los hornos y procesos productivos. Una solución apropiada es la transformación en energía eléctrica de la mayor parte posible de energía sobrante de estas industrias, siendo así la finalidad doble, una la conversión de esta energía en electricidad y otra bajar en lo posible la contaminación térmica. Para ello se propició (e incluso se subvencionó) la instalación de unos grupos de generación de energía eléctrica, formados esencialmente por calderas de calentamiento de vapor de agua, de turbinas y de una máquina eléctrica apropiada (una máquina síncrona que es la que convencionalmente se utiliza como generador). Esta máquina además de poder generar energía eléctrica (existe bastante bibliografía sobre este tipo de generación, y que el autor considera que debe ser tratado en otro trabajo aparte), permite MUY FACILMENTE y MUY EFICIENTEMENTE, regular el **factor de potencia** demandado por el conjunto de la industria.

Con el desarrollo de este trabajo se pretende acercar al lector en el aprovechamiento de la capacidad de generación energía reactiva mediante las máquinas síncronas, que son las que convencionalmente se utilizan en la **"cogeneración"**. Este trabajo viene avalado por la experiencia que supone, el montaje y desarrollo de una práctica de laboratorio (desde hace más de 15 años) y que solo experimenta unos grupos reducidos de alumnos de la especialidades de Ingeniería Eléctrica, aunque el autor considera que debe ser conocido, al menos, por la práctica totalidad de los ingenieros, independientemente de su especialidad, dada la importancia que tiene en la facturación de la energía eléctrica. Con las imágenes de la figura 1, se quiere

poner de manifiesto el montaje que se utiliza en el desarrollo de la citada práctica de laboratorio.

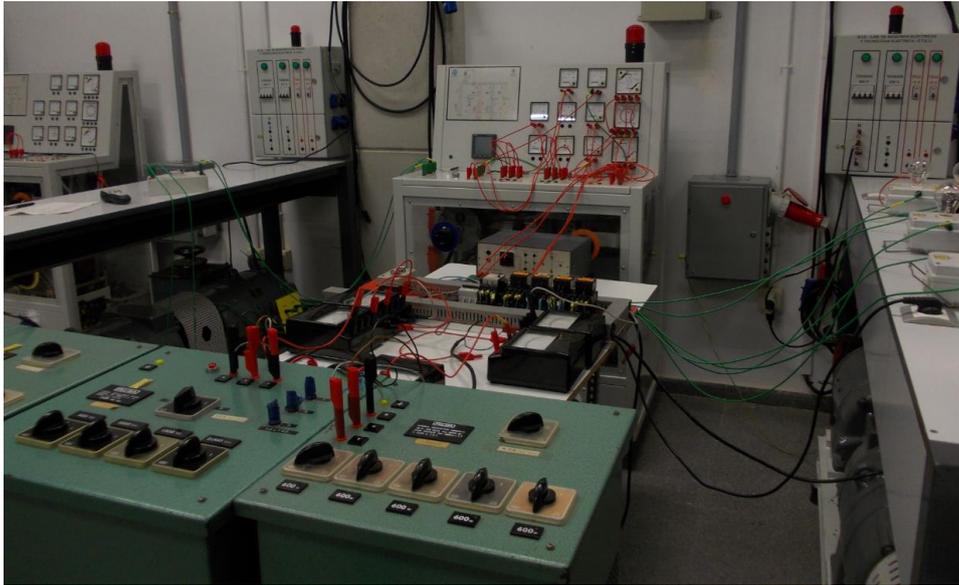


Figura 1.- Montaje de la práctica de simulación de cogeneración.

3 Objetivos

En este trabajo se plantean una serie de objetivos que vienen impuestos por las preguntas que los alumnos de los grupos que pasan por el laboratorio a estudiar la práctica de acoplamiento de generadores a la red eléctrica convencional. Por lo tanto y atendiendo a las inquietudes que estos alumnos le plantean al autor de este artículo, se pueden enumerar los siguientes objetivos a alcanzar:

- El análisis de la regulación continua del factor de potencia.
- La comprensión del comportamiento de receptor o generador de energía reactiva.
- Entender la simplicidad en el control de este tipo de energía mediante la máquina síncrona.
- Analizar la proporcionalidad entre una "pequeña corriente reactiva (o de excitación) y la cantidad de energía reactiva compensada.

El tener unos conocimientos importantes del funcionamiento de la máquina síncrona ayuda mucho a entender este trabajo, no obstante y dado el interés de este trabajo para alumnos no especialistas, se plantea el artículo de la forma más simple posible, de manera que cualquier persona (alumno) que disponga de unos conocimientos mínimos en máquinas eléctricas rotativas, sea capaz de entender lo importante de la compensación del factor de potencia (o energía reactiva) mediante este método. Para realizar un análisis más especializado, sobre el comportamiento de la máquina eléctrica empleada, se sugiere al lector recurra a libros que estudien este tipo de máquinas [1].

4 Desarrollo

Como se ha indicado, es de sobra conocido, incluso en el ámbito industrial por los técnicos, que en el mercado eléctrico se dan importantes penalizaciones económicas por culpa de la energía reactiva que consumen la práctica totalidad de receptores convencionales. Sin duda que cualquier alumno o técnico que se interese en este artículo, sabe que la gran mayoría de los casos de compensación de energía reactiva se realiza por medio de baterías de condensadores, pero que estas están formadas por "bloques o etapas" de determinadas potencias que se conectan o se desconectan, con lo que una compensación fina y óptima no se puede realizar. En todo caso, con las baterías de condensadores, se trabaja entre unos valores de factor de potencia, que acerca a los objetivos que se pretendan, pero que no permite un ajuste muy fino por el carácter de ese tipo de equipos, y a veces en valores de compensación de factor de potencia cercanos a la unidad puede ser necesarios ajustes mas precisos que los alcanzados con baterías de condensadores.

Por lo tanto, en los casos de que se disponga de una **máquina síncrona** en la instalación, es muy recomendable utilizar este tipo de máquina, que además de su cometido principal, que generalmente es la **cogeneración de energía activa**, puede además, ser utilizada como elemento de corrección del factor de potencia, con lo que se optimiza su uso y se recupera la inversión en un tiempo mucho más corto [2].

Aunque la corrección del factor de potencia se puede llevar a cabo, con este tipo de máquinas, bien conectados a la red, o bien trabajando desacoplados de la red y utilizando la máquina síncrona como única fuente de alimentación, El autor quiere dejar claro, que el caso a que se plantea en este trabajo, es en las aplicaciones en las que se encuentre acoplado a la red de alimentación eléctrica convencional, lo que se conoce como una red de alimentación de "**potencia infinita**".

4.1.- Fundamento básico de la máquina eléctrica síncrona.

Dentro de las máquinas eléctricas rotatorias, se encuentra la denominada (por su funcionamiento) como "máquina síncrona", la característica de funcionamiento principal que la diferencia del resto de máquinas rotativas, es que solo puede funcionar a una única velocidad de giro, que es la que impone el campo magnético, esta velocidad se denomina como "**velocidad de sincronismo**" (n_s), y viene determinada por la ecuación 1:

$$n_s = \frac{f \cdot 60}{p}$$

Ecuación 1. Definición de la velocidad de sincronismo.

Donde:

- n_s es la velocidad a la que gira el campo magnético o velocidad de sincronismo, con esta ecuación 1, la velocidad de giro viene expresada en revoluciones por minuto (rpm).

- f es la frecuencia de la red eléctrica a la que se encuentra conectada la máquina eléctrica, que es rigurosamente constante e igual a 50 Hz en España y en Europa.

- p es el número de pares de polos con los que se ha diseñado la máquina eléctrica.

El número de pares de polos, es una característica constructiva de los devanados internos de la máquina. El valor de " p " se determina cuando se construye la máquina y depende fundamentalmente de las características de la turbina a la que se va acoplar el generador síncrono. Para las turbinas de vapor, " p " suele valer 2 o 4. Pero las turbinas hidráulicas el valor de " p " es muy variable, depende del caudal de agua y de la altura del salto, pudiéndose alcanzar hasta un valor de 100 o más pares de polos.

Los generadores síncronos utilizados en cogeneración suelen ser de " $p=2$ o $p=4$ ", pues se utilizan normalmente turbinas de vapor o de gas.

Hay que destacar también, que hay varias ecuaciones muy importantes que relacionan entre los campos magnéticos, y más concretamente el flujo magnético ($\hat{\phi}$), con las variables eléctricas convencionales de las redes de alimentación. Así la ecuación 2 establece una relación directa entre las "fuerzas electromotrices" " E " generada y el flujo magnético común entre los devanados del estator y el rotor de la máquina.

$$E = 4,44 \cdot N \cdot \hat{\phi} \cdot f \cdot \xi$$

Ecuación 2. Fuerzas electromotrices relacionadas con el flujo magnético.

Donde:

- E es la fuerza electromotriz creada por la acción del flujo magnético. Su valor se da en voltios (V), y viene expresado en valor eficaz, que es el que realmente se conoce y se mide con un voltímetro convencional.

- N número de espiras de los devanados de cada fase del estator de la máquina que se encuentra recorrido por las líneas de campo magnético, o flujo.

- f representa la frecuencia de la tensión generada. O lo que es lo mismo, el número de ciclos por segundo. En redes convencionales son 50 hertzios.

- $\hat{\phi}$ Este símbolo representa el flujo magnético o flujo común a los devanados tanto del estator como del rotor.

- ξ es el "factor de devanado", su valor es cercano a la unidad y suele omitirse en la gran mayoría de aplicaciones.

En la ecuación 2 hay varios términos que una vez construida la máquina, y conectada a la red son constantes, por lo que la citada ecuación en su relación entre el flujo y la fuerza electromotriz se puede simplificar a la ecuación 3:

$$E = k \cdot \hat{\phi} \text{ donde } k = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \xi$$

Ecuación 3. Simplificación de la ecuación 2 ante parámetros constantes.

Otra importante ecuación a tener en cuenta, viene a relacionar de nuevo los campos magnéticos y los eléctricos, pero ahora en el sentido contrario, es decir, como se crean convencionalmente las líneas de campo o flujo magnético ($\hat{\phi}$), desde una red eléctrica, esta ecuación 4:

$$\hat{\phi} = \frac{N_{excitación} \cdot I_{ext}}{\mathfrak{R}}$$

Ecuación 4. Creación líneas de flujo desde una red eléctrica.

Donde:

- $\hat{\phi}$ es el flujo magnético.
- **$N_{excitación}$** número de espiras que tiene realizado el devanado que genera el campo magnético, se trata pues, del **devanado de excitación**, esta bobina es independiente de las enunciadas anteriormente.
- **I_{ext}** la **corriente de excitación**, es corriente continua.
- (\mathfrak{R}) es la **reluctancia** del circuito magnético, y viene a determinar la calidad del circuito magnético a recorrer el flujo. Una vez construida una máquina, esta variable queda determinada.

El campo magnético, o líneas de campo ($\hat{\phi}$) pueden ser creadas por un imán permanente, pero solo en caso de aplicaciones de máquinas de poca potencia. Otra manera de obtener el flujo es mediante un circuito eléctrico, que se rige por la ecuación 4. Hay que decir aquí que la compensación **regulada** de energía reactiva, solo se podría efectuar en este segundo caso, no sería posible en máquinas síncrona donde el inductor (el elemento creador del campo magnético) sea un imán permanente.

Observando la ecuación 4, y una vez construida la máquina, se tiene fijado un circuito magnético con valor determinado de \mathfrak{R} , para obtener un valor cualquiera de flujo ($\hat{\phi}$), este puede ser alcanzado mediante un valor de corriente, teniendo en cuenta que se ha instalado un número concreto de espiras en el devanado inductor. Pero en la fase de fabricación de la máquina, se puede determinar (con las espiras de este devanado) que valores de corriente de excitación se quieren emplear para la obtención del campo magnético o del rango del valor de flujo a alcanzar. Por lo tanto los valores de corriente de excitación (también conocida como corriente magnetizante) pueden ser tan pequeños como se estime oportuno.

4.2.- Análisis básico para la regulación del factor de potencia.

Una vez analizada la máquina eléctrica síncrona, aunque haya sido de forma somera, y se admita que para este trabajo se cuenta con la máquina acoplada a la red de alimentación, que anteriormente ya se ha comentado que se trata de una red de “**potencia infinita**”, lo cual significa que se consideran invariables los valores de tensión eficaz (**U**) y la frecuencia (**f**). Es decir atendiendo a la ecuación 2, y conectada la máquina a la red, se puede poner que:

$$U_{Red} \approx E = 4,44 \cdot N \cdot \hat{\phi} \cdot f$$

Ecuación 5. Simplificación de la ecuación 2 si la red es de potencia infinita.

Es decir, en la ecuación 5, se puede observar que prácticamente la tensión de la red (U_{Red}) y la tensión generada son iguales, existe una pequeña diferencia que viene de terminada por unas caídas de tensión (de valor despreciable) en los devanados de la máquina eléctrica y por lo que se conoce como flujo de dispersión. Ambas de poca importancia, y que son irrelevantes para nuestros planteamientos.

Así pues, si se considera que en la ecuación 5, la tensión de red es invariable (por corresponder a una red de potencia infinita), así como la frecuencia (f) que se considera de valor constante. Entonces ¿que pasaría si se modificase el valor de la corriente de excitación?. ¿Se puede dejar de cumplir la igualdad de la ecuación 5?.

Como es natural, si del estudio de la máquina (consultar bibliografía referida al análisis de máquinas síncronas) [3] nos proporciona estas ecuaciones, significa que la máquina debe de ajustarse a ellas. Lo que ocurre, es que al encontrarse la máquina eléctrica conectada con la red, por los conductores que las unen circulan todo “**tipo de corrientes**” y en cualquier sentido (desde o hacia la máquina). Por lo que este efecto se transforma en un intercambio de cualquiera de las dos energías posibles, la correspondiente a la potencia activa o la de potencia reactiva.

4.3.- Funcionamiento en modo “bobina”.

Las cargas convencionales (carga con parte resistiva y parte inductiva R+L) sobre la red de alimentación, demandan corrientes compuestas por una parte activa y una parte reactiva (tal como se comportan los receptores convencionales), cuyo diagrama fasorial es el de la figura 2.

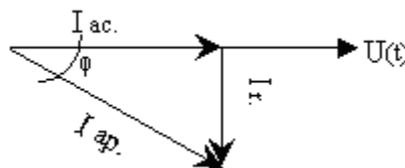


Figura 2.- Diagrama fasorial de las corrientes de los receptores convencionales.

La parte activa de la corriente y su sentido se asocia al comportamiento motor (como la del diagrama de la figura 2) o como comportamiento generador, este estudio (motor/generador) puede ser causa de otro trabajo [4]. Pero lo correspondiente a la corriente reactiva, que se corresponde con el fasor vertical (I_r), y que en los receptores convencionales son los que provocan los recargos en la facturación, pueden ser generados en estas máquinas eléctricas de forma muy sencilla, para ello y atendiendo a la ecuación 2 o 5, si se quisiera disminuir el flujo de la máquina eléctrica mediante una disminución de la corriente de excitación (ecuación 4), entonces trataría de disminuir la tensión generada, pero como es está fijada por la red, la única solución posible, para el funcionamiento del conjunto "red de alimentación-máquina síncrona" es la demanda de corriente creadora de flujo (corriente magnetizante) desde la red.

La circulación de corriente magnetizante (o de excitación) desde la red a la máquina eléctrica, es lo que se conoce como comportamiento "bobina" de la máquina síncrona, ya que tiene el mismo efecto que la parte de bobina de los receptores.

Bajo este tipo de funcionamiento (tipo bobina) se dice que la máquina al estar "hipoexcitada" desde los devanados de excitación generadores de flujo magnético, y tener que consumir desde la red "**corrientes reactivas**", con la finalidad de completar el flujo que ajuste todas las variables que justifiquen la igualdad de la ecuación 2 y 5, se encuentra funcionando como un receptor convencional en cuanto a parte de potencia reactiva se refiere.

4.4.- Funcionamiento en modo "condensador".

Si por el contrario, durante el tiempo de conexión a la red eléctrica, de la máquina síncrona, lo que se le propone es una "hiperexcitación", con un incremento de la corriente de excitación (I_{exc}), el efecto sería un flujo superior al necesario y que adecue los valores de las ecuaciones 2 y 5. Otra vez, la red impone sus características de "**red de potencia infinita**", no permitiendo una variación sensible de la tensión y/o fuerza electromotriz, ni de la frecuencia.

Lo que ocurre ahora, es que la corriente magnetizante que excede de la que se necesita para el valor del flujo que ajuste la ecuación 2 y 5, se inyecta a la red eléctrica, lo cual implica una circulación de corriente reactiva, pero de sentido contrario al impuesto en el párrafo anterior. Si anteriormente se ha podido entender que se trataba de un comportamiento "bobina", ahora el comportamiento es justo lo contrario, y de todos es conocido que el elemento antagonista de la bobina es el condensador.

Por lo tanto cuando una máquina síncrona, se encuentra "**hiperexcitada**", se dice que tiene un comportamiento de tipo "**condensador**". Es muy interesante ahora resaltar, que tal como se dijo anteriormente, el valor de la corriente de excitación puede ser fijado con el número de espiras de dicho devanado de excitación, además también es conveniente recordar que se trataba convencionalmente de una corriente continua, aunque los resultados son sobre las redes con corrientes alternas. Con el diagrama fasorial de la figura 3, se quiere representar el comportamiento en modo "**condensador**" de la aplicación.

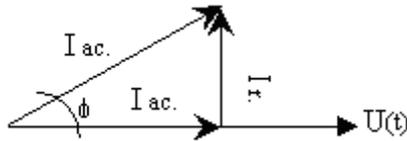


Figura 3.- Diagrama fasorial de las corrientes de tipo resistivo y de tipo capacitivo.

4.5.- Compensadores de energía reactiva.

La regulación de la corriente de excitación en una máquina síncrona conectada a una red de alimentación de las denominadas como de potencia infinita, con el ajuste de la corriente reactiva demanda/entregada por la máquina eléctrica se ajusta su modo de funcionamiento, con respecto a la energía reactiva existente y/o circulante en las redes convencionales. En la figura 4, se puede ver el funcionamiento en ambos cuadrantes de balance de potencia reactiva, bajo un determinado punto o rango de transferencia de corriente activa.

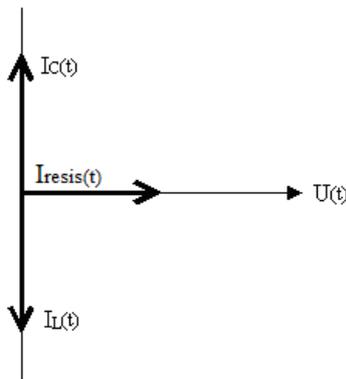


Figura 4.- Diagrama fasorial de regulación de corriente reactiva, en un punto de activa determinado.

Ambos tipos de funcionamiento (modo bobina y/o modo condensador), pueden ser atractivos desde el punto de vista de la gestión de la energía reactiva. Durante las horas diurnas las redes eléctricas suelen tener un déficit de energía reactiva, por lo que un usuario con capacidad puede trabajar (si dispone de una máquina síncrona conectable a red) en modo condensador y suministrar energía reactiva a la red eléctrica.

Por las noches, la parada de gran parte de las industrias, proporcionan una disminución de las cargas generales, y por lo tanto de las cargas con componentes de tipo "R+L", y dado que las propias redes eléctricas, en sí mismas aportan un efecto capacitivo, en estos tramos horarios nocturnos, pueden presentarse unos incrementos de tensión a final de las líneas (sobre todo en las de alta tensión), que pueden resultar incluso peligrosos para los receptores que trabajan durante la noche, esto es conocido como "**efecto Ferranti**". Pues bien en estos tramos la máquina síncrona, puede actuar (debidamente regulada) como una bobina.

Se trata de saber actuar debidamente sobre la corriente de excitación de este tipo de máquinas eléctricas, y gestionar adecuadamente los efectos de estos comportamientos y sus efectos en el correspondiente recibo de energía eléctrica.

5 Cierre

Con todo el criterio que aporta los repetidos ensayos efectuados en el laboratorio y conociendo los efectos del consumo de la energía eléctrica, se puede concluir en este trabajo, exponiendo una serie de ventajas que reporta una adecuada gestión de una máquina eléctrica, en los innumerables casos de que se dispongan. Así, es interesante remarcar que:

.- Aunque la máquina síncrona es poco utilizada en la industria convencional y por tanto poco conocida por la gran mayoría de los técnicos de mantenimiento que disponen de dicha máquina en sus industrias, la regulación del factor de potencia mediante estas máquinas es MUY sencillo, y puede resultar interesante sus resultados.

.- La compensación del factor de potencia, es una de las maneras más importantes a evaluar en el ahorro tanto energético como desde el punto de vista del recibo de la energía eléctrica.

.- Para la regulación óptima del factor de potencia en una instalación, hasta valores muy finos, solo es posible conseguirlo mediante este tipo de máquinas. Hay algún otro tipo de regulación "fina" a base de combinatorias de bobinas y condensadores, pero que industrialmente no se usan por su complejidad de regulación.

.- Cuando se disponga de una aplicación como la estudiada, además de poder gestionar adecuadamente (y con mucha fineza) el factor de potencia propio de la industria, puede regularizar el comportamiento de la red eléctrica. Ambas situaciones debidamente gestionadas y acordadas con la empresa suministradora puede generar unos beneficios muy atractivos.

6 Bibliografía

[1] Guasch Pesquer, L., Ciumbulea, G.E. "Máquinas y accionamientos eléctricos". Marcombo. 2004.

[2] Lobosco, O.S., Pereira da Costa Dias, J.L., Oliver, D. "Selección y aplicación de motores eléctricos". Marcombo. 1989.

[3] Wildi, T. "Máquinas eléctricas y sistemas de potencia". Pearson educación. 2007.

[4] Simón Rodríguez, M.A., González Rosales, A., De la Peña Esteban, F.D., Egido Marcos, J.L. "Electrotecnia Aplicada Circuitos, Transformadores y Motores Trifásicos". Visión Libros. 2007.