

Grupos de generación de energía eléctrica, grupos electrógenos

Félix Redondo Quintela^(a), Roberto C. Redondo Melchor^(a), Margarita Redondo Melchor^(b), Norberto Redondo Melchor^(c).

^(a)Universidad de Salamanca. ^(b)WSP UK. ^(c)STS Proyectos de Ingeniería.

10 de abril de 2013

En la actualidad se demandan mucho los suministros de energía eléctrica que sustituyan al suministro ordinario cuando este falle. Entre los equipos que desempeñan esta función se encuentran los *grupos electrógenos*. Este artículo pretende responder a algunas consultas que hemos recibido sobre ellos. En él se precisan conceptos fundamentales sobre grupos de generación de energía eléctrica porque, como en cualquier tema, son los fundamentos los que desbrozan el camino hacia el conocimiento más completo. Pero también se comenta sobre grupos electrógenos en particular.

Grupos y grupos electrógenos

Los alternadores se mueven por *turbinas hidráulicas, de gas, de vapor, eólicas* u otros motores, entre los que se encuentran *motores de combustión interna de gasolina, de gasoil* o de *gas*. A todos ellos, turbinas y motores de combustión interna, los llamaremos *motores*¹.

El conjunto de cada *alternador* y su *motor*, junto con la *excitatriz* en caso de que exista, se llama *grupo generador de energía eléctrica* o, simplemente, *grupo generador*, y a veces solo *grupo*.

Por lo general, el motor, el alternador y la excitatriz, si existe, tienen el mismo eje y, por tanto, la misma velocidad angular, que designaremos por n y daremos en revoluciones por minuto (rpm).

Si el motor que mueve un alternador es de *combustión interna*, el grupo se llama *grupo electrógeno*, que significa *grupo que genera energía eléctrica* (del griego γεννηξ *genes* engendra). Nótese que también podrían llamarse grupos electrógenos los grupos formados por turbina y generador, pues, al igual que los de motor de combustión interna, generan energía eléctrica. Pero, por costumbre, *grupo electrógeno* suele aplicarse solo a los grupos con motores de combustión interna.

¹ Las turbinas hidráulicas se llaman también *motores hidráulicos*.

Velocidad de un grupo

Cada grupo debe funcionar siempre a la misma velocidad para que la frecuencia f de la fuerza electromotriz que genera el alternador sea la nominal. El valor que ha de tener esa velocidad constante depende del número de pares de polos p con que se construya el alternador. En revoluciones por minuto esa velocidad n es

$$n = \frac{60f}{p}$$

Así, para conseguir fuerzas electromotrices de $f=50$ Hz de frecuencia, la velocidad de un grupo de p pares de polos debe ser

$$n = \frac{60 \times 50}{p} = \frac{3000}{p},$$

que da la siguiente tabla hasta 6 pares de polos:

Pares de polos p	Velocidad n del grupo en rpm para 50 Hz
1	3000
2	1500
3	1000
4	750
5	600
6	500

Para conseguir fuerzas electromotrices de $f=60$ Hz de frecuencia, la velocidad en rpm ha de ser

$$n = \frac{60 \times 60}{p} = \frac{3600}{p},$$

que da la siguiente tabla hasta 6 pares de polos:

Pares de polos p	Velocidad n del grupo en rpm para 60 Hz
1	3600
2	1800
3	1200
4	900
5	720
6	600

Por tanto, para 50 Hz no puede haber grupos de más de 3000 rpm, y para 60 Hz no puede haber grupos de más de 3600 rpm. Por el contrario, no hay un valor mínimo para

la velocidad n , pues el número p de pares de polos, que está en el denominador de la fórmula de n , no tiene límite, puede ser tan grande como las dimensiones del alternador permitan.

Al diseñar un grupo, su velocidad n , y, por tanto, el número p de pares de polos del alternador, se eligen para que las condiciones de funcionamiento del grupo sean las mejores posibles. Una condición que suele ser determinante es el tipo de motor que mueve al grupo. Entre las velocidades posibles suele elegirse aquella para la que el motor tiene mayor rendimiento. Por ejemplo, para las turbinas de vapor, que son los motores que mueven los grupos de las centrales térmicas y nucleares, suelen convenir velocidades altas, incluso si la potencia es grande. Así, la velocidad de los grupos de 350 MW de la planta térmica de Compostilla, que son los de mayor potencia de esa central, es 3000 rpm, la máxima posible, que corresponde a un alternador de un solo par de polos. La velocidad de los dos grupos de la planta nuclear de Almaraz, de 980 MW cada uno, es 1500 rpm. Su alternador, por tanto, es de dos pares de polos.

Por el contrario, la velocidad de los grupos movidos por turbinas hidráulicas se elige, en general, de forma que va disminuyendo con su potencia. Así, los grupos de la planta hidroeléctrica José María de Oriol, en Alcántara, de 430 MW cada uno, tienen una velocidad de 115.4 rpm, que corresponde a 26 pares de polos del alternador. Tantos pares de polos son posibles porque los alternadores para estos grupos se construyen con rotores de gran diámetro. Los grupos de la central de Villarino, de 135 MW cada uno, tienen una velocidad de 600 rpm, que corresponde a 5 pares de polos del alternador.

En general, los grupos movidos por turbinas de vapor y de gas tienen velocidades altas, con alternadores de pequeño diámetro y pocos pares de polos; mientras que para los grupos hidráulicos convienen velocidades pequeñas a medida que su potencia es mayor. Para ello se construyen con alternadores de gran diámetro de su rotor, lo que permite muchos pares de polos.

Las velocidades que se eligen para los grupos electrógenos pueden ser diversas. 1500 rpm para 50 Hz, o 1800 para 60 Hz, que corresponden a dos pares de polos, son muy comunes. Pero se construyen también con otras velocidades y pares de polos.

De forma general, pues, en el diseño se elige la velocidad y , por tanto, el número de pares de polos que más convenga, principalmente para que el rendimiento del motor sea alto.

Regulación de la velocidad del grupo

Es el motor el que debe mantener constante la velocidad n del grupo en todas las condiciones de funcionamiento para que se mantenga la frecuencia f de la fuerza electromotriz.

El trabajo W que realiza una fuerza F tangencial a una circunferencia de radio r cuando su punto de aplicación recorre esa circunferencia es (fuerza por espacio)

$$W = F \times 2\pi r = 2\pi M$$

$M = Fr$ es el momento de la fuerza F respecto al eje de rotación. La fórmula deducida da el trabajo W que realiza un motor giratorio en cada vuelta. Si es n el número de vueltas por minuto que da el motor, el número de las que da por segundo es $n/60$. El trabajo que realiza cada segundo, es decir, la potencia P del motor, es el trabajo que realiza cada vuelta por el número de vueltas $n/60$ que da cada segundo:

$$P = \frac{2\pi Mn}{60}$$

Salvo las pérdidas, esa es la potencia que el motor entrega al alternador, que a su vez la entrega a los receptores en forma de potencia eléctrica. Por eso la potencia P que debe generar el motor está, en general, variando continuamente, pues es la suma de las potencias de los receptores eléctricos que se conectan y desconectan al alternador.

Despejando la velocidad de la fórmula anterior resulta:

$$n = \frac{60P}{2\pi M}$$

Como hemos dicho, a pesar de que P varíe, n ha de mantenerse constante para mantener constante la frecuencia f . Para conseguirlo solo existe una posibilidad, y es que el motor ha de variar el momento $M = Fr$ de la misma forma que varía la potencia P : si P se duplica ha de duplicar M ; si P se triplica ha de triplicar M ; si P se divide por dos, ha de dividir M por dos; y así. Y para variar M debe variar la fuerza F .

En las turbinas hidráulicas, para variar F se abre más o menos caudal de agua. De forma parecida se hace con la presión del vapor y del gas en las turbinas de vapor y de gas. En los grupos electrógenos se aumenta o disminuye la alimentación de combustible.

Por tanto, en el motor de cada grupo ha de haber un dispositivo que automáticamente mantenga constante la velocidad n del grupo. Ese dispositivo se llama *regulador de velocidad* del grupo.

Fuerza electromotriz del alternador

El valor eficaz de la *fuerza electromotriz* que genera un alternador es

$$E = Kn\Phi$$

K es una constante para cada alternador que depende de características de su fabricación, y Φ es el *flujo por polo*, que se llama también *flujo de excitación* o, simplemente, *excitación*.

La fuerza electromotriz E debe ser tal que la *tensión* de los receptores se mantenga siempre próxima al valor nominal. Si se mantuviera E constante, al conectar y desconectar receptores al alternador, la tensión de los receptores podría variar. Para mantener el valor eficaz de la tensión de los receptores dentro de los límites requeridos, puede ser conveniente variar E dentro de un cierto margen alrededor de su valor

nominal. E solo puede variarse de una forma, que es variando la excitación Φ , ya que n no se puede modificar para no variar la frecuencia f de la fuerza electromotriz.

El conjunto de acciones encaminadas a mantener constante el valor eficaz de la tensión de los receptores se llama *regulación de la tensión*.

Potencia máxima de un grupo

La potencia eléctrica P que en cada momento entrega a su carga eléctrica el alternador de un grupo es, salvo las pérdidas, la potencia que entrega el motor al alternador. Dicho de otra manera, toda la potencia que el alternador entrega a los receptores conectados a él sale del motor. El alternador solo transforma potencia mecánica en potencia eléctrica, que entrega a la red conectada a él.

El valor máximo P_n de la potencia que el motor puede entregar al alternador durante tiempo ilimitado se llama *potencia máxima del grupo* o, simplemente, *potencia del grupo*, y suele servir para referirse al grupo.

La planta termoeléctrica de Compostilla tiene cinco grupos generadores. La potencia de cada turbina de dos de ellos es 350 MW. Esa es la potencia de esos dos grupos. En esa planta termoeléctrica hay otros tres grupos: uno de 330 MW, y dos de 141 MW, cantidades que son las potencias de las turbinas respectivas.

Cada uno de los dos grupos de la planta nuclear de Almaraz es de 980 MW. Esa es la potencia máxima que puede entregar cada turbina a su alternador de manera ininterrumpida, la que entrega cuando funciona a plena potencia.

De la misma forma, la potencia máxima del motor de un grupo electrógeno caracteriza al grupo. *Grupo electrógeno de 670 kW* significa que la potencia máxima que puede entregar el motor al alternador durante tiempo ilimitado es 670 kW.

Caracterización de un alternador

En los objetos eléctricos ha de limitarse el valor eficaz de la intensidad que circula por ellos para que la temperatura que la potencia RI^2 origina en su resistencia no se eleve hasta dañarlos. Sin embargo no es habitual dar el valor eficaz máximo de la intensidad, I_n , para caracterizar los alternadores, sino el producto VI_n máximo si el alternador es monofásico, y el producto $\sqrt{3}UI_n$ máximo en los alternadores trifásicos. La razón es que V es la tensión nominal entre los dos terminales de los alternadores monofásicos; y U es la tensión nominal entre fases de un alternador trifásico, ambas constantes. Por eso, al dar los productos máximos VI_n y $\sqrt{3}UI_n$ realmente se está fijando el mayor valor eficaz I_n de la intensidad.

Los productos $VI_n = S_n$ y $\sqrt{3}UI_n = S_n$ se llaman *potencia aparente máxima* de los alternadores monofásicos y trifásicos respectivamente. Su unidad es VA, a la que habitualmente se designa con el nombre de vatio, de símbolo W, pero que para la potencia aparente se prefiere dejar en VA (voltio amperio). Así la propia unidad informa de que nos referimos a potencia aparente. Por tanto, para que un alternador no se dañe por la elevación de temperatura que la intensidad genera en él, no debe sobrepasarse su potencia aparente máxima S_n .

La potencia activa máxima que un alternador entrega a su carga de factor de potencia $\cos \varphi$ es

$$P = S_n \cos \varphi$$

Esa potencia máxima P depende, por tanto, del factor de potencia de la carga. Solo si $\cos \varphi = 1$, $P = S_n$. Como S_n es fija, P depende del factor de potencia de la carga. Es decir, un alternador puede estar funcionando en condiciones de potencia aparente máxima S_n , pero estar entregando una potencia P inferior a S_n .

Potencia máxima del alternador de un grupo

Desde luego, un alternador solo puede entregar a su carga en forma de potencia eléctrica, como máximo, la potencia P_n máxima que pueda entregarle el motor. Así, el alternador de un grupo de $P_n = 350$ MW no puede entregar a su carga eléctrica una potencia activa superior a 350 MW. Parece, por tanto, que la potencia aparente máxima de ese alternador debería de ser de $S_n = 350$ MVA. Pero un alternador con esa potencia aparente solo entrega los 350 MW si la carga tiene factor de potencia 1. Si la carga tiene factor de potencia $\cos \varphi < 1$, el alternador solo puede entregar, como máximo, la potencia activa $P = S_n \cos \varphi = 350 \cos \varphi < 350$.

Es decir, con un alternador de potencia aparente máxima $S_n = 350$ MVA, no se podría entregar a una carga de $\cos \varphi < 1$ la potencia máxima $P_n = 350$ MW del motor de ese grupo, sino solo $350 \cos \varphi < P_n$. Por eso, para la elección del alternador conviene conocer el factor de potencia $\cos \varphi_n$ de la carga a la que se quiere entregar la potencia máxima P_n . Entonces la potencia aparente del alternador ha de ser

$$S_n = \frac{P_n}{\cos \varphi_n} > P_n, \quad (1)$$

mayor que la potencia del motor. Este alternador solo puede entregar la potencia máxima P_n a todas las cargas con factor de potencia $\cos \varphi$ mayor o igual que $\cos \varphi_n$, porque su potencia aparente se mantiene entonces menor o igual que la máxima:

$$S = \frac{P_n}{\cos \varphi} \leq \frac{P_n}{\cos \varphi_n} = S_n \quad (2)$$

Pero a una carga con factor de potencia $\cos \varphi \leq \cos \varphi_n$ el alternador solo puede entregarle la potencia activa

$$P = S_n \cos \varphi \leq S_n \cos \varphi_n = P_n$$

O también,

$$P = S_n \cos \varphi = \frac{P_n}{\cos \varphi_n} \cos \varphi = P_n \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_n} \leq P_n \quad (3)$$

La figura 1 representa lo que expresan (1), (2) y (3). La recta azul es la representación gráfica de la función $P = S_n \cos \varphi$ hasta $\cos \varphi_n$. Si ese producto es menor o igual que la potencia máxima P_n del motor del grupo, el alternador entrega esa potencia P . Eso ocurre si $\cos \varphi \leq \cos \varphi_n$. Para $\cos \varphi > \cos \varphi_n$, las características del alternador le podrían permitir entregar la potencia $S_n \cos \varphi$; pero no lo hará porque esa cantidad es superior a la potencia $P_n = S_n \cos \varphi_n$ que le entrega el motor, por lo que a partir de $\cos \varphi_n$ hasta 1 el alternador solo entrega, como máximo, la potencia máxima P_n que le entregue el motor. El resultado y resumen de lo dicho es que el alternador del grupo solo puede funcionar en los puntos de la figura 1 que están en la curva o debajo de ella, en la zona roja A.

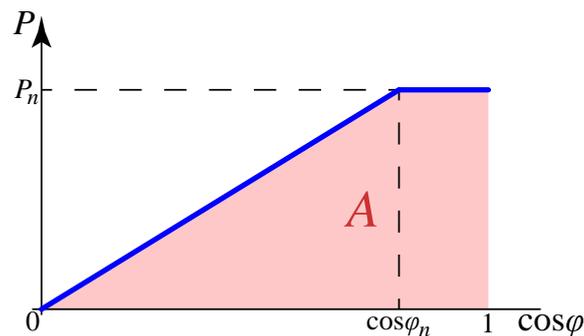


Fig. 1.- Potencia activa máxima que puede entregar un grupo de potencia P_n y factor de potencia $\cos \varphi_n$ a cargas de factor de potencia $\cos \varphi$.

Por comodidad, a veces se llama a $\cos \varphi_n$ *factor de potencia del alternador*. Realmente, como se ha dicho, $\cos \varphi_n$ es el menor factor de potencia de la carga a la que el alternador puede entregar la máxima potencia P_n del grupo. A cargas con factor de potencia menor ($\cos \varphi \leq \cos \varphi_n$) a lo sumo puede entregarles la potencia activa

$$P = P_n \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_n} \leq P_n$$

obtenida en (3).

Por tanto, si se elige un alternador con potencia aparente máxima S_n dada por (1), ese alternador va a poder entregar la potencia máxima P_n del motor a todas las cargas de factor de potencia superior a $\cos \varphi_n$. A las cargas de factor de potencia $\cos \varphi \leq \cos \varphi_n$, solo puede entregarles la potencia máxima $P = S_n \cos \varphi \leq P_n$.

Pero conocer el factor de potencia de la carga que se va a conectar a un alternador no siempre es posible, pues, en general, ese factor de potencia puede cambiar con los receptores que se conectan y desconectan. Por eso, para los grupos electrógenos, suele estimarse un factor de potencia de la carga y se elige el alternador para ese factor de potencia. Para muchos grupos electrógenos se fija $\cos\varphi_n = 0.8$ como factor de potencia, lo que significa elegir un alternador de potencia aparente $S_n = P_n/0.8$, que podrá entregar P_n si la carga tiene factor de potencia 0.8 o superior, y $P = S_n \cos\varphi < P_n$ a las cargas con $\cos\varphi < 0.8$.

Caracterización de grupos

Aparte de la tensión nominal que ha de mantener el alternador, una forma de referirse a los grupos es dar la potencia máxima P_n del motor, y la potencia aparente máxima S_n del alternador. O también, la potencia máxima del motor P_n y el factor de potencia $\cos\varphi_n$ a partir del cual el alternador puede entregar la potencia máxima P_n . Desde luego

$$S_n = \frac{P_n}{\cos\varphi_n}$$

Por ejemplo, se dice: un grupo de 350 MW y 390 MVA; o un grupo de 350 MW y 0.90 de factor de potencia. Significa que el grupo puede entregar los 350 MW solo a cargas con factor de potencia igual o mayor que 0.9. A una carga con factor de potencia 0.8 la potencia máxima que puede entregarle es $390 \times 0.8 = 312$ MW.

Potencias de grupos electrógenos

Todo lo que se ha dicho hasta ahora es válido para los grupos electrógenos. Pero, debido a las características de los motores de combustión interna y a la forma de utilizar los grupos electrógenos, suelen añadirse para ellos otras informaciones útiles. De ellas trata la norma ISO 8528-1. En concreto, las potencias máximas nominales, que nosotros hemos designado por P_n para el motor y S_n para el alternador, se designan como *PRP* (*Prime Rating Power*). Además se define la *LTP* (*Limited Time Power*) o potencia de emergencia, que es la potencia que puede entregar el grupo durante un tiempo limitado.

Por tanto, desde el punto de vista de la potencia, un grupo eléctrico puede caracterizarse así:

Potencia máxima nominal (PRP)	504 kW, 630 kVA
Potencia de emergencia (LTP)	624 kW, 780 kVA