TEMA 42

ACOPLAMIENTO DE GENERADORES

42.1 INTRODUCCIÓN.

Una central de producción de energía eléctrica consiste en un conjunto de máquinas capaces de transformar energía mecánica, de cualquier tipo, en energía eléctrica. Esta transformación se puede hacer utilizando una o varias unidades. La solución recomendable es la segunda, ya que:

- ☞ Una avería, en el supuesto de disponer de una sola unidad, dejaría sin servicio al sistema receptor.
- ☞ Un solo generador, cuando no funciona en régimen nominal, no tiene buen rendimiento.

42.2 TIPOS DE ESTACIONES GENERADORAS.

Las estaciones generadoras se clasifican, según el tipo de corriente que producen, en:

- ☞ Estaciones de corriente continua.
- ☞ Estaciones de corriente alterna.

Las máquinas encargadas de producir la transformación de energía mecánica en eléctrica son:

- ☞ Corriente continua: Dínamos.
- ☞ Corriente alterna: Alternadores.

42.3 TIPOS DE ACOPLAMIENTOS DE DÍNAMOS.

Las dínamos se pueden acoplar de dos formas:

① Acoplamiento en serie.

② Acoplamiento en paralelo.

Los acoplamientos en serie se realizan cuando una sola dínamo no puede proporcionar la tensión necesaria.

Los acoplamientos en paralelo se realizan cuando una sola dínamo no puede proporcionar la intensidad suficiente.

42.4 ESTABILIDAD DEL ACOPLAMIENTO DE DÍNAMOS.

El acoplamiento de dínamos debe responder a tres tipos de estabilidades:

① Estabilidad electromecánica.

② Estabilidad eléctrica.

③ Estabilidad de reparto de cargas.

42.4.1. ESTABILIDAD ELECTROMECÁNICA.

Dos dínamos tienen un funcionamiento estable, desde el punto de vista electromecánico, cuando se verifica:

① Aumentando la velocidad toman más carga.

② Disminuyendo de velocidad ceden carga.

Por tanto, el grupo motor-dínamo tenderá a adquirir una velocidad estable.

42.4.2 ESTABILIDAD ELÉCTRICA.

Es necesario que las polaridades de las dínamos no se cambien unas respecto a otras.

Dado que el sentido de giro del rotor no varía, es necesario que no se cambien los sentidos de las corrientes de excitación. De otra forma un acoplamiento en paralelo pasaría a serie

y se convertiría en inestable desde el punto de vista eléctrico. En consecuencia: *Para obtener un acoplamiento estable, es necesario y suficiente que los sentidos de las corrientes en los inductores de las dínamos sean iguales entre sí.*

42.4.3 ESTABILIDAD DE REPARTO DE CARGAS.

Una vez que se ha efectuado el acoplamiento, se trata de lograr que las cargas se repartan entre las máquinas acopladas.

Existe un punto de equilibrio, que se corresponde con el punto de corte de las curvas características exteriores de las máquinas acopladas.

Diremos que la marcha en paralelo de dos generadores de corriente continua es estable, cuando un aumento de la carga que afecte al conjunto, se reparta entre las dos dínamos de forma proporcional a sus potencias nominales.

42.5 ACOPLAMIENTO DE DÍNAMOS CON EXCITACIÓN EN DERIVACIÓN.

En este estudio se va a describir el acoplamiento en paralelo de dos dínamos en derivación, por ser el caso más general.

En la Fig. 42.1 se ha representado el esquema eléctrico del acoplamiento de dos generadores en derivación (shunt). En el mismo se ha dispuesto un conmutador de voltímetro para medir la tensión en bornes de los dos generadores, y de las barras de distribución a las que van conectados.

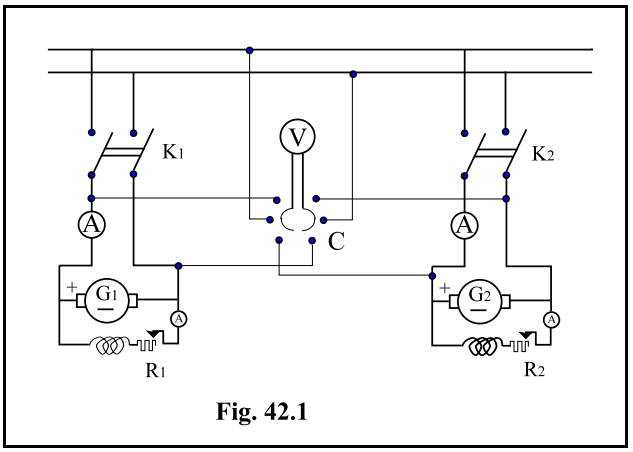


Fig. 42.1

La puesta en marcha de la instalación, desde un principio, es la siguiente: Se comienza por poner en marcha el generador $\mathbf{G_1}$. La maniobra se realiza con los interruptores $\mathbf{K_1}$ y $\mathbf{K_2}$ abiertos. Se regula la tensión de salida actuando sobre el reóstato de excitación $\mathbf{R_1}$, hasta lograr que la tensión de salida sea la deseada, **U** (el conmutador de voltímetro **C**, se coloca dé forma que mida la tensión de salida de la dínamo $\mathbf{G_1}$**).** En estas condiciones se cierra el interruptor $\mathbf{K_1}$ que conecta la máquina a las barras de salida.

A medida que se van conectando o desconectando receptores a las barras de distribución, se produce una caída o una elevación de la tensión, que hay que compensar actuando sobre el

circuito de excitación $\mathbf{R_1}$, de la dínamo $\mathbf{G_1}$ (en estas circunstancias el conmutador de voltímetro **C** se pasa a la posición que permita medir la tensión en barras), de forma que se mantenga el valor la tensión en barras en su valor inicial **U**. Si como consecuencia del número de cargas conectadas, la dínamo $\mathbf{G_1}$ no fuese capaz de mantener el valor adecuado de la tensión en las barras de distribución, sería el momento de conectar en paralelo, la dínamo $\mathbf{G_2}$.

Para conectar el generador $\mathbf{G_2}$ a las barras de distribución, deben cumplirse los siguientes requisitos:

1º) Los terminales de ambos generadores deben estar unidos a la misma polaridad en las barras de salida.

2º) Las tensiones de salida de los dos generadores deben ser iguales.

Por tanto, una vez puesta la segunda máquina en marcha, y con el interruptor $\mathbf{K_2}$ abierto, se actúa sobre el reóstato de excitación $\mathbf{R_2}$, hasta conseguir que la tensión de salida (el conmutador de voltímetro **C** se pasa a la posición que permita medir la tensión de salida de la dínamo $\mathbf{G_2}$) coincida con la tensión en barras de distribución **U**, y solo entonces se cerrará el interruptor $\mathbf{K_2}$. Con lo que las dos máquinas quedarán conectadas en paralelo.

A continuación se va a estudiar como funciona la instalación a partir del momento en que los dos generadores están conectados en paralelo. Un receptor conectado a barras absorbe una intensidad determinada **I**, que es suministrada por los dos generadores. Esta intensidad se reparte de forma determinada. Sean $\mathbf{I_1}$ e $\mathbf{I_2}$ las intensidades que suministran los dos generadores $\mathbf{G_1}$ y $\mathbf{G_2}$**.** Las características exteriores de los generadores establecen la forma de reparto de la intensidad **I**, entre ellos.

Sean **1** y **2** las curvas características exteriores $\mathbf{U(I_i)}_{\ i=1,2}$, de los generadores, tal como se representa en la Fig. 42.2.

La curva **3**, **U(I)** corresponde a la característica exterior del conjunto, es decir determina el valor de la tensión en barras en función de la intensidad total que absorbe el conjunto de receptores. En esta operación es preciso que el conmutador de voltímetro **C** pase a la posición que permita medir la tensión en barras.

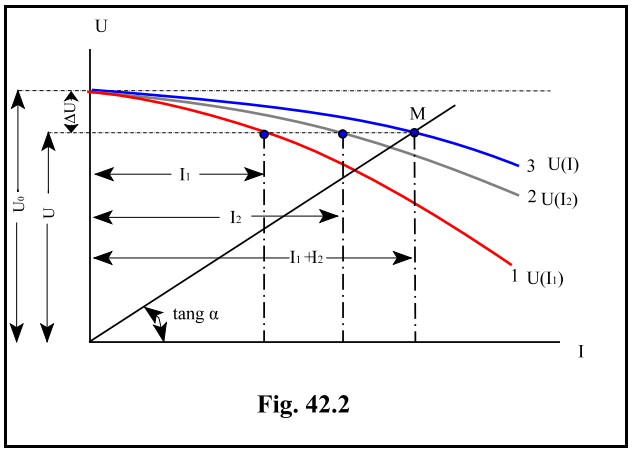


Fig. 42.2

Como la tensión **U**, en barras, es la misma que la que existe en bornes de salida de los dos generadores, se obtendrán los valores que suministran estos, $\mathbf{I_1}$ e $\mathbf{I_2}$ sobre las curvas **1** y **2**, respectivamente, para un valor determinado de **U.**

Si $\mathbf{U_0}$ es la tensión en vacío correspondiente a los dos generadores, significa que en todo momento, la caía de tensión $\mathbf{\Delta U}$ es la misma en ambos, y las intensidades se repartirán con este criterio.

Como se observa en la Fig.42.2, la $\mathbf{I_2}$ suministrada por el generador $\mathbf{G_2}$ es mayor que la $\mathbf{I_1}$ que suministra el $\mathbf{G_1}$. Lo anterior es debido a la diferencia de pendiente de las curvas características de ambas dínamos.

Como conclusión general se deduce, que un generador con una curva característica exterior con menor pendiente que otro, suministra mayor intensidad que aquel.

Si las potencias nominales de las dos dínamos son iguales ($\mathbf{P_1 = P_2}$), para que en una determinado régimen de carga las potencias que suministren las dos dínamos sean iguales, tendrán que serlo las intensidades, y para ello se precisa que las curvas características exteriores de ambas sean iguales. Cuando se aumenta la cargas exterior hasta alcanzar la plena, los dos generadores darán la misma potencia nominal.

Conviene resaltar, que si las dos dínamos tienen la misma potencia nominal, pero sus características exteriores son diferentes, tal como se indica en la Fig. 42.2, cuando el sistema receptor solicite una potencia $\mathbf{2P_1}$, las intensidades de los dos generadores no serán iguales, y tampoco lo serán las potencias. En consecuencia, en este estado, un generador (en este caso el $\mathbf{G_2}$) dará más potencia de la nominal, es decir se sobrecargará, mientras que el otro (en este caso el $\mathbf{G_1}$) no llegará a desarrollar su potencia nominal.

Si las potencias nominales de los dos generadores no fuesen iguales, las intensidades a plena carga tampoco lo serían, y las intensidades que suministran tampoco. En efecto, sean $\mathbf{P_{1n}}$ y $\mathbf{P_{2n}}$, las potencias nominales de ambos generadores. Para plena carga se debe cumplir que:

$$\begin{aligned} P_{1n} &= U.I_{1n} \\ P_{2n} &= U.I_{2n} \end{aligned} \qquad (42.1)$$

Cuando funcionan en paralelo ambos generadores, interesa que en todo momento dicho funcionamiento esté de acuerdo con el mismo régimen de carga, es decir debe cumplirse:

$$\frac{I_1}{I_{1n}} = \frac{I_2}{I_{2n}} \qquad (42.2)$$

y para ello las características exteriores relativas, es decir las que dan $\mathbf{U(I/I_n)}$ deben ser iguales. Las intensidades en los generadores se distribuyen proporcionalmente a sus potencias nominales, dando en el régimen de plena carga toda su potencia nominal. Si esto no fuese así, uno de los

generadores trabajaría sobrecargado, como se ha apuntado más arriba, mientras que el otro no llegaría a desarrollar su potencia nominal.

Supongamos que a las barras de distribución se conectase una carga que tuviese una resistencia eléctrica $\mathbf{R_c}$. El punto de funcionamiento del sistema viene dado en la Fig. 42.2 por la intersección de la característica exterior y la recta de pendiente $\mathbf{R_c}$ (punto **M**). Las ecuaciones que rigen el funcionamiento del conjunto, y que permiten calcular las intensidades $\mathbf{I_1}$ e $\mathbf{I_2}$ que suministran los generadores y la tensión en barras serán:

$$\begin{aligned} U &= E_1 - (I_1 + I_{i1})\cdot r_{d1} = E_1 - (I_1 + \frac{U}{R_{i1}})\cdot r_{d1} \\ U &= E_2 - (I_2 + I_{i2})\cdot r_{d2} = E_2 - (I_2 + \frac{U}{R_{i2}})\cdot r_{d2} \\ U &= R_c\cdot(I_1 + I_2) \end{aligned} \qquad (42.3)$$

donde:

U es la tensión en barras de distribución.
$\mathbf{E_1}$ **y** $\mathbf{E_2}$ son las fuerzas electromotrices en vacío de ambos generadores.
$\mathbf{r_{d1}}$ **y** $\mathbf{r_{d2}}$ son las resistencias de los inducidos de ambos generadores.
$\mathbf{I_{i1}}$ **y** $\mathbf{I_{i2}}$ son las intensidades de excitación de ambos generadores.
$\mathbf{R_{i1}}$ **y** $\mathbf{R_{i2}}$ son las intensidades de las bobinas inductoras de ambos generadores.
$\mathbf{R_c}$ es la resistencia del circuito conectado a las barras de distribución.

42.6 ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE ALTERNADORES.

Aún cuando es posible el acoplamiento de varios generadores síncronos (alternadores) en serie[1], el acoplamiento no es útil y por tanto no se utiliza en la práctica. El procedimiento normal de acoplamiento es en paralelo, con objeto de disponer de la intensidad que en todo momento demande el sistema receptor.

Para poder conectar un alternador a otro que ya esté funcionando, deben cumplirse las siguientes condiciones:

① El valor de la fuerza electromotriz del alternador que se conecte debe ser igual a la del alternador que esté ya conectado.
② Deben conectarse entre sí los terminales de la misma polaridad.
③ Las frecuencias de los alternadores deben ser iguales.

[1] Se demuestra que los alternadores cuando se acoplan en serie tienden a colocarse en oposición, por tanto su marcha es inestable.

42.7 ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE ALTERNADORES MONOFÁSICOS.

Supóngase que se conectan en paralelo tres alternadores monofásicos tal como se refleja en la Fig. 42.3.

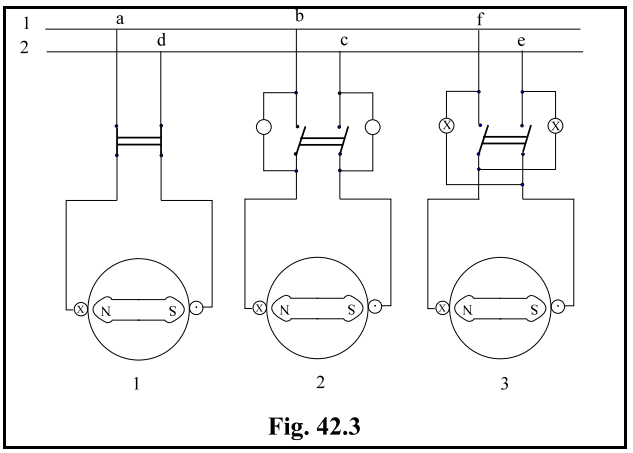


Fig. 42.3

La primera condición que tienen que cumplir es que las fuerzas electromotrices tienen que ser iguales, ya que en el supuesto contrario se produciría una diferencia de potencial entre ellos, lo que daría lugar a una intensidad elevada[2].

La segunda condición es que tienen que conectarse entre sí los terminales de los alternadores de igual polaridad. En consecuencia, la conexión deberá producirse cuando estén en fase las fuerzas electromotrices de los generadores que se vayan acoplar en paralelo.

Los alternadores **1** y **2**, según se indica en la Fig. 42.3, tienen las fuerzas electromotrices en oposición de fase, y como tienen el mismo valor eficaz, por cumplirse la condición primera, su resultante es nula.

El instante en que debe producirse la conexión del segundo alternador puede decidirse usando dos sistemas:

☹ Lámparas apagadas. Se corresponde con **2** en la Fig. 42.3.

☺ Lámparas encendidas. Se corresponde con **3** en la Fig. 42.3

La Fig. 42.3 representa el instante en que pueden conectarse los alternadores **2** o **3** con el alternador **1**, ya que los tres generadores tienen, en dicho instante, la misma polaridad en barras.

Con el sistema de *lámpara apagadas*, el circuito formado por: *1 - lámparas - 2 (d -a -b- c-d)*, tiene tensión nula, al estar la fuerza electromotriz de **1** en oposición con **2** y en consecuencia, las lámparas están apagadas.

Con el sistema *lámparas encendidas*, el circuito formado por: *1 - lámparas - 3* (*d-a-f-e-d)*, tiene una tensión suma de las que proporcionan los dos generadores y las lámparas lucirán con la máxima intensidad.

[2] Esto es debido a la baja impedancia de las inductancias de los inducidos.

Los dispositivos anteriores reciben el nombre de *sincronoscopio de lámparas.*

Finalmente se tiene que verificar que los alternadores tienen que tener la misma frecuencia.

Supóngase que el alternador **1** produjera una frecuencia $\mathbf{f_1}$, y que el **2**, que se pretende acoplar, produjera una $\mathbf{f_2}$.

Si se representan en un diagrama las fuerzas electromotrices de ambos alternadores; $\mathbf{E_1}$ y $\mathbf{E_2}$, respectivamente, y se fijase $\mathbf{E_1}$ en el origen de fases, al girar los vectores con velocidades distintas $\boldsymbol{\omega_1}$ y $\boldsymbol{\omega_2}$, correspondientes a las frecuencias $\mathbf{f_1}$ y $\mathbf{f_2}$, se obtendría un diagrama en el que $\mathbf{E_1}$ estaría fijo y $\mathbf{E_2}$ giraría a una velocidad angular $\boldsymbol{\omega_1 - \omega_2}$.

El circuito interno de los generadores **1** y **2**, produce una fuerza electromotriz diferencia de la que producen ambos alternadores, es decir se cumple:

$$\overline{E_s} = \overline{E_1} - \overline{E_2} \qquad (42.4)$$

La Fig. 42.4 representa el diagrama vectorial correspondiente.

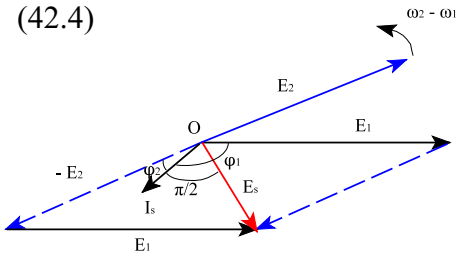


Fig. 42.4

El valor de la intensidad que circula por la malla formada por los dos alternadores, es:

$$\overline{I_s} = \frac{\overline{E_s}}{\overline{Z}} \qquad (42.5)$$

Siendo:

$$\overline{Z} = r_1 + j\omega L_1 + r_2 + j\omega L_2 \qquad (42.6)$$

$\mathbf{r_1}$: Resistencia interna del alternador 1.
$\mathbf{r_2}$: Resistencia interna del alternador 2.
$\boldsymbol{\omega L_1}$: Reactancia interna del alternador 1.
$\boldsymbol{\omega L_2}$: Reactancia interna del alternador 2.

Pero $\mathbf{r_1 + r_2}$ es prácticamente nula, por tanto:

$$\overline{Z} = j(\omega L_1 + \omega L_2) \qquad (42.7)$$

Lo que implica que $\mathbf{I_s}$ y $\mathbf{E_s}$ están desfasados prácticamente $\boldsymbol{\pi/2}$ ($\mathbf{I_s}$ retrasada respecto a $\mathbf{E_s}$).

La circulación de $\mathbf{I_s}$ por los dos alternadores produce potencias en ambos definidas por las expresiones:

$$P_1 = E_1.I_s.\cos\varphi_1 \qquad (42.8)$$
$$P_2 = E_2.I_s.\cos\varphi_2$$

Se ha supuesto que la velocidad de $\boldsymbol{\omega_2}$ es mayor que $\boldsymbol{\omega_1}$, y además:

$\varphi_1 > 90^o$ y $\varphi_2 < 90^o$

Lo que supone que $\mathbf{P_1}$ es negativa y $\mathbf{P_2}$ positiva. En definitiva el alternador **1** absorbe potencia, por tanto funciona como motor, y el **2** suministra potencia, es decir funciona como generador.

Como resultado de lo que se acaba de exponer, el alternador **2** suministra una potencia mayor (la que cede al circuito, más la que absorbe el **1**), por lo que se sobrecargará, reduciendo su velocidad $\boldsymbol{\omega_2}$. Por el contrario **1** dará menor potencia, al recibir parte de **2**, y por tanto aumentará su velocidad $\boldsymbol{\omega_1}$. Como consecuencia de la aparición de $\mathbf{I_s}$, debido a la diferencia de frecuencia entre los dos alternadores, se frenará el más rápido y se acelerará él más lento, con lo que tenderán a alcanzar ambos la misma velocidad, y en consecuencia la misma frecuencia. Por esta razón la intensidad $\mathbf{I_s}$ recibe el nombre de *corriente sincronizante*.

En resumen, cuando las frecuencias de dos alternadores que se pretenden acoplar no son iguales, aparece una fuerza electromotriz $\mathbf{E_s}$, lo que origina la corriente sincronizante $\mathbf{I_s}$, la cual, al circular por las lámparas produce un *aleteo*, ya que $\mathbf{E_s}$ varía desde cero al doble de la fuerza electromotriz de cada alternador. El *aleteo* de las lámparas desaparece cuando la corriente sincronizante ha logrado que las frecuencias de ambos sean iguales.

El diagrama de Behn-Eschenburg correspondiente a un alternador monofásico está representado en la Fig. 42.5.

Del diagrama de la Fig.42.5 se deduce la ecuación:

$$\vec{U} = \vec{E} - j\omega L.\vec{I} - R.\vec{I}$$

Como criterio de simplificación se admite que la resistencia del inducido es despreciable frente a la reactancia

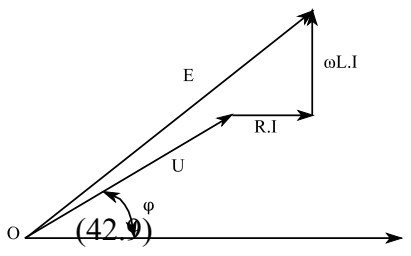


Fig.42.5

inductiva, con lo que la Fig.42.5 se transforma en la Fig.42.6.

De la Fig.42.6 se deduce:

$$BM = X.I.\cos\varphi \qquad (42.10)$$

La potencia que suministra el alternador es:

$$P = U.I.\cos\varphi \qquad (42.11)$$

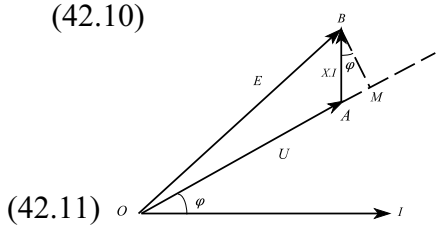


Fig.42.6

Por tanto, si de (42.10) se despeja la componente activa de la intensidad, **I.cos**φ y se sustituye en (42.11) se obtiene:

$$P = BM.\frac{U}{X} \qquad (42.12)$$

Se puede decir, que la potencia activa se obtiene aplicando una semejanza de razón $\frac{U}{X}$ al segmento BM de la Fig.42.6.

La potencia reactiva que suministra el alternador es:

$$Q = U.I.sen\varphi \qquad (42.13)$$

Pero del la Fig.42.6 se deduce:

$$AM = X.I.sen\varphi \qquad (42.14)$$

Despejando la componente reactiva de la intensidad, **I.sen** φ de (42.14) y sustituyendo en (42.13) resulta:

$$Q = AM.\frac{U}{X} \qquad (42.15)$$

Por tanto, la potencia reactiva se obtiene aplicando una semejanza de razón U/X al segmento AM de la Fig.42.6.

La Fig.42.7 refleja la situación que se produce en el acoplamiento en paralelo de dos alternadores iguales.

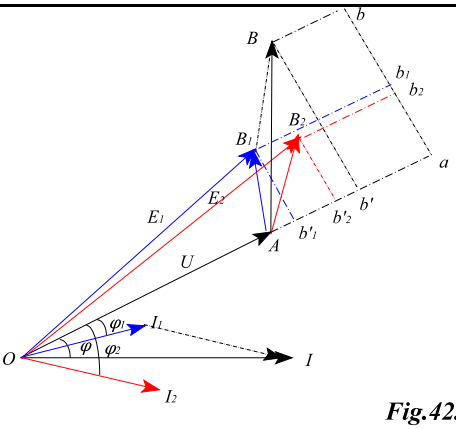


Fig.42.7

La tensión en bornes de los dos alternadores es la misma, y en la Fig.42.7 está representada por el segmento **OA**, siendo la corriente que suministra el conjunto **I,** y la potencia activa $P = U.I.\cos\varphi$.

La intensidad que absorbe el conjunto es igual a la suma de las intensidades que suministran los dos alternadores, es decir:

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 \qquad (42.15)$$

Las fuerzas electromotrices de los alternadores están representadas por los segmentos $\mathbf{OB_1}$ y $\mathbf{OB_2}$.

De la Fig.42.7 se deduce:

$$\begin{aligned} ab &= X.I.\cos\varphi \\ ab_1 &= X_1.I_1.\cos\varphi_1 \\ ab_2 &= X_2.I_2.\cos\varphi_2 \\ Ab' &= X.I.sen\varphi \\ Ab_1 &= X_1.I_1.sen\varphi_1 \\ Ab_2 &= X_2.I_2.sen\varphi_2 \end{aligned} \qquad (42.16)$$

Según se ha visto más arriba, las potencias activas y reactivas en el sistema se pueden establecer a partir del diagrama de tensiones. En efecto:

$$\begin{aligned} P_1 &= ab_1.\frac{U}{X_1} \\ P_2 &= ab_2.\frac{U}{X_2} \\ Q_1 &= Ab_1.\frac{U}{X_1} \\ Q_2 &= Ab_2.\frac{U}{X_2} \\ P &= ab.\frac{U}{X} \\ Q &= Ab'.\frac{U}{X} \end{aligned} \qquad (42.17)$$

42.7 ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE ALTERNADORES TRIFÁSICOS.

A continuación, vamos a estudiar el acoplamiento en paralelo de dos alternadores trifásicos.

Además de las condiciones que se precisaban para la conexión de alternadores monofásicos, es necesario que tengan la misma sucesión de fases.

En este caso se utiliza un sincronoscopio de lámparas que se disponen en los vértices de un triángulo equilátero. Se utilizan dos tipos de sincronoscopio:

a) Lámparas apagadas.

b) Lámparas encendidas.

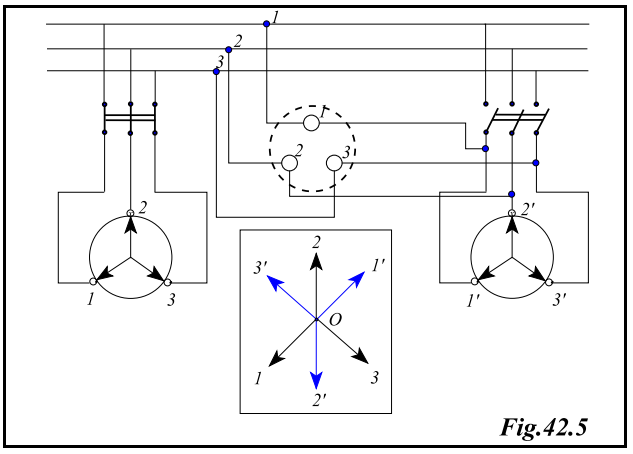


Fig.42.5

En la Fig. 42.5 se ha representado el esquema de la conexión de dos alternadores trifásicos utilizando el sincronoscopio de lámparas apagadas.

Cada lámpara está conectada a una fase. La tensión a la que está conectada cada lámpara, es la resultante de sumar las tensiones simples de cada alternador. En la Fig.42.5 se ha representado en el recuadro la situación que se produce cuando los dos alternadores están en fase. Como puede observarse la lámpara **1** está conectada a una diferencia de potencial entre la tensión simple del primer alternador y la del segundo, como ambas tensiones están en oposición de fase, dicho potencial es nulo. En consecuencia la lámpara estará apagada. Lo mimo se puede decir de las otras dos lámparas. Por tanto, cuando los dos sistemas trifásicos están en fase las tres lámparas permanecerán apagadas.

Otro tipo de sincronoscopio es el de lámparas encendidas. En la Fig.42.6 se ha representado el esquema eléctrico de este sincronoscopio.

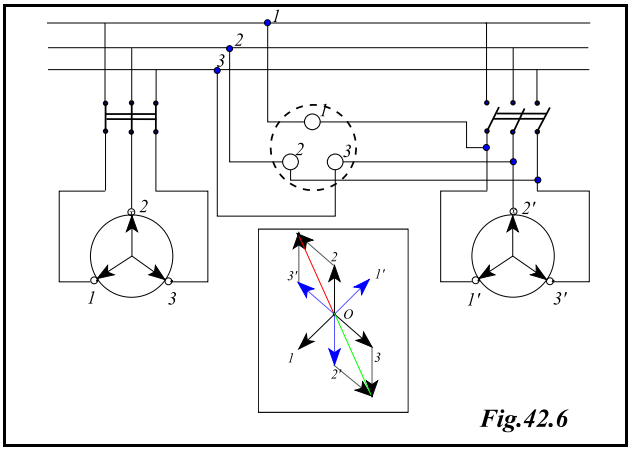


Fig.42.6

En este sincronoscopio la lámpara **1** permanece apagada, como en el tipo anterior, sin embargo las otras dos lucirán a la máxima intensidad luminosa, ya que están conectadas a una tensión que resulta de sumar las fuerzas electromotrices simples de los dos alternadores. Esta circunstancia está representada claramente en el recuadro de la Fig.42.6.

Si no coinciden las frecuencias de los dos alternadores se producirá una diferencia de rotación en los diagramas de los dos alternadores, esto se traduce en una variación en la tensión a la que están conectadas las lámparas del sincronoscopio. Lo anterior da lugar a una sensación de giro en las lámparas.