

Fig. 13. Válvulas de mariposa en la galería de derivación del pantano de Montejaque, movidas por servomotores de aceite. La válvula grande A sirvió durante la construcción para la evacuación de avenidas. Posteriormente se ha instalado la válvula B, para la más precisa regulación requerida por las centrales de agua abajo. (Suministro de Ateliers des Charmilles, S. A.)

como reserva para la fábrica de electricidad de Gaucín, sobre el Guadiaro. Para ajustar mejor el

nivel del agua se montó una segunda válvula de mariposa con 0,80 m de diámetro solamente. Quedó comprobado que la válvula de 1,80 m no bastaba para desaguar las crecidas, pero se consideraba más económico en ciertas circunstancias dejar sumergida la presa, que proveerla de una válvula de mayor diámetro. En efecto, la presa de Montejaque quedó inundada una vez durante su construcción, pero sin perjuicio. Naturalmente, fué preciso limpiar cuidadosamente la superficie del muro antes de verter nuevamente el hormigón.

Para presas de gravedad se adopta otro método. En la presa de Cala, por ejemplo, se hicieron los cimientos en toda la anchura del río durante el estiaje, en seco. Para dar paso a las aguas durante el invierno de 1925-26, se dejó una abertura de 15 m de ancho. Entretanto se construyó la galería del fondo, atravesando el muro en el lado derecho, y seguidamente se cerraba la abertura, que servía de vertedero. En la galería de fondo se ha colocado una válvula de mariposa con un diámetro de 1,80 m. Esta válvula sirve para los desagües regulares de invierno. En caso de crecidas no basta, y la presa queda sumergida, lo que sucedió a fines de noviembre de 1926.

H. E. GRUNER
Ingenieur-conseil
Basilea

Acoplamiento de alternadores ⁽¹⁾

II

Acoplamiento de alternadores según el diagrama clásico

Recordemos el diagrama clásico que representa el caso de dos alternadores iguales, trabajando en paralelo. Con pequeñas reformas se aplica al caso de dos alternadores diferentes. Se supone, con cierto error, que durante el balanceo de las masas giratorias, en relación con otras masas virtuales que girarán uniformemente, las f. e. m. de las máquinas permanecen constantes. En verdad, lo que permanece constante es la excitación de ambas máquinas, que no es lo mismo

Llamaremos: E_1 y E_2 , a las f. e. m. de ambas máquinas, iguales en valor absoluto, y a_1 y a_2 , a los ángulos de decalaje de estas f. e. m. con relación a la corriente; φ , al ángulo de decalaje propio del cir-

cuito externo con $\text{tag } \rho = \frac{X}{R}$, y ψ a la relación de cada máquina haciendo $\text{tag } \psi = \frac{\lambda}{r}$. Sean I_1 , I_2 e I las corrientes en cada máquina y en el circuito exterior.

El diagrama clásico nos muestra las f. e. m. de ambas máquinas y las f. e. m. sélficas BD_1 y BD_2 , como valores iguales a I_1z e I_2z , siendo z la impedancia constante de cada alternador $= \sqrt{\lambda^2 + r^2}$.

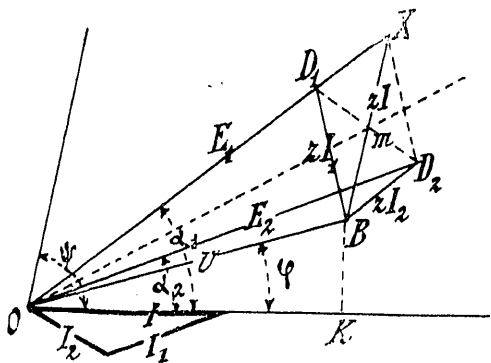
El triángulo BD_1X , es semejante al $I - I_1 - I_2$. Por tanto, $BX = zI$ y $Bm = zI/2$ y el ángulo $KOm = (a_1 + a_2) : 2$.

Fácil es demostrar que este ángulo que forma la bisectriz de OD_1 y OD_2 con OI es constante, aunque oscile la fase de E_1 y E_2 ; porque cualquiera que sea la intensidad de la corriente, OI , en proporción, a su valor se debe tomar el punto B sobre la recta fija OB , y en la misma relación y en la dirección también fija OX , se debe situar el punto m , a la distan-

(1) Véase el número anterior, página 109.

cia $zI : 2$. Luego el punto m cae siempre sobre la misma recta Om .

Para fijar un punto de la recta Om basta calcular



el caso en que ambas f. e. m., E_1 y E_2 , coinciden en una misma fase.

Para esta situación se tendrá

$$\tan \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \tan \delta = \frac{\frac{\lambda}{2} I + XI}{\frac{r}{2} I + RI} = \frac{\lambda + 2X}{r + 2R}$$

Para dibujar el diagrama basta, pues, trazar el ángulo δ , y para cada valor de

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \delta$$

que se toma por dato, se trazan E_1 y E_2 , después la línea D_1D_2 que da el punto m , y conociendo la dirección mB , por el dato de la impedancia supuesta constante de las máquinas, se traza la recta mB que nos permite acabar el diagrama y conocer la d. d. p., U ; y las corrientes I_1 e I_2 .

Este es el diagrama clásico: veamos ahora de trazar el nuevo diagrama en que se tenga en cuenta la variación de las f. e. m., por variación de las componentes desvatiadas, según nos habíamos propuesto.

Acoplamiento de alternadores teniendo en cuenta la variación de la f. e. m

Quando dos máquinas se hallan trabajando acopladas sobre un circuito a una alteración de la carga o de la potencia motora de una máquina, corresponde un acomodamiento de los alternadores a la nueva situación variando la diferencia de fase entre ambas máquinas. Pero la adaptación no se produce de una vez, sino que sobrevienen oscilaciones pendulares de la posición de fase relativa, de una máquina con otra, dependientes de las originales alteraciones de la potencia o de la carga y de las constantes del sistema. Se producen así complicadísimos vaivenes, cuya ley tiene la difícilísima averiguación a que alude el profesor Barbillion.

Las funciones eléctricas que en el estado de movimiento permanente uniforme de las máquinas sean senoidales, dejan de presentar este carácter, y en verdad exacta no puede asimilarse las dependencias mutuas de estas funciones eléctricas a las relaciones geométricas de las líneas de los diagramas vectoriales corrientes. Pero si el período de las oscilaciones mecánicas de las masas giratorias alrededor de posiciones de equilibrio es mucho mayor que el propio

de las alternancias de la corriente, se comprende que la adaptación de las funciones a cada estado, aunque no sea instantánea, se hace con una prontitud tal que el diagrama vectorial responde casi exactamente a la situación instantánea de los valores de las funciones alternativas.

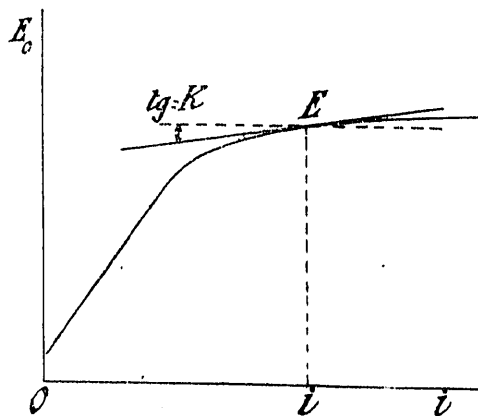
Las reacciones mecánicas de las máquinas calculadas para una situación determinada de las fases respectivas pueden tomarse como valores reales, para introducirlos en las ecuaciones del movimiento de cada masa giratoria, simultáneamente con las demás fuerzas operantes, y resolver así cada problema de acoplamiento.

De manera que lo que necesitamos es calcular las reacciones mecánicas, la potencia media y la potencia sincronizante, para cada ángulo de defasamiento entre las f. e. m. de ambas máquinas.

Para ello no debemos considerar fijas las f. e. m. efectivas de ambas máquinas en valor absoluto; porque lo que se deja invariable en el funcionamiento es la intensidad de excitación, o lo que viene a ser lo mismo: las f. e. m. que, en vacío, produciría el movimiento de cada máquina. Pero estas virtuales f. e. m. se hallan acrecentadas o rebajadas por la reacción magnetizante de las componentes desvatiadas de la corriente en cada máquina. Como esta reacción magnética no sigue una ley algébrica, sino que depende de la forma de la característica en vacío, el problema de cada caso práctico de acoplamiento debería resolverse por tanteos. Se podría tantear para cada valor de δ el valor de ϵ correspondiente y con ello la d. d. p. entre bornes, con lo cual se tendría elementos para saber la potencia instantánea sincronizante. Así averiguaríamos valores correspondiente de ϵ y de la potencia sincronizante y se podría componer una ley algébrica que se adaptase con poco error al catálogo de pares de valores de δ y de la potencia sincronizante, y esta ley algébrica podría introducirse en las ecuaciones del movimiento de las masas mecánicas.

Quando las máquinas, como suele suceder, trabajan en puntos de la característica mas allá de la «rodilla» de esta curva, se puede plantear el problema algébricamente como sigue:

Si C es la característica en vacío del alternador y la corriente de excitación es Oi , el punto E cae en



una región en que la curva tiene una forma casi recta y puede sustituirse el arco próximo a la región E por la tangente, o por la cuerda, o por una recta intermedia entre ambas, de tal modo que el error de tomar el punto de la recta elegida en sustitución del punto de la curva, de igual abscisa, sea muy peque-

ño. La recta que se elige para reemplazar al arco de curva tendrá una cierta inclinación, cuya tangente llamaremos k . La reacción magnética de la componente desvaviada de la corriente de armadura equivaldrá a sumar a la corriente de excitación i , la cantidad $-aI_d$, siendo a el coeficiente de Potier, y la influencia de la reacción magnética en la f. e. m. será $-akI_d$. De manera que la f. e. m., en vez de ser fija, tendrá por expresión $E - akI_d$.

Conviene, como hemos dicho, calcular por separado cada parte de la reacción de armadura, descomponiendo la corriente del inducido en sus porciones vaviada y desvaviada, con respecto a la f. e. m. de la máquina. Así cada elemento f. e. m. de reacción estará en fase con una u otra de estas componentes y con la f. e. m., o encontrada a 90° sobre ella.

En la fase con la f. e. m. virtual E , que se produciría en circuito abierto, se hallarán: la reacción magnética $-akI_d$; la pérdida óhmica correspondiente a la componente vaviada $-rI_v$, y la sélfica de la desvaviada $-\lambda I_d$.

En ángulo recto con las anteriores: la pérdida óhmica de la desvaviada $-rI_d$, y la sélfica de la vaviada $-(\lambda + \tau) I_d$.

Las ecuaciones con que se plantea el problema se resuelven en fórmulas complicadas a causa de la presencia en cada ecuación de ambas componentes.

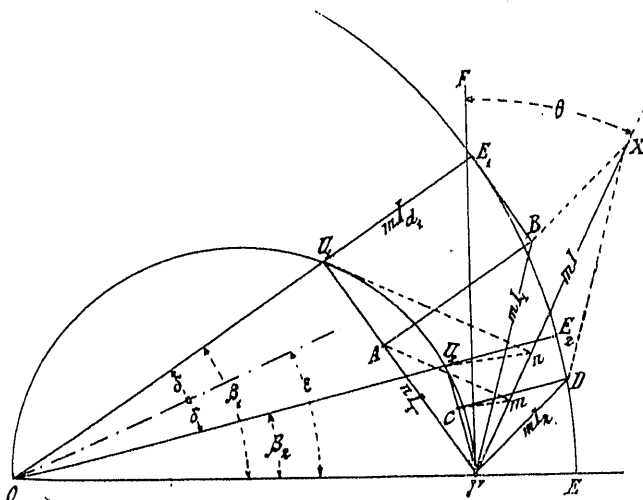
Puede simplificarse mucho el algoritmo fijándose en que la resistencia óhmica interna tiene muy poca influencia en relación con las demás constantes. Tomando en la fase de la f. e. m. el valor $-rI_d$, en sustitución de $-rI_v$, y viceversa en la fase encontrada, en lugar de $-rI_v$ poniendo $-rI_d$ se comete un error insignificante.

De esta manera las ecuaciones aplicables al cálculo del diagrama de cada máquina son

$$\begin{aligned} [1] \quad E - (r + \lambda + ak)I_d &= U \cos \alpha \\ [2] \quad (r + \lambda + \tau)I_v &= U \sin \alpha \end{aligned}$$

Y el diagrama de la situación de las dos máquinas, para el caso de ser iguales e igualmente excitadas y por cada diferencia de fase 2δ , se dibuja como sigue; reemplazando, para escribir más brevemente

$$\begin{aligned} r + \lambda + ak &\text{ por la letra } m, \text{ y} \\ r + \lambda + \tau &\text{ por la letra } n \end{aligned}$$



La circunferencia $E_1 - E_2 - E$, se traza con el radio OE igual a la f. e. m., que da la característica en

vacío de las máquinas, para la excitación constante a que están sometidas.

La semicircunferencia $U_1 - U_2 - U$, tiene por diámetro la d. d. p. entre bornes.

Los ángulos de defasamiento de las f. e. m. respecto a la d. d. p. serán β_1 y β_2 ; $U_1 E_1$ y $U U_1$, podrán representar las f. e. m. de reacción, o sea los productos mI_{d1} y nI_{v1} .

Para encontrar una línea que pueda representarnos la corriente de la máquina primera, podremos componer las líneas $U_1 E_1$ y $U U_1$; pero reduciendo antes la longitud de esta última en la relación $n : m \cdot UA$, será equivalente a mI_{v1} , y AB a mI_{d1} ; por tanto, UB , podrá representar el producto mI_{d1} , proporcional a la corriente de la primera máquina.

De un modo igual se halla que UD puede representar mI_2 , proporcional a la corriente de la segunda máquina, y mI , proporcional a la corriente del circuito exterior, viene dada por UX . Esta línea UX formará un ángulo θ con UF , perpendicular a OU , en que θ es el ángulo de descalaje propio del circuito externo.

La condición que debe llenar el diagrama es precisamente que las f. e. m. de reacción mI_1 y mI_2 , se compongan sobre la línea UX .

Dibujado el diagrama se mide en el mismo la intensidad de las corrientes y se halla con facilidad las potencias que suministran ambas máquinas o que reciben. Promediándolas en suma y en resta se tiene las potencias medias y las potencias sincronizantes.

Pero para dibujar el diagrama de manera que encaje con la condición antedicha, conviene calcular, para cada valor 2δ que se toma como dato el ángulo ϵ , y la d. d. p., U , lo que se hace del modo siguiente:

Las ecuaciones de ambas máquinas son las [1] y [2], repetidas cada una con el índice que señala a cada máquina acoplada, y tendremos

$$\begin{aligned} E - mI_{d1} &= U \cos \beta_1 \\ nI_{v1} &= U \sin \beta_1 \\ E - mI_{d2} &= U \cos \beta_2 \\ nI_{v2} &= U \sin \beta_2 \text{ con } \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} = \epsilon \text{ y } \frac{\beta_1 - \beta_2}{2} = \delta \end{aligned}$$

cuya resolución, que no es muy laboriosa, nos da en función de R , resistencia del circuito exterior, y X , reactancia del mismo:

$$\text{tag } \epsilon = \frac{R}{X + (R^2 + X^2) \frac{m+n}{mn} - (R^2 + X^2) \frac{m-n}{mn}} \cos 2\delta$$

En esta fórmula, la influencia de la desigualdad de los coeficientes de reactancia aplicable a cada componente de la corriente se revela en el tercer sumando del denominador, y trae como consecuencia primera que el ángulo de defasamiento medio ϵ no es constante, como en la teoría clásica.

Los resultados prácticos demuestran que hay un error muy importante en la simplificación clásica del problema, y como ejemplo, para terminar, aplicaremos el método expuesto al cálculo del acoplamiento de dos alternadores, que se estudió detalladamente a consecuencia de temores muy infundados, de que se desacoplaran en servicio, que se manifestaron en un concurso oficial.

Las constantes de las máquinas eran: excitación

correspondiente a la tensión de 6 095 voltios, en la característica en vacío.

$$\begin{aligned} \tau &= 6\omega 65 \\ \lambda &= 7\omega 50 \\ \gamma &= 0\omega 10 \\ ak &= 1\omega 15 \end{aligned}$$

De donde $n = 14,25$ y $m = 8,75$.

En los cuadros a continuación se consigna los resultados del cálculo expresando las tensiones en voltios, compuestas. La intensidad de las corrientes, por el triple de la de cada circuito, en amperios, y las potencias, suministradas al circuito exterior en kilovatios. El circuito exterior de 0,90 de coeficiente de decalaje tenía 30 ohmios de resistencia en cada fase.

2δ	ϵ	DEFASAMIENTO		U	MÁQUINA 1.ª			MÁQUINA 2.ª		
		β_1	β_2		I_{d_1}	I_{v_1}	I_1	I_{d_2}	I_{v_2}	I_2
10°	24°12'	29°12'	19°12'	5 015	196	172	261	155	116	194
20°	23°58'	33°58'	13°58'	4 986	224	195	297	143	84	166
30°	23°36'	38°36'	8°36'	4 945	255	217	334	138	52	147
40°	23° 7'	43° 7'	3° 7'	4 877	290	234	372	140	19	141
50°	22°32'	47°32'	— 2°28'	4 789	327	248	410	150	— 14	150
60°	21°53'	51°53'	— 8° 7'	4 679	366	258	448	167	— 46	173
70°	21°14'	56°14'	— 13°46'	4 529	409	264	487	194	— 78	208
80°	20°33'	60°33'	— 19°27'	4 355	452	266	524	227	— 102	249
90°	19°55'	64°55'	— 25° 5'	4 092	498	260	562	273	— 122	299

Conviene que veamos ahora los resultados que nos hubiera dado el cálculo según el método clásico, para apreciar el grado de aproximación de este último.

El método clásico da, como se ve, valores excesivos para la potencia sincronizante, y el error, por exceso, es inadmisibles, en cuanto se trate de apreciar alguna afirmación dudosa.

$2\delta =$	Potencia de la máquina 1.ª	Potencia de la máquina 2.ª	Potencia media	Potencia sincronizante
10°	1 235	807	1 021	214
20°	1 430	579	1 004	425
30°	1 621	355	988	633
40°	1 797	129	963	834
50°	1 955	— 97	929	1 026
60°	2 093	— 323	885	1 208
70°	2 205	— 543	831	1 374
80°	2 282	— 749	766	1 515
90°	2 298	— 926	686	1 612

2δ	POTENCIA SINCRONIZANTE		ERROR POR EXCESO	
	Met. clásico	Met. reformado	Absoluto	Relativo
10°	306	214	92	43 por 100
20°	603	425	178	42 por 100
30°	881	633	248	40 por 100
40°	1 133	834	299	36 por 100
50°	1 350	1 026	324	32 por 100
60°	1 526	1 208	318	26 por 100
70°	1 656	1 374	282	21 por 100
80°	1 736	1 516	220	15 por 100
90°	1 762	1 612	150	9 por 100

Para impedancia del circuito interno de la máquina podemos tomar la cifra 3,35 ohmios, que corresponde en la curva de impedancia al valor de la excitación que alimentaba a ambas máquinas. De todos modos esta cifra da errores no mayores que los que daría el tomar la impedancia de la rama inicial de la característica en vacío. Se desprecia la resistencia de la armadura, cuyo valor, como se ha visto, es insignificante. El valor constante de ϵ es 16°12', y no se anotan los de θ_1 y θ_2 porque se deducen inmediatamente.

Si se quisiera introducir en el cálculo algébrico, como se hizo en el caso precitado, el valor de la potencia sincronizante, podía tomarse, al menos, entre los valores extremos de $2\delta \begin{matrix} > 0 \\ < 60^\circ \end{matrix}$ la expresión

El valor de la potencia sincronizante puede calcularse directamente en proporción a $\text{sen } 2\delta$.

$$P = 1762 \text{ sen } 2\delta - 320 \text{ sen } 3,1\delta$$

2δ	U	Máquina 1.ª		Máquina 2.ª		Potencia media	Potencia sincronizante
		I_1	W_1	I_2	W_2		
10°	5 009	276	1 322	183	710	1 016	306
20°	4 951	328	1 596	152	390	993	603
30°	4 856	380	1 836	146	74	955	881
40°	4 724	431	2 037	— 167	— 229	904	1 133
50°	4 557	480	2 191	— 206	— 509	841	1 350
60°	4 354	526	2 294	— 255	— 758	768	1 526
70°	4 118	569	2 343	— 305	— 969	687	1 656
80°	3 851	609	2 336	— 358	— 1 135	600	1 736
90°	3 565	643	2 274	— 410	— 1 250	512	1 762

que se ajusta muy aproximadamente al catálogo de pares de valores que hemos encontrado para este caso y que puede desarrollarse en serie y prolongarla hasta el cuadrado o el cubo de la variable.

Para otros casos de la práctica siempre podrá, siguiendo la pauta indicada, componerse una expresión algébrica sencilla, que pueda introducirse en las ecuaciones del movimiento de los alternadores que se intenta acoplar.

Emilio AZAROLA
Ingeniero de Caminos