

Ruido en autotransformadores. Control

J.J.M. Requena

El fenómeno físico que origina el ruido en los autotransformadores es la magnetostricción, nombre que se puso al descubrimiento de Joule, que observó que al someter una barra de hierro a un campo magnético longitudinal se producía un alargamiento en la dirección del campo al mismo tiempo, que se contraía transversalmente. Debido a las dimensiones de las chapas del núcleo el fenómeno más importante, es la magnetostricción longitudinal. Las chapas de grano orientado tienen una magnetostricción a las inducciones corrientes es más pequeña que la correspondiente a las chapas laminadas es caliente.

Los principales fenómenos de la magnetostricción son: efectos directos, efectos inversos, efecto Joule longitudinal, efecto Villari, efecto Joule transversal, efecto Wiedemann, efecto de variación de densidad, efecto Guillemin, efecto ΔE , variaciones del coeficiente de rigidez de Coulomb, efectos variacionales de la resistividad a la modificación de la fuerza termoeléctrica y todos los efectos transitorios debido a las contracciones magnéticas.

Radiación sonora

Se puede aplicar el principio de HUYGHENS, para el cálculo de la radiación sonora de los transformadores, definiendo la ecuación de la presión acústica creada por un elemento de superficie en un punto M del interior de un recinto.

$$dP_M(t) = ds/4\pi r^2 (1 + \cos \alpha) d/dt p(t - r/a)$$

Con esto se refleja la onda sonora de presión acústica total en ese punto.

Si consideramos que el elemento de superficie plano vibra a una velocidad $\theta(t)$ normalmente a su plano engendra en la proximidad una onda plana cuya presión acústica es según el principio de Huyghens:

$$dP_M(t) = (ds/4\pi r^2) \cdot \rho (1 + \cos \alpha) \cdot (d/dt) \theta(t - r/a)$$

considerando la vibración de este elemento sinusoidal, la ecuación del movimiento según la normal a la superficie es: $\chi(t) = A \sin \omega t$ y la velocidad vibratoria:

$$\chi(t) = \theta(t) = d(A \sin \omega t)/dt = \omega A \cos \omega t$$

siendo la expresión final del principio de Huyghens para una vibración armónica del elemento de superficie plana:

$$d\bar{P}_M(t) = iA\omega^2 \cdot (ds/4\pi r^2) \cdot \rho (1 + \cos \alpha) \cdot e^{i\omega(t - r/a)}$$

La onda de presión en un punto M del espacio creado por la vibración de una placa de superficie S tiene por ecuación:

$$\bar{P}_M(t) = \int_{(S)} \int i\omega^2 \cdot A\rho (1 + \cos \alpha / 4\pi r^2) \cdot e^{i\omega(t - r/a)} ds$$

Aplicación a la radiación de una placa rectangular

Si consideramos la placa en reposo en el plano XOZ, de un sistema de coordenadas cartesianas rectangulares, coincidiendo con el centro de gravedad de la placa con el origen de coordenadas, haciendo operaciones llegaríamos a que la presión acústica creada por la placa rectangular en el punto M del espacio definido por las coordenadas R, W, μ , tiene por expresión final:

$P_M = \rho A (\omega^2/4\pi r) \cdot (I_{c1} + I_{c2}) \cdot \text{sen}((R/\alpha) - t)$; en la que I_{c1} e I_{c2} son las soluciones de las integrales:

$$I_{c1} = \int_{(S)} \int \cos(Kl \cos \eta) ds \quad \text{y} \quad I_{c2} = \int_{(S)} \int \text{sen } w \cdot \text{sen } \zeta \cdot \cos(kl \cos \eta) \cdot ds$$

En los autotransformadores en servicio, el núcleo se encuentra en el interior de una cuba llena de aceite. Las vibraciones son transmitidas a esta cuba por las piezas de apoyo y a través del elemento aislante (dieléctrico).

Ruido radiado por un autotransformador

Datos técnicos:

a) Potencia nominal: OFAF	450/450/100 MVA
b) Tipo de silencio	Continuo
c) Tensiones en servicio	
Primario	400 \pm 10% kV
Secundario	138 kV
Terciario	33 kV
d) Frecuencia	50 Hz
e) Nivel de ruido	85 dB
f) Consumo del equipo de refrigerado	36 kW
g) Consumo del equipo de regulación en carga	1,1 kW
h) Calentamiento en el aceite	60 °c
i) Calentamiento en el cobre	45 °c
j) Dimensiones	
Longitudinal	12 m
Anchura total	4,5 m
Altura total	9,5 m
k) Masas	
Parte activa	200.000 kg
Cuba y accesorios	58.000 kg
Aceite	52.000 kg
Total en servicio	310.000 kg

Niveles de ruido radiado

Se han realizado con vientos dominantes, Noroeste, Suroeste, en ambos sentidos. Las rachas de viento en el transcurso de las medidas oscilaron entre 5 m/seg y 7 m/seg, lo que nos ha llevado a acortar los valores obtenidos en un margen de ± 2 dBA.

En la figura 1, se representan las estaciones de medida (a 0,3 m y 2 m) según se encuentre el autotrafo, sin verificación o con verificación respectivamente.



Figura 1: Estaciones de Medida

En la tabla I se recogen los niveles de ruido radiado por el autotransformador

Estaciones de medida	Frecuencia en Hz										
	dBA	c-lineal	50	100	200	315	400	500	1k	2k	4k
0,3m ① sin aero	78,5	90,2	68,8	83,9	87,4	81,5	74,9	67,5	62,2	55,2	49,4
2m ① con aero	82,4	92,2	75,9	84,4	89,4	82,8	79,2	78,1	74,7	68,6	60,4
0,3m ② sin aero	76,2	89,8	75,4	87,2	83,7	77,1	71,7	70,1	63,6	59,8	52,6
2 m ② con aero	80,9	90,3	76,7	85,9	86,9	82,8	80,9	78,8	75	68,8	60,6
0,3m ③ sin aero	76,1	86,8	70,8	82,3	86,7	77,2	73,7	69,9	65,5	60,9	51,4
2 m ③ con aero	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,3m ④ sin aero	79,9	89,9	66,7	77,1	87,7	87,2	84,1	74,3	67,0	56,9	49,6
2m ④ con aero	75,6	86,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,3m ⑤ sin aero	79,9	90,0	70,5	84,8	86,8	83,4	81,5	75,8	63,3	52,8	47,4
2 m ⑤ con aero	72	83,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,3m ⑥ sin aero	78,2	93,1	75,9	92,8	89,0	87,2	84,9	78,3	62,4	53,0	44,7
2 m ⑥ con aero	74,8	89,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,3m ⑦ sin aero	81	94,9	74,8	94,5	90,1	86,3	82,4	73,5	63,2	54,6	47,1
2 m ⑦ con aero	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,3m ⑧ sin aero	82	90	69,4	84,8	85,8	84,1	81,8	78,6	70,1	59,7	48,0
2 m ⑧ con aero	77,4	90,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Cuando los autotransformadores se encuentran a menos de 50 metros de edificaciones, la solución acústica pasa por la ubicación del mismo en un recinto cerrado (fig 2). Lo que supone construir un paralelepípedo de aproximadamente 16 m x 8m x 6m dejando fuera del recinto las bornas de entrada y salida de líneas y el depósito de expansión de aceite.

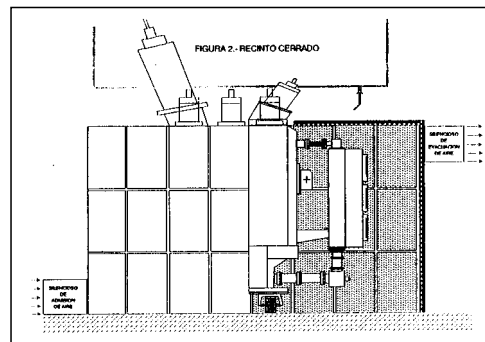


Figura 2.- Recinto cerrado



Figura 3.- Subestación multifuncional en

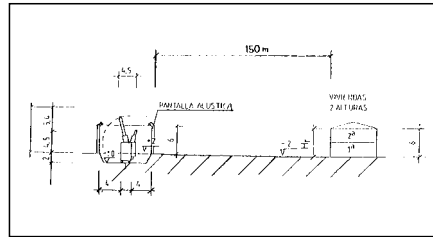


Figura 4.- Atenuación del ruido producido por un autotransformador

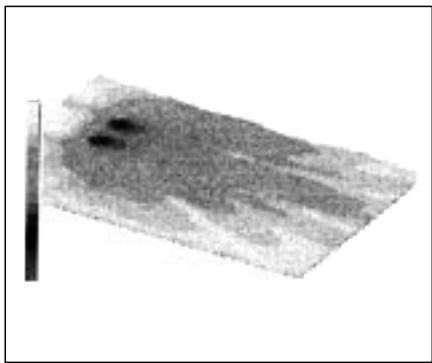


Figura 5.- Representación gráfica de niveles

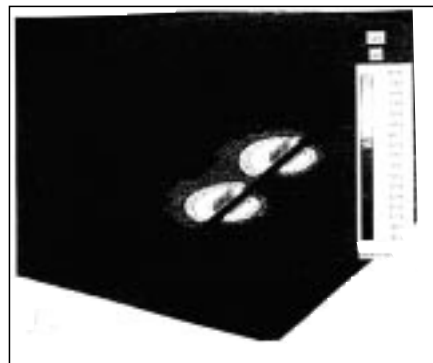


Figura 6 .- Representación gráfica de fuentes de ruido simuladas

Una variante es la de sacar fuera del recinto cerrado del autotransformador los aerorefrigerantes lo cual, aunque facilita el problema de refrigeración, requiere una pantalla adicional que amortiguaría el ruido radiado por los aerorefrigerantes; por tener el espectro desplazado hacia el margen de frecuencias más altas que el espectro de origen el espectro del ruido de origen magnético del autotransformador.

El cerramiento de autotransformadores forma parte del diseño de las nuevas generaciones de subestaciones transformadoras orientadas a reducir el impacto ambiental tanto visual como acústico (fig 3).

A veces si el tamaño de la subestación tiene dimensiones tales que puede ubicar el autotransformador a distancias superiores a 150 m de las zonas sensibles, bastaría con realizar un enterramiento parcial y si fuera preciso utilizando pantallas amortiguadoras (fig 4)

La realización de modelos de propagación y distribución sonora, efectos de apantallamiento, etc., constituye un tema de estudio del mayor interés con relación a la predicción del impacto ambiental de subestaciones transformadoras. Recogemos a continuación en la (fig 5) una representación gráfica de niveles sonoros realizada con el sistema Raynoise que puede considerarse como una aproximación a las medidas reales tomadas a lo largo del recinto de la subestación transformadora (parque de 400 kV).

En la figura 6 se recoge la representación gráfica de fuentes de ruido simuladas (2 autotransformadores de 375 MVA con sus dos reguladores).

NOTA: este trabajo se ha realizado en colaboración con D. Andrés Lara Saenz.