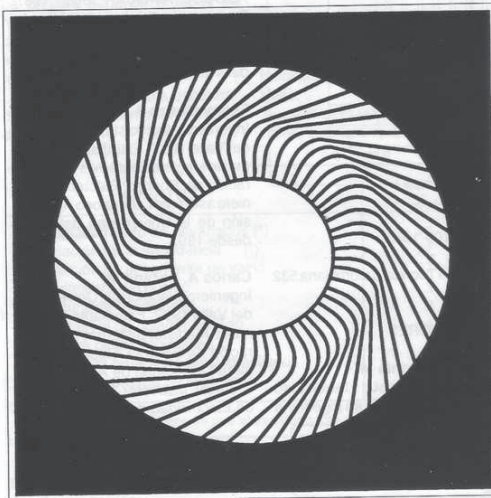


Análisis del efecto producido por el devanado del inducido en los armónicos de campo de excitación en vacío de un alternador de 28,8 MVA



RESUMEN

El presente artículo resume los estudios realizados, como parte de un proyecto de postgrado, en un alternador de 28,8 MVA cuyo devanado estático debió ser reemplazado porque cumplió su ciclo de vida útil.

En el texto se formulan algunos conceptos, para tener en cuenta por quienes realizan este mismo trabajo en máquinas con treinta años o más, de servicio.

En razón de esto, se tratará lo referente a la calidad de la tensión inducida en vacío en el generador sincrónico, es decir, la evaluación de la forma de tensión.

ABSTRACT

This article presents the work. Close for changing an 28.8 MVA alternator winding which finish his aspected life, particularly the studies was by a posgraduated final project.

This paper gaves some guides and concepts to be taken into account for doing this type of work on very old machines.

It is very important the quality of the induced voltage with the generator without load, to evaluate the voltage wave form.

□ Oscar Román Tudela Rangel
Ingeniero Electricista
Profesor Asociado
Departamento de Electricidad
Universidad del Valle

□ José J. Gallego C., M.Sc.
Ingeniero Electricista
Central Hidroeléctrica del Río Anchicayá Ltda.
Cali

1. INTRODUCCION

Cuando se va a rebobinar un generador, se tiene la oportunidad de incluir en el nuevo devanado todas las ventajas que ofrecen los materiales aislantes y las

técnicas de reducción de pérdidas que no se conocían en el momento de su diseño original.

Cada día más plantas antiguas están siendo restauradas para aumentar su capacidad, en la medida en que las nuevas tecnologías del equipo hidráulico y del generador, lo permitan y de acuerdo con el diseño original de la planta.

2. FACTOR DE INFLUENCIA TELEFONICA-TIF

En transmisión de potencia, los armónicos de corriente o voltaje pueden, dependiendo de su magnitud, causar interferencia en las líneas telefónicas vecinas. Para mantener esta interferencia dentro de límites aceptables, los generadores deben tener una forma de onda del voltaje en vacío lo más sinusoidal posible, esto es, con un bajo contenido de armónicos.

Para evaluar el contenido de estos armónicos en la onda de tensión, se concibió el **FACTOR DE INFLUENCIA TELEFONICA**, que llamaremos en adelante **TIF** del nombre original en inglés **TELEPHONE INFLUENCE FACTOR**, también conocido como **THF** del inglés **Telephone Harmonic Factor**.

Aunque el TIF fue diseñado básicamente con fines telefónicos, el TIF del voltaje de salida de los generadores en circuito abierto ha sido usado por muchos años como un índice de la forma de onda de dicho voltaje.

Por definición el TIF es:

$$TIF = E_{tif} / E_{rms}$$

donde:

$$E_{tif} = \sqrt{(T_1 E_1)^2 + (T_2 E_2)^2 + \dots + (T_v E_v)^2}$$

es el valor rms de la onda de voltaje afectada por los factores de peso T_v .

T_v : factor de peso del TIF para el v-ésimo armónico, ver Tabla 1.

E_v : valor rms del v-ésimo armónico de la componente de voltaje, en las mismas unidades que el E_{tif} .

E_{rms} : valor rms de la onda total de voltaje.

A continuación se hará el cálculo analítico, partiendo de las fórmulas enunciadas.

3. ARMONICOS DEL VOLTAJE TERMINAL

La expresión general para la Fuerza Electromotriz-Fem del inducido de una máquina de corriente alterna, con devanado repartido y paso reducido, es según 2-33 [3]:

$$E_v = 2,828 \tau \cdot I \cdot w \cdot k_{dev} \cdot v \cdot f \cdot B_m \cdot v$$

Tabla 1. Factores de peso para el TIF, en los primeros armónicos. Según norma ASA C50.12-1965.

ARMÓNICO	FRECUENCIA	FACTOR
1	60	0,5
3	180	30
5	300	225
7	420	650
9	540	1.320
11	660	2.260
12	720	2.760
13	780	3.360
15	900	4.350
17	1.020	5.100
18	1.080	5.400
19	1.140	5.630
21	1.260	6.050
23	1.380	6.370
24	1.440	6.650
25	1.500	6.680
27	1.620	6.970
29	1.740	7.320
30	1.800	7.570
31	1.860	7.820
33	1.980	8.330
35	2.100	8.830
36	2.160	9.080
37	2.220	9.330
39	2.340	9.840
41	2.460	10.340
43	2.580	10.600
47	2.820	10.210
49	2.940	9.820
50	3.000	9.670

donde:

E_v : f.e.m. del v-ésimo armónico en voltios

τ : paso polar = 0,53856 m

l : longitud del inducido = 1,00 m

w : espiras en serie por fase = 64

k_{dev} : factor de devanado

f : frecuencia fundamental = 60 cps

$B_m \cdot v$: amplitud del armónico de campo de excitación en el entrehierro en Teslas.

Los términos desconocidos $k_{dev} \cdot v$ y $B_m \cdot v$ serán objeto de un estudio especial, a continuación.

Factor de devanado. El devanado en cuestión es un devanado trifásico fraccionario de dos capas, sin ranuras muertas. El factor de devanado para el armónico fundamental puede deducirse de la estrella de fem de ranura. Para todos los armónicos, se obtiene el factor de distribución de la fórmula 1.04.13 a [1]:

55

$$k_{dis} = \frac{\sin(30 \cdot v) / n_p \sin(30 \cdot v / n_p)}{[1]}$$

$$k_{red} = \cos \left[v \left(1 - Y_n / n_p \right) 90^\circ \right]$$

Para este devanado, el paso de bobina Y_n es de 1-12, esto es, 11 ranuras. El paso relativo Y_n/n_p será 0,80208. La Tabla 2 muestra los factores obtenidos.

4. ARMONICOS DE CAMPO DE EXCITACION

Los armónicos presentes en la onda de voltaje de las máquinas sincrónicas dependen, en alto grado, de la magnitud de los armónicos de la onda de inducción magnética en el entrehierro, la cual a su vez depende de la forma de la zapata polar y del porcentaje de abarcamiento del polo. También se producen armónicos por las pulsaciones del flujo debidas al efecto de las ranuras del estator.

Una zapata polar que permita aumentar gradualmente el entrehierro, desde el centro hacia las esquinas, permitirá tener una forma de onda de inducción que decrece hasta llegar a cero en la línea entre los polos.

TABLA 2. Factores de devanado.

Armónico No.	Factor de Reducción	Factor de Distribución	Factor de Devanado
1	0,9521	0,9550	0,9093
3	0,5957	0,6369	0,3794
5	0,0164	0,1912	0,0031
7	-0,5691	-0,1367	0,0778
9	-0,9415	-0,2130	0,2005
11	-0,9616	-0,0873	0,0839
13	-0,6217	0,074	-0,0460
15	-0,0491	0,1286	-0,0063
17	0,5419	0,0569	0,0308
19	0,9300	-0,0510	-0,0474
21	0,9700	-0,0928	-0,0900
23	0,6469	-0,0425	-0,0275
25	0,0817	0,0393	0,0032
27	-0,5141	0,0730	-0,0375
29	-0,9175	0,0342	-0,0314
31	-0,9775	-0,0322	0,0314
33	-0,6715	-0,0608	0,0408
35	-0,1143	-0,0289	0,0033
37	0,4858	0,0275	0,0133
39	0,9040	0,0525	0,0474
41	0,9838	0,0251	0,0247
43	0,6954	-0,0242	-0,0168
47	-0,4569	-0,0225	0,0103
49	-0,8895	0,0217	-0,0193

Si tenemos la curva de distribución del flujo en el entrehierro, podremos, a través de la descomposición en series de Fourier, encontrar la magnitud de los diferentes armónicos. Seguiremos el método gráfico mostrado por John H. Kuhlmann [4], en su libro Diseño de Aparatos Eléctricos, capítulos II y X.

Para el trazado del flujo se parte de un dibujo a escala natural de la mitad de la zapata polar con el correspondiente arco de estator, hasta completar medio paso polar. Ver figura 1. Se divide la superficie de la armadura en un número conveniente de partes iguales. Se trazan las líneas de flujo de forma que salgan de la cara polar y entren a la armadura bajo ángulos rectos. El flujo y las líneas equipotenciales deberán intersectarse en ángulos rectos. Se supone que la armadura es una superficie lisa, sin ranuras.

Para calcular la densidad de flujo en cada punto, dividimos la longitud del entrehierro en el centro del polo, por la longitud de la línea de flujo en ese punto. Esta cifra, expresada en porcentaje, nos indicará que proporción de la densidad máxima es la densidad de flujo en ese punto. Haciendo la corrección por sobreposición del polo adyacente, se obtiene la columna B_n de la tabla 3, con la cual se elabora la gráfica de la figura 2, que muestra la curva de distribución del flujo en porcentaje de su valor máximo.

La curva así definida cumple con las condiciones de Dirichlet, por lo que se puede descomponer en series de Fourier, de fórmula general:

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t)$$

donde: T es el período de la onda y $\omega_0 = 2/T$. Si localizamos el origen del sistema de coordenadas en el punto central entre los polos, en que la densidad de flujo es cero, tendremos una función impar, con simetría respecto al origen, en la cual $f(t) = -f(-t)$. Para esta función, $a_n = 0$ por lo que solo quedarán los términos que tienen la función Seno.

Como no conocemos la expresión matemática de la curva, se puede considerar en escalones de longitud unitaria y de magnitud igual a la consignada en la columna B_n antes citada. El cálculo de b_n queda:

$$b_n = \frac{2}{T} \sum_{t=0}^T f(t) \sin n\omega_0 t$$

Si analizamos que la onda, además de ser impar, cumple que $f(t) = -f(t+T/2)$ el cálculo de b_n se reduce a solo un cuarto de período:

$$b_{2n-1} = \frac{8}{T} \sum_{t=0}^{T/4} f(t) \sin (2n-1) \frac{2\pi}{T} t$$

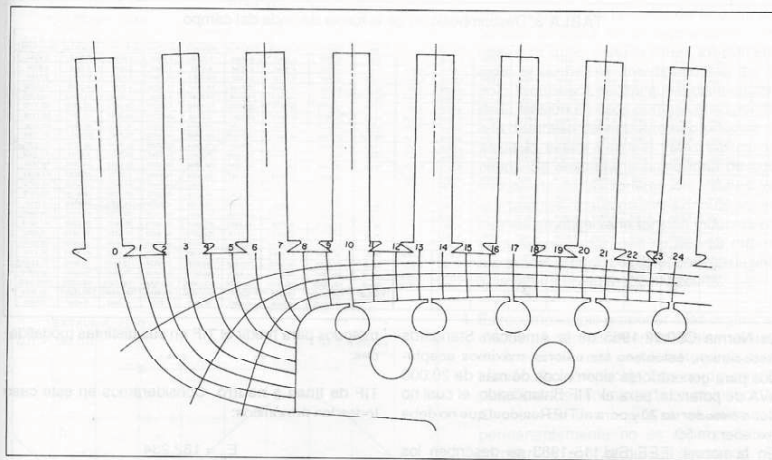


Figura 1.- Campo magnético sobre el polo. Máquina en vacío.

Como puede verse, solo aparecerán términos de armónicos impares. La tabla 3 muestra los resultados de la descomposición en armónicos de la onda de inducción obtenida. Aplicando la fórmula para E enunciada antes y asumiendo que $B_{max} = 0,7139 \text{ T}$, es la inducción máxima teórica senoidal en el entrehierro en vacío, obtenemos los datos de la tabla 4.

5. FACTOR DE INFLUENCIA TELEFONICA

Una vez encontradas las magnitudes de los armónicos del voltaje terminal, se aplican convenientemente las fórmulas:

$$TIF = E_{ef} / E_{rms}$$

$$E_{ef} = \sqrt{(T_1 E_1)^2 + (T_3 E_3)^2 + \dots + (T_v E_v)^2}$$

para obtener la modalidad de TIF que deseamos, según la definición de la norma ANSI/IEEE 100-1977:

TIF balanceado. Utilizamos el análisis de armónicos de la onda de voltaje línea-neutro, pero omitiendo los valores del tercer armónico y sus múltiplos en el cálculo de

$$E_{ef} = 127,006$$

el valor eficaz de la f.e.m. de una fase será:

$$E_{rms} = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + \dots + E_{49}^2} = 4.072,54 \text{ volts}$$

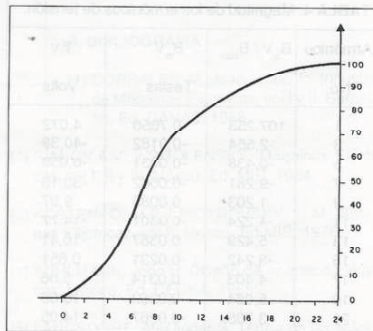


Figura 2.- Curva de distribución del flujo en el entrehierro.

de donde:

$$TIF \text{ balanceado} = E_{ef} / E_{rms} = 31,18$$

que es un valor aceptable según la norma antes citada.

TIF residual. En este caso, para hallar el E_{ef} utilizamos el análisis de armónicos, pero solo consideramos el tercer armónico y sus múltiplos:

$$E_{ef} = 130,685$$

$$TIF \text{ residual} = 32,089$$

TABLA 3. Descomposición de la forma de onda del campo.

PUNTO	ANO X	SEN X	SEN 3X	SEN 5X	SEN 7X	SEN 9X	SEN 11X	SEN 13X	SEN 15X	Bn	BnSENX	BnSEN3X	BnSEN5X	BnSEN7X	BnSEN9X	BnSEN11X	BnSEN13X	BnSEN15X
1	0.0655	0.0654	0.1951	0.3214	0.4423	0.5506	0.6593	0.7718	0.8315	3.00	0.2052	0.5853	0.9543	1.3269	1.6667	1.9786	2.2555	2.4944
2	0.1309	0.1353	0.4208	0.6983	0.9331	0.9238	0.9114	0.9014	0.8929	5.30	0.4016	1.1809	1.9294	2.5948	3.1947	3.7547	4.2766	4.7596
3	0.1964	0.1951	0.5506	0.8315	0.9808	0.8315	0.5506	0.1964	0.1951	11.00	0.6020	1.7713	2.9207	3.9601	4.8895	5.7089	6.4183	7.0183
4	0.2618	0.2588	0.7271	0.9929	0.9929	0.7271	0.2588	-0.2588	-0.7271	16.30	0.7924	2.3717	4.1211	5.5605	6.5999	7.2193	7.5187	7.6981
5	0.3273	0.3214	0.8315	0.9929	0.7271	0.1964	-0.1964	-0.5506	-0.8315	21.60	0.9828	2.9207	4.8895	6.5999	7.9383	8.8577	9.3571	9.5365
6	0.3927	0.3827	0.9238	0.9238	0.3827	-0.3827	-0.9238	-0.3827	-0.9238	26.90	1.1732	3.7547	6.1941	8.1535	9.5929	10.5123	10.9117	11.0911
7	0.4582	0.4423	0.9808	0.7271	0.1964	-0.1964	-0.5506	-0.8315	-0.9808	32.20	1.3636	4.4183	7.2193	9.5929	11.3269	12.1463	12.5457	12.7251
8	0.5236	0.5000	1.0000	0.5506	-0.5506	-0.5506	-0.5506	-0.5506	-0.5506	37.50	1.5540	5.3699	9.1535	12.5457	15.3269	17.1083	18.4467	19.2661
9	0.5891	0.5556	0.9808	0.1964	-0.1964	-0.5506	-0.8315	-0.9808	-0.5891	42.80	1.7444	6.5999	11.3269	17.1083	22.8919	27.6755	31.4591	34.2407
10	0.6545	0.6088	0.9238	-0.3827	-0.3827	-0.9238	-0.3827	-0.9238	-0.6545	48.10	1.9348	8.1535	13.6463	20.5123	27.3867	33.2611	38.1355	42.0100
11	0.7200	0.6594	0.8315	-0.4423	-0.4423	-0.9808	-0.4423	-0.9808	-0.7200	53.40	2.1252	9.5929	15.3269	22.8919	30.7663	36.6407	41.5151	45.3896
12	0.7854	0.7071	0.7271	-0.5506	-0.5506	-0.9238	-0.5506	-0.9238	-0.7854	58.70	2.3156	11.3269	18.4467	26.7511	34.6255	40.5000	45.3744	49.2489
13	0.8508	0.7518	0.5506	-0.6983	-0.6983	-0.9238	-0.6983	-0.9238	-0.8508	64.00	2.5060	13.6463	21.6029	30.7663	38.6407	44.5151	49.3896	53.2641
14	0.9163	0.8064	0.3827	-0.8315	-0.8315	-0.9808	-0.8315	-0.9808	-0.9163	69.30	2.6964	15.3269	24.8831	34.8831	42.7575	48.6319	53.5063	57.3808
15	0.9818	0.8573	0.1964	-0.9808	-0.9808	-0.9808	-0.9808	-0.9808	-0.9818	74.60	2.8868	17.1083	28.1039	38.9919	46.8663	52.7407	57.6151	61.4896
16	1.0472	0.9060	-0.1964	-0.8315	-0.8315	-0.9808	-0.8315	-0.9808	-1.0472	79.90	3.0772	18.9895	31.3231	43.2119	51.0863	56.9607	61.8351	65.7096
17	1.1126	0.9562	-0.5506	-0.6983	-0.6983	-0.9238	-0.6983	-0.9238	-1.1126	85.20	3.2676	21.6029	34.5439	46.4259	54.3003	60.1747	65.0491	68.9236
18	1.1781	0.9929	-0.9238	-0.4423	-0.4423	-0.9808	-0.4423	-0.9808	-1.1781	90.50	3.4580	24.8831	37.7639	50.0000	57.8744	63.7488	68.6233	72.4978
19	1.2435	1.0288	-0.9808	-0.3827	-0.3827	-0.9808	-0.3827	-0.9808	-1.2435	95.80	3.6484	28.1039	40.9839	54.3003	62.1747	68.0491	72.9236	76.7981
20	1.3090	1.0650	-0.9808	-0.3214	-0.3214	-0.9808	-0.3214	-0.9808	-1.3090	101.10	3.8388	31.3231	44.2039	58.5000	65.4000	71.2744	76.1489	80.0234
21	1.3744	1.0956	-0.9238	-0.2588	-0.2588	-0.9238	-0.2588	-0.9238	-1.3744	106.40	4.0292	34.5439	47.4239	62.7239	69.6239	75.5000	80.3744	84.2489
22	1.4399	1.1262	-0.8315	-0.1964	-0.1964	-0.8315	-0.1964	-0.8315	-1.4399	111.70	4.2196	37.7639	50.6439	66.0000	72.8919	78.7663	83.6407	87.5151
23	1.5054	1.1568	-0.6983	-0.1309	-0.1309	-0.6983	-0.1309	-0.6983	-1.5054	117.00	4.4100	40.9839	53.8639	69.2119	75.0863	80.9607	85.8351	89.7096
24	1.5708	1.1874	-0.5506	-0.0655	-0.0655	-0.5506	-0.0655	-0.5506	-1.5708	122.30	4.6004	44.2039	57.0839	72.4239	78.3000	84.1744	89.0489	92.9234

La Norma C50.12-1965 de la American Standards Association, establece los valores máximos aceptados para generadores sincrónicos de más de 20.000 kVA de potencia, para el TIF Balanceado, el cual no debe exceder de 70 y para el TIF Residual que no debe exceder de 50.

En la norma IEEE Std.115-1983 se describen los

métodos para medir el TIF en sus distintas modalidades.

TIF de línea a neutro. Consideramos en este caso todos los armónicos:

$$E_v = 182.234$$

$$TIF = 44,747$$

TABLA 4. Magnitud de los armónicos de tensión.

Armónico	$B_m v / B_{max}$	$B_m v$	E_v
No.		Teslas	Volts
1	107,253	0,7656	4,072
3	-2,554	-0,0182	-40,39
5	-0,438	-0,0031	-0,056
7	-9,281	-0,0662	-30,13
9	1,203	0,0085	9,97
11	-4,224	-0,0301	-14,77
13	5,429	0,0387	-10,41
15	-3,242	-0,0231	0,851
17	4,403	0,0314	5,66
19	-5,084	-0,0363	10,06
21	-3,735	-0,0267	14,05
23	-4,335	-0,0309	4,97
25	4,163	0,0297	0,556
27	-3,815	-0,0272	5,97
29	4,693	0,0335	-6,15
31	-4,069	-0,0290	-5,33
33	3,941	0,0281	6,71
35	-4,367	-0,0312	-0,602
37	4,129	0,0295	2,295
39	-3,909	-0,0279	-7,736
41	4,378	0,0313	4,522
43	-3,976	-0,0284	2,791
47	-3,976	-0,0284	-1,711
49	3,976	0,0284	-3,20

6. PRUEBAS REALIZADAS

Una vez que se hizo el cambio de devanado, y la unidad funcionó correctamente por varias semanas, se llevaron a cabo las pruebas de medición del contenido de armónicos, tanto en la onda de campo como en la onda de tensión en bornes de salida del generador. Las mediciones fueron realizadas por la firma GERS LTDA, con la colaboración del Departamento de Electricidad de la Universidad del Valle.

Para obtener la forma de onda del campo en el entrehierro, se instaló en el estator una espira-sonda de paso completo, una vuelta y se captó la tensión inducida para varios valores de excitación hasta llegar a la tensión nominal, con la unidad fuera de línea. Los registros se hicieron con un osciloscopio con memoria. La figura 3 muestra la forma de onda de la tensión inducida para la tensión nominal en vacío.

Esta señal de tensión se aplicó al analizador digital de GERS LTDA, encontrando los siguientes valores:

TIF total	=	75,12
TIF balanceado	=	57,21
TIF residual	=	48,68

Para el estudio de la onda de tensión en bornes del alternador, se escogió la tensión entre la fase A y el neutro para condición de excitación nominal, la cual se muestra en la figura 4.

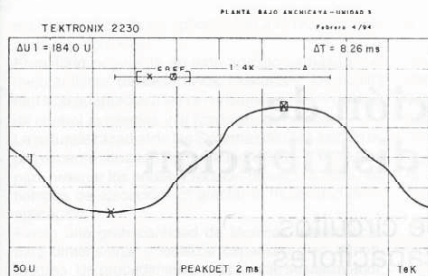


Figura 3.- Tensión inducida en una espira conda completa

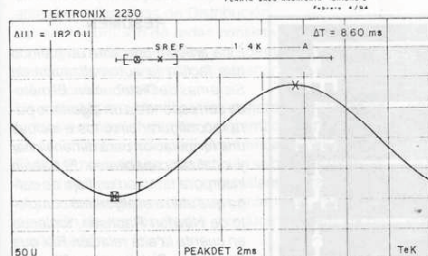


Figura 4.- Tensión línea-neutro en bornes del alternador.

Los resultados del analizador de armónicos para esta onda son los siguientes:

TIF total	=	39,27
TIF balanceado	=	31,68
TIF residual	=	24,18

7. CONCLUSIONES

Se resaltan las siguientes conclusiones:

1. La onda resultante en bornes del alternador sufre una gran mejoría, en cuanto al contenido de armónicos se refiere, en comparación con la onda de campo magnético que la induce. Esto se debe a los arreglos que se hacen al devanado, en cuanto a recortar el paso y distribuir las bobinas.
2. Comparando los resultados obtenidos a través del cálculo indicado en la presente sección: 44,747, 31,18 y 32,089 para el TIF total, balanceado y residual respectivamente, se observa que a pesar del margen de error que conlleva el método gráfico, los valores conservan una aceptable aproximación.

3. En la figura 3, en la curva de la onda de tensión inducida en la espira-sonda, se observan unas ondulaciones, en número igual al de barras amortiguadoras en el polo, lo que hace pensar que la disminución de la tensión en esos puntos corresponde a la distorsión del entrehierro producida al pasar la espira frente a estas barras de cobre. Se descarta la posibilidad de que sea efecto de las ranuras del estator, ya que también aparecen estas ondulaciones cuando se observa la tensión inducida en un solo conductor, que no abarca ranura alguna del estator, por estar encima de una sola ranura en su respectiva cuña.

4. Es recomendable proponer a las organizaciones de normas internacionales, el uso de la espira-sonda como método de evaluación de la capacidad de un devanado para filtrar los armónicos de f.e.m. inducida. El costo de una espira-sonda instalada permanentemente no es representativo comparado con el de un devanado de estator.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] CORRALES M., Juan. Cálculo Industrial de Máquinas Eléctricas, vol I y II. Barcelona, Ed. DANAE, 1968.
- [2] IVANOV, A.V. y SMOLENSKY. Máquinas Eléctricas, vol I, II y III. Moscú, Ed. MIR, 1984.
- [3] KOSTENKO, M.P. y PIOTROVSKY, L., M. Máquinas Eléctricas, vol II, Moscú, Ed. MIR, 1976.
- [4] KUHLMANN, John H. Diseño de Aparatos Eléctricos. México, Ed. CECOSA, 1965.
- [5] LANGSDORF, Alexander S. Teoría de las Máquinas de Corriente Alterna, Ed. Mc Graw Hill Book Co. N.Y., 1967.
- [6] LEHMANN, Th. Détermination graphique des champs magnétiques laplaciens et tourbillonnaires á lignes de flux planes. Revue generale de l'électricité, 15 septembre 1923, tome XIV, No. 11.
- [7] WIESEMAN, Robert W. Graphical determination of magnetic fields. Practical applications to salient pole synchronous machine design. Journal AIEE, feb 1927. Presentado en la Winter Convention of the A.I.E.E. New York, N.Y., Febrero 7-11, 1927.