

Análisis de la deformación del campo magnético rotacional causada por armónicos homopolares en motores trifásicos con saturación

Analysis of the deformation of the rotational magnetic field caused by homopolar harmonics in three-phase motors with saturation

Recibido: 15 de Julio de 2023

Aprobado: 20 de Noviembre de 2023

Cómo citar: L. K. Gualdrón Godoy, L. D. Pabón Fernandez, and D. A. Mejía Bugallo,. Análisis de la Deformación Del Campo Magnético Rotacional Causada Por Armonicos Homopolares en Motores Trifásicos Con Saturación. *Mundo FESC*, vol. 14, no. 29, pp. 243–270, May 2024, doi: 10.61799/2216-0388.1684.

Laury Katherine Gualdrón-Godoy* 

Est. Ingeniero Electrico,
laury.gualdron@unipamplona.edu.co,
<https://orcid.org/0009-0008-3339-2799>,
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

Luis David Pabón-Fernandez² 

Magíster en Controles Industriales,
davidpabon@unipamplona.edu.co,
<https://orcid.org/>,
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

Diego Armando Mejía-Bugallo³ 

Magíster en Controles Industriales,
diego.mejia@unipamplona.edu.co,
<https://orcid.org/0000-0002-0392-5741>,
Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

***Autor para correspondencia:**

laury.gualdron@unipamplona.edu.co



Análisis de la deformación del campo magnético rotacional causada por armónicos homopolares en motores trifásicos con saturación

Resumen

El artículo analiza la deformación del campo magnético rotacional en motores trifásicos, causada por la presencia de armónicos homopolares en la corriente y el efecto de la saturación del material ferromagnético. Los armónicos homopolares contribuyen a la saturación del núcleo y a la deformación de las ondas de densidades de flujo, lo que genera armónicos de secuencia positiva y negativa. Se destaca que la saturación del material ferromagnético otorga al campo una forma hexagonal, alejándolo del círculo ideal descrito en la literatura clásica. Se concluye que, si se posibilita la presencia de armónicos homopolares en la corriente, estos no afectan el campo magnético rotacional directamente, pero su presencia genera distorsiones en las densidades de flujo debido a la saturación del núcleo, lo que crea armónicos adicionales que sí deforman la trayectoria del campo magnético rotacional adicional a la forma hexagonal que genera la saturación. El modelo de la máquina y la evaluación del campo magnético rotacional se realiza en simulink de Matlab utilizando la transformada de Clark.

Palabras clave: Campo magnético rotacional, Armónicos homopolares, Saturación, Deformación, Motores trifásicos.

Analysis of the deformation of the rotational magnetic field caused by homopolar harmonics in three-phase motors with saturation

Abstract

The article analyzes the deformation of the rotating magnetic field in three-phase motors, caused by the presence of zero-sequence harmonics in the current and the effect of ferromagnetic material saturation. Zero-sequence harmonics contribute to core saturation and the deformation of flux density waves, generating both positive and negative sequence harmonics. It is highlighted that the saturation of the ferromagnetic material gives the field a hexagonal shape, deviating from the ideal circle described in classical literature. The conclusion is that if zero-sequence harmonics are allowed in the current, they do not directly affect the rotating magnetic field; however, their presence distorts flux densities due to core saturation, creating additional harmonics that further deform the rotating magnetic field path beyond the hexagonal shape caused by saturation. The machine model and the rotating magnetic field evaluation are carried out in Matlab's Simulink using the Clarke transform.

Keywords: Rotating Magnetic Field,
 Zero-Sequence Harmonics, Saturation,
 Deformation, Three-Phase Motors.

Introducción

El principio del funcionamiento de los motores eléctricos en corriente alterna, es el campo magnético rotativo[1], [2], este campo es generado en el estator de los motores por corrientes alternas que energizan bobinas ubicadas simétricamente en la periferia del estator, lo cual crea una distribución de flujo magnético que rota alrededor del eje de la máquina y que interactúa con el campo del rotor para crear par electromagnético y por ende el movimiento de la máquina [3], [4]. El campo del rotor puede ser creado por el uso de electroimanes o imanes (maquinas síncronas) o por inducción causada por el mismo campo rotatorio (máquinas asíncronas)[5].

Clásicamente en la literatura se expone que la forma de la trayectoria del campo magnético rotacional alrededor del estator es un círculo perfecto [3], [4]. De igual forma, se ha considerado que los armónicos homopolares o múltiplos de tres no generan efectos en el campo magnético de las maquinas trifásicas, debido a su anulación a causa de ser iguales y estar desfasados 120° geométricos [6], [7].

Sin embargo, en este artículo se muestra que los armónicos homopolares pueden saturar el núcleo y generar efectos en la trayectoria del campo magnético rotacional.

Campo magnético rotacional en máquinas trifásicas

En la Fig. 1 se ilustra la creación del campo magnético rotacional en una maquina trifásica, tres bobinas desfasadas 120° geométricos son alimentadas por tres corrientes desfasadas 120° eléctricos. Esta configuración da lugar a tres campos pulsantes que adicionados generan un único campo, cuya magnitud es 1.5 veces el campo pico creado por una de las bobinas y que gira a la velocidad de la expresión (1).

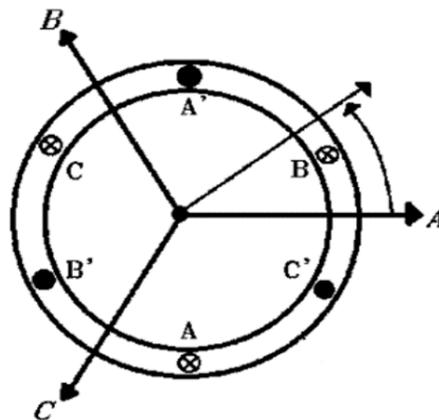


Figura 1. Comportamiento del campo magnético trifásico[8].

En términos generales, la velocidad de rotación (n_m) dependerá del número de polos

de la máquina (P) y de la frecuencia eléctrica de la red de alimentación (f_e) según la siguiente expresión:

$$n_m = \frac{f_e * 120}{P} \quad (1)$$

Si las corrientes son sinusoidales puras y la máquina no tiene saturación[2], el campo magnético rotacional generado es un círculo perfecto; sin embargo, si la máquina tiene saturación magnética el campo no será un círculo, presentara una forma hexagonal, de la misma manera si las corrientes de alimentación no son sinusoidales puras existirá una deformación del campo magnético rotacional.

Industrialmente los motores eléctricos suelen ser alimentados por variadores de frecuencia que controlan la velocidad de la máquina de una manera precisa y confiable[9], [10] . Estos dispositivos se basan en electrónica de potencia que generalmente adoptan modulaciones PWM para generar las tensiones de alimentación del motor, las corrientes creadas por estos voltajes suelen estar distorsionadas y tener componentes armónicos de diferentes ordenes, incluso la sola excitación del material ferromagnético demandara corrientes deformadas por armónicos impares[11]. La Fig. 2 muestra el espectro armónico de una corriente de alimentación de un motor.

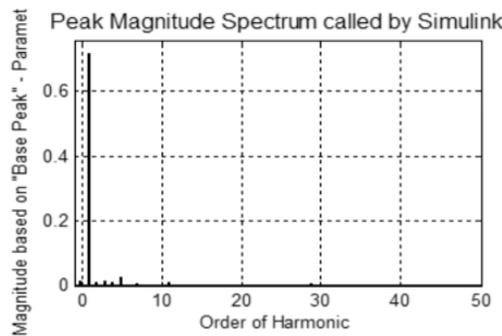


Figura 2. Espectro armónico de la corriente [9].

Los armónicos homopolares son ondas sinusoidales cuya frecuencia es múltiplo de tres veces la frecuencia fundamental, estos tienen la particularidad de estar en fase en cada una de las tres fases de un sistema trifásico por lo que en conexiones estrella o delta suelen anularse. En una conexión estrella si el neutro esta aterrizado las corrientes triplens se adicinaran y se irán por el neutro, si la estrella no tiene neutro, estas corrientes no podrían existir, en el caso de la conexión delta las corrientes formarán una sola corriente que circulará en el devanado trifásico.

En el caso de las máquinas eléctricas rotativas trifásicas, el efecto de los armónicos múltiplos de tres se han visto reducidos al calentamiento de los devanados; en el caso del efecto sobre el campo magnético, se han despreciado ya que en teoría crearían campos iguales en las tres fases que se anularían entre si [11], [12]. Sin embargo, debido

a la presencia de la saturación del material ferromagnético y al efecto saturante de los armónicos múltiples tres, estos armónicos si tendrían un efecto sobre el campo magnético rotacional, es por esto que este artículo presenta un análisis detallado de la deformación que la presencia de estos armónicos generarían en el campo magnético rotacional, para esto se asume que la maquina en estudio estaría en una conexión estrella aterrizada o en su debido caso en una conexión delta en la cual circulan corrientes triplens.[13], [14], [15], [16]

Para determinar la forma del campo magnético rotacional se utilizará la transformada de Clarke [17], con el fin de convertir los campos a,b,c, generados por cada una de las fases en el estator, a coordenadas de esta manera se puede obtener un grafico en el plano de la trayectoria del campo magnético rotatorio [18].

Para que la magnitud del campo sea la real, la constante k de la transformación se asignará como 1 en la siguiente representación matricial de la transformada de Clarke.

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = k \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

La máquina a utilizar para el modelo de este estudio será un motor con un estator de devanados concentrados, de dos polos, correspondiente al diagrama mostrado en la Fig. 1 [19], la maquina cuenta con 70 vueltas por fase y una longitud magnética media de 20 cm.

Modelo de simulación

El modelo de simulación se muestra en la Fig. 3. En este esquema se crea la intensidad de campo (H) a partir de corrientes distorsionadas intencionalmente (I), las densidades de flujo (B) se generan utilizando un modelo de saturación que se describirá posteriormente.

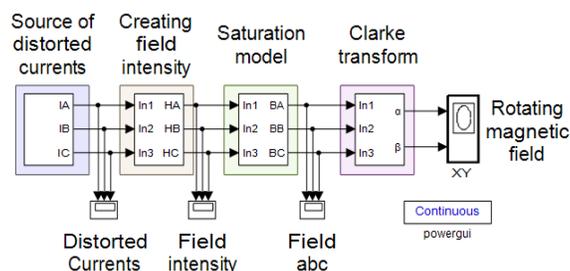


Figura 3. Esquema de simulación.

Las fuentes de corrientes se crearon superponiendo ondas sinusoidales de diferentes frecuencias sobre la fundamental de 60Hz. En el caso particular de este estudio, el orden máximo del armónico a tener en cuenta es el 50, siguiendo lo estipulado en la IEEE 519

que sugiere esta cota [20]. Los parámetros de amplitud se ajustan en función de los armónicos que se desean activar.

Con las corrientes distorsionadas y el modelo establecido por la ecuación (3), se crea la intensidad H a partir del número de vueltas (N) y la longitud media magnética (l) por fase.

$$H = \frac{N}{l} I = H = \frac{50}{0.2} I \quad (3)$$

Para la creación de la densidad de flujo se utiliza la ecuación (4), conocida como ecuación de Fröelich que modela la saturación mediante una curva de magnetización[21] Los parámetros "a" y "b" se determinaron para que esta ecuación se ajustara al comportamiento de una chapa magnética real seleccionada.

$$B = \frac{aH}{1 + bH} \quad (4)$$

La Fig. 5 muestra la curva de magnetización seleccionada, en ella, se observan dos clases de chapas magnéticas suministradas por un fabricante, para el estudio en particular se seleccionó la chapa de mejor comportamiento conocida como chapa de calidad HP, que corresponde a la curva de más alto nivel y cuyo valor de densidad de flujo para la saturación es aproximadamente 1,68T [22].

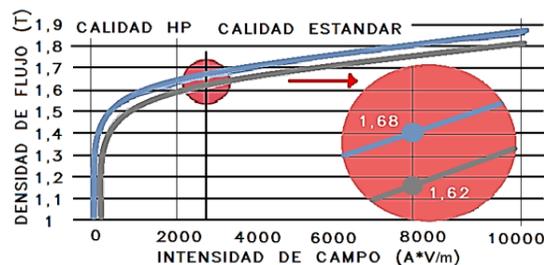


Figura 4. Curva de la chapa magnética de alta permeabilidad [22].

Para modelar esta curva de magnetización se deben establecer dos ecuaciones: una para las magnetizaciones positivas del núcleo y otra para las magnetizaciones negativas, ya que la máquina funciona en corriente alterna y la curva de magnetización debe representar tanto los lóbulos positivos como negativos. Las ecuaciones (5) y (6) definen el modelo ajustado a la chapa magnética seleccionada:

$$B = \frac{0.0067H}{(1 + 0.0033H)} \text{ para } H \geq 0 \quad (5)$$

$$B = \frac{-0.0067H}{(-1 + 0.0033H)} \text{ para } H < 0 \quad (6)$$

La Fig. 5 muestra la gráfica del modelo realizado por los autores para la saturación de la chapa magnética seleccionada. [1].

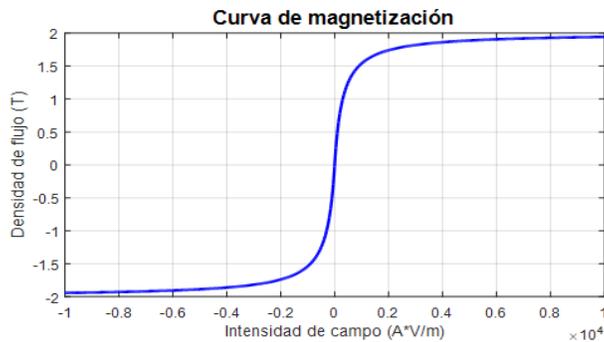


Figura 5. Curva de magnetización.

Las densidades de flujo de cada una de las fases pasan a través de la transformada de Clarke, para calcular sus equivalentes en el espacio de coordenadas alfa y beta, obteniendo así la forma del campo magnético rotatorio producido en el estator de la máquina.

Resultados y Discusión

Para evaluar el efecto que tienen los armónicos homopolares en la forma del campo magnético rotacional, se realizaron simulaciones en un primer caso en una máquina sin saturación y en un segundo caso en una máquina con la curva de magnetización que modela la saturación, con el fin de demostrar que en ausencia de saturación los armónicos homopolares en la corriente no tienen ninguna influencia, y que frente a la no linealidad de la magnetización del núcleo y la saturación los armónicos homopolares generan efectos indirectos a causa del aumento de la densidad de flujo que ellos generan en cada una de las fases.

Núcleo Lineal

En el primer escenario de simulación se inyectaron en una máquina que no tiene saturación, ni curva de magnetización, corrientes distorsionadas por armónicos homopolares, los resultados obtenidos son los siguientes.

Armónico 3TH

El primer caso del análisis se realizó inyectando corrientes del armónico 3 de diferentes porcentajes de la fundamental, cuyo valor RMS verdadero no supera los 2A, las formas de onda de las corrientes para el caso particular de un 30% del armónico tres se muestran en la siguiente figura:

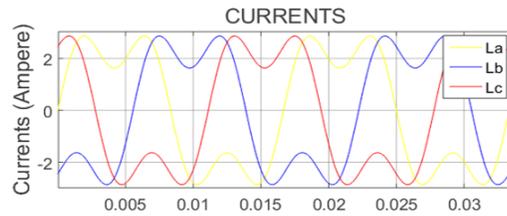


Figura 6. Corrientes distorsionadas generada por el armónico 3th.

Estas corrientes generan las densidades de flujo magnético mostradas en la Fig. 7, las formas de onda son iguales a la corriente ya que el núcleo opera de forma lineal.

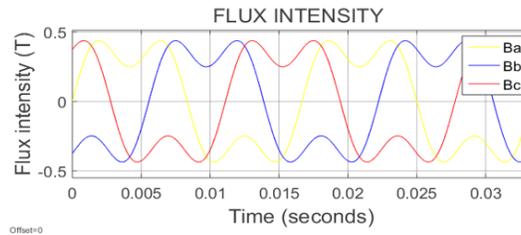


Figura 7. Densidad de flujo generada por el armónico 3th.

Si se analiza el espectro de una fase de la densidad de flujo, se observa que la única presencia corresponde con el armónico 3, al igual que la corriente. Este espectro se muestra en la Fig. 8.

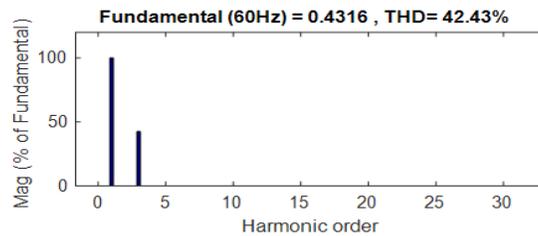


Figura 8. Espectro armónico corriente generado por el armónico 3th.

En la Fig. 9 se muestra la forma del campo magnético rotacional para los diferentes contenidos de armónicos 3.

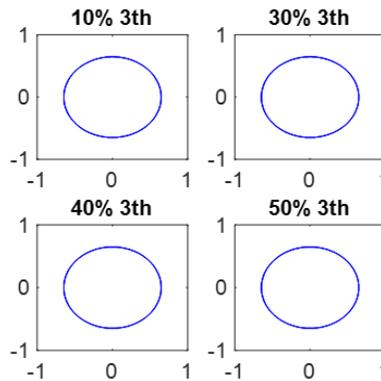


Figura 9. Campo magnético armónico generado por el armónico 3th.

Como se puede observar en la anterior figura, las formas del campo magnético obtenidas son círculos perfectos y de la misma magnitud, prevaleciendo solo el efecto causado por la fundamental, anulándose los armónicos de las densidades de flujo homopolares entre sí, cumpliéndose el análogo a la ley de Kirchhoff en el magnetismo, pues tres campos desfasados 120° geoméricamente e iguales en sus expresiones eléctricas, al adicionarse se anularán entre sí.

Armónico 6TH

La segunda simulación se realizó inyectando corrientes del armónico 6th de diferentes porcentajes, superpuestas con la fundamental, cuyo valor RMS verdadero no superó los 2A. Las formas de onda de las corrientes, para el caso particular de un aporte del 30% del armónico seis, se muestran en la siguiente figura.

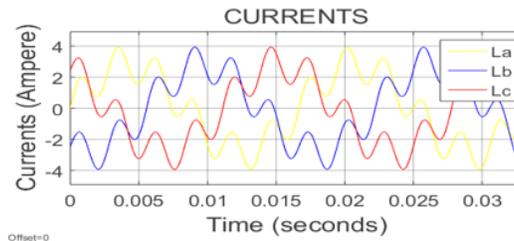


Figura 10. Corrientes distorsionadas generada por el armónico 6th.

Estas corrientes generan las densidades de flujo magnético mostradas en la Fig. 11, al igual que sucedió con el armónico tres las formas de onda son iguales a la corriente pues el núcleo opera de forma lineal.

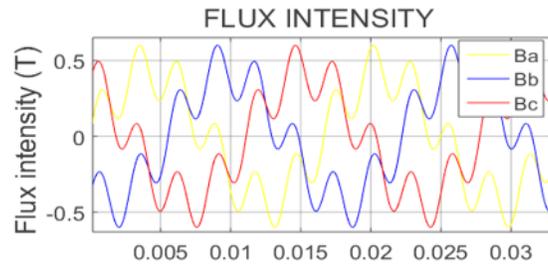


Figura 11. Densidad de flujo generada por el armónico 6th.

El espectro de una fase de la densidad de flujo, se observa en la Fig. 12, la única presencia armónica corresponde con el sexto orden, igual que la corriente.

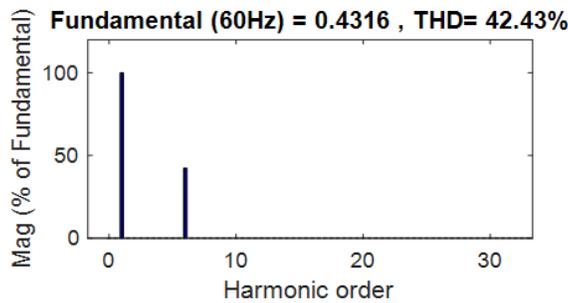


Figura 12. Espectro armónico generado por el armónico 6th.

En la Fig. 13, se muestra la forma del campo magnético rotacional para los diferentes contenidos de armónicos 6.

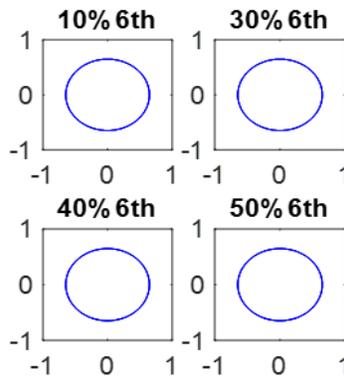


Figura 13. Campo magnético rotacional generado por el armónico 6th.

Al igual que en el caso del armónico tres, las formas del campo magnético obtenidas son círculos perfectos y de la misma magnitud, prevaleciendo solo el efecto causado por la fundamental y anulándose los armónicos seis, de los campos magnéticos de fase, entre sí.

A continuación, se presentan los resultados de dos casos adicionales para la máquina con

núcleo lineal, en donde se inyectaron los armónicos 9th y 12th de manera independiente. En estos se evidencia que el comportamiento es el mismo que el de los armónicos 3th y 6th, es decir que el campo magnético rotacional no presenta ninguna perturbación.

Armónico 9TH

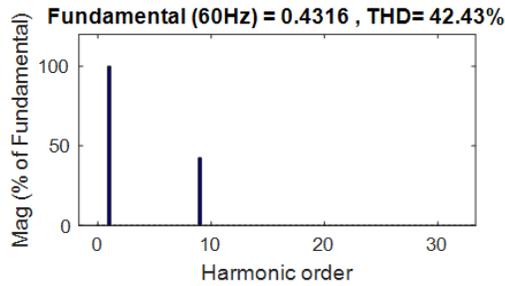


Figura 14. Espectro armónico generado por el armónico 9th.

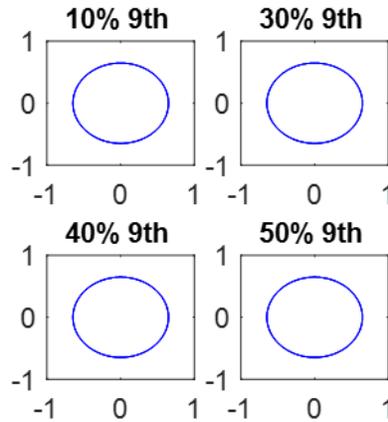


Figura 15. Campo magnético rotacional generado por el armónico 9th.

Armónico 12TH

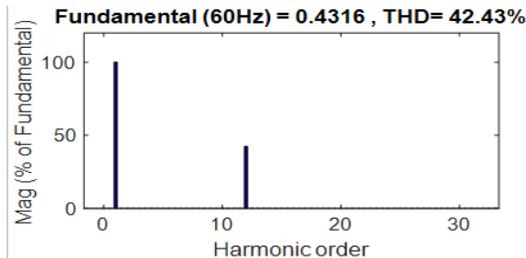


Figura 16. Espectro armónico generado por el armónico 12th.

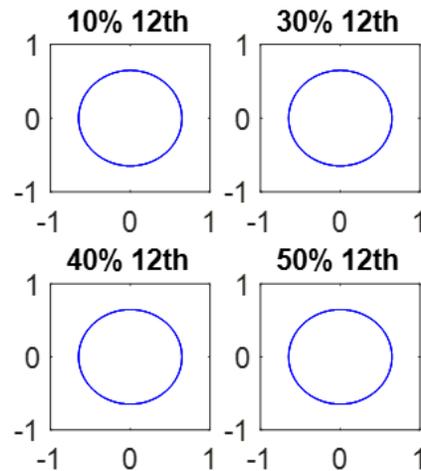


Figura 17. Campo magnético rotacional generado por el armónico 12th.

Según los resultados obtenidos, el campo magnético rotacional no se ve distorsionado por los armónicos homopolares si el núcleo es lineal, lo cual corresponde a la teoría clásica establecida, en la que los armónicos homopolares no tienen influencia en la máquina, debido a que se anulan entre sí.

Núcleo con saturación magnética

Como segundo escenario, se utilizó la máquina con núcleo no lineal, cuya curva de magnetización corresponde a la presentada en la Fig. 5 y modelada con las ecuaciones (5) y (6). Se inyectaron corrientes distorsionadas con magnitudes que generaban densidades de flujo en las tres zonas de operación de la curva de magnetización: lineal (L), codo de la curva o nominal (N) y saturación (S), a continuación, se muestran los resultados para cada uno de los armónicos homopolares analizados.

Armónico 3TH

En la Fig. 18 se muestra las formas de onda de las corrientes inyectadas en el primer caso de estudio de este escenario, estas corrientes solo tienen el armónico fundamental y el tres, como se muestra en el espectro de la Fig. 19.

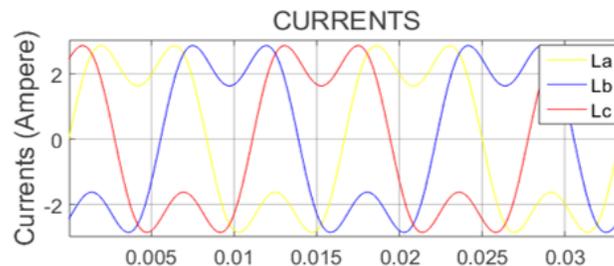


Figura 18. Corrientes distorsionadas generado por el armónico 3th.

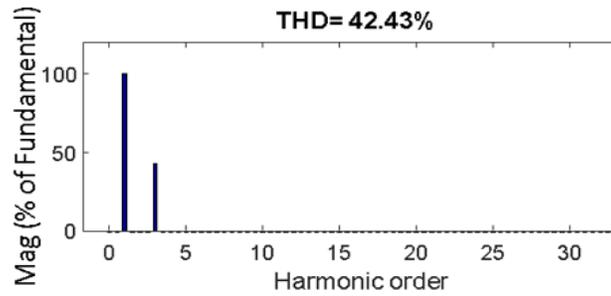


Figura 19. Espectro armónico saturación generado por el armónico 3th.

La Fig. 20 presenta la forma de onda de las densidades de flujo magnético, obtenidas frente a la distorsión de corriente de terceros armónicos, que generan una densidad pico que hace que el núcleo opere en el codo de la curva de saturación.

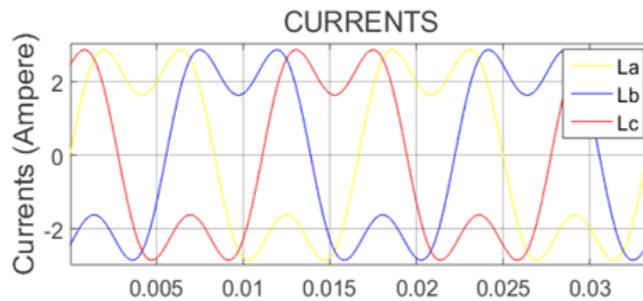


Figura 20. Densidad de flujo generada por el armónico 3th.

La forma de onda de la densidad de flujo es diferente a la presentada por las corrientes, al aplicar la transformada rápida de Fourier a las densidades de flujo, el espectro armónico obtenido se muestra en la Fig. 21.

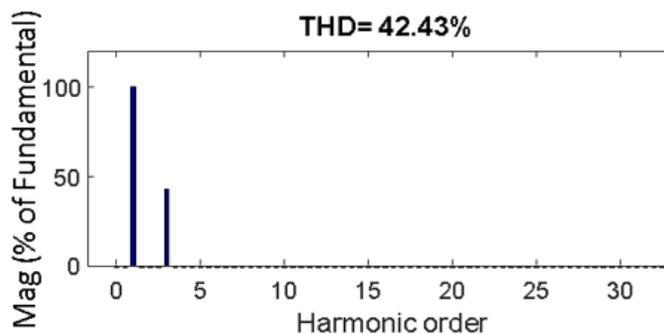


Figura 21. Espectro armónico saturación generado por el armónico 3th.

En el espectro aparecen armónicos adicionales al inyectado en la corriente, hay presencia de armónicos 5th, 7th, 9th, 11th y 13th; esto se debe a la deformación que sufre la onda de densidad de flujo causada por la no linealidad del núcleo.

Para tener más claridad de los armónicos adicionales al inyectado en la corriente y

generados por la no linealidad del núcleo, se simularon varios casos con diferentes magnitudes de armónicos tres en la corriente superpuestos con la fundamental, de tal forma que el núcleo operara en cada una de las zonas; lineal, nominal y saturación; se midieron las magnitudes porcentuales de cada uno de los armónicos presentes y se obtuvo la información en la siguiente Tabla I.

Tabla I. Armónicos presentes en la densidad de flujo para diferentes aportes de armónico tres en las zonas de operación.

TH3	10%			30%		
	L	N	S	L	N	S
h3	16.58	23.77	26.49	30.01	30.87	31.42
h5	3.96	9.69	12.28	5.87	12.01	14.29
h7	1.61	5.14	7.10	3.14	7.24	9.02
h9	0.78	3.06	4.56	1.49	4.43	5.95
h11	0.43	1.98	3.13	0.87	3.00	4.25
H3	40%			50%		
	L	N	S	L	N	S
h3	36.57	34.20	33.68	43.26	37.64	36.01
h5	6.33	12.59	14.79	6.48	12.82	15.01
h7	4.06	8.25	9.87	5.10	9.34	10.75
h9	1.85	4.98	6.47	2.18	5.44	6.89
h11	1.12	3.48	4.73	1.41	3.97	5.19

Como se puede observar en la tabla, a medida que se incrementa la magnitud del armónico tres en la corriente, los componentes adicionales (h5, h7, h9, h11) generados por la no linealidad del núcleo incrementan sus magnitudes. De igual forma, ha de destacarse que frente al incremento de armónico tres en la corriente, en la densidad de flujo este decrece para todos los casos, exceptuando en el primer caso, donde el nivel del armónico no es muy alto.

En la Fig. 22 se muestran las formas del campo magnético rotacional, obtenidas frente a las diferentes distorsiones generadas por los niveles de armónico tres en la corriente. En color negro se muestran los campos rotacionales generados en la zona lineal, en color azul los generados en la zona nominal y en color rojo los campos rotacionales generados en la zona de saturación.

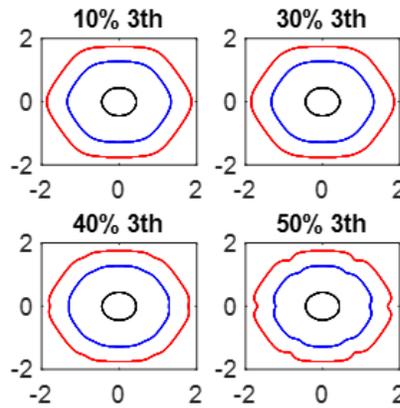


Figura 22. Campo magnético rotacional generado por el armónico 3th.

Los campos magnéticos rotacionales en la zona lineal son completamente circulares, ya que los niveles de armónicos adicionales al tres (5th, 7th, 9th y 11th) son muy bajos, por lo que el único armónico considerable en magnitud es el tercero y al ser homopolar se anulan entre sí en las tres fases, permitiendo que el campo magnético sea circular. Sin embargo, en el caso de la zona nominal y saturación las formas de los campos magnéticos rotacionales se distorsionan, debido a la presencia de los armónicos adicionales generados por la no linealidad del núcleo, se observa que el campo magnético se vuelve hexagonal a medida que la saturación va tomando más relevancia. De igual forma, a medida que el séptimo armónico se vuelve más fuerte hendiduras en las esquinas del hexágono van apareciendo.

Armónico 6TH

En el segundo caso de análisis se inyectaron corrientes distorsionadas con el sexto armónico, de diferentes magnitudes en las diferentes zonas de operación del núcleo. La Fig. 23 muestra las formas de onda de las densidades de flujo magnético.

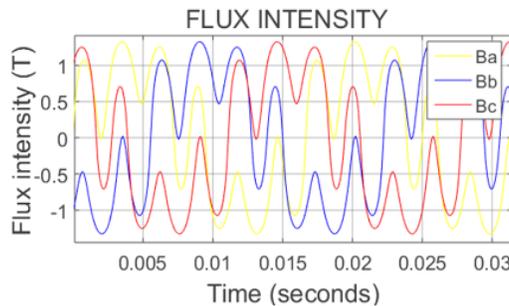


Figura 23. Densidad de flujo generado por el armónico 6th.

Estas densidades de flujo presentan el espectro armónico de la Fig. 24.

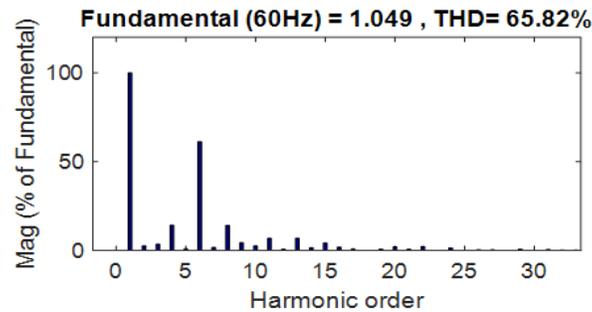


Figura 24. Espectro armónico saturación generada por el armónico 6th.

El espectro muestra que aparecen armónicos adicionales por abajo y por arriba del orden del componente inyectado en la corriente, para tener más claridad de los armónicos adicionales, se simularon varios casos con diferentes magnitudes de armónicos seis en la corriente, de tal forma que el núcleo operara en cada una de las zonas; lineal, nominal y saturación, la información obtenida se muestra en la siguiente tabla.

Tabla II. Armónicos presentes en la densidad de flujo para diferentes aportes de armónico seis en las zonas de operación.

TH6	10%			30%		
	L	N	S	L	N	S
h3	9.20	19.11	22.91	7.78	15.22	17.71
h4	1.85	2.80	2.74	5.79	10.34	11.78
h5	2.28	7.19	9.82	1.02	2.48	2.92
h6	7.91	5.88	4.94	24.55	20.43	19.47
h7	0.8	3.34	5.09	0.36	1.39	2.12
h8	1.93	3.14	3.23	5.98	11.33	13.44
h9	0.30	1.71	2.91	0.88	2.55	3.57
H6	40%			50%		
	L	N	S	L	N	S
h3	6.75	12.68	14.54	5.65	10.20	11.66
h4	7.63	14.05	16.25	9.23	17.08	19.72
h5	0.30	0.05	0.60	0.25	1.83	2.97
h6	33.27	28.04	26.77	42.33	35.58	33.48
h7	0.93	3.54	5.16	1.28	4.73	6.76
h8	7.77	14.73	17.37	9.27	17.25	19.99
h9	1.52	4.29	5.76	2.08	5.47	6.96

Como se puede observar en la tabla, a medida que se incrementa la magnitud del armónico seis en la corriente, los componentes adicionales, que para este caso son pares e impares (h3, h4, h5, h7, h8, h9), generados por la no linealidad del núcleo, incrementan sus magnitudes. De igual forma, ha de destacarse que frente al incremento de armónico seis en la corriente, en la densidad de flujo este orden decrece. De igual forma, en cada uno de los casos de simulación, los armónicos de mayor presencia, adicionales al inyectado en la corriente, están dos órdenes por arriba y por abajo del armónico seis.

En la Fig. 22 se muestran las formas del campo magnético rotacional obtenidas frente a

las diferentes distorsiones, generadas por los niveles de armónico seis presentes en la corriente.

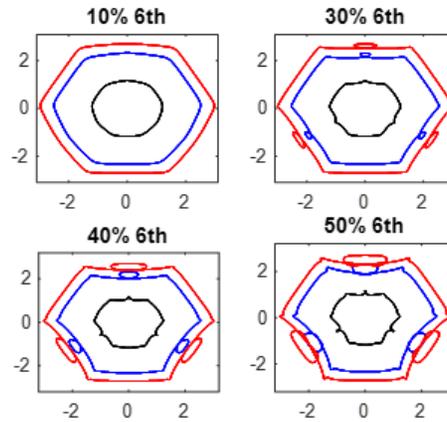


Figura 25. Campo magnético rotacional generado por el armónico 6th.

A diferencia del caso anterior, los campos magnéticos rotacionales en la zona lineal no son completamente circulares, pese a que los niveles de armónicos adicionales al seis son bajos, el efecto de los armónicos pares hace que se deforme el campo, en el caso de la zona nominal y saturación las formas de los campos magnéticos rotacionales se distorsionan aún más, debido a la presencia creciente de los armónicos adicionales, generados por la no linealidad del núcleo. Se observa que el campo magnético se vuelve hexagonal, y hace envolvimientos en el centro de tres de sus lados, a medida que el cuarto y sexto armónico va tomando más relevancia.

Armónico 9TH

En el tercer caso de análisis se inyectaron corrientes distorsionadas con el 9th armónico, de diferentes magnitudes en las diferentes zonas de operación del núcleo. La Fig. 26 muestra el espectro armónico de las densidades de flujo magnético en cada fase.

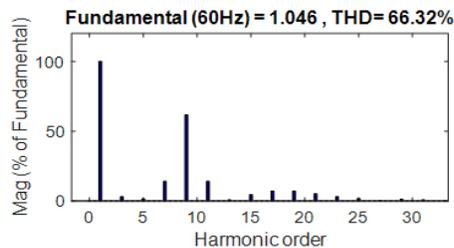


Figura 26. Espectro armónico saturado generado por el armónico 9th.

Los armónicos adicionales en este caso, al igual que en el anterior, aparecen por abajo y por arriba del componente inyectado en la corriente; nuevamente los armónicos más fuertes están dos órdenes atrás y adelante del homopolar original.

Para tener más claridad de los armónicos adicionales, se simularon varios casos con diferentes magnitudes de armónicos nueve, la información obtenida se muestra en la siguiente tabla.

Tabla III. Armónicos presentes en la densidad de flujo para diferentes aportes de armónico nueve en las zonas de operación.

TH9	10%			30%		
	L	N	S	L	N	S
h3	9.51	20.01	23.98	8.73	18.80	22.88
h5	3.02	9.00	11.88	3.37	9.51	12.33
h7	2.78	6.58	8.41	5.94	10.63	11.96
h9	8.32	7.87	7.22	24.19	18.64	16.52
h11	2.12	4.24	5.21	5.45	8.78	9.31
h13	0.81	2.52	3.49	1.51	3.91	4.92
h15	0.36	1.58	2.44	0.08	1.36	2.38
TH9	40%			50%		
	L	N	S	L	N	S
h3	7.77	16.76	20.71	6.34	12.84	15.64
h5	3.15	8.74	11.42	2.62	6.84	8.79
h7	7.41	12.68	13.88	8.89	15.39	17.00
h9	32.70	25.13	21.91	41.99	33.94	30.74
h11	7.05	11.28	11.78	8.72	14.76	16.07
h13	1.57	3.91	4.88	1.42	3.28	3.98
h15	0.49	0.02	0.89	1.41	2.90	3.14

La Tabla III muestra que un incremento en el armónico nueve, hace que los componentes adicionales, que en este caso son solo ordenes impares (h3, h5, h7, h11, h13, h15) incrementan sus magnitudes. De igual forma, ha de destacarse que frente al incremento de armónico nueve en la corriente, en la densidad de flujo se presenta un decrecimiento de este componente conforme los armónicos adicionales aumentan.

De igual foma, en cada uno de los casos de simulación, los armónicos de mayor presencia, adicionales al inyectado en la corriente, están dos órdenes por arriba y por abajo del homopolar original, en este caso particular el 11th y el 7th.

En la Fig. 22 se muestran las formas del campo magnético rotacional obtenidas frente a las diferentes distorsiones, generadas por los niveles de armónico nueve presentes en la corriente.

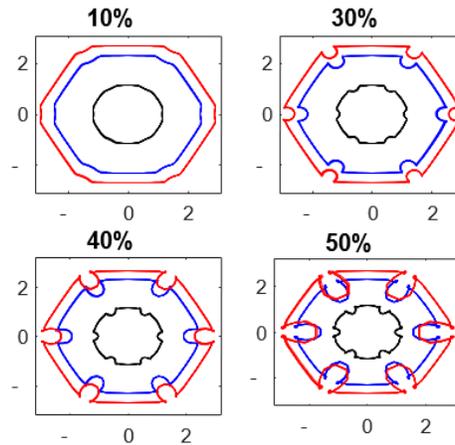


Figura 27. Campo magnético rotacional generado por el armónico 9h.

Los campos magnéticos rotacionales en la zona lineal no son completamente circulares, pese a que los niveles de armónicos adicionales al nueve (h3, h5, h7, h11, h13, h15), son bajos. En el caso de la zona nominal y saturación las formas de los campos magnéticos rotacionales se distorsionan de una forma más pronunciada, debido a la presencia más fuerte de los armónicos adicionales, generados por la no linealidad del núcleo.

Se observa que el campo magnético se vuelve hexagonal a medida que la saturación va tomando más relevancia, de igual forma, a medida que el séptimo armónico se vuelve más fuerte, hendiduras en las esquinas del hexágono van apareciendo.

Armónico 12TH

Para el siguiente caso de estudio se inyectaron corrientes distorsionadas con el 12th armónico, de diferentes magnitudes en las diferentes zonas de operación del núcleo. La Fig. 28 muestra el espectro armónico de las densidades de flujo magnético por fase.

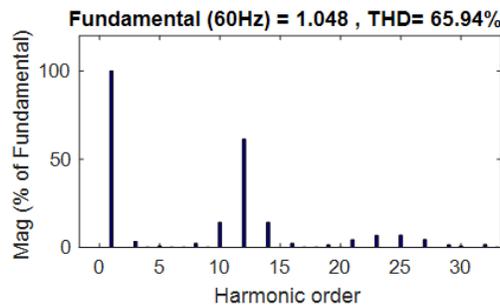


Figura 28. Espectro armónico saturado generado por el armónico 12h.

Los armónicos adicionales que aparecen, al igual que en los casos anteriores, están por abajo y por arriba del orden del armónico inyectado en la corriente. Nuevamente los armónicos más fuertes están dos órdenes por abajo y por arriba del homopolar original.

Para tener más claridad de los armónicos adicionales, se simularon varios casos con diferentes magnitudes de armónicos 12th, la información obtenida se muestra en la Tabla IV.

Tabla IV. Armónicos presentes en la densidad de flujo para diferentes aportes de armónico 12th en las zonas de operación.

TH12	10%			30%		
	L	N	S	L	N	S
h3	9.21	19.13	22.88	7.99	16.26	19.44
h4	0.19	0.76	1.08	0.35	1.63	2.59
h5	2.31	7.21	9.76	1.40	4.19	5.67
h6	0.37	1.29	1.75	0.84	3.18	4.63
h7	0.83	3.35	4.98	0.21	0.75	1.09
h8	0.77	2.09	2.60	2.05	5.81	7.57
h9	0.36	1.70	2.71	0.06	0.38	0.66
h10	1.99	3.47	3.82	5.83	10.45	11.82
h11	0.16	0.87	1.48	0.13	0.78	1.38
h12	8.00	6.38	5.83	24.45	19.82	18.3
h13	0.07	0.41	0.75	0.18	1.00	1.75
h14	2.00	3.54	3.96	5.83	10.44	11.79
h15	0.01	0.13	0.31	0.24	1.23	2.05
h16	0.79	2.23	2.89	2.05	5.79	7.53
TH12	40%			50%		
	L	N	S	L	N	S
h3	6.96	13.70	16.20	5.75	10.64	12.33
h4	0.19	0.85	1.35	0.03	0.28	0.56
h5	0.76	1.94	2.48	0.14	0.27	0.71
h6	0.75	2.78	4.01	0.51	1.71	2.36
h7	0.09	0.54	0.88	0.28	1.39	2.24
h8	2.36	6.66	8.69	2.43	6.79	8.86
h9	0.14	0.70	1.15	0.11	0.53	0.86
h10	7.59	13.72	15.62	9.17	16.76	19.22
h11	0.08	0.43	0.75	0.03	0.25	0.49
h12	33.13	27.22	25.32	42.27	35.31	33.00
h13	0.08	0.42	0.72	0.06	0.38	0.73
h14	7.58	13.68	15.54	9.17	16.75	19.20
h15	0.18	0.88	1.39	0.08	0.29	0.40
h16	2.35	6.58	8.51	2.43	6.76	8.81

Como se puede observar en la tabla, a medida que se incrementa la magnitud del armónico 12th en la corriente, los componentes adicionales, que en este caso son órdenes pares e impares (h3, h5, h7, h8, h10, h12, h14, h16...), generados por la no linealidad del núcleo incrementan sus magnitudes. Frente al incremento de armónico doce en la corriente, en la densidad de flujo este orden decrece.

En cada uno de los casos de simulación, los armónicos de mayor presencia, adicionales al inyectado en la corriente, están dos órdenes por arriba y por abajo del homopolar original.

En la Fig. 22 se muestran las formas del campo magnético rotacional obtenidas frente a las diferentes distorsiones generadas por los niveles de armónico 12th en la corriente.

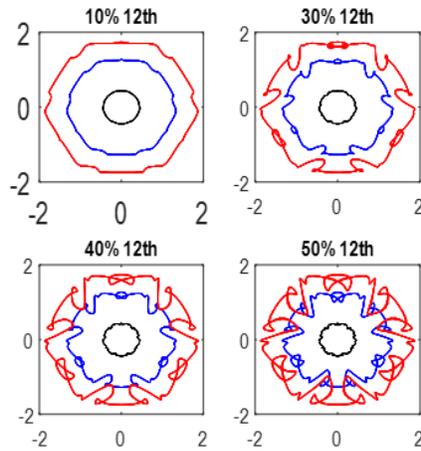


Figura 29. Campo magnético rotacional generado por el armónico 12h.

Los campos magnéticos rotacionales en la zona lineal no son completamente circulares, en el caso de la zona nominal y saturación, las formas de los campos magnéticos se distorsionan aún más, debido a la presencia creciente de los armónicos adicionales generados por la no linealidad del núcleo.

Se observa que la trayectoria del campo magnético se vuelve hexagonal, a medida que el núcleo se satura, y hace envolvimientos en el centro de los lados del hexágono, cuando los armónicos adicionales van tomando más relevancia.

Armónico 15TH

En el último caso de análisis, se inyectaron corrientes distorsionadas con el 15th armónico. La Fig. 30 muestra el espectro de las densidades de flujo magnético por fase.

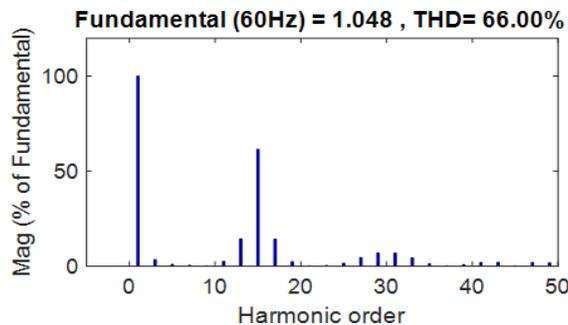


Figura 30. Espectro armónico saturado generado por el armónico 15h.

Los armónicos adicionales que aparecen en este caso, al igual que en los anteriores,

están por abajo y por arriba del orden del armónico inyectado en la corriente, nuevamente los componentes más fuertes están dos órdenes adelante y atrás del armónico original. La información obtenida de las diferentes simulaciones que complementan el estudio de este caso, se muestra en la siguiente tabla.

Tabla V. Armónicos presentes en la densidad de flujo para diferentes aportes de armónico 15th en las zonas de operación.

TH15	10%			30%		
	L	N	S	L	N	S
h3	19.45	23.40	8.02	16.46	19.81	
h5	7.82	10.71	1.52	4.84	6.78	
h7	4.32	6.42	0.56	2.33	3.60	
h9	3.16	4.76	0.79	2.89	4.13	
h11	3.10	4.34	1.97	5.35	6.77	
h13	4.00	4.78	5.77	10.07	11.11	
h15	6.62	6.29	24.40	19.48	17.65	
h17	3.59	4.10	5.76	9.99	10.96	
h19	2.17	2.81	1.92	5.07	6.27	
h21	1.36	1.97	0.61	2.04	2.75	
TH15	40%			50%		
	L	N	S	L	N	S
h3	6.90	13.36	15.57	5.72	10.47	12.07
h5	0.72	1.70	1.99	0.07	0.62	1.28
h7	0.06	0.02	0.11	0.29	1.52	2.48
h9	0.59	1.92	2.56	0.38	1.02	1.19
h11	2.30	6.31	8.11	2.40	6.56	8.40
h13	7.59	13.81	15.84	9.17	16.72	19.09
h15	33.18	27.53	25.93	42.29	35.39	33.17
h17	7.61	13.90	15.99	9.21	16.98	19.64
h19	2.31	6.40	8.25	2.46	7.04	9.38
h21	0.55	1.74	2.26	0.44	1.51	2.20

La anterior tabla muestra que un incremento en el armónico 15th, hace que los armónicos adicionales, que en este caso son armónicos solo impares (h3, h5, h7, h11, h13, h17...), generados por la no linealidad del núcleo incrementan sus magnitudes. De igual forma, ha de destacarse que frente al incremento de armónico 15th en la corriente, en la densidad de flujo este decrece conforme los armónicos adicionales incrementan su magnitud. De igual forma, en cada uno de los casos de simulación, los armónicos de mayor presencia, adicionales al inyectado en la corriente, están dos órdenes por arriba y por abajo del armónico 15th, en este caso particular el 13th y el 17th.

En la Fig. 31 se muestran las formas del campo magnético rotacional obtenidas frente a las distorsiones generadas por los diferentes niveles de armónico 15th.

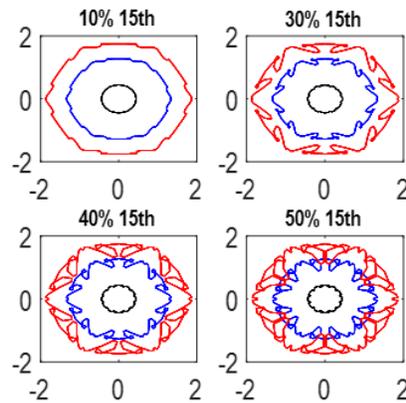


Figura 31. Campo magnético rotacional generado por el armónico 15h.

Los campos magnéticos rotacionales en la zona lineal no son completamente circulares, pese a que los niveles de armónicos adicionales al 15th ($h_3, h_5, h_7, h_{11}, h_{13}, h_{17}$), son bajos. En el caso de la zona nominal y saturación las trayectorias de los campos magnéticos, se distorsionan de una forma más pronunciada debido a la presencia de componentes adicionales, generados por la no linealidad del núcleo.

Se observa que el campo magnético toma forma hexagonal a medida que la saturación va teniendo más relevancia, de igual forma a medida que las componentes adicionales se incrementan, múltiples envolvimientos van apareciendo en la forma del campo magnético rotacional.

Análisis de resultados

En general, los armónicos homopolares, exhiben un patrón en el cual se observa que ante magnitudes bajas de contenido se genera una trayectoria hexagonal causada por el efecto de la saturación. Sin embargo, a medida que la magnitud de los armónicos homopolares aumenta, se observan distorsiones y deformaciones notables en la geometría inicial del hexágono. Estas distorsiones se manifiestan como hendiduras y múltiples enrollamientos.

El análisis del espectro de la densidad de flujo de una fase, revela la presencia de armónicos adicionales al original inyectado en la densidad de fase. Por ejemplo, en el caso del armónico 3 en la corriente, en la densidad de flujo los armónicos con más alta presencia serán el 3 y 5. De manera similar, para el armónico 6 en la corriente, se observa la aparición de armónicos 4, 6 y 8 en la densidad de flujo. En el caso del armónico 9, la densidad de flujo presentará los armónicos de más alto contenido en el 7, 9 y 11.

En términos generales, la presencia del armónico homopolar hh en la corriente, generará la aparición de dos armónicos hg en la densidad de flujo, con magnitudes apreciables y adicionales al armónico homopolar original. Los órdenes de estos armónicos corresponden a la expresión:

$$hg = hh \pm 2$$

En esencia, estos dos armónicos adicionales generados por la saturación, influenciada por la intensificación de los armónicos homopolares, conllevarán la aparición de deformaciones y cambios en la estructura del campo magnético. Estos cambios pueden manifestarse en forma de envolvimientos, hendiduras o enrollamientos adicionales.

El número de envolvimientos o deformaciones generadas en el hexágono corresponderá a:

$$n = hp \pm 3$$

Si la presencia de armónicos homopolares es baja, las deformaciones corresponderán con el menor n , que refleja el efecto del armónico hg de secuencia positiva; a medida que la distorsión homopolar se intensifica el número de perturbaciones corresponderá con el mayor n , que es el número de deformaciones causadas por el armónico de secuencia negativa hg .

La aparición de armónicos adicionales al homopolar, genera en la maquina los efectos asociados a los diferentes ordenes de secuencia positiva y negativa presentes, por lo que se podrían tener torques inversos y otros prejuicios, sin embargo, para que los armónicos homopolares en la corriente puedan existir la maquina debe estar conectada en estrella con el nuestro aterrizado. Ya que la mayoría de motores se conectan en delta en estas máquinas solo podrán existir corriente homopolar inducida y no proveniente de la red eléctrica, por lo que los efectos indirectos de los armónicos homopolares en las maquinas eléctricas quedarán restringidos a la posibilidad de existencia de estos armónicos en la corriente.

Conclusiones

Los armónicos homopolares en las corrientes de fase, idealmente no generan distorsión en la trayectoria del campo magnético rotacional, ya que los campos creados por estas, se anulan entre sí al ser iguales y estar desfasados 120° geométricos, como se mostró en la primera parte del artículo. Sin embargo, frente a la no linealidad del núcleo, estos de manera indirecta afectan la forma del campo, ya que saturan la máquina y generan componentes armónicas adicionales en las ondas de densidades de flujo.

Los armónicos de secuencia positiva y negativa creados de manera indirecta por las componentes homopolares y la saturación, resultan en deformaciones y alteraciones significativas en la forma del campo magnético rotacional, manifestándose a través de envolvimientos, hendiduras o enrollamientos adicionales.

Se observa que, a medida que aumenta la magnitud de los armónicos homopolares en la corriente, los armónicos 3th, 9th y 15th generan armónicos adicionales impares en la

onda de la densidad de flujo, mientras que los armónicos 6th y 12th crean armónicos pares e impares. Generalizando, los armónicos homopolares impares en la corriente crearan solo ordenes adicionales impares en la densidad de flujo, mientras que los homopolares pares crearan tanto ordenes impares como pares.

Los armónicos adicionales en la onda de la densidad de flujo, causados por la no linealidad de la magnetización del núcleo, incrementan sus magnitudes, con el aumento de los armónicos homopolares en la corriente, sin embargo, el orden homopolar en la densidad de flujo, equivalente al componente homopolar en la corriente, disminuye su magnitud conforme los armónicos adicionales van apareciendo e incrementándose, este hecho intuye la conservación de la energía.

En presencia de una curva de magnetización, los armónicos homopolares saturan el núcleo, generando otros armónicos en la densidad de flujo. Los armónicos más prominentes son $h_g = h_h \pm 2$, donde h_h es el armónico homopolar presente en la corriente y h_g son los armónicos adicionales en la densidad de flujo. Esta saturación intensificada por los armónicos homopolares provoca deformaciones y alteraciones en la forma del campo magnético rotacional, manifestándose a través de envolvimientos, hendiduras o enrollamientos adicionales. El número de envolvimientos o deformaciones en el hexágono se relaciona con la expresión $n = h_p \pm 3$.

La presencia de armónicos adicionales a los homopolares en la corriente puede causar diversos efectos en la máquina, como torques inversos y otros problemas asociados a diferentes órdenes de armónicos en distintas secuencias. Es esencial que la máquina esté conectada en estrella con el neutro aterrizado para que los armónicos homopolares en la corriente se manifiesten. En máquinas conectadas en delta, solo se observa corriente homopolar inducida, lo que limita los efectos indirectos de los armónicos homopolares a su posible existencia en la corriente.

Referencias

- [1] I. Laury Katherine Gualdrón Godoy and L. David Pabón Fernández Jorge Luis Diaz Rodríguez, "ANALYSIS OF THE ROTATIONAL MAGNETIC FIELD OF INDUCTION MOTORS GENERATED BY MAGNETIC SATURATION," Pamplona, Norte de Santander , 2023.
- [2] X. Chen, J. Hu, K. Chen, and Z. Peng, "Modeling of electromagnetic torque considering saturation and magnetic field harmonics in permanent magnet synchronous motor for HEV," *Simul Model Pract Theory*, vol. 66, pp. 212–225, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.SIMPAT.2016.02.012.
- [3] F. Mora, "Máquinas asíncronas o de inducción," *Máquinas Eléctricas*, pp. 287–424, 2008, Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://archive.org/details/maquinas-electricas-6a.-ed.-fraile-mora-jesus>.

- [4] Stephen J. Chapman, "Máquinas eléctricas (5a. ed)," 2012.
- [5] "1.5.1.- Generación de un campo magnético giratorio. | E09.- Máquinas rotativas de corriente alterna." Accessed: Dec. 29, 2023. [Online]. Available: https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/E/E09/es_IEA_E09_Contenidos/website_151_generacin_de_un_campo_campo_magntico_giratorio.html
- [6] X. Liang and Y. Luy, "Harmonic Analysis for Induction Motors," in 2006 *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2006, pp. 172–177. doi: 10.1109/CCECE.2006.277368.
- [7] M. Pérez Martínez, J. Ramos Guardarrama, Y. Rodríguez Domínguez, M. Canasí Piñeiro, D. García del Sol, and E. Díaz Alfonso, Estudio por medio de Scilab de los armónicos en los Sistemas Eléctricos de Potencia aplicado a un caso de estudio. 2021.
- [8] "Campo magnético rotativo - Electrónica Fácil Top." Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.electronicafacil.top/motor/motor-sincrono/campo-magnetico-rotativo/>
- [9] "Vista de Simulación del inversor multinivel de fuente común como variador de frecuencia para motores de inducción." Accessed: Apr. 02, 2024. [Online]. Available: https://revistas.uptc.edu.co/index.php/investigacion_uitama/article/view/5636/4701
- [10] "¿Cuáles son las ventajas y desventajas del método de control de velocidad v / f del motor de inducción? Educación te da un futuro mejor – SacoLife.com." Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://edu.sacolife.com/36184/cuales-son-las-ventajas-y-desventajas-del-metodo-de-control-de-velocidad-v-f-del-motor-de-induccion.html>
- [11] G. Faccioli, "Triple harmonics in transformers," *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 41, no. 5, pp. 351–359, 1922, doi: 10.1109/JoAIEE.1922.6590915.
- [12] G. Chicco, P. Postolache, and C. Toader, "Triplen harmonics: Myths and reality," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 7, pp. 1541–1549, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.03.007>.
- [13] R. P. de Souza, D. Morinigo-Sotelo, V. Fernandez-Cavero, Ó. Duque-Perez, C. M. Agulhari, and A. Goedel, "Broken rotor bar fault detection using odd triple harmonics in delta-connected induction motors," in 2023 IEEE 14th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, *Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2023, pp. 49–55. doi: 10.1109/SDEMPED54949.2023.10271506.
- [14] M. Ing. J. G. S. Dr. Ing. Marcos A. de Armas Teyra, "Corrientes armonicas en el

circuito de secuencia cero," Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente Universidad de Cienfuegos, Cuba, 2011.

- [15] "ARMÓNICOS: Análisis de perturbaciones | Electricistas.cl." Accessed: Oct. 27, 2023. [Online]. Available: <https://electricistas.cl/armonicos-analisis-de-perturbaciones/>
- [16] F. Yue, Z. Sun, W. Xu, and Md. R. Islam, "Electromagnetic Design and Vibration Analysis of a Homopolar Linear Synchronous Motor," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 8, pp. 1–5, 2021, doi: 10.1109/TASC.2021.3101769.
- [17] D. Bellan, "Clarke Transformation Solution of Asymmetrical Transients in Three-Phase Circuits," *Energies* (Basel), vol. 13, no. 19, 2020, doi: 10.3390/en13195231.
- [18] E. Sandoval, J. Saavedra, C. Gascon, and C. Gómez, "Transformación de Park y Clark aplicado a las Transformación de Park y Clark aplicado a las Maquinas Eléctricas Maquinas Eléctricas."
- [19] F. Magnussen and C. Sadarangani, "Winding factors and Joule losses of permanent magnet machines with concentrated windings," in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03., 2003*, pp. 333–339 vol.1. doi: 10.1109/IEMDC.2003.1211284.
- [20] "IEEE Std 519-2022 (Revision of IEEE Std 519-2014)," pp. 1–31, 2022.
- [21] H. Santos, J. Miguel, S. Sanz, and J. Andrés, "Diseño electromagnético de Máquinas Eléctricas con el programa de elementos finitos FEMM," 2021, Accessed: May 26, 2024. [Online]. Available: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/52195>
- [22] "Chapa magnética para componentes electromagnéticos." Accessed: Jan. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.waelzholz.com/es/productos/chapa-magnetica.html>