

DISTRIBUCION DE LAS CORRIENTES ARMONICAS EN CIRCUITOS ELECTRICOS DE POTENCIA

ING. JUAN J. DEL CASTILLO

DEPTO. DE DISEÑO ELÉCTRICO - ELECTRONICO

STEM DAKTALAKTOR MR

ELECTRONICA DE POTENCIA

SOLEDAD DE GRACIANO SANCHES, SAN LUIS POTOSI, S.L.P. MEXICO

Resumen: Las corrientes armónicas o múltiplos de la frecuencia fundamental (60 Hz) generadas por cargas no lineales viajan por los circuitos eléctricos que los alimentan llegando a usuarios que no las generan; esto sin duda, comprometa la aplicación de capacitores cuando este usuario desea mejorar su factor de potencia

porque sin saberlo está creando circuitos que atraen y amplifican a estas armónicas errantes. Presentamos la manera clásica de cuantificar la propagación armónica generada por una carga no lineal en su circuito de suministro y el de otros usuarios (punto de conexión común o *acometida*).

I INTRODUCCION

La operación de procesos con cargas no lineales es una mejora indiscutible; sin embargo, la sobrecarga de los circuitos de distribución y suministros eléctricos son un fenómeno real causado por estas mejoras. Las corrientes armónicas se distribuyen en los circuitos eléctricos de potencia acordes a una proporción de reparto a las admitancias en cada nodo del circuito (*2ª ley de Kirchhoff*); se generan nuevos criterios para implementar capacitores mediante el análisis de la frecuencia de resonancia natural del circuito y las frecuencias armónicas comunes en circuitos eléctricos industriales.

II ANÁLISIS DE UN CIRCUITO DE SUMINISTRO ELECTRICO

Analizaremos un circuito de suministro eléctrico de potencia con acometida para tres usuarios como el ilustrado en la *figura 1*; uno de ellos es generador de armónicas y los otros dos no lo son; no hay capacitores para compensación del factor de potencia en ningún punto del circuito:

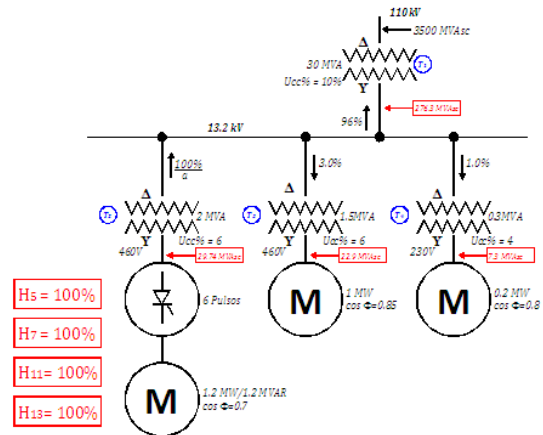


Figura 1 Circuito De Suministro Para 3 Usuarios

III ANÁLISIS DE UN CIRCUITO

1. Independientemente de la magnitud relativa al valor RMS de la corriente total de cada armónica, se estipula como 100% en el punto de generación para fines de claridad en la propagación en el circuito electrónico.
2. La generación armónica del ejemplo es característica de un convertidor de 6 pulsos ($h = np + 1$; $n = 1, 2, 3, \dots$); armónicas 5ª, 7ª, 11ª y 13ª.

➔ No hay capacitores instalados en ningún punto.

➔ Potencia de corto circuito en el secundario (Acometida) del transformador T_1 (30 MVA; 110 kV / 13.2 kV; 3500 MVA_{sc} de cortocircuito en primario):

$$MVA_{sc} = \frac{\left(\frac{30 \text{ MVA}}{10\%} \cdot 100\right) (3500 \text{ MVA})}{\left(\frac{30 \text{ MVA}}{10\%} \cdot 100\right) + 3500 \text{ MVA}} = 276.31 \text{ MVA}_{sc}$$

➔ Potencia de cortocircuito en el secundario del transformador T_2 (2 MVA; 13.2 kV / 460V); circuito generador de armónicas.

$$MVA_{sc} = \frac{\left(\frac{2 \text{ MVA}}{6\%} \cdot 100\right) (276.31 \text{ MVA})}{\left(\frac{2 \text{ MVA}}{6\%} \cdot 100\right) + 276.31 \text{ MVA}} = 29.74 \text{ MVA}_{sc}$$

➔ Potencia de corto circuito en el secundario del transformador T_3 (1.5 MVA; 13.2 kV / 460V) usuario con cargas prácticamente lineales y factor de potencia ligeramente bajo (FP=85%).

$$MVA_{sc} = \frac{\left(\frac{1.5 \text{ MVA}}{6\%} \cdot 100\right) (276.31 \text{ MVA})}{\left(\frac{1.5 \text{ MVA}}{6\%} \cdot 100\right) + 276.31 \text{ MVA}} = 22.92 \text{ MVA}_{sc}$$

➔ Potencia de cortocircuito en el secundario del transformador T_4 (0.3MVA; 13.2 kV / 220V) usuario con carga lineal y factor de potencia bajo (FP=80%).

$$MVA_{sc} = \frac{\left(\frac{0.3 \text{ MVA}}{4\%} \cdot 100\right) (276.31 \text{ MVA})}{\left(\frac{0.3 \text{ MVA}}{4\%} \cdot 100\right) + 276.31 \text{ MVA}} = 7.3 \text{ MVA}_{sc}$$

CALCULO DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA NATURAL (H_R) DE CADA IRCUITO:

➔ Frecuencia de resonancia natural (h_r) del transformador T_2 en el punto de generación de las armónicas.

$$h_r = \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{MVA}} = \sqrt{\frac{29.74}{1.2}} = 4.98 \cong 5^{\text{a}} \text{ Armonica}$$

La frecuencia de resonancia natural (h_r) del circuito coincide con la 5ª armónica que genera la misma carga no lineal de 6 pulsos; habrá amplificación si se instalan capacitores directamente en paralelo a la carga no lineal.

➔ Frecuencia de resonancia natural (h_r) del transformador T_3 en su secundario si se instalaran los capacitores demandados por su carga con fines de mejorar el factor de potencia.

➔ La potencia de los capacitores que demanda la carga lineal de 1MW con un factor de potencia del 85% (FP=0.85) esta dada por la siguiente ecuación:

$$Q_T = P \tan [\cos^{-1} (F.P.)]$$

Donde:

Q_T = Potencia reactiva de los capacitores (MVAR).

P = Potencia activa de la carga (MW).

F.P. = Factor de potencia.

$$\Rightarrow Q_T = 1 \text{ MW} \tan [\cos^{-1} (0.85)]$$

$$Q_T = \underline{0.6197 \text{ MVAR}}$$

$$h_r = \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{MVA}} = \sqrt{\frac{22.92}{0.6197}} = 6.08$$

La frecuencia natural es la armónica 6; sin embargo, nadie compensa el factor de potencia a un FP= 1 por ser incosteable económicamente hablando; ciertamente no hay generación de armónica 6; pero, en el caso hipotético de que este usuario no compense su factor de potencia a unitario; si no a otros valores menores; supongamos que el usuario decide instalar un banco de capacitores de potencia esta dada por la siguiente ecuación.

$$F.P. = \cos \left[\tan^{-1} \frac{Q_T - Q_{INS}}{P} \right]$$

Donde;

Q_T = Potencia reactiva total medida y demandada (MVAR).

Q_{INS} = Potencia reactiva del banco de capacitores que se decide instalar (MVAR).

La **tabla 1** ilustra la forma de como cambia el factor de potencia y la frecuencia de resonancia natural del circuito eléctrico, cambiando el valor de los capacitores ya sea compensando a valores menores de factor de potencia por razones económicas o técnicas (por ejemplo voltajes de operación muy por debajo de los voltajes de fabrica entre otros), o en el caso de bancos automáticos por pasos:

Q_{INS} MVAR	FP %	h_r MULTIPLS DE 60Hz
0.600	99.98	6.18
0.500	99.29	6.77
0.450	98.59	7.13
0.400	97.67	7.57
0.350	96.55	8.09
0.300	95.25	8.74
0.250	93.79	9.57
0.200	92.21	10.70
0.150	90.51	12.36
0.100	88.73	15.14
0.050	86.88	21.41
0.000	85.00	-----

Tabla 1; se ilustra la evolución del factor de potencia (FP) y de la frecuencia de resonancia natural (h_r) alterando la potencia de los capacitores (Q_{INS}) que podrían ser instalados en bornes del transformador T_3 .

NOTAS:

- Los números en rojo indican los valores de potencia instalados (Q_{INS} en MVAR), para los cuales las frecuencias de resonancia natural del circuito (h_r) coincide con las frecuencias armónicas generadas por la carga no lineal vecina, en estos casos, este usuario se convertirá en un importador de armónicas por presentar su circuito baja impedancia o resonancia serie a estas frecuencias armónicas.

- Observe que para determinar (h_r); la ecuación se modifica como sigue:

$$h_r = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{Q_{INS}MVA}}$$

Donde;

MVA_{SC} = Potencia de corto circuito en el punto de instalación de los capacitores (MVA).

Q_{INS} = Potencia reactiva de los capacitores que realmente se instalan por razones varias (MVAR).

- Este análisis sería una práctica factible y muy recomendable de realizar, para la evaluación del valor de la potencia reactiva de los capacitores al compensar factor de potencia en zonas de contaminación armónica.

➔ Frecuencia de resonancia natural (h_r) del transformador T_4 en su secundario si se instalan los capacitores demandados por su carga.

- De igual manera que para el usuario anterior:

$$Q_T = 0,2 \text{ MW } \tan [\cos^{-1} (0.8)]$$

$$Q_T = 0.15 \text{ MVAR}$$

$$\Rightarrow h_r = \sqrt{\frac{7.3 \text{ MVA}_{SC}}{0.15 \text{ MVA}}} = 6.97$$

Este usuario está prácticamente importado a la 7ª armónica a través de la red desde la fuente generada de armónicas de su vecino; de la misma manera se ilustra en la **tabla 2**, la manera de como cambian el factor de potencia (FP) y la frecuencia de resonancia natural (h_r) del circuito, variando la potencia reactiva de los capacitores (Q_{INS}):

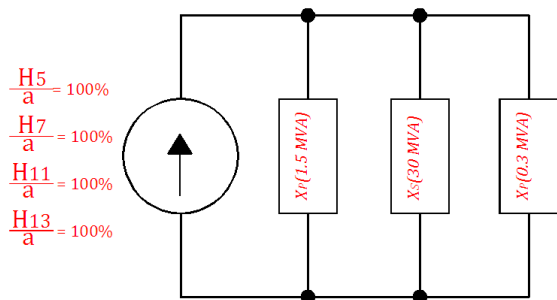
Q_{INS} MVAR	FP %	h_r MULTIPLS DE 60Hz
0.150	100	6.97
0.125	99.22	7.64
0.100	97.01	8.54
0.075	93.63	9.86
0.050	89.44	12.08
0.025	84.80	17.08
0	80.00	-----

Tabla 2; evolución del factor de potencia (FP) y de la recuencia de resonancia natural (h_r) alterando la potencia de los capacitores (Q_{INS}) que podrían ser instalados en bornes del transformador T_4 .

NOTA:

Si este usuario compensara su factor a valores cercanos a la unidad; no solo le constará más; si no que entrara en resonancia al 7ª armónica que genera su vecino.

CIRCUITO EQUIVALENTE REFERIDO A LA FUENTE GENERADORA DE ARMONICOS



Donde;

1. $X_P(1.5MVA)$; reactancia inductiva vista desde el primario del trafo. de 1.5 MVA.
2. $X_S(30MVA)$; reactancia inductiva vista desde el secundario del trafo. de 30 MVA.
3. $X_P(0.3MVA)$; reactancia inductiva vista desde el primario del trafo. de 0.3 MVA.
4. En este caso; las pérdidas activas (R) son mucho menores que las impedancias por lo que las impedancias ($Z \approx X$) son iguales a las reactancias por simplicidad.
5. Los armónicos inyectados por la fuente armónica en el circuito primario (13.2kV o acometida) están disminuidas por el factor (a); que es la relación de transformación según la siguiente ecuación:

$$a = \frac{V_P}{V_S} = \frac{13.2kV}{460 V/\sqrt{3}} = 49.7$$

Es decir; las armónicas están atenuadas ≈ 50 veces.

6) Las ecuaciones que rigen la distribución de corrientes armónicas para cada transformador son acordes a la distribución de corrientes armónicas para cada transformador son acordes a la distribución en corriente por admitancias ($Y = Z^{-1}$).

$$\Rightarrow Z_P \approx X_S = \frac{3 \cdot V_P^2 \cdot U_{CC}\%}{S_T} = a^2 X_S$$

y;

$$Z_S \approx X_P = \frac{3 \cdot V_S^2 \cdot U_{CC}\%}{S_T} = \frac{X_P}{a^2}$$

Donde;

Z_P : Reactancia defase (impedancia) vista desde el primario (por lo común devanado de alto voltaje).

X_S : Reactancia de fase (impedancia) vista desde el secundario; o devanado de bajo voltaje.

V_P : Voltaje primario de fase (V_{L-L} para Δ ; V_{L-N} en Y).

V_S : Voltaje Secundario de fase (V_{L-L} para Δ ; V_{L-N} en Y).

U_{CC} : Impedancia de cortocircuito en porcentaje del transformador.

S_T : Potencia aparente (VA) del transformador.

a^2 : Cuadrado del cociente del voltaje de fase primario ver sus voltajes de fase secundaria.

También:

$$Y_P = (Z_P)^{-1} \approx (X_P)^{-1}$$

$$Y_S = (Z_S)^{-1} \approx (X_S)^{-1}$$

$$Y_T = Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_N$$

$$I_{hP} (1.5 MVA)\% = \frac{Y_P (1.5 MVA)}{Y_T} 100$$

$$I_{hS} (30VA)\% = \frac{Y_S (30 MVA)}{Y_T} 100$$

$$I_{hP} (0.3 MVA)\% = \frac{Y_P (0.3 MVA)}{Y_T} 100$$

Donde;

Y_P : Admitancia de fase vista desde el primario.

Y_S : Admitancia de fase vista desde el secundario.

Y_T : Admitancia total del círculo.

$I_{hp}(\text{trafo})\%$: porcentaje de corriente armónica (h) que atraviesa el transformador correspondiente en su circuito primario.

$I_{hs}(\text{trafo})\%$: porcentaje de corriente armónica (h) que atraviesa el transformador correspondiente en su circuito secundario.

Entonces;

$$Z_p(1.5 \text{ MVA}) \approx X_p(1.5 \text{ MVA}) = \frac{3(13.2 \text{ kV})^2(6\%)}{1.5 \text{ MVA}} = 20.9 \Omega$$

$$Y_p(1.5 \text{ MVA}) = Z_p(1.5 \text{ MVA})^{-1} = 0.047826 \text{ S}$$

$$Z_s(30 \text{ MVA}) \approx X_s(30 \text{ MVA}) = \frac{3(13.2 \text{ kV}/\sqrt{3})(10\%)}{30 \text{ MVA}} = 0.5808 \Omega$$

$$Z_p(0.3 \text{ MVA}) \approx X_p(0.3 \text{ MVA}) = \frac{3(13.2 \text{ kV})^2(4\%)}{0.3 \text{ MVA}} = 69.696 \Omega$$

$$Y_p(0.3 \text{ MVA}) = Z_p(0.3 \text{ MVA})^{-1} = 0.014348 \text{ S}$$

$$Y_T = Y_p(1.5 \text{ MVA}) + Y_s(30 \text{ MVA}) + Y_p(0.3 \text{ MVA}) \\ = 0.047826 \text{ S} + 1.721763 \text{ S} + 0.014348 \text{ S} \\ = 1.783937 \text{ S}$$

$$I_{h_p}(1.5 \text{ MVA})\% = \frac{0.047826 \text{ S}}{1.783937 \text{ S}}(100) = 2.68\%$$

Al transformador T_3 (1.5MVA) Le atraviesan el $\approx 3\%$ de las corrientes armónicas generadas en el transformador T_2 (2MVA).

$$I_{h_s}(30 \text{ MVA})\% = \frac{1.721763 \text{ S}}{1.783937 \text{ S}}(100) = 96.51\%$$

Al transformador T_1 (30MVA) Le atraviesan el $\approx 96\%$ de las corrientes armónicas generadas en el transformador T_2 (2MVA).

$$I_{h_p}(0.3 \text{ MVA})\% = \frac{0.014348 \text{ S}}{1.783937 \text{ S}}(100) = 0.832\%$$

Al transformador T_3 (0.3MVA) Le atraviesan el $\approx 1\%$ de las corrientes armónicas generadas en el transformador T_2 (2MVA).

APLICACIÓN DE LOS CONCEPTOS

En el transformador (T_2) la carga no lineal puede demandar corrientes según la siguiente ecuación:

$$I_{RMS} = \frac{(PM/\cos\varphi)}{\sqrt{3} \cdot V_S} = \frac{1.2 \text{ MV}/0.7}{\sqrt{3} \cdot (460 \text{ V})} = 2.151.6 \text{ A}$$

Teóricamente por continuar con el ejemplo un 20% de la corriente eficaz (IRMS) es de la 5ª armónica; entonces

$$I_5 = \frac{I_{RMS}}{5} \approx 430 \text{ A}$$

Esta corriente de la 5ª armónica generada en el secundario de (T_2), es inducida al bus de 13.2kV (primario de T_2 o punto de acometida) atenuada por un factor (α) propio del transformador (T_2); a saber:

$$\alpha = \frac{V_P}{V_S} = \frac{13.2 \text{ kV}}{0.46/\sqrt{3}} = 49.7$$

Los 430 A de 5ª armónica en secundario se convierte en:

$$I_P = \frac{I_S}{\alpha} = \frac{430 \text{ A}}{49.7} = 8.65 \text{ A}$$

8.65 A de 5ª armónica en la acometida.

Por analizar un transformador; elijamos el transformador de 1.5 MVA (T_3), según valores, a este se le inyectan el 2.68% del contenido armónico y en este caso de 5ª armónica:

$$\Rightarrow (8.65 \text{ A})(2.68\%/100) = 0.2318 \text{ A}$$

Hay 0.2318 A de 5ª armónica en el devanado primario de (T_3); este armónico, será amplificado por la relación de voltaje propia del transformador hacia su devanado secundario; a saber:

$$I_S = \alpha I_P = \frac{V_P}{V_S} \cdot I_P = \frac{13.2 \text{ kV}}{0.460 \text{ kV}/\sqrt{3}} (0.2318 \text{ A}) = 11.52 \text{ A}$$

⇒ Existirán 11.52 A de 5ª armónica adicionales en el secundario del usuario del transformador (T_3) cuando el usuario del transformador (T_2) pone en operación su carga no lineal.

- ➔ Este fenómeno se repite en proporción para cada armónica generada y la suma geométrica contribuye a aumentar el RMS de la corriente.

$$I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2}$$

CONCLUSIÓN.

El fenómeno de importación de armónicas a través de la acometida por usuarios que no las generan e incluso no operan con cargas no lineales es cuantificable y predecible; las corrientes armónicas encuentran caminos de baja impedancia por efecto de resonancia serie en circuitos de usuarios que solo pretenden mejorar su factor de potencia por fines económicos y de rendimiento de sus instalaciones conectados a la misma acometida. Un simple análisis de frecuencia natural de resonancia del circuito a mejorar, proporciona una nueva variable a considerar para la implementación de bancos capacitivos en la corrección del factor de potencia y evitar problemas de corto plazo.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] Dr. Ing. Alfredo Navarro Crespo, *“Corrientes Armónicas”*.
- [2] George Mcpherson; Universidad De Missouri Rolla; *“Manual de Maquinas Eléctricas y Transformadores”*; Tomo 2.