

5. ANALISIS DE REDES CON ARMÓNICOS

El análisis armónico de una red consiste básicamente en determinar las tensiones armónicas provocadas por las corrientes armónicas, inyectadas a la misma por las fuentes constituidas por las cargas no lineales. También es conveniente trazar las curvas de las impedancias en función de la frecuencia en los puntos o nudos elegidos de la red. Esto último permite comprobar con claridad el riesgo de resonancia de la red a las frecuencias de los armónicos con presencia en la misma, resonancias que pueden comportar serios inconvenientes a los receptores y por ende al conjunto de la red.

Antes de plantear un procedimiento de cálculo es necesario tratar varios aspectos importantes.

a) **Análisis monofásico o trifásico**

Es necesario determinar si es suficiente realizar un análisis monofásico de la red o bien debe efectuarse un estudio trifásico de la misma. En el primer supuesto se acepta que el sistema es equilibrado y, por tanto, solo debe considerarse el sistema directo o de secuencia positiva.⁸² En general, estas condiciones se dan con suficiente aproximación en las redes o instalaciones industriales. En instalaciones donde abundan receptores monofásicos, dando lugar a considerables desequilibrios, el estudio se complica considerablemente al tener que contemplar un análisis trifásico. En lo que sigue solo se considerará el análisis monofásico.

b) **Determinación de las corrientes armónicas**

Si bien existen abundantes estudios que pretenden simular las diferentes cargas no lineales con el fin de determinar las corrientes armónicas inyectadas a la red [1] [2], no es fácil encontrar un método suficientemente preciso ni fácil de implementar, por lo que se suele recurrir a los datos facilitados por los fabricantes de los equipos, caso típico de los variadores de frecuencia, o si es posible a mediciones de campo, teniendo en cuenta que estas corrientes armónicas varían para un equipo determinado con la potencia suministrada, así como con la impedancia de red como sucede de forma ostensible con los convertidores c.a.-c.c. de fuente de tensión.

Además, en caso de desequilibrio en las tensiones de red debe de contemplarse la aparición de armónicos no característicos de cierta importancia como es el caso del tercer armónico en convertidores trifásicos.

82. La secuencia directa es la que corresponde al sentido giro positivo de los fasores. En un sistema desequilibrado aparecen otros dos sistemas, el inverso o negativo por su sentido de giro y el homopolar.

c) Factores de diversidad y atenuación

El *factor de diversidad* es consecuencia del ángulo de fase de los armónicos. Así en instalaciones donde se conectan varios receptores no lineales, los ángulos de fase de las corrientes de un mismo armónico no son iguales en cada receptor, dando lugar a que la suma vectorial de los fasores de corriente sea inferior a la suma aritmética. Al cociente entre ambas sumas se le denomina *factor de diversidad*. Como se comprueba en [3] para cargas residenciales, si bien este es próximo a la unidad para los armónicos de orden bajo, su valor se reduce ostensiblemente para armónicos de orden superior.

En caso de cargas industriales como sucede con los VF trifásicos el fenómeno de diversidad es menos apreciable.

El *factor de atenuación* se debe a la influencia por una parte de la impedancia de red como se menciona en b) y por otra a la distorsión de tensión. Su incidencia, si bien es bastante clara en el caso de la impedancia, no lo es tanto en el de la distorsión, aunque por lo general también tienden a reducir las corrientes armónicas inyectadas a la red.

Con este preámbulo puede apreciarse la complejidad que supone realizar un estudio armónico de una red con un elevado rigor.

Sin embargo, hay que tener presente que en la mayoría de casos el propósito del estudio, en las instalaciones industriales o de servicios como los edificios de oficinas, consiste en determinar o analizar:

- Problemas causados en la instalación como son pérdidas en transformadores y líneas, mal funcionamiento de equipos electrónicos, etc.
- Características de la batería de condensadores a instalar, es decir, elegir entre una batería convencional o con filtros.
- Si la emisión de armónicos a la red pública cumple con los requisitos exigidos por las normas o las condiciones del operador de la red.

En los supuestos anteriores el análisis armónico a realizar admite simplificaciones importantes que permiten utilizar herramientas de cálculo perfectamente manejables por técnicos no especialmente expertos en la materia.

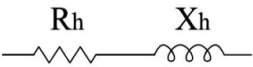
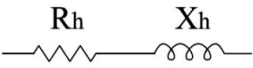
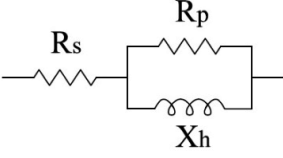
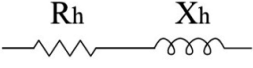
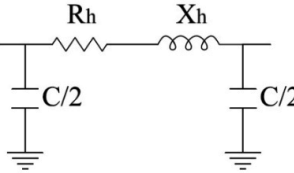
5.1 Modelación de la red y sus componentes

En toda red eléctrica encontramos componentes tales como líneas, generadores, transformadores, motores y baterías de condensadores para los cuales necesitamos conocer su impedancia no solo a 50 Hz o 60 Hz sino a cualquier frecuencia dentro del rango de los armónicos a analizar.

En general, los modelos de estos elementos se asemejan a los utilizados en los cál-

culos de cortocircuitos pero contemplando como variable la frecuencia. En la tabla 5.1-1 se detallan los utilizados en el presente manual.⁸³

Las impedancias indicadas corresponden al sistema directo ya que suponemos la red equilibrada y, por tanto, válido el análisis monofásico de la misma.

| Componente | Circuito equivalente | Valor de los parámetros |
|--------------------|---|---|
| Acometida |  | $X_h = hX_1, \quad X_1 = \frac{U^2}{S_K}$ $R_h = \sqrt{h} 0,1X_1$ |
| Generador síncrono |  | $R_h = \sqrt{h} R_1, \quad R_1 = 0,1X_d''$ $X_h = hX_d''$ $X_d'' = \text{reactancia subtransitoria}$ |
| Transformador |  | $R_s = \frac{X_1}{\tan \Psi_1}$ $R_p = 10X_1 \tan \Psi_1 \quad ^{84}$ $X_h = hX_1, \quad X_1 = u_k \frac{U^2}{S}$ $u_k = \text{tensión de cc.}$ $S = \text{Potencia del transformador}$ |
| Motor asíncrono |  | $R_h = \sqrt{h} R_1, \quad R_1 = \frac{X_1}{3}$ $X_h = X_1 h, \quad X_1 = \frac{U^2}{a S}$ $a = I_{\text{arranque}} / I_N$ $S = \text{Potencia aparente del motor}$ |
| Líneas o cables |  | $R_h = R_1, \quad X_h = h X_1 \quad ^{85}$ $\text{Para C consultar datos del fabricante o proyectista} \quad ^{86}$ |

83. No existe unanimidad en la literatura técnica al respecto en cuanto a los modelos para los elementos pasivos de la red. En este manual se han utilizado los modelos propuestos por [5]. Para el transformador, que es uno de los elementos más críticos, las discrepancias son apreciables especialmente para transformadores de potencia reducida y frecuencias armónicas por encima del 7º armónico.

84. Basados en [5] se obtiene los siguientes valores de $\tan \Psi_1$, para transformadores de distribución:

| Potencia del trafo, kVA | 400 | 630 | 1.000 | 1.250 | 1.600 | 2.000 | 2.500 |
|-------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\tan \Psi_1$ | 0,93 | 1,37 | 2,00 | 2,38 | 2,88 | 3,40 | 4,00 |

85. El valor de R_1 puede obtenerse por cálculo y el de X_1 al depender del tipo de cable y disposición de los conductores es preferible consultar los datos del fabricante (valores orientativos 0,1 Ω /km para cables y 0,4 Ω /km para líneas aéreas).

86. Valores orientativos 0,01 μ F/km para líneas aéreas de AT con valores inferiores para MT y 0,2-0,9 μ F/km para cables de MT.

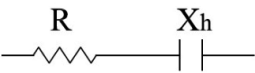
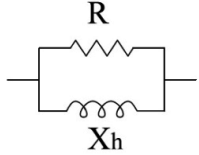
| Componente | Circuito equivalente | Valor de los parámetros |
|--|---|--|
| Condensadores |  | $X_h = \frac{X_1}{h}, X_1 = \frac{U^2}{Q_c}$ <p>R habitualmente se desprecia</p> |
| Cargas agrupadas (conjunto de cargas lineales de potencias individuales reducidas) |  | $R = \frac{U_N^2}{P_1}, X_h = h \frac{U_N^2}{Q_1}$ <p>P_1 y Q_1 potencias activa y reactiva del conjunto de cargas</p> |

Tabla 5.1-1 Modelos de los principales componentes lineales de la red.

5.2 Análisis de la red

En [6] y [7] se resumen los métodos más utilizados para análisis de armónicos en redes eléctricas. De entre ellos destaca el de *inyección de corriente* que consiste en considerar las cargas no lineales como fuentes de corrientes armónicas conectadas en determinados nudos de la red. Este método es el utilizado en el presente manual por su mayor divulgación.

En casos sencillos es posible analizar la red de forma manual o con la ayuda de una hoja de cálculo, siempre que no se consideren los ángulos de los armónicos, lo cual puede conducir a errores importantes generalmente por exceso si no se toman las pertinentes precauciones. A título de ejemplo en la figura 5.2-1 se ha representado el esquema de una instalación con dos niveles de tensión, bastante frecuente en industrias con distancias apreciables en planta. En el mismo es conveniente mencionar varios puntos:

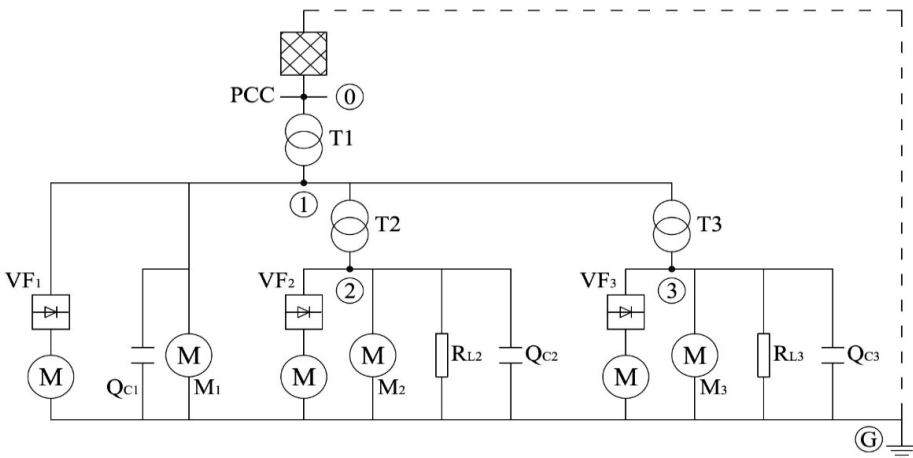


Figura 5.2-1 Ejemplo de esquema unifilar de una red con cuatro nudos, más tierra (G).

1. La red se ha representado con un esquema unifilar aceptando que el análisis se efectuará de forma monofásica, suponiendo, por consiguiente, que se trata de un sistema equilibrado.
2. Los nudos en una red son aquellos en que confluyen dos o más elementos del circuito, que en nuestro caso corresponderán a los puntos 0, 1, 2, 3 y G.
3. El nudo G constituye el nudo de referencia para las tensiones del resto de nudos, es decir, se considera con tensión cero de tierra.
4. Se considera un conductor o neutro artificial de retorno representado a puntos en el esquema.
5. Como ya se ha mencionado, las cargas no lineales, que en el caso de la figura 5.2-1 son los VF, se sustituyen por generadores ideales de corrientes armónicas cuyo orden y amplitud se determinan por mediciones o por datos correspondientes a las características de los equipos.
6. Las fuentes de tensión a frecuencia de red se sustituyen por sus impedancias internas adecuadamente modeladas para armónicos, considerando su tensión nula.
7. El resto de elementos pasivos como líneas, transformadores, motores y cualquier otro tipo de carga lineal se sustituyen por los modelos descritos en la tabla 5.1-1.
8. Debe elegirse una tensión base o de referencia para el cálculo.

Ejemplo 5.2-1. Red con un solo nudo

Con este ejemplo se pretende exponer con claridad el procedimiento de cálculo. Para ello si en el esquema de la figura 5.2-1 se prescinde de los transformadores T2 y T3, la red solo tendrá el nudo 1 más el obligado de referencia G si no se considera el nudo 0.⁸⁷

Para el cálculo se facilitan los datos necesarios en la siguiente tabla:

| Componente | Tensión | Potencia | X/R | z | Corrientes armónicas de VF _i , I _h (%) | | | | | | | | |
|---------------|---------|-------------------|-----|---|--|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| | | | | | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 23 | 25 | |
| | kV | MVA | | % | | | | | | | | | |
| Acometida | 20 | 500 ⁸⁸ | 10 | | | | | | | | | | |
| Transformador | 20/6,3 | 2 | | 6 | | | | | | | | | |
| VF (6pulsos) | 6,3 | 1,2 | | | 32 | 12 | 5,7 | 3,9 | 2,2 | 1,7 | 1,1 | 0,9 | |
| Motor | 6,3 | 0,5 | | | | | | | | | | | |
| Condensadores | 6,3 | 0,2 | | | | | | | | | | | |

Tabla 5.2-1 Características de los componentes de la red de la figura 5.2-1 con T2 y T3 desconectados.

87. Omisión válida si en ese nudo no existe ninguna fuente de corriente o tensión armónicas.

88. Se refiere a la potencia de cc.