

CÁLCULO DE INSTALACIONES TRIFÁSICAS CON CARGA DESEQUILIBRADA

J. M. GARCÍA ARÉVALO, ROBERTO C. REDONDO, N. R. MELCHOR
Ingeniería Eléctrica, ETSII Béjar, Universidad de Salamanca

El estudio de una instalación con carga desequilibrada no está muy difundido, pese a constituir la configuración más frecuente en la práctica. En este artículo se muestran los aspectos más importantes a tener en cuenta para calcular correctamente los elementos principales de una instalación eléctrica trifásica con carga desequilibrada. Se analizan ciertos conceptos básicos que conducen a un cálculo notablemente exacto de la instalación, como el concepto de coeficiente de simultaneidad por fase en la alimentación de un conjunto de viviendas, y se comprueba la repercusión que el desequilibrio puede tener sobre el rendimiento de la instalación.

Introducción

El reparto de las cargas monofásicas influye en el valor de algunos parámetros determinantes en el diseño de las instalaciones eléctricas. Un reparto desigual provoca el desequilibrio en las intensidades de fase, lo que influye en la potencia del transformador a instalar y la sección de los conductores necesarios.

El error que se comete al calcular una instalación desequilibrada utilizando las expresiones para carga equilibrada depende del grado de desequilibrio de la instalación. Cuando éste es reducido el error es despreciable, pero no sucede lo mismo con desequilibrios acusados, que hacen inaceptable el tratamiento de las cargas como equilibradas.

Mostraremos la forma correcta de determinar los valores de algunos factores fundamentales en el diseño de una instalación cuando la carga está desequilibrada. Concretamente la determinación de la potencia del transformador y la sección de las líneas necesarias.

Potencias por fase

La potencia compleja que absorbe una carga conectada a un sistema trifásico de cuatro hilos, figura 1, se puede determinar sumando las potencias complejas de cada fase [1].

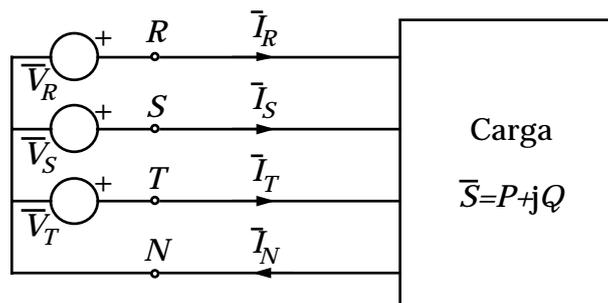


Fig. 1.- Sistema trifásico de cuatro hilos.

$$\begin{aligned} \bar{S} &= \bar{S}_R + \bar{S}_S + \bar{S}_T = (P_R + j Q_R) + (P_S + j Q_S) + (P_T + j Q_T) = \\ &= (P_R + P_S + P_T) + j (Q_R + Q_S + Q_T) = P + j Q \end{aligned} \tag{1}$$

donde \bar{S} , P y Q son respectivamente: la potencia compleja, activa y reactiva absorbidas por la carga y $\bar{S}_{R,S,T}$, $P_{R,S,T}$, y $Q_{R,S,T}$ las potencias por fase.

Las potencias activas y reactivas por fase se obtienen sumando las potencias de las cargas monofásicas conectadas entre cada fase y neutro. También se pueden medir, por ejemplo, mediante un analizador de redes conectado como se muestra en la figura 2.

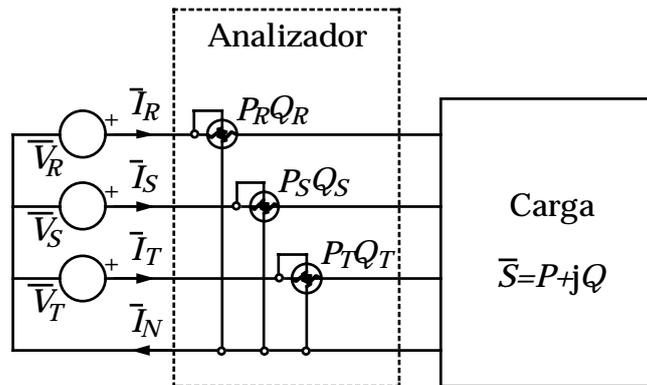


Fig. 2.- Medida de las potencias por fase.

Las potencias aparentes por fase se calculan a partir de las potencias activas y reactivas por fase de la siguiente forma

$$S_R = \sqrt{P_R^2 + Q_R^2}, \quad S_S = \sqrt{P_S^2 + Q_S^2}, \quad S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} \tag{2}$$

Con las potencias activas y reactivas, y partiendo del habitual sistema de tensiones equilibrado, es inmediato el cálculo de las intensidades de fase [2].

$$\bar{I}_R = \frac{P_R - j Q_R}{V}, \quad \bar{I}_S = \frac{P_S - j Q_S}{V/120^\circ}, \quad \bar{I}_T = \frac{P_T - j Q_T}{V/-120^\circ} \tag{3}$$

La intensidad por el neutro es

$$\bar{I}_N = \bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T \tag{4}$$

Y, finalmente, los valores eficaces de las intensidades

$$I_R = \frac{S_R}{V}, \quad I_S = \frac{S_S}{V}, \quad I_T = \frac{S_T}{V}, \quad I_N = |\bar{I}_R + \bar{I}_S + \bar{I}_T| \tag{5}$$

Con carga equilibrada, la potencia aparente del transformador necesario coincide con la potencia aparente de la carga. No sucede lo mismo con carga desequilibrada, pues hay que tener en cuenta que el límite de un transformador se alcanza cuando la potencia requerida por una de las fases es igual a la tercera parte de la potencia aparente nominal del transformador. Por tanto, la potencia nominal de éste será, al menos, el triple de la máxima potencia aparente absorbida por las fases. Es decir, debe garantizarse que la intensidad por

cualquiera de los devanados del transformador no supere el límite impuesto por el fabricante en su construcción.

Coefficiente de simultaneidad por fase

La intensidad por una línea que alimenta varias cargas se obtiene sumando fasorialmente las intensidades de las cargas conectadas simultáneamente. Sin embargo, es habitual, que no todas las cargas se conecten a la vez, lo que reduce la intensidad total y, en consecuencia, la sección necesaria. La forma ideal para determinar la intensidad sería considerar solo aquellas cargas que son susceptibles de funcionar simultáneamente, pero esto no siempre resulta fácil de precisar. Para subsanar este inconveniente se emplean coeficientes o factores de simultaneidad, como establece el Reglamento para Baja Tensión para el caso de un conjunto de viviendas.

Tabla 1. Coeficientes de simultaneidad para viviendas según la ITC-BT 10.

Nº de viviendas (n)	Coefficiente de simultaneidad
1	1
2	2
3	3
4	3,8
5	4,6
6	5,4
7	6,2
8	7
9	7,8
10	8,5
11	9,2
12	9,9
13	10,6
14	11,3
15	11,9
16	12,5
17	13,1
18	13,7
19	14,3
20	14,8
21	15,3
n > 21	15,3+(n-21)0,5

La tabla 1, obtenida de la instrucción técnica nº 10 del Reglamento [3], sirve para determinar la carga simultánea correspondiente a un conjunto de viviendas. La potencia a considerar se obtiene multiplicando la media aritmética de las potencias máximas previstas en cada vivienda por el coeficiente de simultaneidad indicado en dicha tabla, según el número de viviendas. Los coeficientes de simultaneidad de la tabla 1 se obtienen según la ley de formación mostrada en la tabla 2, y consiste en sumar un factor decreciente, de 1.0 a 0.5, al coeficiente correspondiente al número de viviendas anterior: en las tres primeras viviendas se añade 1.0; en las 6 viviendas siguientes se añade 0.8; en las 5 siguientes se añade 0.7, en las 5 siguientes se añade 0.6, y luego siempre 0.5.

Nos ha llamado la atención que la ley de formación no agrupe las viviendas en múltiplos de 3 (empieza haciéndolo pero luego sigue de 5 en 5), pues, como se ve en la tabla 3, resulta más conveniente para sistemas trifásicos.

En la tabla 3 se introduce el coeficiente de simultaneidad por fase, que se obtiene a partir del coeficiente de simultaneidad propuesto (tabla 2), que llamaremos *coeficiente global*, pero esta vez fase a fase, y suponiendo que se va cargando primero la fase *R*, luego la *S*, luego la *T* y así sucesivamente. Esta suposición es arbitraria y no resulta relevante para la obtención de la tabla de coeficientes que se muestra.

Tabla 2. Ley de formación del coeficiente de simultaneidad actual y su propuesta de modificación.

Nº de viviendas (n)	Coeficiente de simultaneidad de la ITC-BT 10		Coeficiente de simultaneidad propuesto	
1	1	1	1	1
2	1 + 1	2	1 + 1	2
3	2 + 1	3	2 + 1	3
4	3 + 0,8	3,8	3 + 0,8	3,8
5	3,8 + 0,8	4,6	3,8 + 0,8	4,6
6	4,6 + 0,8	5,4	4,6 + 0,8	5,4
7	5,4 + 0,8	6,2	5,4 + 0,8	6,2
8	6,2 + 0,8	7	6,2 + 0,8	7
9	7 + 0,8	7,8	7 + 0,8	7,8
10	7,8 + 0,7	8,5	7,8 + 0,7	8,5
11	8,5 + 0,7	9,2	8,5 + 0,7	9,2
12	9,2 + 0,7	9,9	9,2 + 0,7	9,9
13	9,9 + 0,7	10,6	9,9 + 0,7	10,6
14	10,6 + 0,7	11,3	10,6 + 0,7	11,3
15	11,3 + 0,6	11,9	11,3 + 0,7	12
16	11,9 + 0,6	12,5	12 + 0,6	12,6
17	12,5 + 0,6	13,1	12,6 + 0,6	13,2
18	13,1 + 0,6	13,7	13,2 + 0,6	13,8
19	13,7 + 0,6	14,3	13,8 + 0,6	14,4
20	14,3 + 0,5	14,8	14,4 + 0,6	15
21	14,8 + 0,5	15,3	15 + 0,6	15,6
$n > 21$	15,3+($n-21$)0,5		15,6+($n-21$)0,5	

Nº de viviendas totales y reparto por fase (R, S, T)	Coeficiente de simultaneidad fase R	Coeficiente de simultaneidad fase S	Coeficiente de simultaneidad fase T	Coeficiente de simultaneidad global
1 (1,0,0)	1	0	0	1
2 (1,1,0)	1	1	0	2
3 (1,1,1)	1	1	1	3
4 (2,1,1)	1,8	1	1	3,8
5 (2,2,1)	1,8	1,8	1	4,6
6 (2,2,2)	1,8	1,8	1,8	5,4
7 (3,2,2)	2,6	1,8	1,8	6,2
8 (3,3,2)	2,6	2,6	1,8	7
9 (3,3,3)	2,6	2,6	2,6	7,8
10 (4,3,3)	3,3	2,6	2,6	8,5
11 (4,4,3)	3,3	3,3	2,6	9,2
12 (4,4,4)	3,3	3,3	3,3	9,9
13 (5,4,4)	4	3,3	3,3	10,6
14 (5,5,4)	4	4	3,3	11,3
15 (5,5,5)	4	4	4	12
16 (6,5,5)	4,6	4	4	12,6
17 (6,6,5)	4,6	4,6	4	13,2
18 (6,6,6)	4,6	4,6	4,6	13,8
19 (7,6,6)	5,2	4,6	4,6	14,4
20 (7,7,6)	5,2	5,2	4,6	15
21 (7,7,7)	5,2	5,2	5,2	15,6
$n > 21$				15,6+($n-21$)0,5

Tabla 3. Desglose del coeficiente de simultaneidad global aplicable a cada fase.

Se puede comprobar que la suma, en cada fila, de los tres coeficientes aplicables a las tres fases, resulta equivalente al coeficiente de la tabla del Reglamento modificada. La aplicación práctica de la tabla 3 se transforma en la sencilla aplicación de la tabla 4 a cada fase, que está extraída de cualquiera de las tres columnas de fase de la tabla 3. Así, para obtener la previsión de potencia suministrada por una fase, bastaría multiplicar el coeficiente de simultaneidad de la tabla 4 por el valor medio de las potencias correspondientes a las viviendas conectadas en esa fase.

Nº de viviendas por fase (nf)	Coefficiente de simultaneidad por fase
1	1
2	1,8
3	2,6
4	3,3
5	4
6	4,6
7	5,2
$nf > 7$	$5,2 + (nf - 7) 0,5$

Tabla 4. Coeficiente de simultaneidad por fase.

La potencia a considerar como potencia de una vivienda coincide con el grado de electrificación de la misma. En la tabla 5 se muestran los escalones de potencias monofásicos habituales [4].

Electrificación	Potencia (W)	Calibre interruptor general automático (IGA) en (A)
Básica	5750	25
	7360	32
Elevada	9200	40
	11500	50
	14490	63

Tabla 5. Escalones de potencia en suministros monofásicos (Guía-BT-10).

El grado de electrificación pretende identificar la potencia máxima que el abonado podrá contratar con la compañía distribuidor. Sin embargo, no todos los abonados contratan una potencia igual al grado de electrificación y, además, es altamente improbable que todas las viviendas estén absorbiendo la máxima potencia al mismo tiempo. Estas razones justifican la técnica del factor de simultaneidad. Como excepción, en edificios cuya instalación esté prevista para la aplicación de la tarifa nocturna, la simultaneidad a considerar es la unidad, ya que todos los radiadores y acumuladores se suelen conectar al mismo tiempo.

Nos sumamos, desde luego, a la opinión de quienes consideran que la potencia límite de una instalación debe fijarse en VA y no en W. Y a la de quienes piden que las compañías distribuidoras indiquen en el contrato y las facturas de suministro la potencia máxima en VA, ya que la potencia limitada no es potencia activa, sino potencia aparente. En efecto, al colocar un interruptor general automático (IGA), también conocido como interruptor de control de potencia (ICP), lo que realmente se está limitando es la intensidad máxima que puede absorber la instalación, y al ser fija la tensión de la red, ello equivale a limitar el producto de la intensidad por la tensión, que es la potencia aparente y no necesariamente la activa. Solo coinciden ambas en el caso de que el factor de potencia (fdp) del conjunto de receptores conectados por el abonado sea la unidad, lo que resulta rarísimo en la práctica. En el resto de los casos la potencia activa que podría obtenerse a partir del límite impuesto por el ICP, $P_{\text{máx}}$, sería igual a la potencia aparente contratada S_{cont} multiplicada por el factor de potencia, es decir:

$$P_{\text{máx}} = S_{\text{cont}} \times fdp \quad (6)$$

Cálculo de secciones por intensidad máxima

Los criterios que establecen la sección de los cables de una red de baja tensión son la intensidad máxima, la caída de tensión, el rendimiento, y la intensidad de cortocircuito. El procedimiento de cálculo teniendo en cuenta los tres primeros criterios es diferente en función de si la carga está desequilibrada o no. Veamos:

Cuando la carga está desequilibrada, la intensidad no es igual en las tres fases. El diseño debe partir del cálculo, para todos los tramos entre nudos o derivaciones a las cargas, de las intensidades de fase. Después hay que tener en cuenta la mayor intensidad de las tres, verificar que no supere la máxima admisible por el cable, y calcular, además, la intensidad que tendrá que circular por el neutro, si existe, verificando también su sección. Con una sencilla herramienta informática, como una hoja de cálculo, las laboriosas operaciones necesarias se resuelven cómodamente.

La intensidad admisible en condiciones de instalación (c.i.) se obtiene multiplicando la intensidad máxima admisible en condiciones normales (c.n.) por el producto de todos los factores de corrección f_{ci} establecidos por las Instrucciones Técnicas del Reglamento de BT.

Las condiciones que tienen que cumplirse son:

- para las fases:

$$(I_R, I_S, I_T)_{\text{máx}} \leq I_{\text{cable de fase (c.i.)}} = I_{\text{cable de fase (c.n.)}} \prod f_{ci} \quad (7)$$

- para el neutro: $I_N \leq I_{\text{conductor neutro (c.i.)}} \quad (8)$

Cálculo de secciones por caída de tensión

En cuanto a la caída de tensión, está muy extendida la práctica de emplear las expresiones para la caída de tensión simple ΔV_e y compuesta ΔU_e en una línea trifásica con carga equilibrada siguientes:

$$\begin{aligned} \Delta V_e &= I_e (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \\ \Delta U_e &= \sqrt{3} \Delta V_e = \sqrt{3} I_e (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \end{aligned} \quad (9)$$

Sin embargo, cuando la carga es desequilibrada, hay que considerar las tres caídas de tensión simples y las tres compuestas, y la relación entre las compuestas y las simples ya no es tan simple como la raíz de 3. El Reglamento para Baja Tensión no se refiere a ninguna caída de tensión en particular, por lo que hay que entender que la condición de validez de las secciones debe ser que las tres caídas de tensión simples y las tres compuestas no superen las caídas de tensión reglamentarias:

$$\begin{aligned} (\Delta V_R, \Delta V_S, \Delta V_T)_{\text{máx}} &\leq \Delta V_{\text{Reglamentaria}} \\ (\Delta U_{RS}, \Delta U_{ST}, \Delta U_{TR})_{\text{máx}} &\leq \Delta U_{\text{Reglamentaria}} \end{aligned} \quad (10)$$

La determinación de todas las caídas de tensión que reglamentariamente hay que considerar para verificar la sección de una línea trifásica de cuatro hilos, como la mostrada en la figura 3, debe hacerse de la siguiente forma:

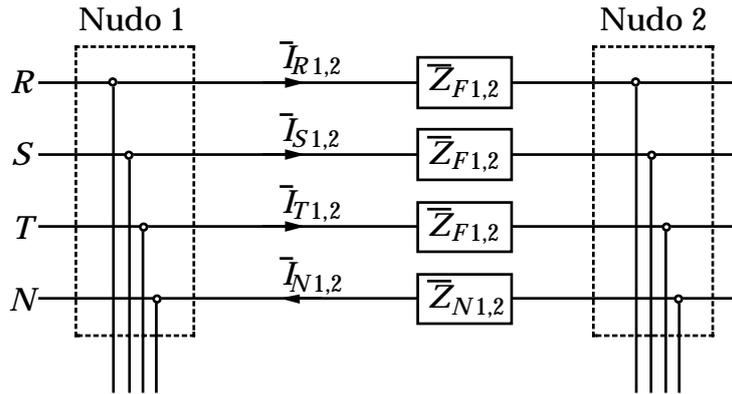


Fig. 3.- Línea trifásica de cuatro hilos.

La tensión entre la fase R y el neutro en el nudo 2 es

$$\bar{V}_{R_2} = \bar{V}_{R_1} - \bar{Z}_{F_{1,2}} \bar{I}_{R_{1,2}} - \bar{Z}_{N_{1,2}} \bar{I}_{N_{1,2}} \tag{11}$$

siendo \bar{V}_{R_1} y \bar{V}_{R_2} las tensiones entre la fase R y el neutro en los nudos 1 y 2, respectivamente, $\bar{Z}_{F_{1,2}}$ y $\bar{Z}_{N_{1,2}}$ las impedancias correspondientes al tramo de línea entre el nudo 1 y el 2 de la fase y del neutro, respectivamente e $\bar{I}_{R_{1,2}}$ e $\bar{I}_{N_{1,2}}$ las intensidades en el tramo de línea entre el nudo 1 y el 2 por la fase R y el neutro, respectivamente.

Las intensidades por la fase R y el neutro, en ese tramo, son

$$\begin{aligned} \bar{I}_{R_{1,2}} &= f_{S_{R2}} \sum \bar{I}_{R_2} \\ \bar{I}_{S_{1,2}} &= f_{S_{S2}} \sum \bar{I}_{S_2} \\ \bar{I}_{T_{1,2}} &= f_{S_{T2}} \sum \bar{I}_{T_2} \\ \bar{I}_{N_{1,2}} &= \bar{I}_{R_{1,2}} + \bar{I}_{S_{1,2}} + \bar{I}_{T_{1,2}} \end{aligned} \tag{12}$$

donde $f_{S_{R2}}$ es el factor de simultaneidad de la fase R en el nudo 2 y $\sum \bar{I}_{R_2}$ es el sumatorio de las intensidades correspondientes a las cargas conectadas a la fase R en el nudo 2.

De la misma forma se obtienen las tensiones en las fases S y T

$$\begin{aligned} \bar{V}_{S_2} &= \bar{V}_{S_1} - \bar{Z}_{F_{1,2}} \bar{I}_{S_{1,2}} - \bar{Z}_{N_{1,2}} \bar{I}_{N_{1,2}} \\ \bar{V}_{T_2} &= \bar{V}_{T_1} - \bar{Z}_{F_{1,2}} \bar{I}_{T_{1,2}} - \bar{Z}_{N_{1,2}} \bar{I}_{N_{1,2}} \end{aligned} \tag{13}$$

Las caídas de tensión simples por fase en el tramo de línea comprendida entre los nudos 1 y 2 son

$$\begin{aligned}
\Delta V_{R_{1,2}} &= \left| \bar{V}_{R_1} \right| - \left| \bar{V}_{R_2} \right| \\
\Delta V_{S_{1,2}} &= \left| \bar{V}_{S_1} \right| - \left| \bar{V}_{S_2} \right| \\
\Delta V_{T_{1,2}} &= \left| \bar{V}_{T_1} \right| - \left| \bar{V}_{T_2} \right|
\end{aligned} \tag{14}$$

Y las caídas de tensión compuestas, en las que, como se ve, no influye la caída de tensión en el neutro, se obtienen de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
\Delta U_{RS_{1,2}} &= \left| \bar{U}_{RS_1} \right| - \left| \bar{U}_{RS_2} \right| = \left| \bar{U}_{RS_1} \right| - \left| \bar{U}_{RS_1} - \bar{Z}_{F_{1,2}} \left(\bar{I}_{R_{1,2}} - \bar{I}_{S_{1,2}} \right) \right| \\
\Delta U_{ST_{1,2}} &= \left| \bar{U}_{ST_1} \right| - \left| \bar{U}_{ST_2} \right| = \left| \bar{U}_{ST_1} \right| - \left| \bar{U}_{ST_1} - \bar{Z}_{F_{1,2}} \left(\bar{I}_{S_{1,2}} - \bar{I}_{T_{1,2}} \right) \right| \\
\Delta U_{TR_{1,2}} &= \left| \bar{U}_{TR_1} \right| - \left| \bar{U}_{TR_2} \right| = \left| \bar{U}_{TR_1} \right| - \left| \bar{U}_{TR_1} - \bar{Z}_{F_{1,2}} \left(\bar{I}_{T_{1,2}} - \bar{I}_{R_{1,2}} \right) \right|
\end{aligned} \tag{15}$$

Cálculo de secciones por rendimiento

El rendimiento de la línea depende de las pérdidas de potencia en la misma, siendo este un criterio que justifica la elección de secciones mayores que las exigibles según los anteriores. Cuando la carga está equilibrada las tres intensidades de fase son iguales, y las pérdidas en una línea se pueden determinar, despreciando los parámetros transversales, con la siguiente expresión

$$P_{pe} = 3RI_e^2 \tag{16}$$

Siendo P_{pe} las pérdidas de potencia supuesta la carga equilibrada, R la resistencia por fase de los conductores e I_e el valor eficaz de la intensidad de fase.

En general, sin embargo, para una línea con conductores de fase y neutro idénticos, la expresión de las pérdidas es

$$P_p = R \left(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2 \right) \tag{17}$$

Definiremos la relación de pérdidas r_p como el cociente de las pérdidas reales entre las pérdidas mínimas teóricas, es decir,

$$r_p = \frac{P_p}{P_{pe}} = \frac{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2}{3I_e^2} \tag{18}$$

En [5] se demuestra que las mínimas pérdidas se producen cuando la carga está equilibrada. En ese caso, la relación de pérdidas es 1, y si está desequilibrada siempre es mayor que la unidad. Por tanto, la relación de pérdidas es un buen índice del grado de desequilibrio de una carga.

Con el objetivo de analizar la influencia que tiene el desequilibrio sobre las pérdidas, vamos a considerar el siguiente reparto particular de la carga sobre las fases:

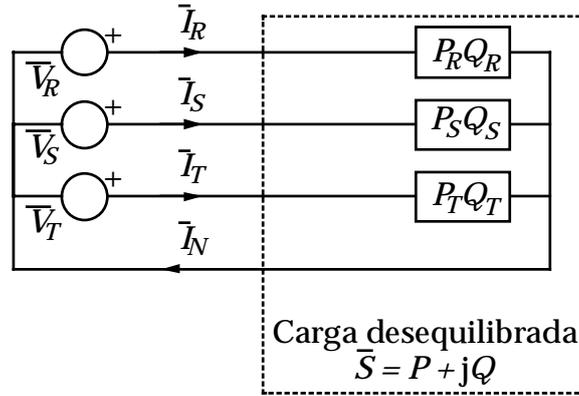


Fig. 4. Reparto de potencias sobre las fases.

Se supondrá, figura 4, que la relación entre las potencias activas y reactivas en las tres fases es la misma, que el sistema de tensiones está equilibrado, y que la fase *S* y *T* están cargadas de la misma forma, siendo la fase *R* la que soporta una carga mayor.

$$\frac{P_R}{Q_R} = \frac{P_S}{Q_S} = \frac{P_T}{Q_T}, \quad \bar{V}_R = V/\underline{0^\circ}, \quad \bar{V}_S = V/\underline{-120^\circ}, \quad \bar{V}_T = V/\underline{120^\circ} \quad (19)$$

Para cuantificar las potencias activas, reactivas y aparentes por fase se puede introducir una variable auxiliar *x*, que tome valores entre 0 y 1, tal que un aumento de *x* implique un mayor desequilibrio de la carga. En la expresión (20) se formula un caso de reparto de la carga que, cumpliendo con las condiciones de (19), implica desde un equilibrio total (*x*=0) hasta un desequilibrio en el que la fase *R* asume toda la carga (*x*=1)

$$0 \leq x \leq 1 \left\{ \begin{array}{l} P_R = (1 + 2x)\frac{P}{3}, \quad P_S = (1 - x)\frac{P}{3}, \quad P_T = (1 - x)\frac{P}{3} \\ Q_R = (1 + 2x)\frac{Q}{3}, \quad Q_S = (1 - x)\frac{Q}{3}, \quad Q_T = (1 - x)\frac{Q}{3} \\ S_R = (1 + 2x)\frac{S}{3}, \quad S_S = (1 - x)\frac{S}{3}, \quad S_T = (1 - x)\frac{S}{3} \end{array} \right. \quad (20)$$

Las intensidades por las fases y el neutro son

$$I_R = (1 + 2x)\frac{S}{3V}, \quad I_S = (1 - x)\frac{S}{3V}, \quad I_T = (1 - x)\frac{S}{3V}, \quad I_N = \frac{xS}{V} \quad (21)$$

La relación de potencias, con este reparto, es la mostrada en (22). En la figura 5 se representa su variación en función del grado de desequilibrio *x*.

$$r_p = \frac{P_p}{P_{pe}} = \frac{I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 + I_N^2}{3I_e^2} = 1 + 5x^2; \quad 1 \leq r_p \leq 6 \quad (22)$$

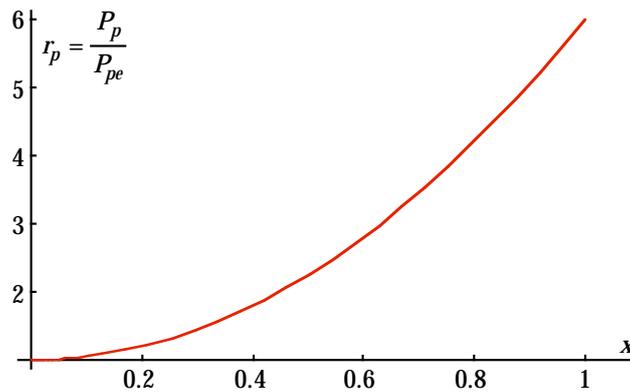


Fig. 5. Relación de potencias en función del grado de desequilibrio.

Aunque hay muchas otras formulaciones del reparto de la carga distintas de la empleada en (20), por lo demostrado en [5] se deduce que, para todas ellas, cuanto mayor es el desequilibrio, mayores son las pérdidas en la línea de alimentación, en relación con las que se tendrían con carga equilibrada. Y en el caso extremo de que se conecte toda la carga entre una fase y neutro, de la (22) se deduce que las pérdidas se multiplican por seis (igual en las referencias [2] y [5]). Este ejemplo pone de manifiesto el error que se comete cuando se fija la sección de la línea que alimenta una carga desequilibrada en función de las pérdidas calculadas como carga equilibrada.

Ejemplo

Calcular los parámetros que determinan el diseño de una línea general de alimentación de un bloque de 7 viviendas con grado de electrificación elevada (9200VA), suponiendo que se conectan 3 viviendas entre la fase R y el neutro, 2 en la S y 2 en la T . La tensión de alimentación es 400V, y con el objeto de simplificar los cálculos se supondrá que el factor de potencia de las viviendas es la unidad, no se consideran los servicios generales del edificio y se desprecia la reactancia de la línea de alimentación.

La potencia aparente total del conjunto de viviendas según la tabla 1 sería

$$S = 6.2 \times 9200 = 57040 \text{ VA}$$

La intensidad por las fases S y T , en este caso, es menor a la de la fase R . Sin embargo con la tabla 1, no es posible determinar la intensidad en cada fase de forma correcta. La intensidad supuesta la carga equilibrada sería

$$I_e = \frac{S}{\sqrt{3} U} = \frac{57040}{\sqrt{3} \times 400} \approx 82.33 \text{ A}$$

Si se realiza de nuevo el cálculo utilizando la tabla 4, es posible determinar la intensidad en cada fase sin cometer el error de tratar la carga como equilibrada cuando no lo es. En efecto:

$$S_R = 2.6 \times 9200 = 23920 \text{ VA}, \quad S_S = S_T = 1.8 \times 9200 = 16560 \text{ VA}$$

$$I_R = \frac{S_R}{V} = \frac{23920}{400/\sqrt{3}} \approx 103.58 \text{ A}, \quad I_S = I_T = \frac{S_S}{V} = \frac{16560}{400/\sqrt{3}} = 71.71 \text{ A}$$

La relación entre la intensidad máxima y la equilibrada es

$$\frac{I_R}{I_e} = \frac{103.58}{82.33} \approx 1.26$$

Es decir, la intensidad en la fase más cargada es un 26% mayor que la obtenida con la tabla 1 del Reglamento.

La caída de tensión simple en la línea, utilizando la expresión (9) para carga equilibrada y con las suposiciones hechas al principio, es

$$\Delta V_e = I_e (R \cos \varphi + X \sin \varphi) = R I_e = R \frac{S}{\sqrt{3} U}$$

Si se utilizan las expresiones (14), la caída de tensión simple máxima entre el origen (1) y el final (2) de la línea estaría en la fase R siendo su valor

$$\Delta V_{R_{1,2}} = |\bar{V}_{R_1}| - |\bar{V}_{R_2}| \approx 1.65 R \frac{S}{\sqrt{3} U}$$

La relación entre las caídas de tensión

$$\frac{\Delta V_{R_{1,2}}}{\Delta V_e} \approx 1.65$$

Por tanto, la caída de tensión simple en la fase R es un 65% mayor a la obtenida supuesta la carga equilibrada.

En cuanto a las pérdidas de potencia, el valor de x correspondiente a este ejemplo se puede obtener a partir de una de las expresiones contenidas en (20), por ejemplo la siguiente

$$S_R = (1 + 2x) \frac{S}{3} \rightarrow x \approx 0.13$$

La relación de pérdidas es

$$r_p = \frac{P_p}{P_{pe}} = 1 + 5x^2 \approx 1.08$$

Las pérdidas son un 8 % mayores que las que se obtendrían suponiendo que la carga está equilibrada.

Conclusiones

El cálculo de una instalación con carga desequilibrada a partir de las expresiones de carga equilibrada no garantiza un resultado fiable. La simplificación que supone despreciar el desequilibrio de la carga puede ocasionar resultados que se alejan de forma importante de la realidad.

El empleo del coeficiente de simultaneidad global en el cálculo de la línea general de alimentación de un bloque de viviendas no resulta adecuado cuando el número de viviendas es reducido y no es múltiplo de tres. En su lugar se recomienda utilizar el coeficiente de simultaneidad por fase.

Debe calcularse el valor de la intensidad que soporta cada conductor de fase (y el neutro si existe), entre cada dos nudos de una red o línea de alimentación, pues solo de esta forma es posible aplicar correctamente los criterios reglamentarios para verificar las secciones de los conductores. El cálculo de esas intensidades ha de consistir en una suma fasorial, conductor por conductor incluido el neutro, y debe abandonarse la simplificación de considerar que la intensidad se debe a cargas equilibradas, cuando éstas no lo son.

Obtenidas correctamente todas las intensidades, pueden evaluarse satisfactoriamente las secciones con los criterios de intensidad máxima admisible, caída de tensión y rendimiento. En las secciones anteriores se ha mostrado la manera de hacerlo.

Bibliografía

- [1] F. Redondo Quintela, and N. Redondo Melchor, “*Multi-terminal network power measurement*”, International Journal of Electrical Engineering Education (IJEEE), abril 2002.
- [2] J. M. García Arévalo, “*Desarrollo de un sistema para el equilibrado de cargas trifásicas y la corrección simultánea de su factor de potencia*”, Tesis doctoral, septiembre 2005.
- [3] Ministerio de Ciencia y Tecnología, “*Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto. Reglamento electrotécnico para baja tensión. Instrucciones técnicas complementarias*”, Boletín Oficial del Estado nº 224, de 18 de septiembre de 2002.
- [4] Ministerio de Ciencia y Tecnología, “*Guía técnica de aplicación: instalaciones de de enlace. Previsión de cargas para suministros en baja tensión*”, Guía-BT-10, ed. septiembre 2003.
- [5] F. Redondo Quintela, J. M. García Arévalo, N. Redondo Melchor, “*Desequilibrio y pérdidas en las instalaciones eléctricas*”, Montajes e Instalaciones, nº 338, pág. 77-82, abril 2000.