



La Representación de las Cargas y el Análisis de los circuitos de Distribución

Dr. Leonardo Casas Fernández
MSc. Jorge Leiva Jassa

RESUMEN / ABSTRACT

Los nodos de las redes de alta tensión mantienen voltajes prácticamente balanceados desde donde se alimentan las cargas a través de transformadores con cambia taps bajo carga, los que conservan un voltaje por secundario sensiblemente constante independientemente de la demanda. A los nodos de las redes de distribución, por el contrario, se conectan los transformadores de distribución, los que se ven afectados por las variaciones de voltaje que ocurre en los circuitos, con las correspondientes influencias sobre la demanda.

Otra característica de las cargas en la distribución es la combinación o mezcla de consumidores domésticos, mayoritariamente monofásicas, y de clientes con instalaciones trifásicas formadas estas últimas casi exclusivamente por motores asincrónicos, lo que ha hecho muy popular el uso de bancos de transformadores asimétricos, generadores de corrientes desbalanceadas.

En este artículo se hace un estudio de la influencia que tiene la representación de las cargas sobre los resultados de los análisis de los circuitos, fundamentalmente sobre las pérdidas.

Palabras claves: Cargas, Representación de las cargas, Circuitos de distribución.

Voltages at high voltage buses are practically balanced and from them loads are connected through tap change under load transformers. So secondary voltages are perceptibly constant independent of the power demanded by loads. On the other hand, distribution transformers are connected at distribution buses, where voltage varies, and the power demanded by loads also changes, as does the voltage.

Another characteristic of distribution loads is the mixture of home applications, single phase loads; with three phase ones, basically induction motors, which need asymmetric transformer banks, associated to unbalanced currents.

In this paper, an analysis on the influence of load representations about the results of circuit analysis is made, related to power and energy losses.

Key words: Load, Load Representation, Distribution Circuits.

INTRODUCCIÓN

En los circuitos primarios, las cargas se alimentan a través de los transformadores de distribución, los que se forman fundamentalmente mediante la combinación de unidades monofásicas en forma de bancos de uno, dos o tres transformadores, en función de las proporciones de cargas monofásicas y trifásicas. Se presentan los siguientes casos:

- a) Bancos de un transformador: Se emplean para dar servicio a cargas monofásicas (conexión de fase a neutro o entre fases)
- b) Bancos de dos transformadores: Se usan para servir cargas mixtas con las monofásicas mayoritarias (conexión estrella abierta delta abierta, o delta abierta delta abierta)
- c) Bancos de tres transformadores: Transformadores para cargas mixtas con carga trifásicas predominantes (conexión estrella delta o delta delta)

En todos los casos se producen desbalances de corriente en las fases. Por otro lado, como los transformadores de distribución no pueden cambiar el tap bajo carga, el voltaje por secundario varía según lo hace el del primario, y la demanda del banco dependerá de las características de voltaje de las cargas asociadas al mismo.

Así pues, el desbalance y la característica de la carga con respecto al voltaje son dos de los factores de mayor incidencia en los resultados de los análisis de los circuitos de distribución, los que pueden ofrecer marcadas diferencias con respecto a los obtenidos al no considerar estos efectos.

1. CORRIENTES POR LAS LÍNEAS PARA CADA BANCO DE TRANSFORMADORES. EFECTO SOBRE LAS PÉRDIDAS.

a) Bancos de un transformador

- Conexión fase-neutro: Las corrientes circulan por las líneas desde donde se conectan y por el neutro
- Conexión fase-fase: Las corrientes circulan por las dos líneas desde donde se conectan

b) Bancos de dos transformadores

- Conexión estrella abierta-delta abierta. Las corrientes por las líneas dependen de la proporción de carga monofásica y trifásica y su ángulo de fase es de alrededor de los 60° . La corriente del neutro es la resultante de las anteriores con signo contrario
- Conexión delta abierta-delta abierta. Las corrientes por las líneas dependen de la proporción de carga monofásica y trifásica. Existen corrientes por las tres y obviamente no existe la corriente de neutro.

c) Bancos de tres transformadores

- Conexión estrella-delta. Las corrientes por las líneas dependen de la proporción de carga monofásica y trifásica. Existen corrientes por las tres fases y como el neutro de la estrella está aislado, no circula corriente por el mismo.
- Conexión delta-delta. Las corrientes por las líneas dependen de la proporción de carga monofásica y trifásica. Existen corrientes por las tres y obviamente no existe la corriente de neutro.

Como resultado de la instalación de los bancos de transformadores formados por unidades monofásicas, es prácticamente imposible mantener un balance de las corrientes durante las 24 horas del día, por lo que su efecto se manifiesta con valores de pérdidas mayores que si no se considera este hecho. O sea siempre ocurrirá que:

$$\left[I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2 \right] R \geq 3 I^2 R \quad 1.1$$

2. EFECTO DEL DESBALANCE SOBRE LOS VOLTAJES

Evidentemente, corrientes desiguales por las líneas ocasionan caídas de voltaje diferentes, y por tanto voltajes distintos en cada fase, lo cual puede determinarse mediante

$$V_{rec} = V_{env} - \Delta V \quad 2.1$$

donde
$$[\Delta V] = [Z] * [I]$$

que en forma desarrollada se expresa mediante:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad 2.2$$

Esta forma de cálculo tiene en cuenta la asimetría de las cargas (por fase), a la vez que considera el efecto menos pronunciado de la asimetría de las líneas, al no estar los conductores situados en los vértices de un triángulo equilátero. El uso de modelos de carga balanceados (análisis monofásico) cuando las mismas se alimentan desde bancos de transformadores monofásicos como los descritos, introduce diferencias sensibles en los resultados cuando se comparan con los cálculos de flujo potencia por fase (análisis trifásicos), como se ilustra más adelante.

3. GRÁFICOS HORARIOS DE CARGAS

Los estudios tradicionales de los circuitos de distribución tienen como uno de sus objetivos fundamentales la determinación de los voltajes en los nodos a la hora más crítica, o sea a la hora de máxima demanda. Por esta razón en la mayoría de los estudios se suelen representar las cargas por los valores de potencia activa y reactiva para estas condiciones, con lo cual se simplifica extraordinariamente la representación de las cargas en cuanto a su demanda.

Esta simplificación, sin embargo, afecta notablemente los cálculos de las pérdidas de energía, ya que las mismas se calculan mediante

$$\Delta E = \Delta P * T_{eq} \quad \text{kW.h/día} \quad 3.1$$

donde ΔP : pérdidas de potencia en kW

ΔP : pérdidas de energía en kW.h

T_{eq} : Tiempo equivalente en h/día

El valor del T_{eq} se corresponde con el gráfico de carga equivalente medido en la subestación, o sea el gráfico general del circuito con lo que se oculta el Factor de Diversidad que existe entre las cargas. Al representar las cargas por sus gráficos horarios, cada tramo y cada fase del circuito tendrá un valor propio de T_{eq} y las pérdidas totales de energía se determinan mediante:

$$\Delta E = \sum_{j \in F} \sum_{i=1}^n \Delta P_{ij} * T_{eqij} \quad \text{kW.h/día} \quad 3.2$$

donde F: conjunto de conductores a, b, c y n

Al usar un solo gráfico equivalente para todas las cargas aparecen diferencias sensibles en los resultados como se ilustra más adelante.

4. EFECTO DEL VOLTAJE SOBRE LA DEMANDA

Las demandas de potencia activa y reactiva de todas las aplicaciones de la energía eléctrica se ven afectadas por el voltaje de operación de las mismas en mayor o menor medida. Esta realidad se manifiesta de una forma muy sensible en el análisis de las redes de distribución, donde las variaciones horarias de las cargas implican diferencias, a veces significativas, en los voltajes de los clientes. Es obvio que cada aplicación en particular exhibe sus propias características y que la carga de un nodo de un circuito de distribución es una mezcla un tanto heterogénea de las aplicaciones más difundidas cuyas proporciones se estiman en las siguientes proporciones:

- Pequeños motores eléctricos 30 – 50 %
- Luces 20 – 30 %
- Cocinas y calentadores 25 – 35 %
- Equipos electrónicos 10 – 20 %

4.1 Motores de inducción

La potencia de los motores de inducción depende de varios factores entre los cuales figuran el tipo de carga, el tipo de motor, etc. De forma general su demanda es a potencia constante para pequeñas variaciones de voltaje. Si no se considera el incremento de las pérdidas debido al aumento de la corriente. Si este se tiene en cuenta, la demanda tiene una forma como la que se muestra en la Fig. 4.1.1

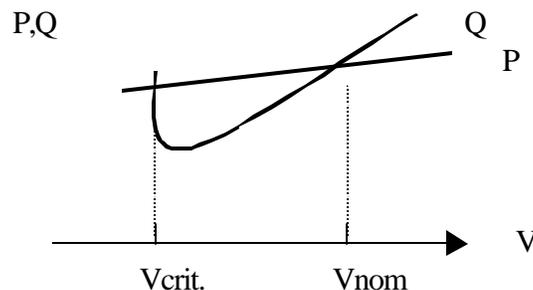


Fig. 4.1.1 Característica general del comportamiento de P y Q en función del voltaje.

Siempre ocurrirá que $\frac{dQ}{dV} \gg \frac{dP}{dV}$ Valores típicos son los siguientes:

$$\frac{dQ}{dV} \approx 1,5 - 3,5 \quad \text{y} \quad \frac{dP}{dV} \approx 0,3 - 0,75$$

4.2 Dispositivos térmicos

Aquí se incluyen tanto los hornos, cocinas y calentadores como las lámparas incandescentes. Su comportamiento es como se muestra en la Fig. 4.2.1

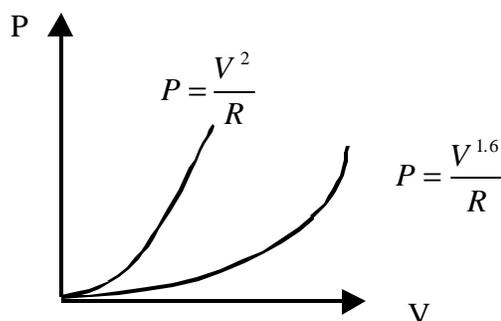


Fig. 4.2.1 Demanda de potencia activa de cocinas y lámparas incandescentes en función del voltaje

Evidentemente, estas cargas no consumen potencia reactiva. Las lámparas fluorescentes se ven muy poco afectadas por la variación del voltaje.

De forma práctica la variación de la demanda al variar el voltaje aplicado a cargas formadas por diferentes componentes se puede considerar, como si las mismas fueran impedancias, corrientes o potencias constantes, Fig. 4.2.2, o una combinación de ellas en cualquier proporción, lo que puede hacerse mediante

$$S_{real} = S_{nom} \left[k_Z \left(\frac{V_{real}}{V_{nom}} \right)^2 + k_I \left(\frac{V_{real}}{V_{nom}} \right)^1 + k_P \left(\frac{V_{real}}{V_{nom}} \right)^0 \right] \quad 4.2.1$$

sujeto a la restricción de $k_Z + k_I + k_P = 1$

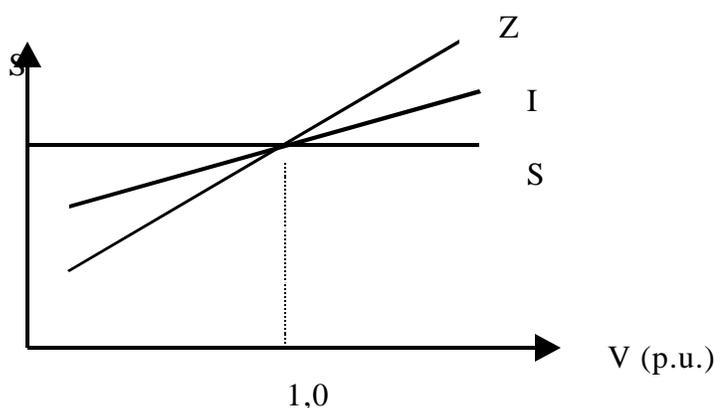


Fig.4.2.2 Representación de las cargas en circuitos de distribución para considerar el efecto del voltaje sobre la demanda

De forma general los bancos de transformadores asociados a cargas de tipo industrial deben representarse por cargas de potencia constante. En las cargas de los sectores residenciales donde las cocinas eléctricas y en general los equipos generadores de calor predominen, una representación por impedancia constante es la más real. Una representación por corriente constante es una opción intermedia. El uso de una representación única, generalmente a potencia constante, provoca la aparición de diferencias sensibles en los resultados como se ilustra más adelante.

5. PRINCIPALES RESULTADOS

Los resultados de numerosos pruebas con circuitos típicos mostraron los resultados que se exponen a continuación son los siguientes:

	Análisis monofásico		Análisis trifásico	
	Pérd. Pot.	Pérd. Energ.	Pérd. Pot.	Pérd. Energ.
Gráficos reales	100	100	100	100
Gráficos equivalentes	148	151	113	135

Como puede observarse, el gráfico equivalente arroja una sobre valoración de las pérdidas debido a que se tiene en cuenta la diversidad de una horma poco precisa. En circuitos con cargas muy diversas las diferencias pueden alcanzar hasta un 80 %.

	Gráfico real		Gráfico equivalente	
	Pérd. Pot.	Pérd. Energ.	Pérd. Pot.	Pérd. Energ.
Monofásico	100	100	100	100
Trifásico	131	107	127	105

Los cálculos trifásicos siempre dan mayores pérdidas de potencia que los obtenidos por el método monofásico (Ec. 1.1) y dependen lógicamente del grado de desbalance del circuito, sin embargo estas diferencias resultan más marcadas en las pérdidas de energía debido al efecto mostrado en la Ec. 3.2, como se muestra seguidamente:

CONCLUSIONES

Las características de las redes de distribución primaria hacen que las representaciones tradicionales de las cargas influyan sobre los resultados de los análisis de los circuitos. Las experiencias en estos estudios indican que las modelaciones más cercanas a la realidad deban contemplar los siguientes aspectos:

- El modelo de las cargas debe ser trifásico, o sea se debe disponer de la información primaria suficiente (tipo de banco, conexiones, fases, proporción entre carga monofásica y trifásica, etc.) para poder determinar las corrientes por fase en cada nodo de carga para realizar los cálculos de voltaje y pérdidas por fase.
- El modelo debe tener una representación lo más fiel posible del gráfico de carga diario de cada nodo, de lo contrario, las aproximaciones al considerar un gráfico único oculta resultados que en ocasiones introducen diferencias apreciables.
- La representación de las cargas por potencia, corriente o impedancia constante ofrece resultados más próximos al comportamiento real del circuito, fundamentalmente

en aquellos casos en que los voltajes experimentan desviaciones apreciables con respecto al nominal. Muchos sistemas de computación ofrecen la facilidad de hacer las representaciones por nodo o de forma integral y pueden cambiarla automáticamente cuando ocurren grandes variaciones

BIBLIOGRAFÍA

- Casas, L. Y Mier J. Sistemas para cálculos en redes de distribución primaria. Revista Energética. Cuba, 2001.
- Casas L. y Leiva A. Influencia de las aproximaciones usadas en el cálculo de las pérdidas de energía en los circuitos de distribución primaria. Memorias del VIII Simposio de Ing. Eléctrica de la UCLV. Sta. Clara, 1997.
- Mesut E. B. Y Staton A. E. Distribution transformer models for branch current based feeder analysis. IEEE on Power System Vol. 12 No. 2, May 1997.
- Lee, R.E. y otros. Analysis of time varying distribution circuit current and load characteristics. IEEE Transactions on Power Delivery, p. 1249. Oct. 1987