

# Regulación de Tensión y Selección de Voltajes de un Sistema de Distribución

Erick Christopher Dávalos González  
Universidad de Guadalajara (CUCEI)  
Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica  
Guadalajara, Jalisco, México  
[erick.davalos2937@alumnos.udg.mx](mailto:erick.davalos2937@alumnos.udg.mx)

**Resumen** — Se presenta el análisis y diseño de un sistema de distribución eléctrica para una zona residencial en Tonalá, Jalisco, con base en la selección de voltajes y regulación, considerando circuitos limitados por caída de voltaje. El estudio abarca el cálculo de proporciones de caída de voltaje en el alimentador principal y laterales, el impacto del cambio de voltaje de 23 kV a 13.8 kV en las longitudes de los circuitos, y las áreas máximas cubiertas con diferentes niveles de voltaje. Además, se extiende la longitud del sistema manteniendo proporciones de densidad de carga, y se propone la instalación de un regulador de voltaje para garantizar límites de  $\pm 0.03\text{pu}$ .

*Palabras clave — Distribución Eléctrica, Esquema Radial, Caída de Voltaje, Selección de Voltajes, Regulación de Tensión.*

## I. NOMENCLATURA

- $S$ : Potencia Aparente
  - $\%VD$ : Porcentaje de Caída de Tensión
  - $V_{ref}$ : Voltaje de Referencia
  - $Pr$ : Proporción de Caídas de Voltaje
  - $D$ : Densidad de Carga
  - $A$ : Área de Alcance
  - $s$ : Distancia desde la Subestación
  - $c$ : Longitud de los Laterales
  - $d$ : Separación entre Laterales
  - $l$ : Longitud del Alimentador
  - $NE$ : Número de Escalones

## II. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se centra en el análisis de un sistema de distribución radial para una zona residencial en Tonalá, Jalisco, conectado a la subestación CFE Zalatitán. Partiendo de un diseño previo, se realiza un estudio sobre la selección de voltajes, regulación y análisis de caída de voltaje.

El sistema consta de un alimentador principal en 23 kV que abastece 10 laterales, cada uno cubriendo dos cuadras. Se considera una densidad uniforme de carga con 15 casas por cuadra y un diseño inicial que limita la caída de voltaje al 4%.

Este documento profundiza en el impacto de cambiar el voltaje a 13.8 kV, la distribución de la caída de voltaje entre el alimentador principal y los laterales, y la extensión del sistema bajo restricciones de corriente y caída de voltaje. Finalmente, se analiza la necesidad de reguladores de voltaje para mantener la operación dentro de límites permitidos bajo condiciones de demanda máxima y mínima.

### III. DESARROLLO DEL CASO DE ESTUDIO

#### A. Proporción de caída de voltaje

En la Fig. 1 se muestra el área que abarca el sistema de distribución a analizar, este sistema de distribución cuenta con

300 usuarios, 30 por lateral y 10 laterales, en donde cada usuario tiene una demanda de 30A a 127V lo que nos da una demanda de potencia de 3.81kVA por usuario. Considerando el factor de diversidad para los usuarios por lateral y usuarios totales tenemos 43.34kVA y 342.9kVA respectivamente. El calibre de los laterales es de 20 AWG y el del principal es de calibre 16 AWG, esto nos da una caída de tensión de 0.005% para el lateral y 0.052% para el alimentador principal, lo que nos da un total de 0.058%.



Fig. 1. Área del sistema de distribución bajo estudio

Para encontrar la proporción de las caídas de tensión en el alimentador y en el lateral tenemos:

$$Pr_{ppal} = \frac{\%VD_{ppal}}{\%VD_{total}} = \frac{0.0524}{0.058} = 0.90345 \quad (1)$$

$$Pr_{lat} = \frac{\%VD_{lat}}{\%VD_{total}} = \frac{0.0052}{0.058} = 0.09655 \quad (2)$$

De las ecuaciones (1) y (2) tenemos que el 90.345% de la caída de tensión se presenta en el alimentador principal y el 9.655% restante se presenta en los laterales.

### *B. Proporción de longitudes con tensiones diferentes*

En un sistema eléctrico cuando se aumenta la tensión las pérdidas y la caída de tensión se reducen considerablemente. En el caso de un sistema de distribución, esto nos permite tener un aumento en las distancias de servicio del primario y de los laterales, esta relación viene dada por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (3)$$

$$\frac{l_2}{l_1} = \sqrt{\frac{V_2}{V_1}} \quad (3)$$

$$\frac{l_2/c_2}{l_1/c_1} = \sqrt{\frac{V_1}{V_2}} \quad (5)$$

La ecuación (3) nos da la proporción para los laterales, la ecuación (4) entre los principales y la ecuación (5) la relación principal – lateral. Sustituyendo, tenemos:

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{23kV}{13.8kV} = 1.67 \quad (6)$$

$$\frac{l_2}{l_1} = \sqrt{\frac{13.8kV}{23kV}} = 0.77 \quad (7)$$

$$\frac{l_2/c_2}{l_1/c_1} = \sqrt{\frac{23kV}{13.8kV}} = 1.29 \quad (8)$$

La ecuación (6) nos indica que la longitud de los laterales a 23kV pueden ser 67% más largos a comparación con una tensión de 13.8kV, por lo que nos permite cubrir una mayor distancia en los laterales.

En el caso de la ecuación (7), el valor de 0.77 indica que la longitud del alimentador principal a una tensión de 13.8kV es un 77% de la longitud del alimentador a una tensión de 23kV.

La ecuación (8) indica que la relación principal – lateral es del 29% mayor para 23kV que para 13.8kV, esto quiere decir que un voltaje mayor permite una mayor longitud relativa del principal, esto quiere decir que la longitud del principal se puede extender un 29% más a comparación de 13.8kV.

#### C. Proporción entre áreas con misma densidad de carga

Para comparar las áreas máximas que se pueden cubrir con ambos voltajes, partimos de las siguientes relaciones geométricas.

El área de cobertura es el área máxima que puede cubrir el sistema, esta depende de la densidad de carga y del voltaje, suponiendo una densidad de carga constante, tenemos:

$$\frac{A_{23kV}}{A_{13.8kV}} = \left( \frac{23kV}{13.8kV} \right)^{\frac{3}{2}} = 2.15 \quad (9)$$

Se observa que, manteniendo la misma densidad de carga, el sistema en 23kV puede cubrir un área de 2.15 veces mayor que el área cubierta con 13.8kV. El sistema puede cubrir más del doble de área con 23kV, esto se debe a la reducción de la caída de tensión.

#### D. Sistema de distribución extendido y regulación de voltaje

El área de servicio de la Fig.1 se va a ampliar, por lo que se requiere extender la longitud del alimentador y de los laterales, es necesario extender el servicio 5 cuadras para el alimentador y los laterales. Ahora el alimentador principal abarcará 10 cuadras y 20 laterales, cada lateral tendrá una longitud de 7 cuadras y 60 usuarios por cuadra.

Se sigue considerando carga uniformemente distribuida, con 60 usuarios por cuadra, teniendo 420 usuarios por lateral.

Para implementar el regulador monofásico se selecciona un regulador de tensión RT-1-32 con 32 escalones y un 10% de regulación, intervalo de paso de 5/8% con un ancho de banda ajustable de 0.75V y nivel de tensión regulable de 105 a 135V con 120V como base.

En este caso se considera que el punto de regulación es igual al punto donde se colocará el regulador  $s_1 = s_{rp}$ . El objetivo es mantener el voltaje dentro del límite de  $\pm 0.03pu$ . Se considera que la demanda mínima es de 9601kVA y la demanda máxima de 11041kVA.

Para el ajuste del VRR se tiene para el voltaje primario más alto permisible, considerando el ancho de banda BW que ocurre cuando la carga es igual a 0, es:

$$BW = 2 \left( \frac{0.1pu}{32} \right) = 0.00625pu \quad (10)$$

$$BW_{23kV} = 0.00625pu (23kV) = 143.75V \quad (11)$$

$$\frac{V_{DS1}}{\sum V_D} = \frac{s_1}{l} \left( 2 - \frac{s_1}{l} \right) \quad (12)$$

La caída de tensión total para el caso de la demanda máxima, considerando una longitud de 2 millas para el alimentador principal:

$$\sum V_D = 3.9 \times 10^{-6} * 11041kVA * \frac{2mi}{2} = 0.04306pu \quad (13)$$

$$\frac{0.03}{0.04306} = \frac{s_1}{2} \left( 2 - \frac{s_1}{2} \right) \quad (14)$$

Resolviendo la ecuación (14) para  $s_1$  se obtiene que las soluciones a la ecuación (14) son 3.0945 y 0.899, debido a que en este caso la longitud del principal es de 2 millas (3218m), la opción de 0.899 es la correcta. Por lo que el regulador deberá de localizarse a 1447 metros de la subestación.

El voltaje mínimo para el alimentador primario en el extremo final a 2 millas es:

$$VRR_{pu} = V_{p,max} - BW \quad (15)$$

$$VRR_{pu} = 1.03 - 0.00625 = 1.024pu \quad (16)$$

$$VRR_{pu} = 122.88V \quad (17)$$

$$\Delta V = \frac{0.1}{32} = 0.003125pu \quad (18)$$

$$NE_{dmin} = \left| \frac{V_{p,max} - VRR_{pu}}{\Delta V} \right| \quad (19)$$

$$NE_{dmax} = \left| \frac{V_{p,min} - VRR_{pu}}{\Delta V} \right| \quad (20)$$

$$NE_{dmin} = \left| \frac{1.03 - 1.024}{0.003125} \right| = 1.92 \quad (21)$$

$$NE_{dmax} = \left| \frac{1 - 1.024}{0.003125} \right| = 7.68 \quad (22)$$

De los resultados de (21) y (22) se puede concluir que se requiere reducir el voltaje (buck) en dos escalones para el caso de demanda mínima y aumentar en 8 escalones el regulador para el caso de demanda máxima.

#### IV. CONCLUSIONES

El presente análisis demuestra la importancia de la regulación de voltaje en sistemas de distribución eléctrica para garantizar la operación dentro de límites establecidos. En el caso de estudio, se observa que la instalación de un regulador de voltaje permite mantener el voltaje dentro de  $\pm 0.03\text{pu}$ . ajustando dos escalones hacia abajo (modo buck) en condiciones de demanda mínima y ocho escalones hacia arriba (modo boost) en condiciones de demanda máxima. Este control asegura la estabilidad del sistema bajo diferentes escenarios de carga.

Además, el cambio de nivel de tensión de 23kV a 13.8kV reduce significativamente las longitudes máximas de los alimentadores y laterales debido al aumento de pérdidas y caída de voltaje. Sin embargo, se observa que los sistemas diseñados a 23kV pueden cubrir un área 2.15 veces mayor con la misma densidad de carga, mostrando que es mejor operar a tensiones más altas en términos de alcance y reducción de perdidas.

La ubicación óptima del regulador se determinó a 1447 metros de la subestación basándose en las ecuaciones de proporción de caída de voltaje. El ancho de banda ajustable de 0.00625pu permitió un control preciso de las variaciones de voltaje.

#### V. REFERENCIAS

- [1] Turan Gonen, Electric Power Distribution System Engineering, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.
- [2] Comisión Federal de Electricidad, "Reguladores de tensión y autoelevadores tipo distribución," Especificación CFE VF000-34, México, dic. 2000.