

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

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

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

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 23k.

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 $\pm 0.03pu$. 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 pérdidas.

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 Gönen, 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.