



EFFECTOS DINÁMICOS QUE SE PRODUCEN EN LAS TORRES DE SOPORTE DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA DEBIDO A LA RUPTURA DE UN CABLE

||||||| POR NEFTALÍ RODRÍGUEZ Y VERÓNICA BENÍTEZ |||||||

Cuando se rompen los cables que se apoyan en las torres de una línea de transmisión por efecto del viento, se produce una carga longitudinal de impacto que se propaga a lo largo del cable y se transfiere sobre las torres de soporte, a través de los herrajes y las cadenas de aisladores, y se producen momentos de torsión sobre dichas torres. También aparecen amplificaciones importantes en la magnitud de las cargas axiales de los miembros de la torre. Las normas para diseño consideran este fenómeno como cargas estáticas amplificadas que generan un desequilibrio interno al aplicarse sobre las torres. Este planteamiento es una simplificación de un fenómeno que se ha hecho presente en numerosas ocasiones.

Las torres de soporte de líneas de transmisión pueden llegar a colapsarse debido, entre otras causas, a fenómenos naturales, como huracanes y tormentas severas. De acuerdo con estudios realizados, se ha llegado a la conclusión de que ambos fenómenos meteorológicos no presentan el mismo comportamiento. En cuanto a las normas de diseño por viento vigentes en nuestro país, no se proporcionan especificaciones al respecto. En los mapas de isotacas del Manual de Diseño por Viento de la CFE únicamente se consideran las velocidades de diseño por viento probables, obtenidas de registros en observatorios de primera. Con el fin de conocer este problema a fondo, el profesor Neftalí Rodríguez realizó los siguientes estudios:

- Evaluó la variación de la velocidad del viento con la altura para el caso particular de una tormenta severa.
- Comparó los lineamientos para diseño por viento empleados en México con las normas utilizadas en Europa, para definir las principales diferencias entre dichas filosofías.
- Propuso un método para simular la ruptura de los cables que es fácil de implementar para los casos comúnmente desarrollados en la práctica profesional.
- Estableció la influencia de las condiciones de cimentación sobre el comportamiento estructural de las torres de soporte de una línea de transmisión.
- Definió la magnitud de los momentos de torsión que se generan sobre las torres de soporte, como resultado del fenómeno estudiado.
- Estudió la evolución de los elementos mecánicos sobre los elementos de las torres de soporte, en intervalos de tiempo posteriores a la ruptura de uno de los cables, para definir los factores de amplificación dinámica que se generan.



Fig. 1. Daño en el soporte de las torres de una línea de transmisión de la CFE

Para poder realizar la investigación se analizó una porción de línea de transmisión de energía eléctrica proyectada para Ciudad del Carmen, Campeche, la cual consta de dos torres de soporte y tres claros de 450 m cada uno. Las torres de soporte tienen 67.53 m de altura, con seis fases y dos hilos de guarda. Los cables conductores se conectan a las torres a través de cadenas de aisladores y herrajes, mientras que los hilos de guarda llegan directamente de los herrajes a las torres. Los miembros de las torres de soporte están constituidos por ángulos de lados iguales de acero estructural, con esfuerzo de fluencia $F_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ (acero A36) y otros con $F_y = 3515 \text{ kg/cm}^2$ (acero grado 50).

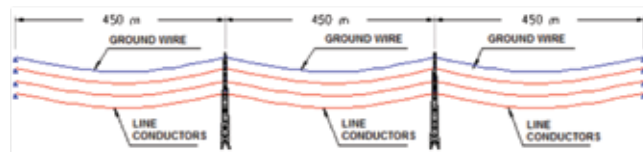


Fig. 2. Análisis dinámico de una porción seleccionada en una línea de transmisión

También se consideraron las especificaciones establecidas por la Compañía de Luz y Fuerza del Centro para cables conductores 1113 kCM "Bluejay", que tienen una resistencia a la ruptura de 14.03 t, y cables de guarda de acero de alta resistencia extra galvanizado, con una resistencia a la ruptura de 4.9 t.

En este tipo de estudios fue importante evaluar la acción del viento, al aceptar una velocidad regional igual a 144 km/hora sobre las torres a 10 m de altura. La idea fue comparar los resultados al aplicar el Manual de Diseño por Viento de la CFE vigente en México, con normas británicas y con el Eurocódigo, ambas de 2005.

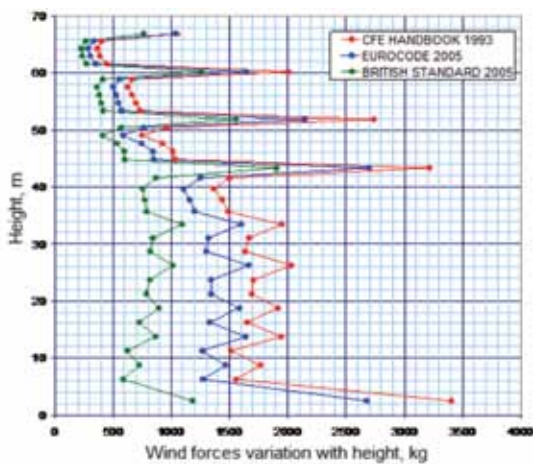


Fig. 3. Variación de las fuerzas inducidas por el viento sobre la torre

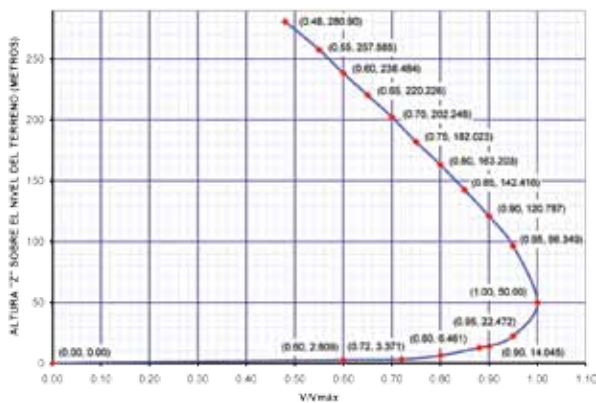


Fig. 4. Perfil promedio de variación de la velocidad del viento con la altura durante una tormenta severa

Como en toda estructura, el apoyo en la base de las torres resulta importante; con el fin de conocer cuáles serían las mejores condiciones para la cimentación, se propusieron dos alternativas: suelos de alta y de baja capacidad.

En el suelo de alta capacidad se consideró una torre con base articulada, con posibilidad de rotar alrededor de los tres ejes cartesianos, mientras que las traslaciones lineales estuvieron impedidas; con ello se buscó simular el efecto de un suelo con alta capacidad de carga, ya que los asentamientos verticales no se consideraron.

Para el suelo de baja capacidad la base de la torre de sostén se apoyó en una losa de cimentación de concreto reforzado de 20 cm de espesor, y ataguías metálicas hasta una profundidad de 12 m. Con las consideraciones previamente descritas, la torre de soporte presentará traslaciones en las tres direcciones cartesianas y rotaciones alrededor de las mismas, cuya magnitud dependerá de la rigidez de dicho sistema de cimentación; con todo esto se pretende simular el efecto de desplantar la torre de soporte en un suelo de baja capacidad de carga.

Otro aspecto a considerar fue la variación de la velocidad del viento cuando se presenta una tormenta severa. De acuerdo con el estudio realizado por Kim y Hangan, estos fenómenos naturales se caracterizan por producir aceleraciones intensas de masas de aire, en periodos muy cortos. Algunas investigaciones anteriores señalan que la velocidad máxima se produce a alturas menores del 5 % del diámetro de la tormenta.

CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

El modelo del tramo de la línea (fig. 2) se desarrolló con base en el programa SAP2000; para los miembros de las torres se utilizaron elementos barra con tres grados de libertad por nodo ($U_x \neq 0$, $U_y \neq 0$, $U_z \neq 0$). Con base en un análisis estático preliminar se utilizaron cables de elementos "cable flexible", tomando en cuenta la configuración inicial (tensión y flecha máxima).

Las cadenas de aisladores se modelaron con elementos barra, que tienen un extremo libre (donde se conectan los cables) y el extremo opuesto se encuentra conectado a las crucetas (con tres grados de libertad $U_x \neq 0$, $U_y \neq 0$, $U_z \neq 0$).

El valor del amortiguamiento se consideró de la siguiente manera: para los miembros de las torres se consideró un coeficiente de amortiguamiento de 0.01, recomendado en las NTC-2004. Para los cables flexibles, los herrajes y las cadenas de aisladores se consideró 0.02, recomendado en los lineamientos de diseño de estructuras para transmisión de energía eléctrica de la ASCE.

También se consideró el efecto P-d, originado por la excentricidad con que actúa la carga axial de compresión sobre los miembros de las torres de soporte, lo que genera momentos secundarios que provocan un incremento en las fuerzas internas de los elementos.

Además, se consideró la excentricidad con la que actúa la tensión de los cables sobre las torres, debida al movimiento de las cadenas de aisladores. Para simular el relajamiento progresivo de la tensión de presfuerzo en los cables, que culmina con la ruptura de los mismos, se recurrió a definir una función de variación en el tiempo, de la acción del viento con incremento lineal inicial. Al alcanzar el valor de la velocidad de diseño se considera constante y al aparecer la ruptura, se aceptó una rápida disminución de la carga.

En el estudio se consideró como función de carga constante el peso propio de las torres y el peso propio de los cables; se definió como función de carga constante a las cargas por viento sobre torres, a las cargas por viento sobre los cables y a la tensión de los cables sobre las torres. Se aceptó como variable, la carga de viento sobre un solo cable por ruptura (variable en el tiempo), y se definió mediante la función carga-ruptura.

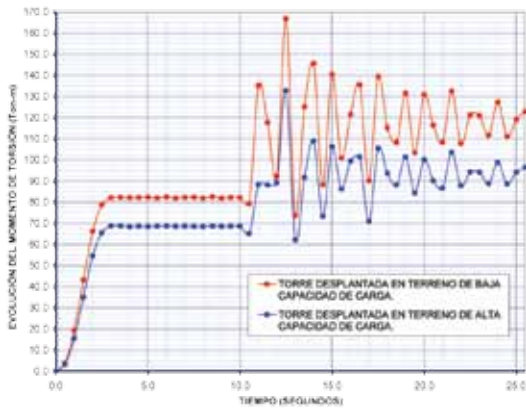


Fig. 5. Evolución con el tiempo de los momentos de torsión sobre las torres, al romperse un cable

INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

De acuerdo con los estudios realizados, se pudieron definir las ecuaciones que proporcionan la rigidez vertical, horizontal, angular y torsional de la cimentación, formada por una losa de cimentación cuadrada, con lados de 7.183 m y contra trabes de 40 cm x 45 cm perimetrales a la losa de cimentación, de concreto $f'c = 500 \text{ kg/cm}^2$, con la finalidad de evitar su agrietamiento excesivo de la misma por efectos de esfuerzos de tensión. Las ataguías se formaron con láminas metálicas de 1.30 cm de espesor y 12 m de profundidad, con $F_y = 3500 \text{ kg/cm}^2$. El suelo se consideró con módulo de Young al cortante $G = 90 \text{ t/m}^2$.

Para la cimentación correspondiente al terreno de baja capacidad de carga, se modeló la losa de cimentación por medio de una placa dividida en cuatro elementos finitos; el efecto de confinamiento que generan las ataguías metálicas, se tomó en cuenta para evaluar las rigideces correspondiente a una cimentación con ataguías de 12 m de profundidad, y se definieron seis resortes de rigidez, en cada uno de los nueve nodos de la placa de cimentación.

RECOMENDACIONES

Es recomendable estimar las cargas debidas a la acción del viento cuando sopla con un ángulo de ataque de 45° , medido con respecto al eje de la línea, ya que dicho caso resulta ser siempre el más crítico; además, es conveniente emplear el Manual para Diseño por Viento de la CFE para estimar la velocidad regional.

Los resultados obtenidos muestran que el efecto de considerar un análisis no lineal, o uno de tipo lineal, no proporciona resultados que difieran en gran magnitud.

A pesar de lo antes mencionado, se recomienda considerar los efectos geométricos no lineales, ya que a pesar de que los resul-

tados no difieren sustancialmente con respecto al análisis tipo lineal (las variaciones máximas encontradas varían alrededor del 7 %), habría que considerar la posibilidad, aún cuando sea escasa, de que más de un solo cable o hilo de guarda falle en un mismo instante de tiempo, en cuyo caso los resultados obtenidos de un análisis no lineal (efecto P d) podrían ser mucho más importantes.

Los resultados muestran que la rigidez de las torres de soporte bajo las dos condiciones de cimentación consideradas no difieren en forma importante entre sí. Se puede afirmar que las diferencias obtenidas en los desplazamientos lineales en la parte alta de las torres se deben a la rigidez a la flexión de cada una de las torres, y a su rigidez a la torsión.

Al revisar los resultados para la torre desplantada en terreno de baja capacidad, los desplazamientos en su parte alta resultan del orden de un 46 % superiores a los obtenidos para la torre cimentada en suelo de alta capacidad (85 cm contra 45 cm de desplazamiento en la dirección perpendicular a la línea), es decir, cuando existe terreno de buena calidad la torre resulta ser considerablemente más rígida ante efectos de flexión.

En conclusión, la cimentación define tanto la rigidez a la flexión global como las condiciones de estabilidad de este tipo de estructuras. Se revisaron todas las posibilidades de ruptura de los cables ubicados entre ambas torres, para lo cual se analizaron ocho modelos, en cada uno de los cuales se hizo fallar un solo cable a la vez. Se llegó a la conclusión de que el caso crítico se presenta con la ruptura de uno de los cables de la cruceta más baja, debido a que las diagonales ubicadas en dicha zona tienen longitudes mayores de la que presentan en las ubicadas a la altura de las crucetas superiores; lo anterior provoca que los primeros sean más susceptibles a sufrir pandeo, al presentarse los efectos de torsión originados por la ruptura de los cables.

Las diagonales más próximas a la primera cruceta presentarán mayores incrementos de carga de tensión, amplificaciones que van de un 80 % en el panel 1, hasta 130 % en la vecindad del punto de falla.

Se ha observado que cuando una torre de transmisión se colapsa, se presenta la fractura de las placas de conexión provocada por la concentración de esfuerzos de gran magnitud en la zona próxima a los agujeros, y no por un número insuficiente de tornillos.

Son muchas las variables que pueden provocar que una torre de transmisión se colapse, pero los estudios realizados muestran un procedimiento para evaluar una torre al ser afectada por un huracán o por tormentas severas. 🚧