

El sistema eléctrico como una bicicleta tándem

septiembre de 2005

por Stefan Fassbinder¹, Bruno De Watcher²

correo electrónico sfassbinder@kupferinstitut.de

El sistema que entrega electricidad a particulares y empresas en todo el país es altamente complejo. Si bien la electricidad es una parte omnipresente y crucial de nuestra economía cotidiana, comprender este sistema y todos sus fenómenos asociados no es fácil, a veces incluso para ingenieros eléctricos capacitados. En tal caso, una buena analogía a menudo ayuda a formarse una mejor idea de cómo funcionan las cosas. Hemos optado por comparar el sistema eléctrico con una bicicleta tándem para explicar algunos de sus aspectos.

Por supuesto, ninguna analogía es 100% perfecta. El sistema eléctrico real y nuestro sistema de bicicletas imaginario no coinciden en todos los aspectos, ya que todas las características del sistema eléctrico no se prestan necesariamente a traducirse en este sistema de bicicletas. Ciertos aspectos de la analogía no siempre son completamente exactos. Sin embargo, las similitudes entre los dos son lo suficientemente cercanas como para hacer que el sistema de bicicletas se visualice más fácilmente y sea de gran ayuda para comprender el sistema eléctrico más abstracto. Y ese, por supuesto, es el objetivo de este trabajo.

Reconocimiento

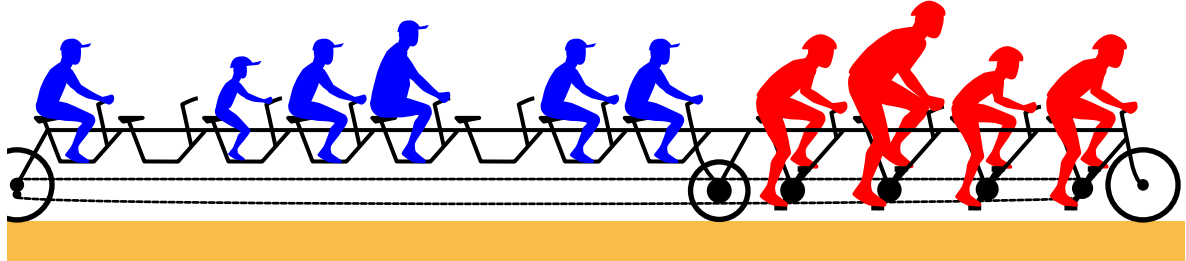
Este documento se ha desarrollado basándose en gran medida en las ideas presentadas en un documento publicado en abril de 2002 en IEEE Power Engineering por el profesor Lennart Söder.

¹Instituto Alemán de Kupfer

²Forte

1 La representación básica del sistema

Imagina una bicicleta tándem moviéndose a velocidad constante.



El objetivo de todo este sistema es mantener las figuras en azul en la parte trasera de la bicicleta en movimiento, aunque no generen nada de la energía que mantiene la bicicleta en movimiento. Representan la carga. Hay cargas grandes que consumen mucha electricidad, plantas industriales por ejemplo, y cargas más pequeñas, como viviendas particulares.

Las cifras de pedaleo en rojo entregan la energía que mantiene el sistema en marcha. Son las centrales eléctricas donde se genera la energía eléctrica. Algunas centrales eléctricas son más grandes y potentes que otras y, por lo tanto, suministran más energía.

La cadena que conecta todos los elementos del sistema es el equivalente a la red de transmisión eléctrica. Esa es la red de líneas de alta tensión que se utiliza para transportar la energía eléctrica por todo el país. La cadena debe hacer girar las ruedas a un ritmo constante para mantener la misma velocidad. Asimismo, la red eléctrica necesita tener una frecuencia fija y constante. La parte superior de la cadena debe estar bajo una tensión física constante, así como la conexión en la red de transmisión eléctrica debe tener un nivel de voltaje fijo. La parte inferior de la cadena está sin tensión y es el equivalente al hilo neutro en una red de transmisión.

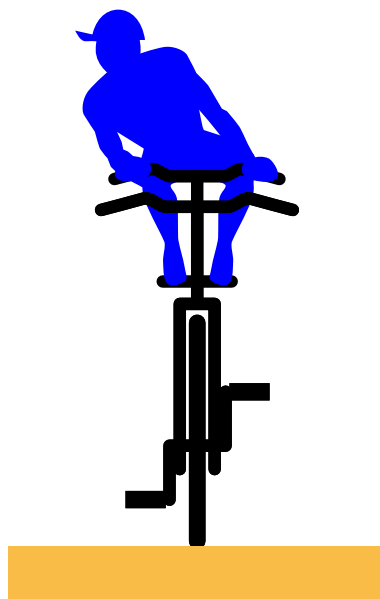
El movimiento de pedaleo (energía) de las figuras rojas se transmite a la cadena mediante un engranaje o un sistema de engranajes. Este engranaje es como el transformador entre el movimiento de giro de la turbina en una central eléctrica y la red eléctrica de alta tensión.

Algunas de las figuras rojas (= centrales eléctricas) no pedalean a plena potencia. Conservan parte de su energía para poder aplicar alguna fuerza adicional cuando sea necesario para mantener la misma velocidad. Por ejemplo, cuando otra figura azul salta repentinamente a la bicicleta (= otra carga se conecta a la red), o una de las figuras rojas tiene un calambre y tiene que dejar de pedalear (= una central eléctrica tiene problemas técnicos y tiene que apagarse), se necesita fuerza de reemplazo para mantener la misma velocidad.

La analogía de la bicicleta tándem también se puede aplicar a algunas de las características específicas del Sistema de Energía Eléctrica y su Calidad de Energía.

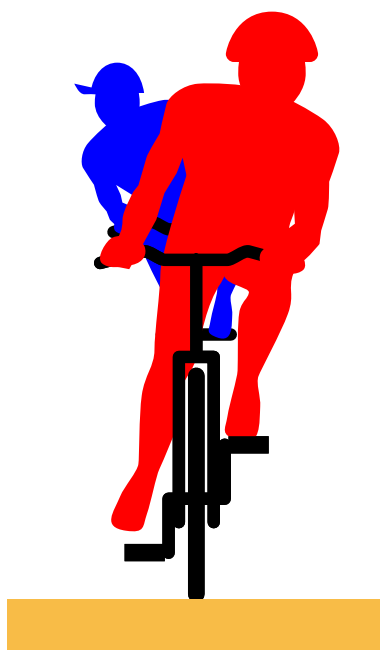
2 Potencia inductiva y su compensación

Una carga inductiva tiene una onda sinusoidal o un patrón recurrente con una frecuencia y un nivel de voltaje normales, pero está un poco retrasada en comparación con la onda sinusoidal principal en la red. Se origina en bobinas de inducción de motores eléctricos, balastos de iluminación fluorescente y ciertos tipos de calefacción eléctrica.



Tal carga inductiva se puede representar con una figura azul inclinada hacia un lado del tándem (ver dibujo). Tiene el mismo peso (= carga normal), por lo que no influye en la tensión de la cadena (= nivel de voltaje de la red) ni en la velocidad de la bicicleta (= frecuencia de la red), pero sin compensación puede causar la bicicleta se caiga.

Entonces, una figura roja debe inclinarse en la dirección opuesta para compensar (= una central eléctrica debe generar energía inductiva; energía con el mismo retraso en la onda sinusoidal que la carga), vea el dibujo.



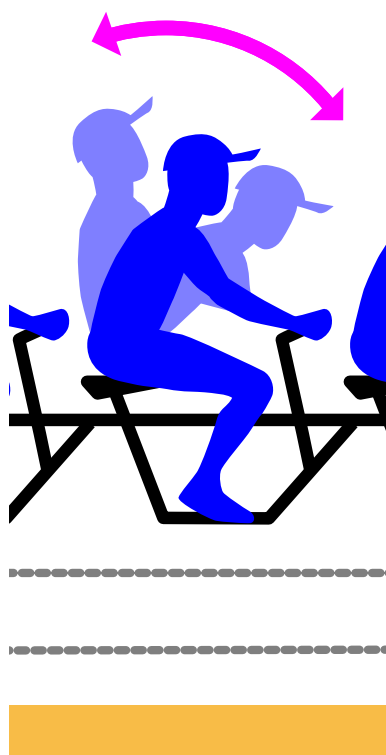
Esto tiene las siguientes consecuencias:

- La compensación tiene que ser inmediata y exacta o toda la bicicleta (= red eléctrica) se caerá. Esto requiere una comprensión clara entre las figuras rojas que venden (= entre las centrales eléctricas) de lo que se debe hacer, y la capacidad de reaccionar muy rápidamente.
- Una figura roja pedaleando (= centrales eléctricas) inclinada hacia un lado no puede trabajar tan cómodamente como antes. Como consecuencia, pondrán menos fuerza en los pedales (= las centrales eléctricas generarán menos 'energía activa'; energía sin demora en la onda sinusoidal). Entonces, los otros pedalistas rojos (= centrales eléctricas) deberán agregar algo de fuerza adicional.
- Con una figura azul, montando en la parte trasera e inclinada hacia un lado de la bicicleta y una figura roja inclinada hacia el otro, la bicicleta atrapa más viento de frente, lo que genera pérdidas adicionales. Esto es como la corriente inductiva que fluye a través de la red eléctrica; trae consigo pérdidas adicionales.

Para contrarrestar estas consecuencias, las grandes cargas inductivas generalmente se compensan cerca de su fuente. Esto se hace mediante una carga capacitiva, más concretamente mediante una batería de condensadores. Tienen una corriente con una onda sinusoidal que tiene un cierto tiempo de anticipación en comparación con la onda sinusoidal principal de la red. De esta manera, compensa el retraso de la carga inductiva. Una carga capacitiva puede verse como otra figura azul sentada cerca de la primera pero inclinada hacia el lado opuesto.

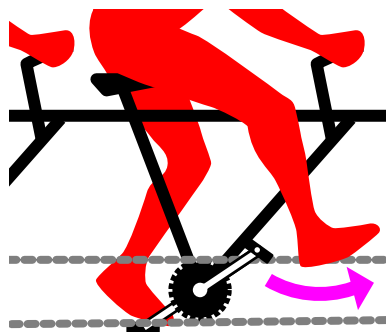
Las cargas inductivas o capacitivas también se denominan cargas reactivas. Una carga sin demora o tiempo de entrega se denomina carga activa.

3 distorsión armónica



Imagine un jinete azul hiperactivo que se inclina constantemente hacia adelante y hacia atrás (ver figura). Si hiciera este movimiento al ritmo de la bicicleta, no le haría ningún daño. Pero ocurre un problema si se mueve tres o incluso cinco veces más rápido. Esto representa una carga armónica, una carga con una frecuencia múltiplo de la frecuencia normal. Los televisores, las computadoras, las lámparas fluorescentes compactas y los motores eléctricos con convertidores son ejemplos típicos de aplicaciones que pueden generar corrientes armónicas. Idealmente, estos deberían compensarse con filtros de armónicos cerca de la fuente; de lo contrario, la bicicleta comienza a moverse bruscamente hacia adelante y hacia atrás, lo que genera pérdidas de energía adicionales. Tal filtro armónico puede verse como una silla montada sobre ruedas que se mueve hacia adelante y hacia atrás y de esta manera neutraliza inmediatamente el movimiento del hiperactivo jinete azul.

4 Mantener el voltaje y la frecuencia constantes



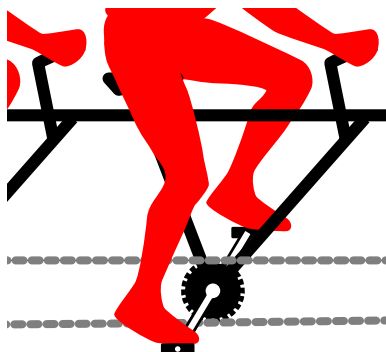
Uno de los pedalistas rojos usa zapatos demasiado resbaladizos. De repente, su pie resbala del pedal. De repente, su contribución al poder del sistema se pierde y la tensión en la cadena cae. Esto debe ser compensado por los otros pedalistas rojos para mantener la misma velocidad. El ciclista al que se le resbalaron los pedales debe tener cuidado de no lastimarse, ya que la cadena y sus pedales siguen girando. Es una operación complicada poner el pie en el pedal y comenzar a hacer su parte del trabajo nuevamente con sus colegas.

Esta situación se puede comparar con una caída de tensión. Por una falla en una central eléctrica (= zapatos resbaladizos), puede ocurrir que su sistema de control se apague repentinamente (= resbalar el pedal), pero con el riesgo de dañar ciertos equipos ya que la red es más potente y mantiene la misma frecuencia (= el pedal sigue girando). El resultado de este drop out es un brusco hueco de tensión en la red (= caída de tensión en la cadena) que se prolonga hasta que el resto de centrales de la red reaccionan aumentando su aportación. Si no reaccionan lo suficientemente rápido, la frecuencia (= velocidad de la bicicleta) podría comenzar a disminuir. Y al igual que el pedalista que perdió el pedal y le cuesta volver a poner el pie en el pedal de giro, para una central eléctrica es una operación complicada volver a conectar su generador a la red,

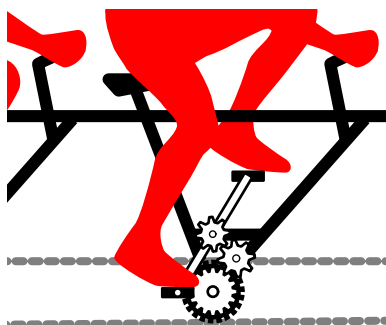
Una caída de voltaje similar puede ocurrir cuando una carga pesada se conecta repentinamente a la red. Esta es la razón por la que la mayoría de las veces las cargas pesadas no se conectan todas a la vez, sino en pasos incrementales.

Cuando una carga pesada se desconecta repentinamente, puede ocurrir un pico de voltaje. En tal caso, las centrales tienen que bajar su contribución rápidamente o la frecuencia aumentará. En nuestra analogía del tándem, la bicicleta acelerará repentinamente si alguno de los ciclistas azules salta de la bicicleta y los ciclistas rojos continúan aplicando la misma fuerza en los pedales. Tienen que reaccionar rápidamente y reducir su potencia o la moto comenzará a acelerar.

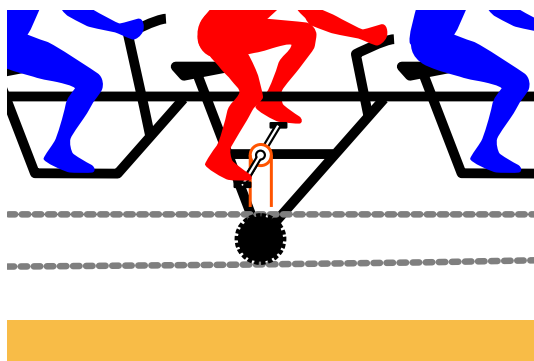
5 Tres tipos diferentes de centrales eléctricas



Si una figura roja que pedalea está directamente conectada a la cadena con una marcha, tiene que pedalear constantemente a la velocidad correcta y con la cantidad correcta de potencia. Este es el caso de las grandes centrales eléctricas tradicionales y centrales nucleares que se conectan a la red mediante un transformador.



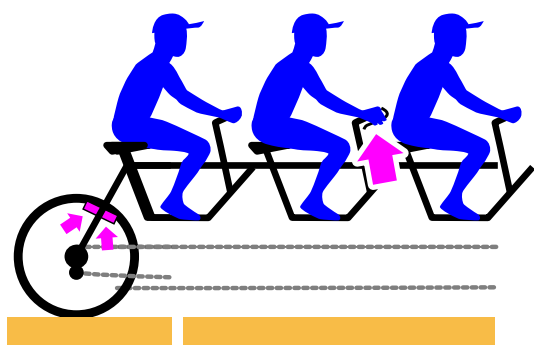
Sin embargo, algunos ciclistas pueden pedalear más lento, ya que su fuerza se transforma en la velocidad correcta mediante un sistema de engranajes. Eso corresponde a centrales eléctricas que funcionan más lentamente, por ejemplo, una central hidroeléctrica cuya velocidad de turbina depende del caudal del río. En tal caso, la turbina está conectada al generador al igual que en el caso de la bicicleta tándem por un sistema de engranajes que transforma la velocidad. Otra opción es que el generador gire a la misma velocidad que la turbina y se alcance la frecuencia adecuada para la red mediante un inversor de frecuencia.



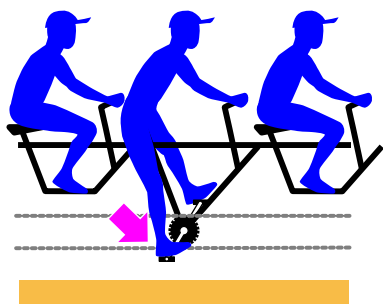
Los aerogeneradores son como pequeñas figuras rojas que pedalean solo cuando hace buen tiempo. Cuanto mejor hace el tiempo, más rápido pedalean. A veces son de gran ayuda, pero no puedes confiar en ellos. Esto es lo mismo que las turbinas eólicas: solo funcionan cuando la velocidad del viento no es demasiado lenta ni demasiado rápida. Es por eso que necesitan ser respaldados por otro tipo de centrales eléctricas. Estos pedales de buen tiempo están conectados a la cadena por una correa y un sistema de engranajes, lo que les permite pedalear a diferentes velocidades, de la misma forma que los aerogeneradores están conectados por una caja de cambios o por un variador de frecuencia para compensar las variaciones en la velocidad del viento.

6 Tres tipos diferentes de cargas

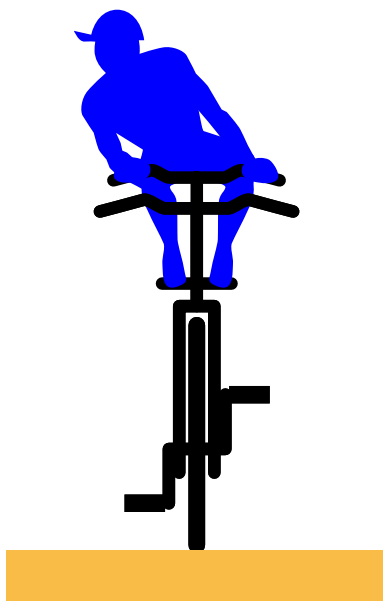
Las centrales eléctricas no solo difieren mucho en sus características, sino que también difieren las cargas.



Un primer tipo de carga eléctrica es una resistencia, que produce calor o luz a partir de la energía eléctrica. Algunos ejemplos son la bombilla o la mayoría de los tipos de sistemas de calefacción eléctrica. Es el equivalente a un piloto azul sin pedales, pero pisando continuamente los frenos. Esos frenos transforman la energía cinética en calor de la misma manera que una resistencia transforma la energía eléctrica en calor.



Un motor eléctrico tiene un principio básico que es similar a un generador. Pero en lugar de transformar la energía rotatoria en energía eléctrica, el motor vuelve a transformar la energía eléctrica en energía rotatoria. En la analogía, esto se puede representar con un ciclista azul con los pies en los pedales giratorios al igual que las figuras rojas (= centrales eléctricas), pero en lugar de pedalear, aplica todo su peso contra el movimiento giratorio.



Un tercer tipo de carga es la carga reactiva, ya comentada en el punto 2. Se trata del jinete azul sin frenos ni pedales, inclinado hacia un lado. Esto crea una carga inductiva con cierto retraso respecto a la red (por ejemplo, una lámpara fluorescente) o al contrario, una carga capacitiva con cierto adelanto respecto a la red (por ejemplo, una batería de condensadores).

7. Conclusión

Esta analogía deja en claro cuán complejo es administrar un sistema de energía. La potencia generada en un momento dado debe compensar exactamente la carga. Mantener este frágil equilibrio significa controlar varias dimensiones. El desafío más difícil es que tanto la velocidad de la cadena (frecuencia de la red) como la tensión en la cadena (nivel de voltaje) deben permanecer estables. Y todo ello mientras pueden ocurrir diferentes e inesperadas perturbaciones del equilibrio.

Desde la liberalización del mercado eléctrico en Europa, cada país cuenta con un operador de red independiente que se esfuerza por ejecutar esta tarea.

Referencias

[Soeder, 2002] Lennart Soeder, Explicación del funcionamiento del sistema de energía para personas que no son ingenieros, Ingeniería de energía IEEE, abril de 2002