

Analogie du tandem pour la compréhension des systèmes électriques

Leonardo ENERGY

Septembre 2005

Auteurs :

Stefan Fassbinder

Deutsches Kupferinstitut
email sfassbinder@kupferinstitut.de

Bruno De Wachter

Forte

Résumé

Le réseau qui fournit l'énergie électrique aux usagers privés ou aux entreprises dans un pays est extrêmement complexe. Alors que l'énergie électrique est omniprésente et cruciale dans le quotidien de notre économie, la compréhension de ce réseau, ainsi que celle des phénomènes qui y sont associés, n'est pas aisée, y compris parfois pour des ingénieurs qualifiés. Dans ce type de situation, une bonne analogie est souvent utile pour se faire une meilleure idée du mode de fonctionnement. Nous avons pensé que comparer le réseau électrique à un tandem est une bonne façon de d'expliquer quelques uns de ses aspects.

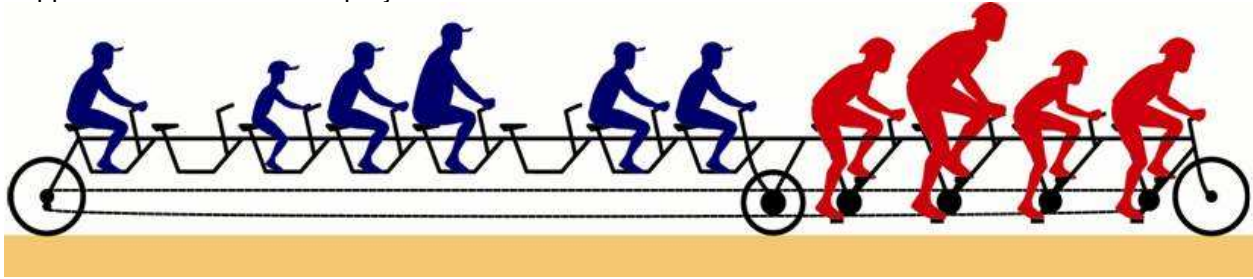
Bien sûr, aucune analogie n'est parfaite et le réseau électrique et notre système imaginaire de tandem ne présente pas une équivalence exacte : toutes les caractéristiques d'un réseau électrique ne peuvent pas être imaginées dans cette analogie du tandem. Certains aspects de l'analogie ne sont d'ailleurs parfois pas pertinents. Les ressemblances entre les deux sont cependant suffisamment proches pour qu'un modèle de bicyclette, plus facilement visualisable, puisse grandement contribuer à une meilleure compréhension du caractère plus abstrait d'un réseau électrique. Ceci est bien entendu l'objectif de ce papier.

Remerciements

L'écriture de cet article est largement inspirée d'idées présentées dans la publication faite en avril 2002 dans IEEE Power Engineering par le Professeur Lennart Söder.

1 Représentation fondamentale du système

Supposons un tandem se déplaçant à vitesse constante.



L'objectif du système dans son ensemble est de maintenir en mouvement les personnages en bleu à l'arrière de la bicyclette, même s'ils ne produisent pas l'énergie nécessaire à son mouvement : ils représentent la charge. Certaines charges sont de gros consommateurs d'énergie électrique, comme, par exemple, les installations industrielles, tandis que d'autres, comme les résidences privées, en consomment peu.

Les personnages en rouge, qui pédalent, fournissent l'énergie créatrice de mouvement pour l'ensemble. Elles représentent les centrales de production de l'énergie électrique. Certaines sont plus grandes et plus puissantes que d'autres, offrant ainsi plus de puissance.

La chaîne reliant tous les éléments du système est l'équivalent du réseau de transport de l'électricité. Il s'agit du réseau de transport haute tension qui sert à transférer l'énergie électrique à tout un pays.

La chaîne doit entraîner constamment les roues pour conserver une vitesse constante. De façon analogue, la fréquence sur le réseau électrique doit être maintenue à une valeur fixée. La tension sur la partie supérieure de la chaîne doit rester constante, de la même façon que le niveau de tension sur le réseau électrique doit être maintenu à une valeur fixée. La partie inférieure de la chaîne ne présente pas de tension et correspond au conducteur de neutre sur un réseau de transport.

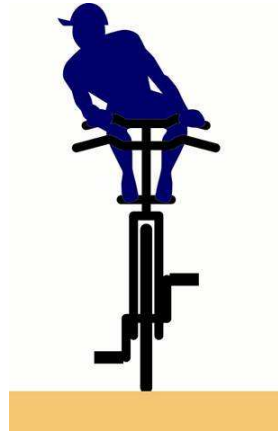
Le mouvement de pédalage (énergie) des personnages rouges est transmis à la chaîne par un pignon ou un système à pignons. Ce pignon est l'équivalent du transformateur interfaçant le mouvement de rotation de la turbine dans une centrale de production et le réseau électrique haute tension.

Certains des personnes en rouge (= centrales de production) ne pédalent pas à pleine puissance. Ils conservent en réserve une partie de leur énergie afin de pouvoir fournir de la force supplémentaire pour garder la même vitesse. Ainsi, si un nouveau personnage bleu saute soudain sur le tandem, (= une autre charge est raccordée au réseau), ou si l'un des personnages rouges est pris de crampes et doit s'arrêter de pédaler (= une centrale de production subit un problème technique et doit être arrêtée), alors une force complémentaire doit être apportée pour conserver la vitesse.

L'analogie du tandem peut aussi s'appliquer à certaines caractéristiques spécifiques d'un système de production d'énergie électrique ainsi qu'à la qualité de cette énergie.

2 La puissance réactive et sa compensation

Une charge inductive, soumise à une tension de fréquence et d'amplitude normales est traversée par une onde de courant sinusoïdale ou périodique, mais légèrement en retard sur l'onde de tension du réseau. C'est par exemple le cas des bobines excitatrices des moteurs électriques, les ballasts des éclairages fluorescents, et certains types de chauffage électrique.



Une charge inductive de ce genre peut être représentée par un personnage bleu qui se pencherait sur un des côtés du tandem (voir figure). Il ne change pas de poids (=charge normale) et, de ce fait, n'a d'incidence ni sur la tension de la chaîne (niveau de tension sur le réseau) ni sur la vitesse du tandem (fréquence sur le réseau), mais si le phénomène n'est pas compensé, le tandem peut tomber. Il convient donc qu'un personnage rouge se penche de l'autre côté (une centrale de production doit fournir la puissance réactive, caractérisée par le même décalage entre les formes d'onde que pour la charge), voir figure ci-après.



Il en résulte que :

- La compensation doit être instantanée et précise sinon l'ensemble du tandem (réseau électrique) tombera. Cela nécessite donc une réelle entente et une coordination entre les personnages en rouge qui pédalent (= entre les centrales de production), ainsi qu'une capacité à réagir très rapidement.
- Un pédaleur en rouge (= centrales de production), tandis qu'il se penche sur le côté ne dispose plus du même confort que précédemment. Il pédalera donc moins fort (= les centrales de production vont produire moins d'énergie active, énergie sans décalage entre les formes d'onde). Les autres pédaleurs rouges (= centrales de production) se verront obligés de rajouter de la force.
- Tandis qu'un personnage bleu, à l'arrière, se penche d'un côté du tandem alors qu'un personnage rouge se penche de l'autre côté, la bicyclette oppose plus de résistance à l'air, ce qui accroît les pertes. Il en va de même avec le courant réactif circulant sur les réseaux électriques et qui génère des pertes supplémentaires.

Pour s'affranchir de ces conséquences, les charges fortement inductives sont en général compensées au voisinage des sources. Cette compensation est réalisée à l'aide de charges capacitives, plus précisément par des batteries de condensateurs. L'onde de courant qui les parcourt est cette fois en avance par rapport à l'onde de tension du réseau. Cela compense ainsi le retard observé sur les charges inductives. Une charge capacitive peut être considérée comme un autre personnage bleu, assis près du premier mais penché de l'autre côté.

Les charges inductives ou capacitives sont regroupées sous le terme de charges réactives. Une charge ne présentant pas de décalage avant ou arrière entre les ondes de tension et de courant est une charge active.

3 Distorsion harmonique



Imaginons un cycliste bleu hyperactif qui passe son temps à se pencher d'avant en arrière (voir figure). Si ce balancement s'effectue au même rythme que celui du tandem, cela ne pose pas de problème. Par contre, un problème va apparaître s'il oscille trois ou cinq fois plus vite. Il s'agit ici de la transposition d'une charge non linéaire (harmonique), charge engendrant l'apparition de fréquences multiples de la fréquence normale. Les récepteurs télé, les ordinateurs, les lampes fluorescentes compactes, les moteurs électriques commandés par des variateurs à ponts onduleurs en sont des exemples typiques de charges pouvant générer des courants harmoniques. Il convient alors de les compenser à l'aide de filtres anti-harmoniques placés au voisinage de la source ; si ce n'est pas le cas, le tandem va commencer à osciller d'avant en arrière, avec une déperdition énergétique associée. Le filtre anti-harmonique peut dans ce cas être vu comme une selle placée sur des roulettes et se déplaçant d'avant en arrière, ce qui aura pour effet de compenser immédiatement le mouvement du personnage bleu hyperactif.

4 Maintenir constantes les valeurs de la tension et de la fréquence

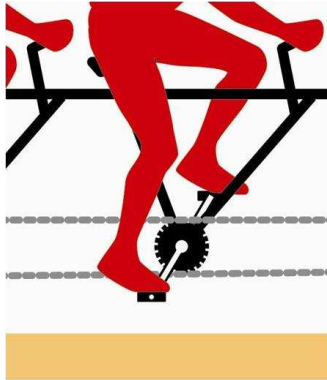


Un des cyclistes rouges porte des chaussures trop glissantes. Tout à coup, son pied vient à glisser de la pédale. Brutalement, sa contribution à fournir de la puissance au système disparaît et la tension sur la chaîne diminue. Les autres cyclistes rouges doivent alors se substituer à lui pour conserver une vitesse constante. Celui dont le pied a glissé doit prendre garde à ne pas se blesser, car la chaîne et ses pédales continuent de tourner. Reposer son pied sur la pédale pour fournir sa part du travail avec ses collègues peut s'avérer difficile.

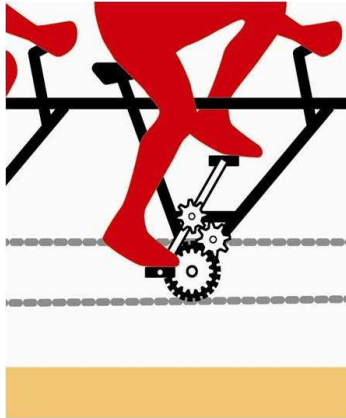
Cette situation est à comparer à celle d'une chute de tension. Suite à une panne survenue dans une centrale de production (=chaussures glissantes), son système de contrôle peut soudain être perdu (= le pied glisse de la pédale), mais avec un risque de casse de certaines parties de l'équipement car le réseau est plus puissant et conserve sa fréquence (= la pédale continue de tourner). Cette perte va engendrer un creux de tension brutal sur le réseau (= perte de tension sur la chaîne) qui durera jusqu'à ce que les autres centrales de production du réseau réagissent en augmentant leur contribution. Si elles ne réagissent pas suffisamment vite, la fréquence (vitesse du tandem) peut commencer à chuter. De la même façon qu'il est délicat pour un cycliste de replacer son pied sur une pédale en rotation si celui-ci a glissé, il n'est pas évident, dans une centrale de production de recoupler son alternateur au réseau, les fréquences respectives devant parfaitement concorder. Le même type de creux de tension risque d'apparaître lorsque qu'une charge puissante est brutalement raccordée au réseau. C'est pour cette raison que le retestage de la plupart des charges puissantes se fait de façon progressive.

Lorsqu'une charge importante est brutalement déconnectée, une surtension transitoire peut apparaître. Les centrales de production doivent, dans ce cas, diminuer leur contribution rapidement si l'on souhaite éviter une augmentation de fréquence. Dans l'analogie du tandem, celui-ci va brutalement accélérer si l'un des cyclistes bleus en saute et si les cyclistes rouges continuent d'appuyer aussi fort sur leurs pédales. Ils doivent réagir rapidement en diminuant la puissance fournie, sinon le tandem commence à accélérer.

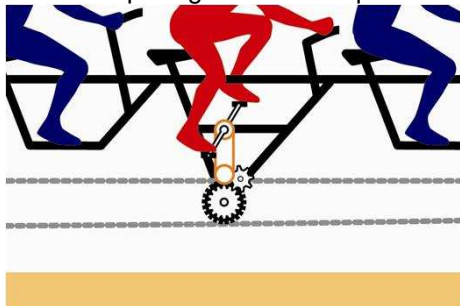
5 Trois différents types de centrales de production



Si un cycliste rouge est directement relié à la chaîne par l'intermédiaire d'un seul pignon, il devra pédaler de façon permanente à la bonne vitesse avec la quantité de puissance nécessaire. C'est le cas des grandes centrales de production traditionnelles ou nucléaires, connectées au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur.



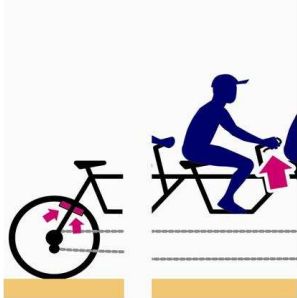
Certains cyclistes peuvent toutefois pédaler moins vite, si une adaptation de leur force à la vitesse souhaitée est réalisée à l'aide d'un réducteur. Cela correspond aux centrales de production dont la vitesse de rotation est plus lente, par exemple les centrales hydrauliques dont la vitesse de la turbine dépend du courant de la rivière. La turbine est alors raccordée à l'alternateur, comme dans le cas du tandem, par un réducteur dont la vitesse d'entrée n'est pas celle de sortie. Une autre possibilité existe : l'alternateur tourne à la même vitesse que la turbine et un convertisseur de fréquence est mis en œuvre pour générer la fréquence du réseau.



Les turbines éoliennes sont identiques à de petits personnages rouges qui ne pédaleraient que si le temps est beau. Plus il fait beau, plus ils pédalent vite. Bien que parfois très utiles, il est impossible de se fier à eux. Il en va de même avec les turbines éoliennes, puisque celles-ci ne fonctionnent que si la vitesse du vent n'est ni trop lente ni trop rapide. Une éolienne est donc forcément redondante avec d'autres types de centrales de production. Ces pédaleurs « du beau temps » sont donc reliés à la chaîne à l'aide d'une courroie et d'une boîte de vitesse, ce qui leur permet de pédaler à des vitesses variables, de la même façon que les turbines éoliennes sont connectées à un réducteur ou un convertisseur de fréquence pour gommer les variations de la vitesse du vent.

6 Trois différents types de charge

De même que les centrales de production, les charges proposent des caractéristiques très différentes.



Une première catégorie de charges électriques sont les résistances électriques dédiées à produire de la chaleur ou de la lumière à partir de l'énergie électrique. Il s'agit par exemple des ampoules lumineuses ou de la plupart des systèmes de chauffage. Ces charges ont pour équivalent cycliste bleu sans pédales et qui appuierait continuellement sur les freins. Le système de freinage transforme l'énergie cinétique en chaleur, au même titre qu'une résistance transforme l'énergie électrique en chaleur.



Un moteur électrique obéit aux mêmes principes fondamentaux qu'un générateur. Cependant, au lieu de proposer la conversion d'énergie de rotation en énergie électrique, un moteur convertit, à l'inverse, l'énergie électrique en énergie de rotation. Dans notre analogie, c'est comme si un cycliste bleu, qui a ses pieds posés sur les pédales qui tournent comme les cyclistes rouges (= centrales de production), au lieu d'accompagner le mouvement de rotation appuyait de tout son poids sur elles en cherchant à s'opposer à la rotation.



Un troisième type de charge est une charge réactive, déjà étudiée au paragraphe 2. Il s'agit alors d'un cycliste bleu sans frein ni pédales, penché d'un côté. Cela correspond à une charge inductive qui décale la forme d'onde de courant en arrière de celle de la tension réseau (une lampe fluorescente, par exemple), ou au contraire, une charge capacitive qui la décale en avant (une batterie de condensateurs, par exemple).

7 Conclusion

Cette analogie permet de se rendre compte combien il est difficile de contrôler un réseau électrique. La puissance fournie à chaque instant doit être parfaitement égale à celle appelée par la charge. Pouvoir conserver cet équilibre fragile signifie disposer de contrôles dans diverses directions. Le défi est d'autant plus difficile qu'il convient à la fois de garder constantes la vitesse de la chaîne (fréquence du réseau) et sa tension (niveau de tension). Et cela bien sur, tout en tenant compte que des perturbations de nature variable et inattendue qui peuvent ébranler l'équilibre. Depuis la libéralisation du marché de l'énergie électrique en Europe, chaque pays possède un opérateur de réseau indépendant qui lutte pour réaliser cette tâche.

Références

[Soeder, 2002] Lennart Soeder, Explaining Power System Operation to Non-engineers, IEEE Power Engineering, April 2002