

Le système électrique vu comme un tandem

Septembre 2005

par Stefan Fassbinder¹, Bruno De Wachter²

courriel : sfassbinder@kupferinstitut.de

Le système fournissant l'électricité aux citoyens ainsi qu'aux entreprises aux quatre coins du pays est extrêmement complexe. Alors que l'électricité représente une partie omniprésente et cruciale de notre économie quotidienne, la compréhension de ce système et de l'ensemble des phénomènes qui y sont associés n'est pas simple, parfois même pour des ingénieurs en électricité qualifiés. Dans ce cas, une analogie concrète permet souvent de se faire une idée plus précise de son mode de fonctionnement. Nous avons donc choisi de comparer le système électrique à un tandem afin d'expliquer quelques-uns de ses aspects.

Naturellement, aucune analogie ne correspond à 100%. Le système électrique réel et notre système imaginaire de tandem ne correspondent pas exactement pour la simple raison que toutes les caractéristiques du système électrique ne se prêtent pas à une transposition dans ce système de tandem. Certains aspects de l'analogie ne sont pas toujours parfaitement exacts. Cependant, les similitudes entre les deux sont suffisamment proches pour que le système de tandem s'avère d'un grand secours dans la compréhension du système électrique. En effet, le système de tandem se représente aisément tandis que le schéma électrique est plus abstrait.

Remerciements

Ce document se fonde principalement sur des idées présentées dans un article publié en avril 2002 dans IEEE Power Engineering par le professeur Lennart Söder.

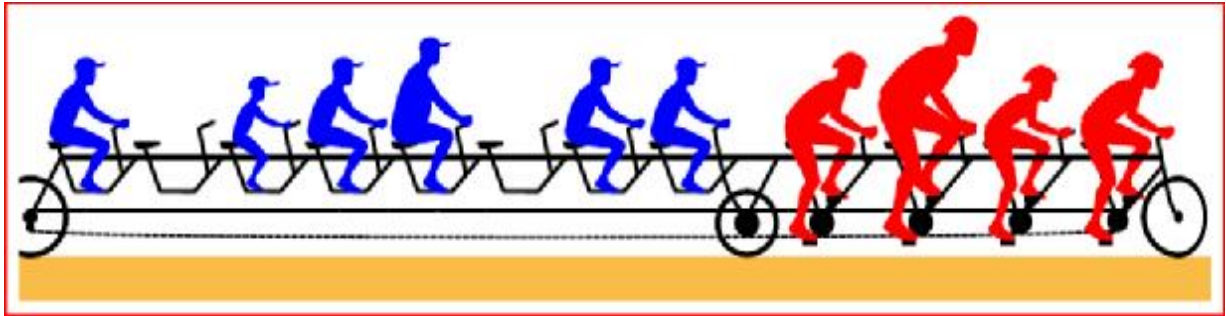
1 Deutsches Kupferinstitut

2 Forte

Septembre 2005

1. Représentation basique du système

Imaginons un tandem se déplaçant à une vitesse constante.



Le but de ce système consiste à ce que les personnes en bleu, à l'arrière du tandem, restent en mouvement même s'ils ne génèrent pas l'énergie qui maintient le vélo en mouvement. Ceux-ci représentent la charge. Il existe de grosses charges qui consomment beaucoup d'électricité, comme les implantations industrielles, et de plus petites charges telles que les habitations privées.

Les personnes en rouge qui pédalent fournissent l'énergie maintenant le système en mouvement. Ce sont les centrales électriques où l'énergie électrique est générée. Certaines centrales électriques sont plus grandes et plus puissantes que d'autres et fournissent par conséquent davantage d'électricité.

La chaîne qui relie tous les éléments de ce système est l'équivalent au réseau de distribution d'électricité. C'est le réseau des lignes à haute tension utilisé pour transporter l'énergie électrique dans tout le pays. La chaîne doit faire tourner les roues à une vitesse constante pour que la vitesse soit maintenue. De même, le réseau électrique doit présenter une fréquence fixe et constante. La partie supérieure de la chaîne du vélo doit être soumise à une tension physique constante. C'est également le cas pour la connexion dans le réseau de distribution électrique qui doit offrir un niveau de tension fixe.

La partie inférieure de la chaîne n'est pas sous tension et est l'équivalent du fil neutre dans un réseau de distribution électrique.

Le mouvement engendré par les personnes en rouge, grâce aux pédales, est transmis à la chaîne par un pignon ou un engrenage. Ce pignon réalise un mouvement rotatif comparable au mouvement de la turbine dans une centrale électrique et le réseau électrique haute tension.

Certaines des personnes en rouge (= centrales électriques) ne pédalent pas à pleine puissance. Ils conservent une partie de leur énergie pour avoir la possibilité d'appliquer un effort supplémentaire lorsque cela s'avérera nécessaire afin de maintenir la même vitesse. Par exemple, si une personne en bleu supplémentaire prend subitement place sur le vélo (= une autre charge se connecte au réseau) ou si l'une des personnes en rouge est prise d'une crampe et doit cesser de pédaler (= une centrale électrique connaît des problèmes techniques et doit s'arrêter), une force de substitution est nécessaire pour maintenir une vitesse constante.

L'analogie avec le tandem peut également être appliquée à certaines caractéristiques spécifiques du système d'énergie électrique et de la qualité de l'énergie.

2. La puissance inductive et sa compensation

Une charge inductive présente une forme sinusoïdale ou récurrente d'une fréquence et d'un niveau de tension normal, mais avec un certain décalage en comparaison à l'onde sinusoïdale principale du réseau. Elle est produite par les bobines d'induction des moteurs électriques, les ballasts des tubes fluorescents et certains types de chauffages électriques.



Une telle charge inductive peut être représentée par une personne en bleu qui s'appuie sur un des côtés du tandem (voir illustration). Comme il a le même poids (= charge normale), il influence ni la tension de la chaîne (= niveau de tension du réseau) ni la vitesse du vélo (= fréquence du réseau) mais, sans compensation, il risque de provoquer la chute du vélo.

Une personne en rouge doit se pencher du côté opposé pour compenser le déséquilibre provoqué par la personne en bleu (= une centrale électrique doit générer un courant inductif ; du courant avec le même décalage dans l'onde sinusoïdale que la charge), voir illustration.



Les conséquences sont les suivantes :

- La compensation doit être immédiate et exacte sinon le vélo (= réseau électrique) chutera. Cela requiert une bonne compréhension entre les personnes (= parmi les centrales électriques) de ce qui doit être fait et ils doivent être capables de réagir très rapidement.
- Une personne en rouge en train de pédaler (= centrales électriques) qui se penche sur le côté ne peut pas travailler aussi confortablement qu'auparavant. Par conséquent, il exercera moins d'effort sur les pédales (= les centrales électriques généreront moins « d'énergie active » ; de l'énergie sans décalage sur l'onde sinusoïdale). Les autres personnages en rouge qui pédalent (= centrales électriques) devront alors produire un effort supplémentaire.
- Avec une personne en bleu qui pédale à l'arrière et se penche d'un côté du vélo et une personne en rouge incliné de l'autre, le vélo offre une plus grande résistance au vent, ce qui entraîne des pertes supplémentaires. C'est exactement comme le courant traversant le réseau électrique ; il entraîne des pertes supplémentaires.

Pour contrer ces conséquences, de fortes charges inductives sont en général compensées à proximité de leur source. Ce qui est réalisé au moyen d'une charge capacitive, et plus spécifiquement à l'aide d'une batterie de condensateurs. Ils ont un courant avec une onde sinusoïdale qui présente un certain délai de démarrage en comparaison à l'onde sinusoïdale principale du réseau. De cette manière, il compense le décalage de la charge inductive. Une charge capacitive peut être considérée comme une autre personne en bleu assis près du premier, mais penché du côté opposé.

Les charges inductives et capacitatives sont également appelées des charges réactives. Une charge sans décalage ou délai de démarrage est appelé une charge active.

3. Distorsion harmonique



Imaginons un cycliste bleu hyperactif qui bascule constamment en avant et en arrière (voir illustration). S'il effectue ce mouvement au rythme du tandem, cela ne pose aucun problème. Les difficultés commencent à se poser s'il effectue ces mouvements trois ou cinq fois plus rapidement. Cela représente une charge harmonique, une charge avec une fréquence qui correspond à un multiple de la fréquence normale. Les postes de télévision, les ordinateurs, les lampes fluorescentes compactes et les moteurs électriques à inverseur sont des exemples typiques d'applications susceptibles de causer des courants harmoniques. Ils doivent idéalement être compensés par des filtres harmoniques proches de la source ; sinon, le vélo commence à osciller d'avant en arrière, ce qui entraîne des pertes d'énergie supplémentaires. Un tel filtre harmonique peut être constitué d'une selle montée sur roulettes qui se déplace d'avant en arrière et neutralise ainsi instantanément le mouvement du cycliste bleu hyperactif.

4. Maintien de la tension et de la fréquence à un niveau constant



L'un des cyclistes en rouge porte des chaussures glissantes. Tout à coup, son pied glisse de la pédale. Sa contribution à l'entraînement de ce système est brusquement perdue et la tension sur la chaîne diminue.

Cette perte doit être compensée par les autres cyclistes en rouge pour maintenir la même vitesse. Le cycliste dont le pied a glissé de la pédale doit prendre garde à ne pas se blesser, car la chaîne et ses pédales continuent à tourner.

Il est assez délicat de remettre le pied sur la pédale et de recommencer à fournir sa part de travail auprès de ses collègues.

On peut comparer cette situation à une baisse de tension.

À la suite d'une défaillance dans une centrale électrique (= chaussures glissantes), il peut arriver que le système de contrôle ferme brusquement la centrale électrique (= chaussure a glissé de la pédale), mais avec le risque d'endommager certaines pièces d'équipement puisque le réseau est plus puissant et conserve la même fréquence (= la pédale continue de tourner).

Le résultat de cette baisse est une chute de tension brutale sur le réseau (= baisse de tension de la chaîne) qui dure jusqu'à ce que les autres centrales électriques du réseau réagissent en augmentant leur contribution.

Si elles ne réagissent pas assez rapidement, la fréquence (= vitesse du vélo) peut commencer à baisser. Et tout comme le cycliste pédaleur dont le pied a glissé de la pédale et qui éprouve des difficultés à remettre le pied sur la pédale en train de tourner, il est assez compliqué pour une centrale électrique de reconnecter son générateur au réseau, puisque les deux fréquences doivent correspondre.

Une baisse de tension similaire peut se produire lorsqu'une lourde charge est brusquement connectée au réseau. C'est pourquoi la plupart du temps, les lourdes charges ne sont pas toutes connectées en même temps, mais par étapes intermédiaires.

Lorsqu'une lourde charge est brusquement déconnectée, une crête de tension peut se produire. Dans ce cas, les centrales électriques doivent diminuer rapidement leur contribution, sans quoi la fréquence va augmenter.

Dans le cas de notre analogie avec le tandem, le vélo va brusquement accélérer si l'un des cyclistes bleus saute du vélo et que les pédaleurs rouges continuent à appliquer la même force sur les pédales. Ils doivent réagir rapidement et diminuer leur effort, sinon le vélo va accélérer.

5. Trois types de centrales électriques

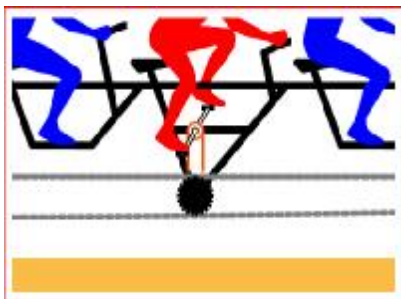


Si une personne en rouge pédalant est directement relié à la chaîne avec un pignon, il doit constamment pédaler à la bonne vitesse et appliquer le même d'effort. C'est le cas des grandes centrales électriques classiques et des centrales électriques nucléaires, qui sont reliées au réseau par un transformateur.



Certains cyclistes peuvent cependant pédaler plus lentement, puisque leur effort est transformé à la bonne vitesse par un système d'engrenages. C'est le cas des centrales électriques qui tournent lentement, comme les centrales hydroélectriques dont le régime de la turbine dépend du débit du fleuve.

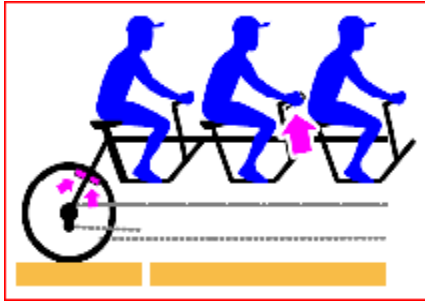
Dans ce cas, la turbine est reliée à la génératrice tout comme le tandem et son système d'engrenages qui transforme la vitesse. Une autre possibilité est celle où le générateur tourne à la même vitesse que la turbine et que la fréquence adéquate pour le réseau est obtenue au moyen d'un convertisseur de fréquence.



Les turbines éoliennes sont comme de petites personnes en rouge qui ne pédalent que par beau temps. Plus le temps est beau, plus ils pédalent rapidement. Ils peuvent parfois s'avérer très utiles mais ne sont pas fiables. C'est le même principe pour les turbines éoliennes : elles ne fonctionnent que lorsque la vitesse du vent n'est ni trop faible ni trop rapide. C'est pourquoi elles doivent être secondées par d'autres types de centrales électriques. Ces cyclistes de beau temps sont reliés à la chaîne au moyen d'une courroie et d'un système d'engrenages qui leur permettent de pédaler à des vitesses variables, de la même manière que les turbines éoliennes sont connectées par un réducteur ou un convertisseur de fréquence pour compenser les variations de vitesse du vent.

6. Trois types de charges

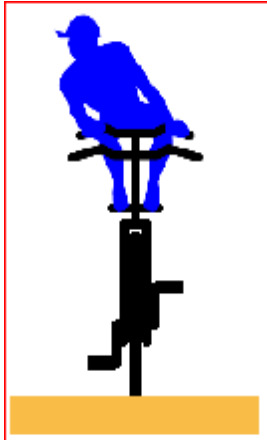
Les centrales électriques ne diffèrent pas uniquement au point de vue des caractéristiques, mais également au niveau des charges.



Un premier type de charge électrique est la résistance. Elle produit de la chaleur ou de la lumière à partir d'énergie électrique. Citons, par exemple, les ampoules électriques et la plupart des systèmes de chauffage électrique. C'est l'équivalent du cycliste en bleu sans pédale, qui tire continuellement sur les freins. Cette décélération transforme l'énergie cinétique en chaleur de la même manière qu'une résistance transforme l'énergie électrique en chaleur.



Un moteur électrique présente un principe de base similaire à celui d'une génératrice. Mais au lieu de transformer l'énergie rotative en énergie électrique, le moteur convertit l'énergie électrique en énergie rotative. On peut représenter cette analogie par un cycliste bleu qui garde les pieds sur les pédales en rotation tout comme les personnes en rouge (= centrales électriques) mais qui, au lieu de pédaler, applique tout son poids à contresens de la rotation.



Un troisième type de charge est la charge réactive, que nous avons déjà abordée au second point. C'est le cas du cycliste bleu sans freins ni pédales, qui se penche d'un côté. Cela crée une charge inductive avec un certain décalage par rapport au réseau (une lampe fluorescente, par exemple) ou à l'inverse, une charge capacitive avec un certain temps de démarrage par rapport au réseau (par exemple, une batterie de condensateurs).

7. Conclusion

L'analogie du tandem présente clairement la complexité de la gestion d'une centrale électrique. L'électricité générée à un moment donné doit compenser exactement la charge. Le maintien de ce fragile équilibre revient à contrôler plusieurs dimensions. La tâche la plus difficile est de maintenir la vitesse de la chaîne (la fréquence du réseau) ainsi que sa tension (le niveau de tension) constants lorsque des perturbations imprévues peuvent se produire et déstabiliser cet équilibre.

Depuis la libéralisation du marché de l'électricité en Europe, chaque pays est pourvu d'un opérateur réseau indépendant chargé de l'exécution de cette mission.

Références

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