

PRODUCTION ET TRANSPORT D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

Niveau

Commentaires de Sylvio

- La leçon est proche de conversion de puissance électromagnétique, mais ne se résume pas à ça...

Bibliographie

- Electrotechnique PSI Brenders page 121
- Cours de Montrouge de Jérémy Neveu : [lien cliquable](#)
- poly d'électromagnétisme de Jérémy Ferrand
- Cours : <http://lnspe2.fr/Coursphys/CP02.pdf>

pré-requis

- Epaisseur de peau

Expériences

—

Table des matières

1 Production : la machine à courant continu ou plutôt la machine synchrone	2
1.1 Principe de fonctionnement	2
1.2 Bilan de puissance	2
1.3 Application et ordre de grandeur	2
2 Transport : la ligne haute tension	2
2.1 Intérêt du triphasé et de la haute tension	2
2.1.1 Haute tension	2
2.1.2 Le triphasé	2
2.2 Modèle électrocinétique et propagation	4
2.3 Caractéristiques techniques	4
3 De la centrale aux lignes électriques	4
3.1 De l'alternatif au continu	4
3.2 Du continu à l'alternatif	6
3.3 Transformateur	6

Introduction

Ici on va s'intéresser aux différentes étapes de production et de transport de l'énergie pour l'acheminer jusqu'à chez nous. C'est un enjeu important. En effet, la consommation annuelle d'électricité en France est de 473 TWh en

2019. Pour répondre à ce besoin il faut produire efficacement et transporter efficacement. Un ordre de grandeur à avoir en tête est que 10% de l'électricité est perdu dans le réseau

1 Production : la machine à courant continu ou plutôt la machine synchrone

Il vaut mieux faire la machine synchrone on ne va utiliser que de l'alternatif dans la suite et c'est comme ça que c'est fait dans les centrales nucléaires je crois. mais il ya moins de chose à dire ce qui ma fois n'est peut être pas un problème :) Voir leçon LP20

1.1 Principe de fonctionnement

1.2 Bilan de puissance

1.3 Application et ordre de grandeur

2 Transport : la ligne haute tension

Après la production d'énergie électrique, on peut se demander de quelle manière on transporte l'électricité jusqu'aux endroits où elle sera consommée. Tout le monde connaît les "lignes hautes tensions", mais quelles sont leurs caractéristiques ?

2.1 Intérêt du triphasé et de la haute tension

2.1.1 Haute tension

Dans les lignes électriques françaises, la tension est alternative. On appelle ligne haute tension une ligne électrique dans laquelle la tension est supérieure à 50 kV. En pratique, plus la distance à parcourir est grande, plus on augmente la tension.

Type de distribution	Voltage
Urbaine, départementale	63 à 90 kV
Inter-régionale	110 à 220 kV
Internationale	345 à 500 kV

Certains pays utilisent jusqu'à 1000 kV !

L'intérêt de la haute tension réside dans les pertes associées : la résistance des câbles des lignes étant fixées, les pertes joules s'écrivent de la forme : $P_J = RI^2$. A puissance transportée fixe $P = UI$, l'augmentation de U implique une diminution de I et donc un amoindrissement des pertes Joule. (tout réside dans le fait qu'on a une relation linéaire entre U et I mais une relation quadratique avec les pertes)

Un petit ordre de grandeur

$$\frac{P_J}{P} = \frac{RP}{U^2}$$

Pour un câble de diamètre 5cm d'une longueur de 50km et une puissance de 1GW, on a :

— Pour $U = 400kV$: $\frac{P_J}{P} = 0.2\%$

— Pour $U = 63kV$: $\frac{P_J}{P} = 8\%$

2.1.2 Le triphasé

Système triphasé : trois grandeurs x_1, x_2, x_3 forment un système triphasé équilibré de grandeurs sinusoïdales si elles s'écrivent sous la forme :

$$\begin{aligned}x_1(t) &= X\sqrt{2}\cos(\omega t + \phi) \\x_2(t) &= X\sqrt{2}\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \phi\right) \\x_3(t) &= X\sqrt{2}\cos\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \phi\right)\end{aligned}$$

Ces grandeurs ont la même RMS X et sont déphasées de $\frac{2\pi}{3}$.

Il existe 2 structures électriques triphasées : en triangle et en étoile. Néanmoins, on ne va les aborder ici.

Puissance dans le système triphasé :

On considère un système triphasé équilibré en tension et en courant : V_1, V_2, V_3 et I_1, I_2, I_3 s'écrivent comme écrit plus haut, avec des RMS V^{RMS} et I^{RMS} . On note φ le déphasage entre courant et tension. La puissance totale dans le système s'écrit :

$$P(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t)$$

avec $p_i(t) = V_i(t)I_i(t)$.

La somme de ces puissances nous donne : $P = 3V^{RMS}I^{RMS} \cos(\varphi)$.

Pour faire le calcul, il faut connaître ses formules trigo.

On remarque que P est constante. Si on n'avait que $p_1 = I_1V_1$, la puissance aurait une pulsation 2ω , ce qui pose des problèmes pratiques de fluctuation de couple dans les machines tournantes.

Avantage du triphasé : on va comparer les 2 modes de transport en terme de pertes joule.

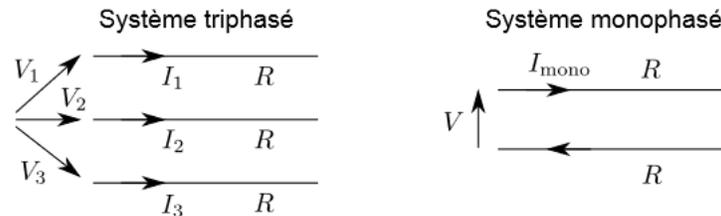


FIGURE 1 – Schéma et notation. Source : Jérémy Neveu.

On suppose que les lignes électriques que l'on compare sont constituées de conducteurs de même résistance R , et qu'elles transportent la même puissance P . Avec les mêmes notations qu'avant, on a pour le triphasé : $P = 3V^{RMS}I^{RMS} \cos \varphi$.

On veut transporter la même puissance P avec la même valeur efficace de tension V^{RMS} en monophasé. On a :

$$\begin{aligned} P(t) &= V_{mono}(t)I_{mono}(t) \\ &= \sqrt{2}V^{RMS} \cos(\omega t) \times \sqrt{2}I_{mono}^{RMS} \cos(\omega t + \varphi) \\ &= V^{RMS}I_{mono}^{RMS}[\cos(\varphi) + \cos(2\omega t)] \end{aligned}$$

On retrouve le terme en 2ω de la puissance instantanée...

Si on veut transporter la même puissance en moyenne, il faut donc que $I_{mono}^{RMS} = 3I^{RMS}$.

On compare alors les pertes joule :

$$P_{J,tri} = 3RI^{RMS^2}$$

Dans le système monophasé :

$$P_{J,mono} = 2RI_{mono}^{RMS^2} = 18RI^{RMS^2}$$

Les pertes sont nettement plus élevée dans le système monophasé! Mais le problème n'est en fait pas aussi simple...

Raffinement : il n'est en fait pas raisonnable de dimensionner de la même manière les câbles monophasés et triphasés. Pour transporter le même courant, les câbles monophasés doivent avoir une section trois fois plus importante, ce qui a pour effet de diviser par 3 la résistivité. Les pertes joule valent en fait :

$$P_{J,mono} = 6RI^{RMS^2}$$

Ainsi, les pertes joules restent supérieure dans le cas monophasé. Par ailleurs, le fait de tripler la section de la ligne monophasée demande 2 fois plus de métal que le triphasé!

L'arrivée au domicile en pratique : chaque domicile est relié à une seule phase du triphasé. Quelques entreprises demandant une forte puissance sont reliées au triphasé.

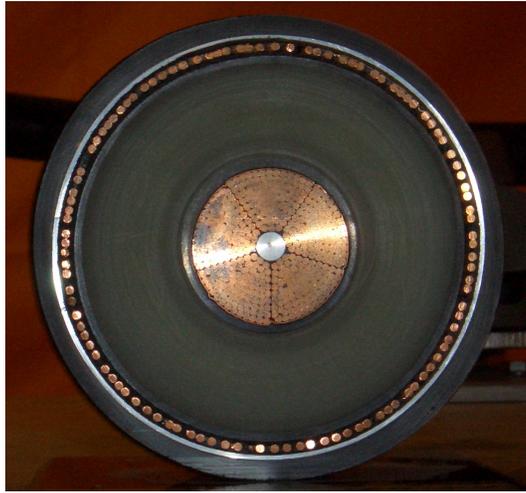


FIGURE 2 – Section d'une ligne en cuivre. Source : Par Wdwd — Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=10282825>

2.2 Modèle électrocinétique et propagation

On parle de "modélisation en pi" de la ligne électrique. On modélise la ligne comme un câble coaxial. Cf poly de Jérémy pour les calculs.

Cette modélisation n'est valable que pour des lignes courtes : en effet, nous avons implicitement fait l'hypothèse de l'ARQS. A 50Hz, la longueur d'onde vaut : $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2 \times 10^8}{50} = 4 \times 10^6 m$, en prenant la célérité des ondes dans un câble coaxial. On considère alors que la ligne est assez courte si elle est de longueur inférieure à 200 km (source : wikipédia), ce qui correspond à 5% de la longueur d'onde.

Au delà, il faut associer des "sections en Pi" en série.

2.3 Caractéristiques techniques

Les lignes hautes tension sont constituées d'aluminium, d'acier, d'alliage aluminium acier ou de cuivre. Le cuivre permet de réduire la section du câble, mais les câbles en aluminium sont quand même plus légers. La section de l'âme des lignes aériennes va jusqu'à 400 mm² selon les besoins.

Effet de peau : à cause de l'effet de peau dans les conducteurs en régime sinusoïdal, le courant se propage surtout en surface. Il n'est pas forcément intéressant d'augmenter la section des câbles dans des proportions démesurées.

Espacement des câbles :

Afin d'éviter l'apparition d'arcs électriques entre les conducteurs, il faut les espacer suffisamment (de l'ordre de 1 cm/kV d'après wikipédia).

Enfin, il est à noter que les lignes hautes tensions forment une capacité avec la Terre. Cette capacité n'est pas gênante en soi, mais afin que le courant se propageant dans les différents câbles perçoive la même impédance, il est nécessaire d'alterner les altitudes des câbles par rapport au sol.

3 De la centrale aux lignes électriques

3.1 De l'alternatif au continu

Si on présente une production électrique alternative, il vaut mieux présenter cette partie que la suivante.

Afin de convertir une tension alternative en une tension continue, on va appliquer des opérations de **lissage** et de **redressement**.

Première approche : redressement monoalternance

Il convient d'utiliser un dipôle asymétrique, comme une diode : lorsque la tension d'entrée est négative, la diode est bloquée. Il faut ensuite lisser le signal avec un circuit RC avec une grande constante de temps, par exemple.

Cet exemple n'est pas satisfaisant, on a une tension continue "par morceaux". Il introduit néanmoins le principe du redressement. En pratique, on utilise un pont de Graetz, pour effectuer un redressement double alternance.

Redressement double alternance :

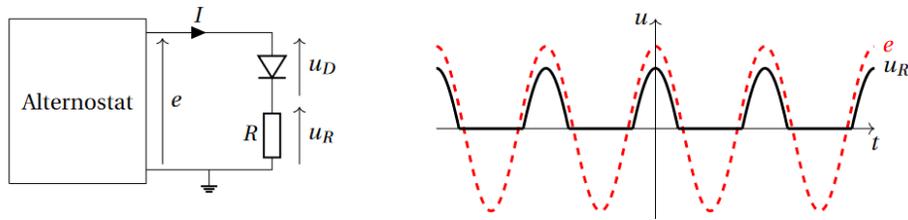


FIGURE 3 – Schéma de principe et oscillogramme du redressement monoalternance.

On aimerait redresser le courant aussi lorsqu'il est négatif :

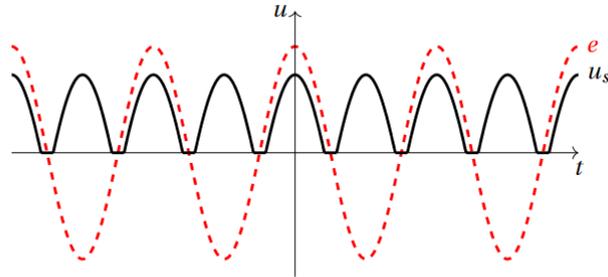


FIGURE 4 – Allure du signal après un redressement double alternance.

Pour ce faire, on utilise un pont de Graetz :

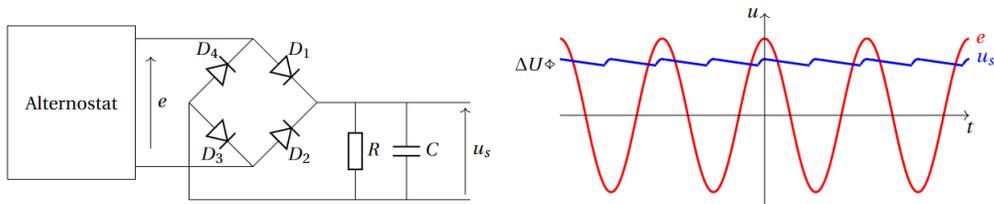


FIGURE 5 – Pont de Graetz, et lissage par une cellule RC.

Pour comprendre le fonctionnement du pont, commençons par se placer à un moment où $e > 0$. Dans ce cas, D_4 et D_2 sont bloquées, les autres diodes sont passantes. Faire un dessin du circuit équivalent avec des interrupteurs ouverts et fermés. La tension à l'entrée de la cellule RC vaut e .

A l'inverse, lorsque $e < 0$, D_1 et D_3 sont bloquées, les autres diodes sont passantes. Le courant dans la résistance est alors négatif. La tension à l'entrée de la cellule RC vaut donc $-e$.

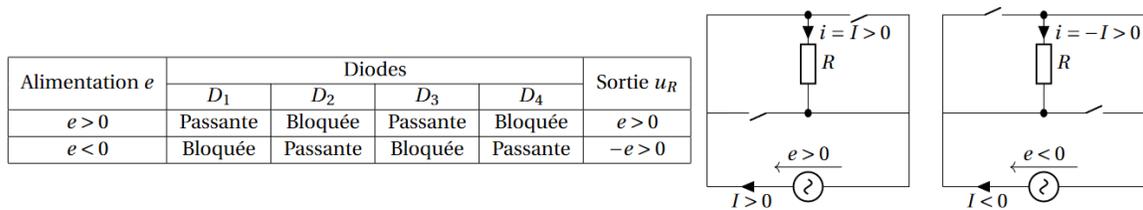


FIGURE 6 – Analyse de Graetz.

3.2 Du continu à l'alternatif

Le gros avantage de propager des tensions alternatives est celui de pouvoir utiliser un transformateur, qui génère de très hautes tensions et réduit les pertes. De plus, le triphasé ne peut exister que pour du courant alternatif.

Or, on l'a vu, les centrales nucléaires et les barrages fournissent des tensions continues. Comment obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue ? Un dispositif réalisant cela s'appelle un **onduleur**. Il existe plusieurs circuits onduleurs, plus ou moins complexes. Nous allons étudier ici un exemple simple : les oscillateurs à relaxation.

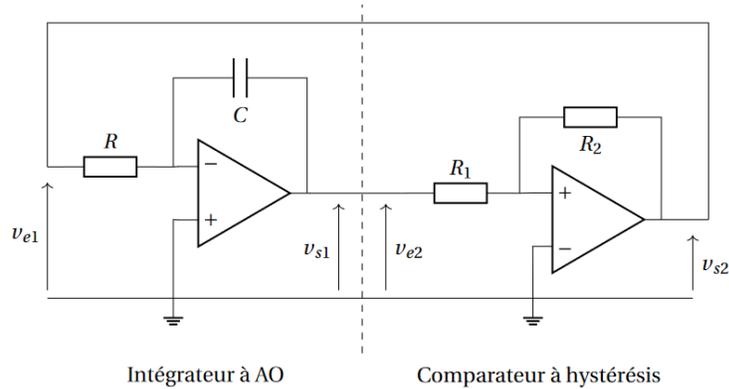


FIGURE 7 – Schéma de l'oscillateur à relaxation le plus simple.

Fonctionnement qualitatif : les oscillateurs à relaxation fonctionnent en 2 phases : une phase d'accumulation d'énergie, et une phase de décharge.

Ici, le comparateur à hystérésis fournit une tension de $\pm 15\text{ V}$, intégrée par l'intégrateur. Lorsque la tension intégrée change de signe et dépasse le seuil du comparateur, celui-ci commute et alors l'intégrateur intègre une nouvelle tension. Faire un dessin.

La charge correspond à l'accumulation d'énergie dans le condensateur.

Equations :

Pour l'intégrateur : on suppose l'AO parfait fonctionnant en régime linéaire. On a alors : $v_{e1} = Ri$ et $v_{s1} + u_C = 0$ par 2 lois des mailles. La relation courant tension aux bornes du condensateur est : $i_C = C \frac{du_C}{dt}$. Or, $i_+ = i_- = 0$, donc $i = i_C$. On en déduit :

$$v_{e1} = -RC \frac{dv_{s1}}{dt}$$

ou encore :

$$v_{s1} = \frac{-1}{RC} \int v_{e1} dt$$

Pour le comparateur : il fonctionne en régime saturé (rétroaction positive). La tension en sortie vaut $\pm V_{sat}$. Si $v_{s2} = +V_{sat}$, l'AO commute lorsque $v_{e2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat}$. C'est pareil avec signes - dans l'autre sens... Faire le dessin du cycle d'hystérésis.

Le bouclage impose $v_{s2} = v_{e1}$. On en déduit la période d'oscillations : $T = \frac{4R_1RC}{R_2}$. v_{s2} est un créneau, v_{s1} est un triangle.

On a créé une tension alternative à partir d'une tension continue !

Limitations : Les signaux créés sont rectangle ou triangle : un sinus serait mieux...

Autres exemples :

- Multivibrateur astable : comme avant mais avec un filtre RC à la place de l'intégrateur.
- Oscillateur commandé en tension, dont la fréquence dépend de la tension d'entrée.

Ce sont des oscillateurs qui ne délivrent pas de tensions sinusoïdales. En pratique, les montages sont plus complexes et font appel à d'autres composants (transistor bipolaire à grille isolée, transistor de puissance, thyristors, ne pas en parler parce que ca a l'air compliqué). On a toutefois vu le principe simplifié.

3.3 Transformateur

Poly de Montrouge...

Conclusion