fut remorqué à la vitesse de 105 kilomètres à l'heure, avec une consommation de 260 kilowats, le courant utilisé étant de 11.000 volts avec 95 périodes ; le démarrage d'un train de 133 tonnes se fit sans difficulté.

Ces essais montrent que la question des transports à grandes vitesses et à de longues distances est pratiquement résolue par l'électricité comme par la vapeur. Celle-ci serait même en état d'infériorité sur celle-là, pour une égale rapidité, sous le rapport du poids à déplacer pour un même effet utile. En se basant sur les résultats qu'a donnés l'automotrice de Siemens, M. Reischel a calculé que le poids mort nécessaire au transport d'un voyageur est de 1250 kilogr. par l'électricité, tandis qu'avec le matériel à vapeur il est de près de 1900 kilog., et cette supériorité est certainement accentuée avec la nouvelle locomotive, beaucoup plus légère.

P. Pierron,
Ingénieur,
ancien élève de l'Institut Electrotechnique Montefiore.

Etude de la variation du décalage d'un courant sur la force électromotrice, en fonction de la capacité du circuit.

Dans les transports de force à haut voltage et à longue distance, la capacité de la ligne, qui jusqu'à ces dernières années, n'entrait guère en ligne de compte, peut, avec ces nouvelles données, acquérir une influence considérable sur la marche des alternateurs et occasionner de graves accidents si l'on n'en a pas sérieusement tenu compte dans le calcul général de l'établissement de la transmission. C'est la capacité qui est la cause d'un courant à vide, décalé de 90 degrés en avant sur la force électromotrice ; c'est la capacité qui occasionne parfois, en certains points, des relèvements de voltage tout à fait anormaux, comme cela a été observé une des premières fois à l'usine Deptford, à Londres, par suite de conditions de résonnance avec la self du circuit ; c'est elle, enfin, qui produit au moment d'une rupture en charge ou en cas de fusion des fusibles, des courants de décharge très intenses qui peuvent brûler les tableaux de distribution.

Pour qu'on puisse, en effet, couper un circuit sans qu'il se produise la plus petite étincelle, il suffirait qu'au moment de la rupture, le courant soit nul ainsi que la force électromotrice, et que, pendant tout le temps que met la partie mobile de l'interrupteur à s'éloigner de la partie fixe, la différence de potentiel entre ces deux parties soit inférieure à celle qui pourrait faire naître un arc. En général, ces conditions ne sont pas remplies. En premier lieu, le courant n'est pas en phase avec la force électromotrice, de sorte que l'on ne pourrait opérer la rupture que, soit pour un courant nul, soit pour une force électromotrice nulle, ce qui donnerait dans le premier cas une décharge de capacité ; dans le second cas, un extra courant de self. Dans le cas général, on coupe à un instant quelconque, de sorte que les deux phénomènes se superposent, donnant ainsi des résultats variables.

L'étude que nous proposons aujourd'hui a pour but d'étudier la variation du décalage d'un courant sur la force électromotrice en fonction de la capacité de la ligne que nous prenons pour variable indépendante ; elle peut servir de préface à une étude complète des perturbations apportées par la capacité à la marche normale d'un transport de force.

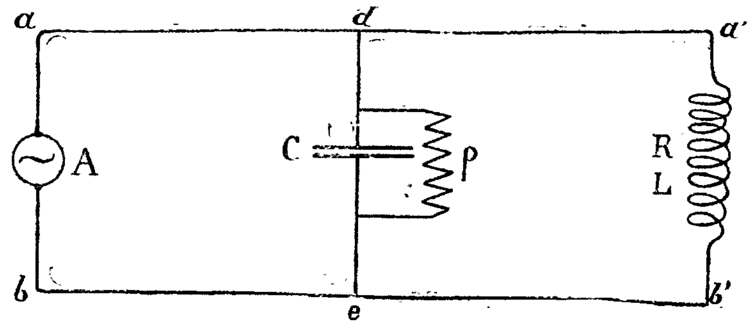

Fig. 1

Considérons un alternateur de force électromotrice **E** débitant un courant **I** dans un circuit contenant à la fois de la résistance, de la self-induction et de la capacité ; cette dernière étant fournie, par exemple, par une canalisation souterraine avec câbles concentriques, l'isolant entre câbles jouant le rôle de diélectrique ; ou encore plus simplement par les fils aériens à haute tension de la transmission.

Nous allons chercher comment varie le décalage φ du courant sur la force électromotrice, lorsque les conditions de la distribution restant les mêmes, on fait seulement varier la capacité de la ligne.

Pour plus de généralité et pour nous rapprocher des conditions de la pratique, nous supposerons que le diélectrique du condensateur n'est pas un isolant parfait ; il aura donc une certaine résistance ρ qui ne sera pas infinie ; ce sera la résistance d'isolement de l'installation considérée entre les conducteurs.

Pour mettre le problème en équation et éviter de trop longs calculs, nous aurons recours à la représentation des fonctions alternatives sinusoïdales, au moyen des quantités imaginaires. Nous supposons donc que la force électromotrice et le courant de l'alternateur peuvent se mettre sous la forme :

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{max} \sin \omega t$$
$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_{max} \sin(\omega t - \varphi)$$

Sur la figure 1, nous avons représenté en **A** un alternateur monophasé ; **aa'** et **bb'** sont les deux fils de distribution, dont les appareils d'utilisation ont été figurés entre **a'** et **b'** ; soit **R** la résistance et **L** la self-induction de ces appareils. En dérivation des deux fils de la ligne, nous avons placé en **C** la capacité de tout le réseau et comme le diélectrique présente des fuites, nous avons figuré en ρ, en dérivation de la capacité, la résistance d'isolement du diélectrique.

En remplaçant les diverses parties du circuit par les résistances imaginaires correspondantes, on trouve les résultats suivants où **i** est égal à $\sqrt{-1}$.

Le circuit d'utilisation **RL** est équivalent à la résistance imaginaire : $\mathbf{R} - \mathbf{i}\mathbf{L}\omega$.

Le condensateur **C** est équivalent à $\frac{i}{C\omega}$.

Il s'agit donc de trouver la résistance combinée d'un circuit trois fois dérivé ayant pour résistances de chaque bras :

$$R - i L\omega, \quad \rho, \quad \frac{i}{C\omega}$$

Nous n'avons qu'à traiter la question comme en courant continu ; nous aurons, en appelant **X** la résistance cherchée :

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{R - i L\omega} + \frac{1}{\rho} + \frac{1}{\frac{i}{C\omega}}$$

$$\frac{1}{X} = \frac{\rho \frac{i}{C\omega} + (R - i L\omega)\frac{i}{C\omega} + (R - i L\omega)\rho}{(R - i L\omega)\rho \frac{i}{C\omega}}$$

d'où : $$X = \frac{\rho \frac{L}{C} + i \frac{\rho R}{C\omega}}{\frac{L}{C} + \rho R + i\left(\frac{R+\rho}{C\omega} - \rho L\omega\right)}$$

$$X = \frac{\left(\rho \frac{L}{C} + i \frac{\rho R}{C\omega}\right)\left[\frac{L}{C} + \rho R - i\left(\frac{R+\rho}{C\omega} - \rho L\omega\right)\right]}{\left(\frac{L}{C} + \rho R\right)^2 + \left(\frac{R+\rho}{C\omega} - \rho L\omega\right)^2}$$

En mettant le numérateur sous la forme **A — Bi** on a de suite pour la tangente de l'angle de décalage :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{B}{A}$$

En faisant les calculs, on trouve finalement :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega - (R^2 + L^2\omega^2) C\omega}{R + \frac{R^2 + L^2\omega^2}{\rho}}$$

Si nous construisons la courbe représentée par cette équation en portant les capacités en abcisses et **tg φ** en ordonnées, nous trouvons une droite (fig. 2) passant par :

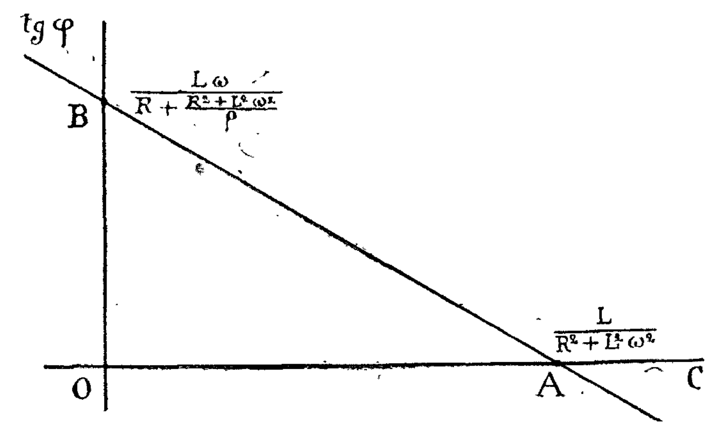

Fig. 2

$$OA = \frac{L}{R^2 + L^2\omega^2} \qquad OB = \frac{L\omega}{R + \frac{R^2 + L^2\omega^2}{\rho}}$$

Etudions comment varie **tg φ**.

Lorsque la capacité est nulle, ce qui a lieu sensiblement pour une tranmission aérienne à très bas voltage, le décalage est donné par :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R + \frac{R^2 + L^2\omega^2}{\rho}}$$

ρ représente alors la résistance d'isolement de l'installation, considérée entre les deux lignes ; le décalage est alors maximum.

A mesure que la capacité augmente, le décalage diminue et devient nul pour :

$$C = \frac{L}{R^2 + L^2\omega^2}$$

telle est la condition que l'on devra réaliser, si l'on veut avoir un courant en phase avec la force électomotrice.

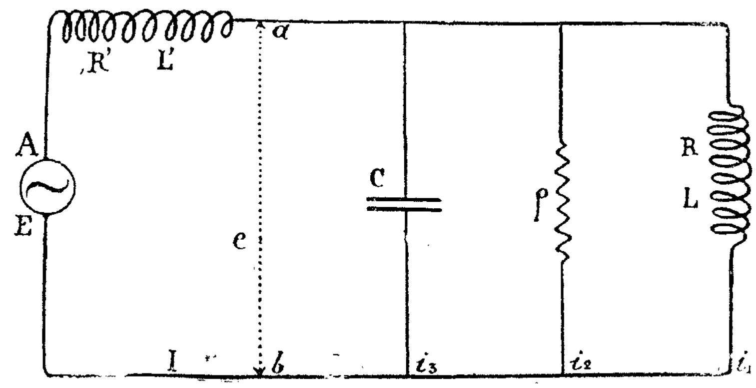

Fig. 3

Si la capacité devient supérieure à cette valeur, le sens du décalage change; le courant se met en avance sur la force électromotrice, mais dans la pratique ce cas ne se rencontre guère; la self-induction des transformateurs, des moteurs à champ tournant et de la ligne elle-même, étant bien supérieure à la capacité de la transmisson ou même des moteurs synchrones surexcités.

Dans les calculs précédents, nous n'avons pas tenu compte de la résistance et de la self-induction de l'alternateur qui auraient donné lieu à des calculs plus longs. Nous allons exposer maintenant une solution géométrique de la question qui permet d'en tenir compte.

Nous conserverons les mêmes notations que ci-dessus et nous désignerons (fig. 3) par **R'** et par **L'** la résistance et la self des générateurs et d'une manière générale de tous les appareils de mesure ou de service situés avant ceux d'utilisation. Nous désignerons par i_1, i_2, i_3 et **I** les valeurs instantanées des courants circulant dans les diverses branches du réseau. Nous prendrons comme origine des phases des grandeurs sinusoïdales considérées, la phase de la différence de potentiel **e** entre les deux points **a b** situés après les appareils générateurs, mais avant ceux d'utilisation. Nous ne connaissons pas la valeur efficace e_{eff} de **e** ; nous porterons donc une longueur arbitraire **OA** représentant e_{eff} sur l'épure, mais à la fin des constructions, nous trouverons un vecteur représentant une grandeur connue qui nous fixera l'échelle du dessin et par suite e_{eff}.

Si nous faisons en dessous de **OA** un angle β tel que :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{L\omega}{R}$$

et si nous portons sur la droite ainsi tracée une longueur **OB** telle que :

$$\mathbf{OB} = \frac{e_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + L^2\,\omega^2}} = i_{1\,\text{eff}}$$

nous aurons représenté en grandeur et en phase le courant i_1.

Le courant i_2 étant en phase avec **e**, nous portons sur **OA** une longueur **OC** telle que :

$$\mathbf{OC} = \frac{e_{\text{eff}}}{\rho} = i_{2\text{eff}}$$

Enfin le courant i_3 décalé à 90° en avant sur la force électromotrice sera représenté par **OD** tel que :

$$\mathbf{OD} = e_{\text{eff}}\,C\omega = i_{3\,\text{eff}}$$

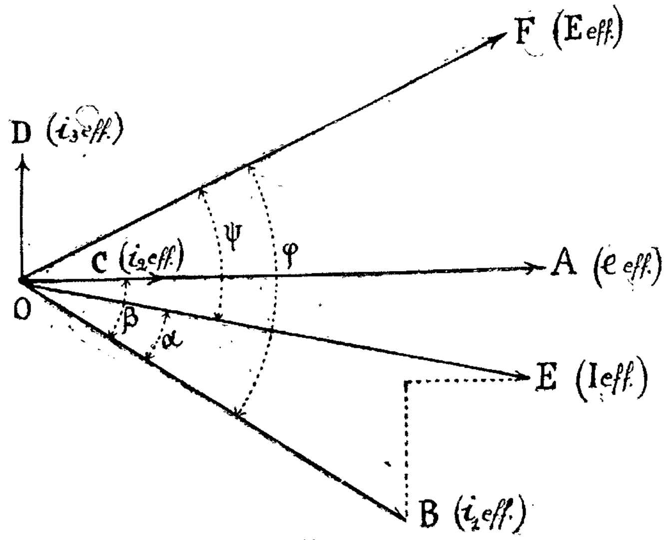

Fig. 4

Le courant de ligne **I** s'obtient en faisant la résultante géométrique de $i_1\ i_2\ i_3$; on trouve ainsi **OE**.

Si nous faisons en dessus de **OE** un angle Ψ tel que :

$$\text{tg}\,\Psi = \frac{L'\,\omega}{R'}$$

et si nous portons sur la droite ainsi considérée une longueur **OF** telle que :

$$\mathbf{OF} = \mathbf{OE}\,\sqrt{R'^2 + L'^2\,\omega^2}$$

nous aurons représenté en grandeur et en phase la force électromotrice **E** de l'alternateur. Mais cette longueur **OF** = **E** est une des données du problème puisque l'alternateur est connu ; il s'ensuit que l'échelle du dessin est fixée et que la longueur **OA** dont nous sommes partis n'est plus arbitraire.

On voit enfin sur la figure que le décalage φ cherché du courant i_1 sur la force électromotrice **E** est la somme des deux angles Ψ et α.

$$\varphi = \Psi + \alpha$$

La construction précédente donne donc tous les éléments de la question et la discussion de l'épure donnerait les mêmes conclusions que la solution analytique.

J. Courbier,

Ancien élève de l'Ecole Polytechnique
et de l'Ecole Supérieure d'Electricité de Paris
Licencié en Droit.

Réflexions sur les études préliminaires à l'aménagement des chutes d'eau

(*Suite*).

II. — Avec quelle précision peut-on connaître la puissance des chutes d'eau?

1° Vue d'ensemble.

L'équation : $\mathbf{QH} = \mathbf{K}^2$ (1)

entre le débit, la hauteur de chute et la puissance nous donne entre les variations finies et absolues des paramètres qu'elle rapproche l'équation :

$$\Delta(K^2) = H.\Delta Q + Q\Delta H \qquad (2)$$

et, entre les variations relatives des mêmes éléments,

$$\frac{\Delta\,(K^2)}{K^2} = \frac{\Delta\,Q}{Q} + \frac{\Delta\,H}{H} \qquad (3)$$

équation qui lie, par conséquent, l'erreur relative à craindre sur le résultat à celles qui affectent les mesures des éléments. Elle montre que, pour une erreur déterminée, pour un tant pour cent de perte préalablement consenti, l'erreur permise sur la hauteur devra être d'autant moindre que celle qu'on aura commise sur le jaugeage aura été plus grande, et inversement.

Or, des deux paramètres composants, débit et hauteur de chute, le plus difficile à évaluer est, de beaucoup, le débit ; il a donc le plus de chances de troubler les résultats, quoiqu'on fasse, aussi ne saurait-on s'entourer de trop de soins pour son appréciation.

2° Précision du jaugeage.

Sans refaire ici la théorie du jaugeage, analysons sommairement cependant de quels éléments se compose cette quantité.

Pour plus de simplicité, supposons que la section transversale du cours d'eau sur lequel nous spéculons soit rectangulaire : cette hypothèse suffit à accuser les tendances des variations.

m étant le coefficient de contraction de la nappe d'écoulement, **1** le poids spécifique de l'eau, **h** l'épaisseur en mètres de la dite nappe, **L** la largeur en mètres du cours d'eau, **U** la vitesse moyenne d'écoulement en mètres, nous savons que le débit en litres (ou en kilogrammes) est, dans le cas du régime permanent qu'on suppose toujours réalisé :

$$Q = m h L U . 1000 \qquad (4)$$

Nous en tirons :

$$\frac{\Delta\,Q}{Q} = \frac{\Delta\,h}{h} + \frac{\Delta\,L}{L} + \frac{\Delta\,U}{U} \qquad (5)$$

3° Vitesse déduite de la charge.

Des trois éléments, largeur du cours d'eau, épaisseur de la lame déversante et vitesse, c'est le dernier qui est le plus difficile à mesurer. La vitesse résulte, en effet, de la combinaison d'une mesure de longueur avec une mesure de temps.