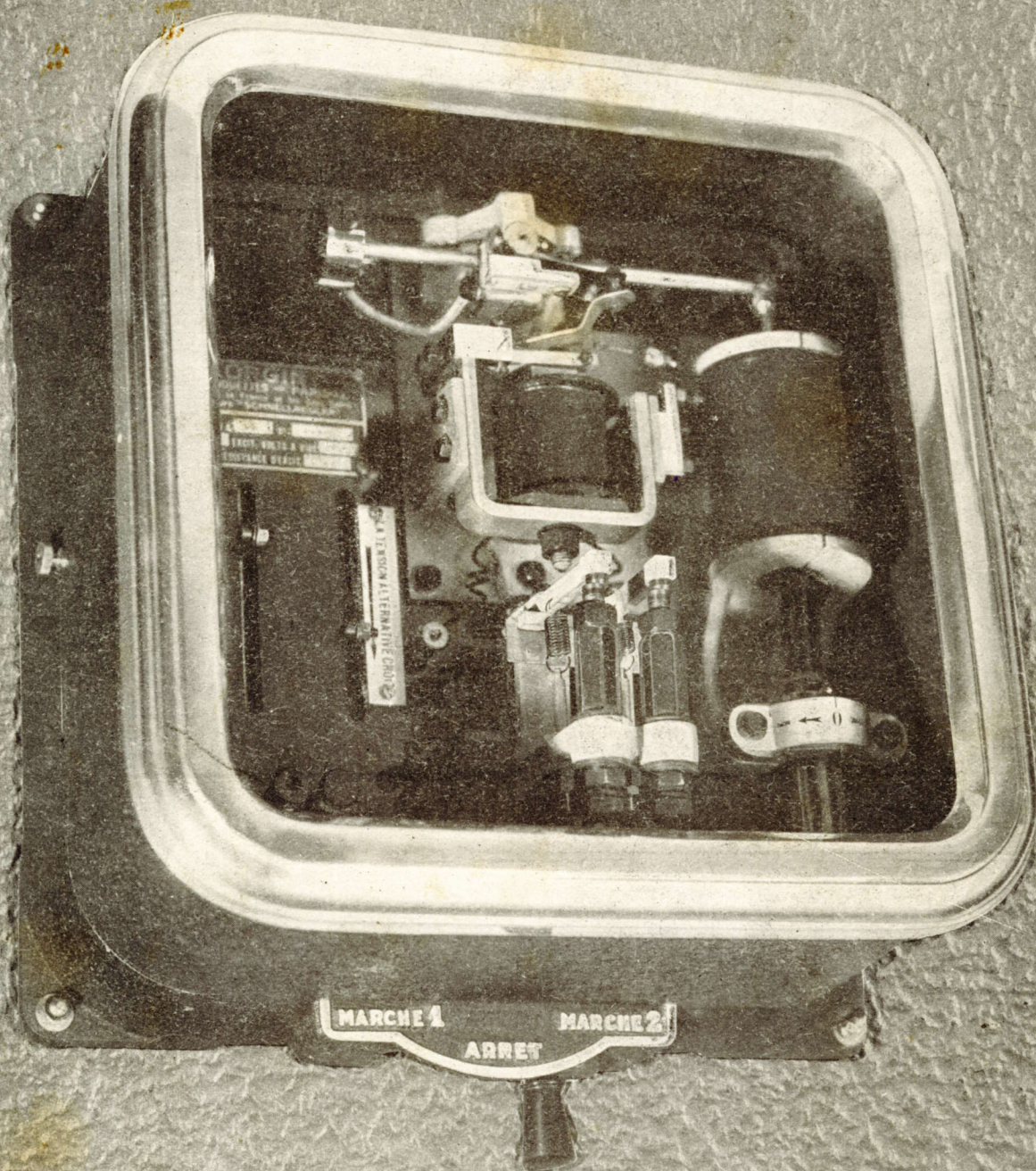




GEORGIN & C^{IE}
CONSTRUCTEURS DE RÉGULATEURS AUTOMATIQUES
69-71, Rue Desnouettes - PARIS XV^e

DBH Sarl 33 Les Chênes
88340 Le Val d'Ajol
Siret 510 554 835 00015
Tél. 06.2346.1385 beaume.d@wanadoo.fr

LES RÉGULATEURS DE TENSION POUR ALTERNATEURS

ÉTUDE TECHNIQUE

AVANT-PROPOS.

Lisez quelques notices techniques décrivant des appareils ; généralement le constructeur vous annoncera que, « par les « moyens judicieux, une étude très poussée, un outillage particulièrement étudié, il a réalisé un appareil qui donne satisfaction, « qui ne connaît pas les pannes, enfin que la solution qu'il a adoptée est la seule donnant de bons résultats. »

Vous vous félicitez donc d'être tombé sur le seul constructeur ayant fabriqué un appareil qui marche. Mais si vous avez entre les mains une notice d'un de ses concurrents, il vous dira, avec autant d'assurance, que seule sa solution peut fonctionner et que les malheureux constructeurs qui se sont attachés à une autre perdent leur temps et font fausse route.

A la suite de la lecture, d'un certain nombre de notices, le client éventuel ne se trouve donc pas plus éclairé car on lui offre à des prix très différents des appareils qui sont, aux dires des constructeurs, tous parfaits ; la commande finit alors par échoir au moins cher ou au représentant le plus persuasif.

Nous allons donc, dans la présente notice, rompre avec la tradition, pour étudier objectivement le problème de la régulation et de faire bien connaître ainsi le sujet à nos clients éventuels et leur permettre de juger les appareils qui leur sont offerts en toute connaissance de cause et impartialement.

L'ÉVOLUTION DES RÉGULATEURS.

Les régulateurs automatiques de tension qui sont, en somme, à peu près aussi anciens que les machines qu'ils règlent, ne se sont pas développés parallèlement à la même allure ; ils donnent l'impression d'avoir été longs à évoluer et à trouver une forme satisfaisante. Nous attribuons cette évolution lente au peu de demandes de la part de la clientèle, les constructeurs n'ont pas été attirés par ce faible débouché commercial et la complexité des organes et des fonctions de ces appareils en ont rebuté un certain nombre.

Il n'existe peu ou pas de bibliographies concernant les régulateurs de tension, le constructeur envisageant leur fabrication doit donc faire, par ses propres moyens, une étude longue, laborieuse, nécessitant beaucoup de temps et des machines puissantes consommant beaucoup de courant.

De cette diffusion restreinte et du manque de bibliographie, il résulte que ces appareils, quoique très intéressants aux points de vue physique et mathématique, sont relativement peu connus des « Électriciens. »

Ceci a pour résultat de créer de fréquents malentendus entre le client et le constructeur. Les clients exigent des garanties de rapidité d'action et quelquefois nous avons eu des cahiers des charges nous imposant « qu'aucune variation de tension ne soit visible quelle que soit la perturbation ou la charge demandée à l'alternateur. »

Nous avons dû répondre à notre client que cela était matériellement impossible ; nous le démontrerons, du reste, dans les lignes qui vont suivre.

Nous pensons donc rendre service à nos clients en leur exposant d'une façon impartiale ce que l'on est en droit d'attendre de ces appareils, mais où se limite également leurs possibilités. Nous prions toutefois nos clients de se méfier des appareils trop « bons » et qu'ils n'hésitent pas à demander au constructeur un essai dans leurs conditions d'emploi particulières, car certains appareils sont absolument inopérants dans certaines conditions défavorables.

ÉTUDE TECHNIQUE

Il y a deux fonctions bien distinctes à envisager dans la marche des régulateurs. En premier lieu le régime stable, c'est-à-dire pendant les périodes où la charge reste constante, en second lieu le régime troublé, c'est-à-dire quand la charge est modifiée lentement ou instantanément. Il est évident que c'est à peu près uniquement sur ce second point que portera notre étude.

ÉTUDE D'UN ALTERNATEUR EN RÉGIME TROUBLÉ.

Pour la commodité de notre étude, nous examinerons la marche d'un alternateur tournant à vitesse sensiblement constante, quelle que soit la charge, comme c'est généralement le cas dans la pratique courante.

Admettons donc que notre alternateur est à vide, à sa vitesse normale et donne sa tension normale, l'excitatrice possède un seul rhéostat d'excitation agissant sur son champ (figure 1). Au moyen d'un interrupteur S nous pouvons mettre l'alternateur en pleine charge (charge partiellement réactive comme c'est le cas généralement dans la pratique).

Fermions donc S et examinons les appareils de mesures ; d'une façon rigoureusement instantanée et correspondant à la fermeture de S, la tension indiquée par le voltmètre a baissé, puis elle continue à baisser plus lentement ; nous traduisons ceci par la courbe de la figure 2. La portion verticale AB, qui est la chute instantanée, est due à la réactance de fuite de l'alternateur, puis la portion BC où le temps cette fois intervient, est l'effet assimilable à la réaction d'induit des génératrices.

Il est dû à la composante réactive en retard de la charge. Si l'on n'agissait pas sur le rhéostat d'excitatrice, la tension continuerait à baisser pour atteindre, asymptotiquement, une valeur très basse (portion de courbe en pointillé).

De ce premier essai, il résulte que la branche verticale AB, de la courbe de chute de tension a lieu en un temps nul, le régulateur ne peut donc la supprimer, puisque c'est cette chute même qui déclenche son mouvement, ou alors il faudrait construire un appareil qui « devinerait » la perturbation et on conçoit évidemment que ce n'est pas chose possible.

Un régulateur aura donc, d'après ce que nous venons de voir, d'autant plus d'efficacité que son point d'intervention, porté sur la courbe 2, se situera près de B ; un régulateur vraiment rapide a son point d'action situé, à un infiniment petit près, en B.

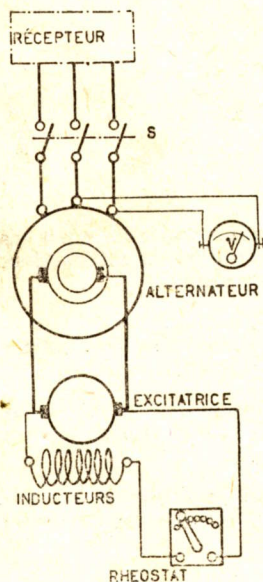


Figure 1

RÉGLAGE MANUEL.

Reprenons notre essai de mise en charge, mais en faisant régler la tension manuellement par un opérateur ; nous admettons que cet opérateur est doué d'une très grande virtuosité quant à ces manœuvres.

Dès qu'il voit le voltmètre baisser, il manœuvre immédiatement le rhéostat d'excitation en le poussant à fond, mettant toutes les résistances en court-circuit. La tension remonte, mais dès que le voltmètre indique une valeur proche de la valeur de réglage, il ramène la manette du rhéostat pour insérer les résistances (sans cette précaution la tension croîtrait trop), puis il cherche par tâtonnements le plot correspondant à la tension normale.

Si l'on traduit par la courbe (figure 2) ce réglage manuel, on obtient :

Branche ABC : chute de tension.

Branche CD : montée de la tension.

Branche DE : oscillations autour du point de réglage définitif.

Cet essai nous révèle que malgré la mise en court-circuit du rhéostat d'excitation (on ne peut du reste rien faire de plus pour faire monter la tension) le temps t sur l'axe des temps compris entre le point A et le point D nécessaire pour ramener la tension à sa valeur normale n'est pas négligeable.

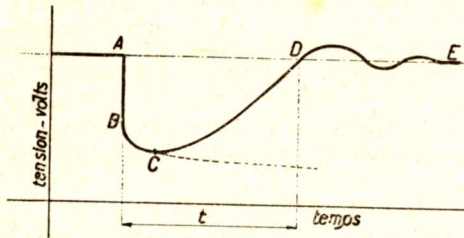


Figure 2

Voyons maintenant à quoi est dû ce retard.

Pour compenser la chute de tension due aux réactances de fuite de l'alternateur il faut augmenter le flux émis par la roue polaire, pour cela, augmenter la tension de l'excitatrice qui l'alimente et pour faire croître cette tension il faut augmenter l'intensité du courant circulant dans les inducteurs de l'excitatrice.

Nous avons en somme, pour ramener la tension à sa valeur normale, fait passer la résistance R_0 du circuit inducteurs-rhéostat, à une nouvelle valeur plus faible R_1 , l'équation qui donne le courant dans ce circuit est pour

$R_0, I_0 = \frac{U}{R_0}$ et pour $R_1, I_1 = \frac{U}{R_1}$ on remarque que le temps n'y entre pas, parce que l'on a l'habitude d'étudier les circuits électriques une fois le courant établi, et généralement la période d'établissement est un infiniment petit. Ici nous sommes dans un cas différent, car les circuits envisagés (inducteurs et roue polaire) sont des selfs considérables et ce qui nous intéresse c'est précisément la période transitoire. Nous devons donc envisager l'équation dans son entier, qui est :

$$I = \frac{E}{R_0} \left(1 - e^{-\frac{R_0 t}{L}} \right)$$

Le terme $\frac{L}{R}$ que l'on nomme constante de temps du circuit est homogène à un temps, car la self L a les dimensions d'une longueur, R celles d'une vitesse. Le temps t que mettra I_0 à prendre sa nouvelle valeur I croîtra avec la self L , cette self dépend des caractéristiques des alternateurs envisagés, mais quoi que l'on fasse le temps se chiffrera toujours par un certain nombre de secondes.

La conclusion de notre essai est qu'après une perturbation importante sur un alternateur, même si l'on agit instantanément sur le rhéostat d'excitation, il subsistera dans la tension fournie par l'alternateur un creux A-B-C-D- représenté sur la courbe 2, qu'il est impossible de supprimer dans l'état actuel de la technique des alternateurs, nous disons bien des alternateurs et non pas des régulateurs.

Il n'est donc pas possible d'imposer une durée de perturbation minimum au constructeur de régulateurs, de même qu'il n'est pas plus raisonnable de la part de constructeur d'annoncer que son appareil rétablit la tension, après une perturbation en x dixièmes de seconde et de présenter des courbes parfaitement rectilignes faites avec un voltmètre enregistreur, dont l'allure dépend de l'alternateur et des conditions d'essai.

Il est évident qu'un opérateur ayant les qualités de l'opérateur idéal envisagé ci-dessus est une fiction, mais elle nous a permis d'analyser succinctement la manœuvre qu'aura à faire un régulateur de tension lors de la mise en charge brutale d'un alternateur.

S'il s'était agi d'une décharge brusque au lieu d'une charge nous aurions trouvé la même allure de courbe, mais en sens inverse et une surtension aurait fait place à la baisse de tension.

MODE D'ACTION D'UN RÉGULATEUR DE TENSION

Nous avons vu que, dans la perturbation du régime d'un alternateur, une mise en pleine charge par exemple, il faut que le régulateur agisse le plus rapidement possible, c'est-à-dire au voisinage de B.

Sa rapidité dépend de plusieurs facteurs qui sont :

- l'inertie des masses à accélérer,
- la distance à parcourir,
- le couple de l'organe moteur.

Supposons que notre régulateur agisse très vite et au maximum des possibilités de l'excitatrice, la tension remonte donc rapidement, mais si la portion de la courbe CD coupe la droite OX (figure 3), à ce moment le régulateur agit pour la faire baisser, du fait de la self-induction élevée des circuits inducteurs, elle continue à croître puis elle décroît, retransverse l'axe OX et

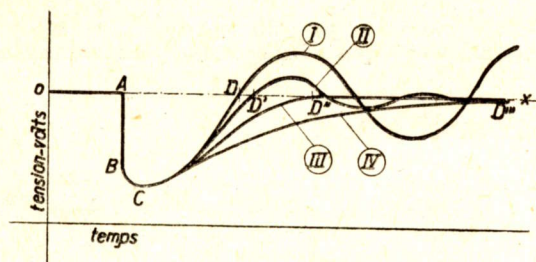


Figure 3

Courbe I : asservissement insuffisant, oscillations non amorties.

Courbe II : asservissement meilleur, oscillations rapidement amorties.

Courbe III : asservissement parfait, retour à la tension sans oscillations.

Courbe IV : pas de surréglage, temps de perturbation trop long.

l'on démontre mathématiquement, par un développement malheureusement trop long pour trouver place ici, que si l'asservissement ou l'amortissement du régulateur est insuffisant, lui conférant, en somme, une trop grande rapidité, par rapport au temps que l'alternateur met à s'exciter, on obtient une fonction périodique non amortie, qui provoque des oscillations de la tension avec d'énormes amplitudes autour de l'axe OX (courbe I). Il faut donc au régulateur un asservissement ou un amortissement suivant le type d'appareil qui retarde le réglage.

En examinant les diverses courbes de réglage de la figure 4 on constate qu'il faut faire un compromis entre les inconvénients et les qualités suivantes :

la tension remonte très rapidement, inconvénient : une série d'oscillations amorties apparaît (courbe II, figure 3),

la tension remonte lentement, la courbe vient se confondre asymptotiquement à l'axe OX, inconvénient : la durée totale du rétablissement de la tension est allongée (courbe III, figure 3).

SURRÉGLAGE

En étudiant la régulation manuelle d'un alternateur nous avons vu qu'il était nécessaire, pour diminuer le temps compris entre A et D, de mettre lors de l'application de la charge le rhéostat en court-circuit pour faire croître rapidement la tension. Cette manœuvre nous a paru naturelle, car tout électricien la fait intuitivement. Il n'en est pas de même pour les régulateurs et pour nous rendre compte de son importance, faisons l'essai suivant :

Repérons le plot du rhéostat d'excitation correspondant à la pleine charge, puis l'alternateur étant à vide, mettons-le en pleine charge ; pour ramener la tension à sa valeur normale, nous mettrons immédiatement la manette du rhéostat sur le plot repéré. Nous voyons monter la tension assez rapidement tout au début, puis croître de plus en plus lentement, en principe en un temps infini, mais l'écart final entre la tension obtenue et la tension de réglage étant faible, on peut admettre, en pratique, que la durée de la perturbation est, par cette manœuvre, 4 à 5 fois plus longue que lors de l'utilisation du surréglage (courbe IV, figure 3).

QUALITÉS DES RÉGULATEURS.

Nous voyons déjà apparaître les principales qualités que doit avoir un régulateur :

Il doit être rapide, c'est-à-dire intervenir promptement après la charge pour ne pas laisser la chute de tension se développer. Pour cela, il faut qu'il ait peu d'inertie, un fort couple moteur, un parcours réduit à effectuer.

Il doit être exact ; pour ramener la tension exactement à la valeur de régime.

Il doit être sensible ; pour réagir aux faibles perturbations.

Il doit avoir un amortissement ou un asservissement efficace, pour éviter la production d'oscillations, et il doit même posséder, si c'est possible, un amortissement pouvant être modifié par le client lui-même pour l'ajuster aux caractéristiques de son alternateur.

Enfin il doit provoquer automatiquement le surréglage au maximum des possibilités de l'alternateur.

DIVERS TYPES DE RÉGULATEURS QUE L'ON TROUVE SUR LE MARCHÉ EUROPÉEN.

Si nous les examinons par ordre d'ancienneté c'est certainement par le régulateur à servo-moteur qu'il faut commencer.

La première idée venant à l'esprit de l'ingénieur qui doit construire un appareil automatique est celle qui consiste à calquer le mouvement de l'opération réalisée manuellement.

Voici donc le premier régulateur :

1° **Régulateur à servo-moteur électrique.** — Un relais de tension tient place de l'œil de l'opérateur regardant le voltmètre ; et un servo-moteur électrique actionnant le rhéostat remplace le bras et la main de ce même opérateur. La coordination des mouvements de ces deux appareils est obtenue par des relais ou des contacteurs plus ou moins complexes.

Mais un appareil ainsi conçu est voué à l'échec, il est lent, a une inertie considérable et pas d'asservissement ; il oscille donc longuement autour de son point de stationnement, trouvant difficilement une position d'équilibre.

Certains constructeurs avaient très perfectionné ce système, mais l'apparition de nouveaux types d'appareils plus rapides et plus stables l'ont fait tomber dans l'oubli. Seul a subsisté un type à servo-moteur à pression d'huile parfaitement établi. Mais la complexité de ses organes et leur nombre exige une réalisation mécanique impeccable et évidemment coûteuse.

2° Appareil à action directe.

C'est l'équipage voltmétrique qui déplace lui-même en fonction de la tension le frotteur du rhéostat. On voit immédiatement que deux conditions contradictoires s'affrontent, avoir une sensibilité élevée et un couple moteur important pour déplacer rapidement la manette du rhéostat. Il faut donc faire un compromis entre ces deux conditions et il s'en trouve toujours une quelque peu sacrifiée.

3° Régulateur à contacts vibrants.

Dans ce type d'appareil, ce qui surprend tout d'abord un électricien non averti, c'est qu'il ne comporte pas de cadran de rhéostat, par conséquent, pas de plot, pas de curseur, enfin rien de ce qui donne habituellement l'idée de résistances variables.

Ici l'on crée artificiellement la résistance variable en mettant en court-circuit le rhéostat d'excitation (dont la manette est immobilisée) à une cadence rapide mais variable.

Pour bien comprendre le processus nous allons recourir aux « vieilles » analogies hydrauliques.

Sur le schéma ci-contre (figure 4) nous représentons un tuyau ABC alimenté à son extrémité A par un réservoir d'eau sous pression, ce tuyau peut laisser écouler une veine liquide en D, dont l'importance du débit varie entre un maximum et un minimum suivant que la soupape B est ouverte ou fermée. T est une sorte de by-pass à faible débit.

Nous admettons dans notre raisonnement que pour des raisons de construction la soupape ne peut occuper que deux positions toute ouverte ou toute fermée. Pour obtenir des débits moyens, il suffit de l'ouvrir ou de la fermer très rapidement ; toutefois pour que la veine ne soit pas pulsatoire on suppose la conduite C posséder une grande élasticité.

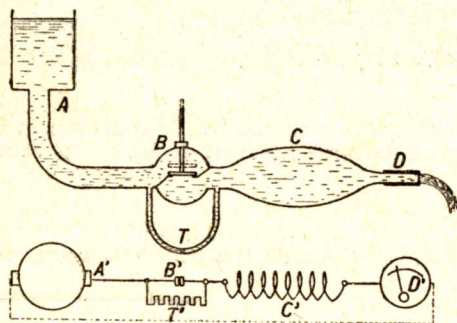


Figure 4

Quand les périodes de fermeture de la soupape sont longues par rapport aux périodes d'ouverture le débit est faible. Dans le cas inverse le débit est fort, la fréquence restant constante.

Si nous assimilons le tuyau t au rhéostat d'excitation, la soupape P au contact d'un relais mettant ce rhéostat en court-circuit, nous voyons que la résistance apparente de l'ensemble (rhéostat-contact) pourra prendre toutes les valeurs comprises entre la résistance totale du rhéostat et le court-circuit, suivant que le relais aura une vibration telle que les périodes de fermeture de ses contacts seront longues ou courtes par rapport aux périodes d'ouverture tout comme dans l'analogie hydraulique.

C'est la self des inducteurs qui joue alors le rôle de tuyau élastique et absorbe les pulsations du courant et lui donne une allure continue.

Nous verrons, dans la description détaillée de notre système, comment se produisent les vibrations donnant un réglage satisfaisant.

Ce dernier système décrit a comme avantages :

1° Une inertie très faible puisqu'il suffit d'un simple relais dont l'armature peut-être très légère pour avoir le maximum ou le minimum de résistance ;

2° Un parcours de l'organe de réglage très faible (quelques dixièmes de millimètres) qui est l'ouverture des contacts du relais vibreur : il n'est jamais à l'arrêt puisqu'il vibre constamment, il est donc toujours prêt à intervenir, c'est en somme un avantage un peu analogue à celui des régulateurs de vitesse dits « luvoyants ».

Tandis que dans les régulateurs possédant plots et curseurs, il y a toujours au moins une dizaine de centimètres à parcourir, car le nombre de plots doit être assez grand, si l'on en réduit le nombre il arrive que pour certaines valeurs de la charge le curseur cherche une position intermédiaire entre deux plots et se met à osciller entre eux deux sans pouvoir se stabiliser. L'ensemble de tout le système de réglage ayant une assez forte inertie, cette oscillation est forcément lente et apparaît dans la tension alternative sous forme d'une pulsation désagréable du flux lumineux des lampes.

Pendant les périodes de charge stable, le curseur stationne sur un plot, lors d'une perturbation il doit démarrer, accélérer, puis s'arrêter sur un autre plot.

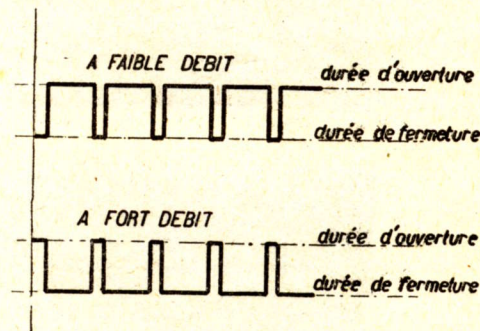


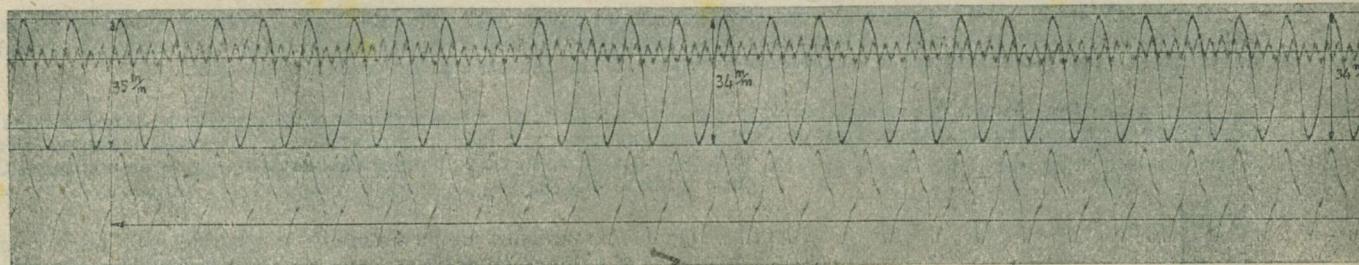
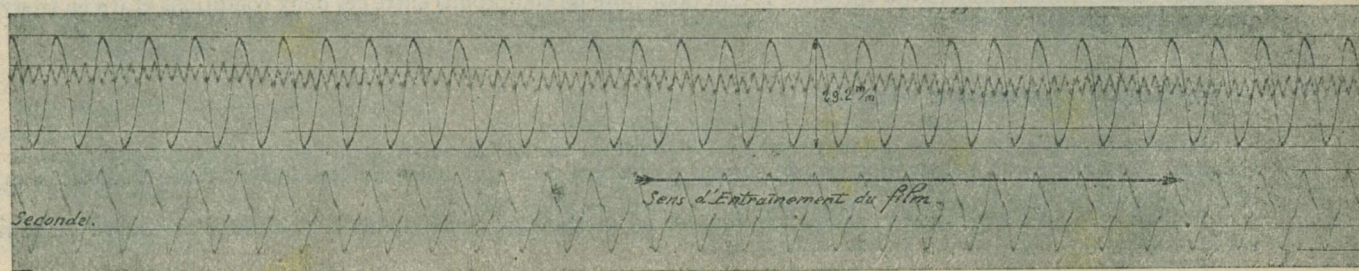
Figure 5

(durée d'ouverture du contact B')

Diagramme supérieur : faible débit de l'excitatrice, alternateur à vide.

Diagramme inférieur : fort débit de l'excitatrice, alternateur en charge.

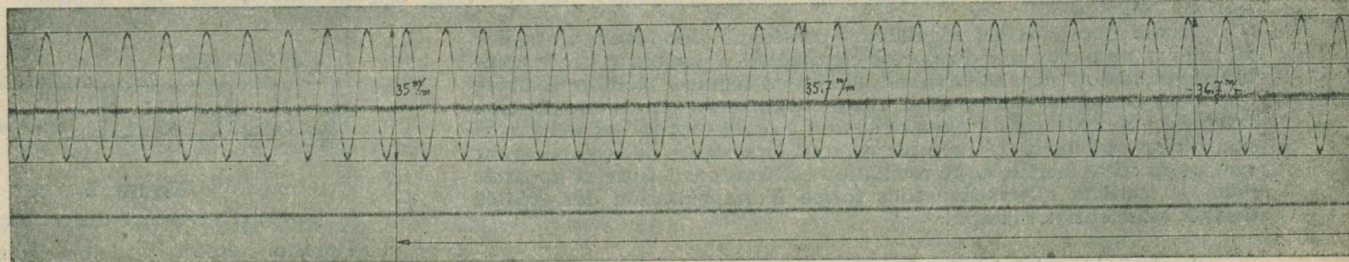
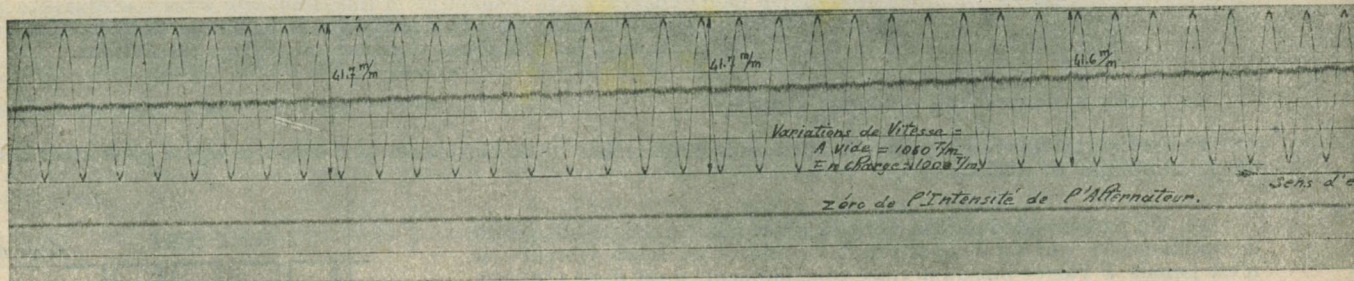
Ces oscillogrammes ont été relevés dans le but de donner un témoignage impartial sur la marche des régulateurs de tension ; nous avons précédemment fait un certain nombre d'affirmations sur le fonctionnement de nos appareils et nous tenons à donner quelques preuves irréfutables de la réalité de nos assertions.



Du fait de la grandeur de l'échelle nous avons dû couper l'oscillogramme ci-dessus en 2 morceaux, il commence en haut et à droite et le phénomène se poursuit de droite à gauche, et continue sur l'image inférieure également de droite à gauche.

Examinons le début de l'oscillogramme à droite, l'alternateur étant à vide :

La sinusoïde du haut est la tension de l'alternateur, elle a une amplitude correspondant à 230 volts, efficace tension normale. La droite hachurée au milieu de la sinusoïde tension représente la tension de l'excitatrice qui a pour valeur 10,5 volts. La droite en bas est l'axe de zéro de l'intensité.

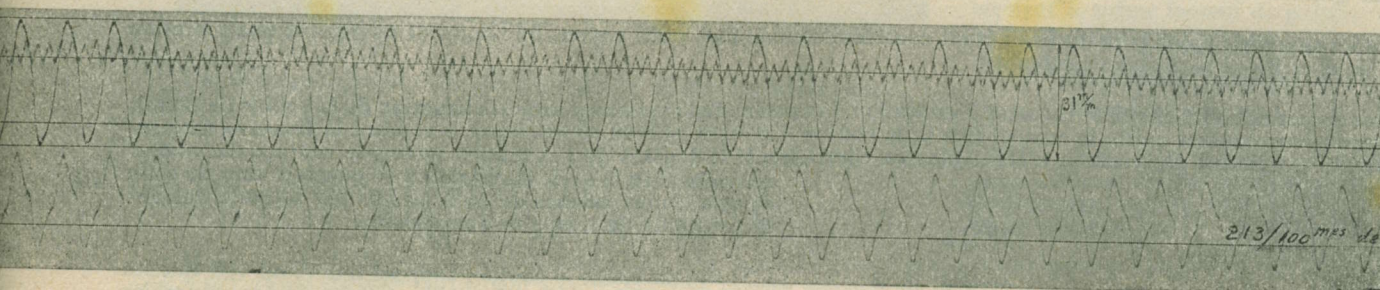
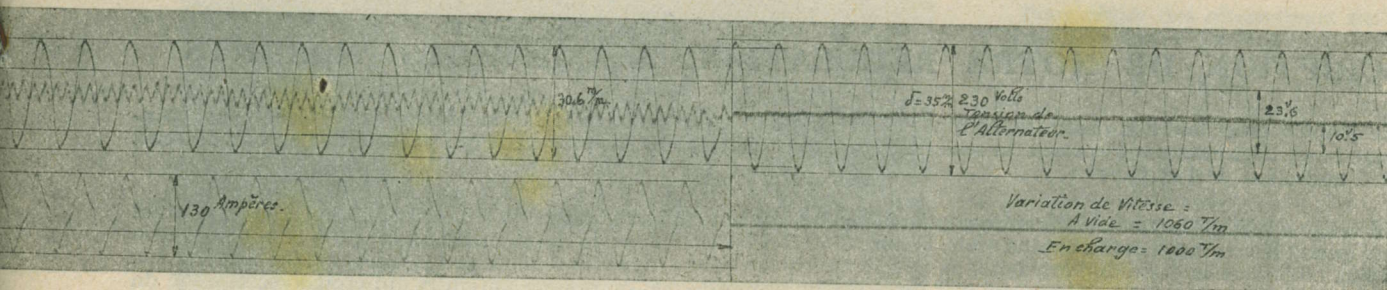


L'oscillogramme ci-dessus est en somme l'inverse du premier, l'alternateur est en pleine charge, soit 130 ampères, et l'on coupe brutalement toute la charge pour le mettre à vide. Il commence également à droite en haut, se déroule de droite à gauche,

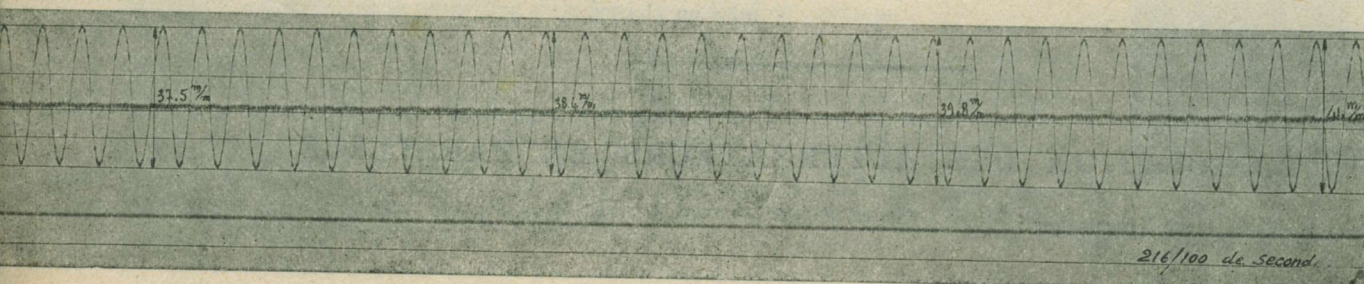
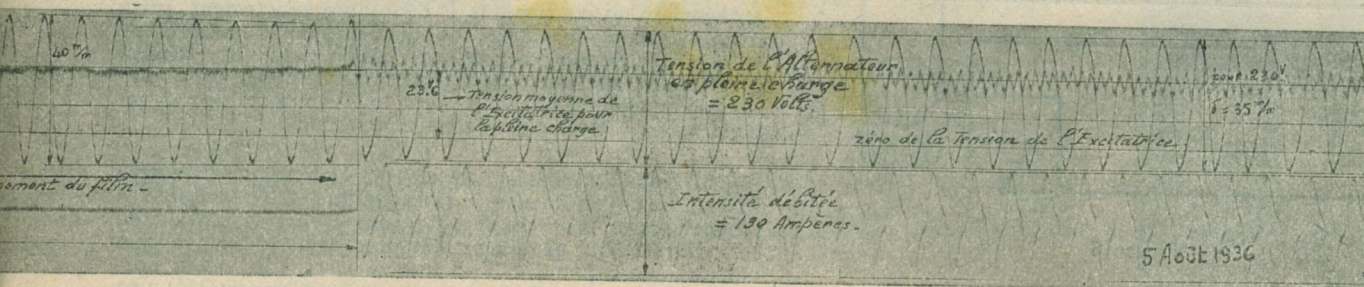
GRAMMES

Les deux oscillogrammes ci-dessous ont été relevés sur le même alternateur, à échelle assez grande pour permettre de vérifier aisément au moyen d'une réglette l'amplitude des sinusoïdes, vérifier également que le régulateur, par ses vibrations, n'affecte ni ne module la courbe de tension et qu'elle reste parfaitement sinusoïdale.

Le régulateur ayant servi pour ces essais avait un amortissement réglé pour ramener la tension sans oscillations et suivant la courbe III de la figure 3 (Alternateur 60 KVA., 1.000 tours-diphasé 230 volts - 50 périodes).



On met brutalement l'alternateur en pleine charge qui est de 130 ampères, la tension baisse instantanément à 200 volts puis continue à baisser jusqu'à 192 volts, malgré l'action du régulateur qui a rigoureusement été instantanée, et il faut 2,13 secondes pour faire croître la tension d'excitation à sa valeur de pleine charge qui est environ 24 volts, et ramener ainsi la tension alternative à 230 volts.



puis reprend en dessous à droite. Et ici encore, quoique le régulateur ait pris instantanément son oscillation de marche à vide, faut 2,16 secondes pour ramener la tension à sa valeur normale : 230 volts.

CONCLUSIONS SUR LES OSCILLOGRAMMES.

Dans l'ensemble des essais précédents on voit nettement le régulateur agir au temps zéro et malgré cette action instantanée il faut un temps appréciable pour rétablir la tension normale après une perturbation, ce qui est la meilleure illustration de nos démonstrations précédentes.

DESCRIPTION DE NOTRE RÉGULATEUR A CONTACTS VIBRANTS

Dans le chapitre précédent nous avons vu comment les régulateurs à contacts vibrants procédaient au réglage. Nous reconnaissons donc immédiatement par l'examen du schéma (figure 6) ci-contre, le relais vibreur A qui peut mettre en court-circuit le rhéostat d'excitation de l'excitatrice.

Un deuxième relais vibreur B, différent comme réalisation, est branché aux bornes de l'excitatrice, il possède un contact qui s'abaisse quand le courant dans sa bobine croît, l'effort d'attraction exercé par le champ magnétique dû à la bobine, sur la palette mobile, croît avec le carré de l'intensité, ou ce qui revient au même, avec le carré de la tension appliquée à la bobine. Pour obtenir un déplacement de la palette qui soit directement proportionnel on oppose un effort qui croît avec le carré du déplacement grâce à une articulation spéciale, agissant sur un ressort antagoniste.

Le contact supérieur C solidaire du fléau étant considéré comme fixe, nous voyons que nous allons obtenir une vibration de l'ensemble A et B par le processus suivant :

Le relais A met en court-circuit le rhéostat d'excitation, la tension de l'excitatrice croît, l'attraction de la bobine de B croît donc également, son contact quitte le contact fixe C, la bobine A n'étant plus en court-circuit le courant la traverse, ses contacts s'ouvrent, le rhéostat d'excitation n'étant plus en court-circuit la tension de l'excitation baisse, le contact du vibreur retouche C et le cycle de vibration se poursuit ainsi de suite et cela à une cadence de 10 à 60 fois par seconde, suivant la constante de temps de l'excitatrice.

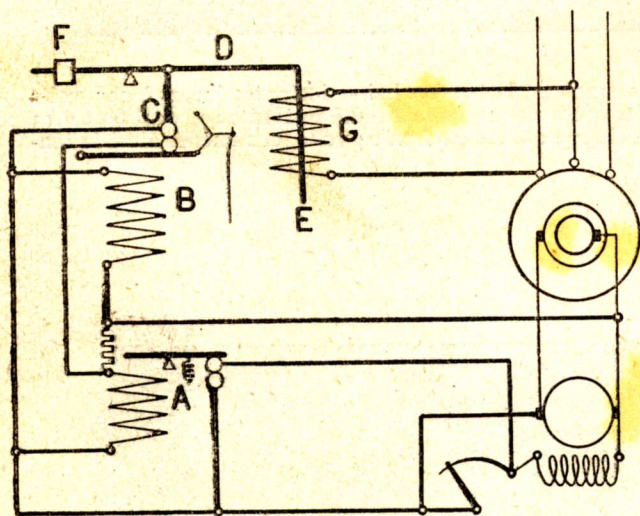


Figure 6

Si l'on baisse le contact supposé fixe C, on voit que les vibrations se produiront encore, mais la tension nécessaire pour obtenir ces vibrations sera plus élevée puisqu'il faudra plus d'ampères-tours dans la bobine B pour faire quitter le contact mobile du contact C.

Admettons que nous rendions mobile le contact C supposé fixe, pour cela il est rendu solidaire du fléau de balance D, portant à une extrémité un noyau E et à l'autre un contrepoids F, la tension donnée par l'excitatrice sera donc d'autant plus élevée que C occupera une position plus basse.

Le fléau D est en équilibre indifférent quand une force antagoniste au contrepoids F l'équilibre exactement, cette force étant fournie par l'action du champ de la bobine G sur le noyau E. Supposons que l'alternateur donne une tension précisément suffisante pour maintenir le fléau en équilibre ; la tension d'excitation prend une valeur stable moyenne et les vibrations ont une cadence définie.

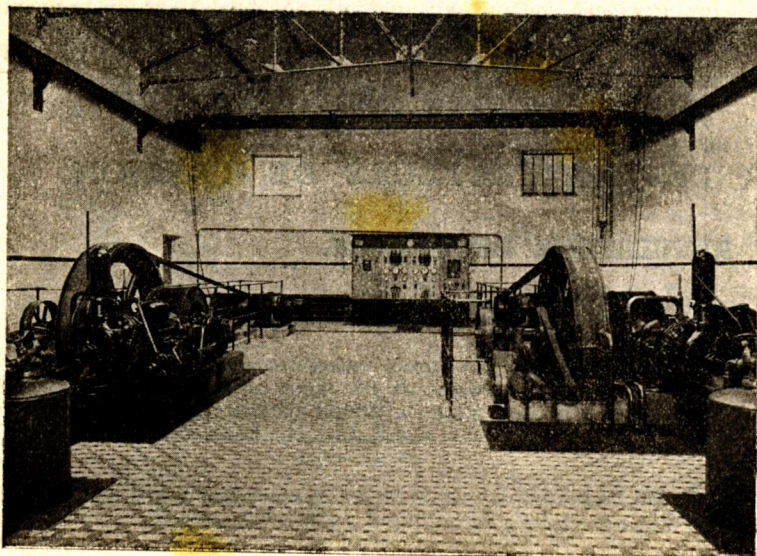
Mettons l'alternateur en charge, la tension alternative baisse, le noyau E descend, le contact C également, ce mouvement a pour résultat de faire croître la tension de l'excitatrice, qui provoque l'augmentation de la tension alternative et quand celle-ci sera revenue à sa valeur normale, le fléau D sera à nouveau en équilibre, mais à une position telle que le contact C sera plus bas qu'avant la mise en charge.

RÉGULATION DES ALTERNATEURS EN PARALLÈLE

Trois cas distincts sont à envisager :

1° Alternateurs identiques.

Quand il s'agit de régler 2, 3, ..., n alternateurs fonctionnant en parallèle et ayant rigoureusement les mêmes caractéristiques d'excitation, il est possible de les régler avec un seul régulateur ayant un nombre de contacts de travail proportionnel au nombre



Un Régulateur pour deux alternateurs de mêmes caractéristiques, et pouvant fonctionner en parallèle.

d'alternateurs. Un commutateur spécial à 2, 3, ...n directions permettant de choisir un des alternateurs comme « chef d'orchestre » ou de faire fonctionner n'importe quel alternateur seul. En pratique il est difficile de régler par ce procédé plus de 2 alternateurs.

2° Alternateurs différents.

Pour régler des alternateurs de puissances et caractéristiques quelconques devant fonctionner en parallèle, il faut utiliser un régulateur par alternateur, chaque régulateur comporte une impédance de stabilisation alimentée par un transformateur d'intensité spécial.

Si un alternateur a tendance à se décaler en arrière, c'est-à-dire à absorber un courant réactif en retard, sa tension d'excitation est renforcée et réciproquement pour le décalage en avant. Grâce à cet artifice, quand la charge du réseau croît, les intensités débitées par les alternateurs croissent proportionnellement à leur puissance, en conservant chacun très sensiblement le même facteur de puissance.

3° Alternateurs raccordés à un réseau important.

Un alternateur de petite ou moyenne puissance débitant sur un réseau important, ne peut évidemment, par sa seule action, faire croître ou décroître la tension de ce réseau.

Il faut éviter également, en cas de disjonction, que cet alternateur atteigne une tension dangereuse, ou en cas de disjonction d'une grosse centrale participant à ce réseau, que le petit alternateur ne débite une puissance exagérée.

Dans ce but on munit un alternateur placé dans de telles conditions d'un régulateur de tension avec impédance de stabilisation qui lui donne une caractéristique en charge légèrement tombante, puis on adjoint à ce régulateur un régulateur d'intensité qui intervient à la pleine charge et qui, à partir de ce moment, fait fonctionner l'alternateur à intensité constante, quelle que soit la tension du réseau.

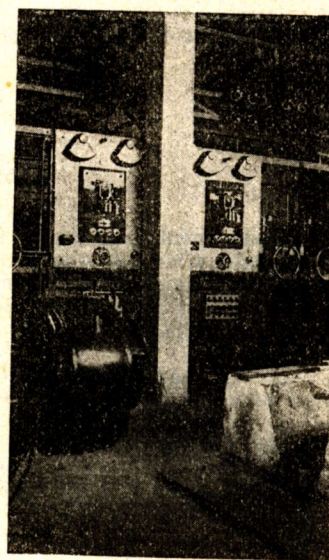
RÉGULATION DES ALTERNATEURS POSSÉDANT UNE EXCITATRICE A TRÈS BASSE TENSION

Depuis quelques années, certains constructeurs fabriquent des alternateurs ayant des excitatrices qui donnent à vide des tensions très basses de l'ordre de 4 à 10 volts. Nous supposons que ce choix est dû à la construction simultanée d'alternateurs et de moteurs asynchrones-synchronisés. Mais que ce choix soit dû à n'importe quelle cause, nous n'avons pas à les analyser ni à juger de leur opportunité, mais notre rôle doit se réduire à établir des régulateurs qui fonctionnent correctement avec ces alternateurs. A l'encontre de la plupart des constructeurs de régulateurs qui ont fait des régulateurs pour leurs alternateurs, nous devons faire, et c'est notre raison d'être, des régulateurs pour n'importe quel type d'alternateur.

Voici les difficultés qui résultent de ce cas particulier : dans les contacts ou les plots d'un régulateur, il y aura, du fait de la faible tension, une intensité assez importante qui augmente sensiblement la dimension et le poids des pièces de contacts.

Il y a encore un autre inconvénient qui est un obstacle bien plus sérieux, c'est que cette tension de 4 à 10 volts paraît être une tension critique donnant des arcs particuliers, qui ont la propriété de créer un oxyde métallique isolant sur la plupart des métaux classiques, précieux ou non, utilisés dans la fabrication des contacts de régulateurs. Ceci a pour résultat de désexciter brutalement l'alternateur et il ne peut être remis en route qu'après un polissage des contacts du régulateur. Toutefois, quelques alliages de métaux précieux ne donnent pas d'oxyde, mais ils se soudent ou se boursouflent, c'est encore un plus grave inconvénient, car cela provoque une forte surtension pouvant mettre hors d'usage toute les lampes raccordées sur ce réseau.

Au cours de l'étude très poussée que nous avons dû faire de ces phénomènes nous avons remarqué que pour les tensions de 4 à 10 volts, l'ozone et les oxydes d'azote produits avaient des caractéristiques différentes des gaz et oxydes obtenus pour des tensions plus élevées. Ces remarques nous ont permis de mettre au point des contacts dura-



Deux régulateurs pour deux alternateurs haute tension, et de caractéristiques différentes, fonctionnant en parallèle.

bles et inoxydables en utilisant les mêmes alliages que pour nos appareils courants, mais en y adjoignant un produit catalyseur qui fait disparaître les fâcheuses propriétés des gaz incriminés. Nous pouvons donc garantir nos régulateurs fonctionnant sur des excitatrices à basse tension, comme nous les garantissons pour les machines normales.

NOTES PRATIQUES SUR LES RÉGULATEURS DE TENSION

CE A QUOI NE PEUT REMÉDIER UN RÉGULATEUR DE TENSION.

1° Coefficient d'irrégularité trop élevé.

Si une machine motrice à piston a un coefficient d'irrégularité trop fort dû à l'accélération des coups de piston, comme cela se produit dans certains petits moteurs Diesel ayant 1 ou 2 cylindres et un volant un peu léger, ou encore sur des machines à vapeur mono-cylindriques, le flux lumineux des lampes branchées sur un alternateur actionné par une machine ayant ce défaut est pulsatoire et désagréable pour les usagers ; aucun régulateur ne corrigera cela. Il est, du reste, facile de s'en rendre compte en reprenant les principes exposés au début de la présente notice.

Donc tout défaut cyclique ayant une fréquence assez élevée, de l'ordre de une ou quelques secondes, perturbant la tension d'un alternateur est impossible à corriger, du moins dans l'état actuel de la technique des **alternateurs**.

Pour mémoire, nous rappelons que le coefficient d'irrégularité désigné généralement par δ est donné par la formule ci-dessous :

$$\delta = \frac{\Omega_{\max} - \Omega_{\min}}{\Omega_{\max} + \Omega_{\min}}$$

Ω désignant les accélérations.

On admet généralement pour δ une valeur maxima égale à $\frac{1}{150}$ pour que la lumière soit acceptable.

2° Variation très importante de vitesse.

Quand une machine motrice, pour des raisons quelconques, a de grosses variations de vitesse, il arrive que pendant les excès de vitesse à faible charge le rhéostat d'excitation, quoique inséré totalement, est encore trop peu résistant pour ramener la tension à sa valeur normale, la tension monte et le régulateur ne joue plus.

Pour une grosse baisse de vitesse en charge le phénomène inverse se produit. L'excitatrice ne donne pas assez de tension malgré son rhéostat totalement en court-circuit, la tension alternative baisse au-dessous de la valeur normale, le régulateur n'agit plus.

3° Turbine ou roue hydraulique sans régulateur de vitesse.

Ce cas étant d'un développement assez long, nous avons établi une notice spéciale pour traiter à fond ce problème.

SOUPLESSE DE NOS RÉGULATEURS

Précédemment, nous avons fait remarquer que du fait que nous étions uniquement constructeurs de régulateurs, nous devions régler n'importe quel alternateur, ce qui est beaucoup plus complexe que de régler les alternateurs que l'on fabrique. Ceci explique également la carence de certains constructeurs devant des problèmes de régulation de vieilles machines dont personne ne peut donner les caractéristiques, et qui parfois ont de graves défauts qui peuvent être dus à une transformation plus ou moins heureuse.

Nous nous sommes trouvés devant de vieux alternateurs monophasés haute tension devenus triphasés basse tension, ou des 42 périodes devenus 50 périodes.

Jadis les excitatrices étaient toujours des génératrices courantes à tension à peu près constante, on ajoutait alors en série avec la roue polaire, un gros rhéostat traversé par le courant total. Puis on effectuait le réglage en agissant soit sur ce rhéostat, soit sur le rhéostat d'excitation de l'excitatrice.

Cette pratique n'était évidemment pas économique, on gaspillait bien inutilement de l'énergie dans le gros rhéostat et, de par ses dimensions, c'était un accessoire coûteux et peu maniable.

Ces inconvénients, puis l'apparition des régulateurs rapides, ont amené la majorité des constructeurs de machines à faire des excitatrices à tension variable. Il ne subsiste ainsi que le rhéostat d'excitation d'excitatrice pour procéder au réglage.

Donc, lorsqu'un alternateur ancien ou moderne comportant en plus du rhéostat d'excitatrice, un rhéostat de roue polaire, doit être muni d'un régulateur automatique de tension, il faut supprimer le rhéostat de roue polaire en le mettant en court-circuit.

Cette manœuvre a pour résultat de faire fonctionner l'excitatrice quand l'alternateur est à vide ou à faible charge, à une trop faible tension située dans la portion instable de sa caractéristique (au delà du point C de la caractéristique à vide, figure 7), c'est-à-dire que la tension de l'excitatrice ne peut conserver la valeur désirable, elle tombe à zéro ou monte très au-dessus de la valeur requise.

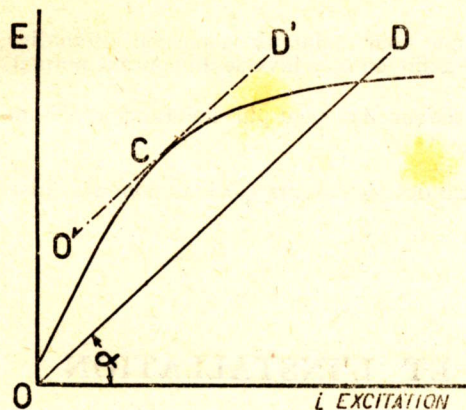


Figure 7

Si le point de fonctionnement est situé sur la caractéristique à vide plus bas que C, la tension est instable O'D' parallèle à OD, OD déterminé par $\tan \alpha = \text{résistances des inducteurs}$.

OB représentant la chute de tension réactive, c'est-à-dire due à la self et d'un vecteur AB qui représente la chute de tension active décalée de 90° par rapport à OB, la résultante OA est la chute de tension interne de l'alternateur.

Traçons maintenant un deuxième triangle qui représentera la chute de tension externe, c'est-à-dire celle du réseau alimenté par l'alternateur, elle se décompose en deux vecteurs : 1° le vecteur BC représentant la chute de tension réactive du réseau qui s'ajoute au vecteur OB puisque en phase; 2° le vecteur DE qui représente la chute active et s'ajoute à AB en phase avec ce dernier. AE la résultante de BC et DE fait un angle ϕ avec ED dont le cosinus représente le facteur de puissance du réseau.

La résultante des chutes de tension interne et externe nous donnera en somme la force électro-motrice alternative de l'alternateur, représentée par OE.

La différence entre OE et AE nous donnera la chute de tension de l'alternateur en charge pour le facteur de puissance correspondant à l'angle ϕ . Pour mettre cette différence en évidence, traçons deux arcs de cercle de rayon OE de centre O, puis avec le même rayon de centre A, le prolongement AE rencontre le cercle de centre A en F, et FE est la chute de tension cherchée ou une grandeur proportionnelle à la tension de l'excitatrice en charge.

En donnant diverses valeurs à ϕ on constate que :

Quand le cosinus ϕ de l'installation est égal à 1 c'est-à-dire $\phi = 0$, BC = 0 la tension d'excitation est déterminée par le vecteur E'F' puis quand $\cos \phi$ décroît, c'est-à-dire que l'angle croît, le vecteur EF croît également, pour $\cos \phi = 0,5$ en retard, il est égal à EF.

Les constructeurs calculent les alternateurs pour un $\cos \phi = 0,8$, par conséquent si l'on fait débiter à un alternateur sa pleine charge sous un $\cos \phi$ inférieur à 0,8, il arrive que l'excitatrice est insuffisante pour maintenir la tension alternative normale. Si on utilise un régulateur automatique sur un alternateur fonctionnant dans de telles conditions il s'arrête, mettant le rhéostat d'excitation totalement en court-circuit. Généralement devant cet incident, l'usager conclut que le régulateur fonctionne mal puisqu'il s'arrête.

Il est prudent, sur une installation de quelque importance de prévoir un phasemètre sur le tableau pour connaître le facteur de puissance de l'installation et remédier à sa baisse anormale.

Considérons maintenant une variation de facteur de puissance en avance.

Si l'on considère alors le fonctionnement d'un régulateur à résistance variable comme les deux premiers types que nous avons décrits au chapitre (divers types de régulateurs...) on voit que le curseur ne pouvant trouver de point d'équilibre pour cette tension d'excitation trop faible pour l'excitatrice, il oscille constamment sur les premiers plots et la tension alternative oscille également dans d'énormes proportions.

Par contre, notre système de régulateurs à contacts vibrants s'accommode très bien de ce défaut, puisque dans sa marche normale la tension d'excitation n'est jamais en équilibre. (Voir courbe en dents de scie de la tension d'excitation, figurée sur les oscillogrammes.)

INFLUENCE DU FACTEUR DE PUISSANCE SUR LA MARCHE DES ALTERNATEURS

Pour examiner cette question d'une façon plus générale, nous étudierons le diagramme de Kapp qui, quoique un peu succinct, nous suffira pour mettre en lumière le phénomène qui nous intéresse.

Nous traçons en premier lieu (figure 8), le triangle de la chute de tension interne de l'alternateur (triangle hachuré). Il se compose d'un vecteur

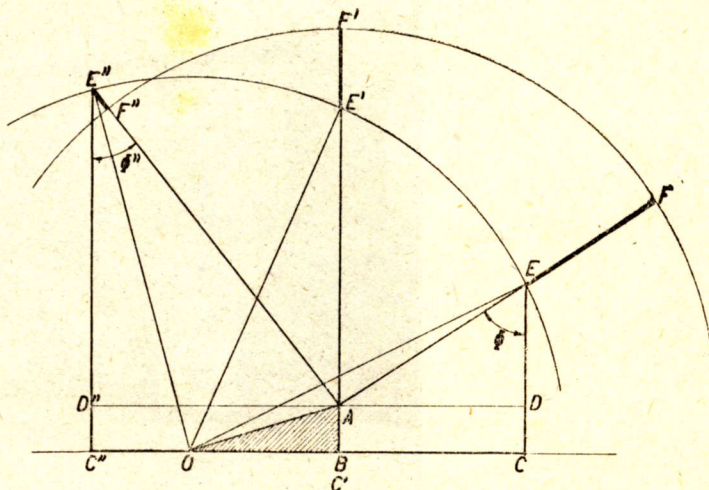


Figure 8.

Supposons que le décalage de ce dernier corresponde à l'angle Φ'' de notre diagramme. Ce décalage pouvant être provoqué, par exemple, par le branchement sans autre charge réactive d'une ligne aérienne ou souterraine d'une certaine longueur et à vide, d'une batterie de condensateurs, ou d'un condensateur synchrone.

On constate que le vecteur EF s'est inversé pour devenir E' F'', ceci signifie que pour maintenir la tension alternative constante il faut envoyer dans la roue polaire un courant d'excitation négatif, c'est-à-dire en sens inverse du courant normal.

Ce cas n'est évidemment pas très fréquent, mais on comprend que s'il y a un régulateur il ne peut plus fonctionner, n'étant pas capable d'inverser la tension de l'excitatrice.

Toutefois, dans le cas particulier que nous venons de décrire, nous pouvons fournir des régulateurs spéciaux donnant pleinement satisfaction.

CONSEILS PRATIQUES POUR LE MONTAGE ET L'INSTALLATION DE RÉGULATEURS

Il faut leur réserver un emplacement suffisant et accessible sur le tableau de distribution (nous demander l'encombrement). Ce tableau peut être en marbre, en ardoise, en isolant synthétique, ou en tôle.

On choisit un emplacement situé à une hauteur au-dessus du sol de l'ordre de 1 m. 50 à 1 m. 70 mesuré à la partie inférieure de l'appareil.

Ne choisissez jamais un soubassement du tableau, car cela exigerait de la part de l'électricien de service une gymnastique inutile pour l'usage et l'entretien.

Évitez autant que possible les vibrations de la machine motrice.

Ne branchez jamais d'appareils de coupure tels que coupe-circuit, interrupteur, disjoncteur, entre le point où est branchée la bobine à courant alternatif du régulateur et l'alternateur.

Quand le rhéostat d'excitation comporte trois fils et qu'il possède par conséquent un premier plot relié uniquement à un balai de l'excitatrice permettant de désexciter totalement cette dernière, il faut supprimer le troisième fil se rendant à ce premier plot et relier électriquement le premier plot au deuxième, de façon qu'en manœuvrant le rhéostat d'excitation on ne puisse jamais couper le circuit des inducteurs.

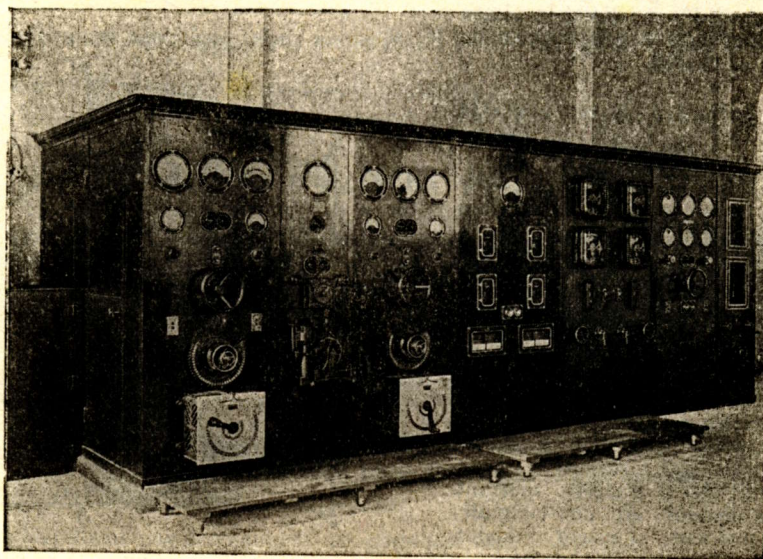
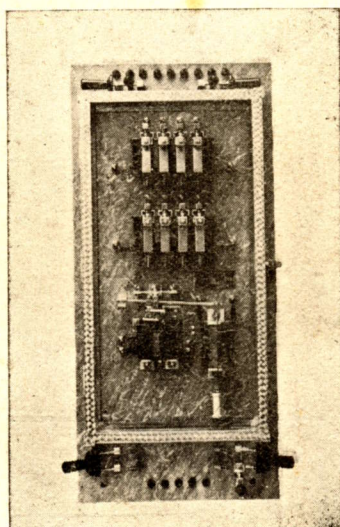


TABLEAU avec régulateur de notre fabrication, fonctionnant sur des alternateurs en parallèle avec d'autres réglés par des régulateurs concurrents.



Régulateur type A 8 pour alternateur 20.000 KVA

DBH Sarl 33 Les Chênes
88340 Le Val d'Ajol
Siret 510 554 835 00015
Tel. 06.2346.1385 beaume.d@wanadoo.fr