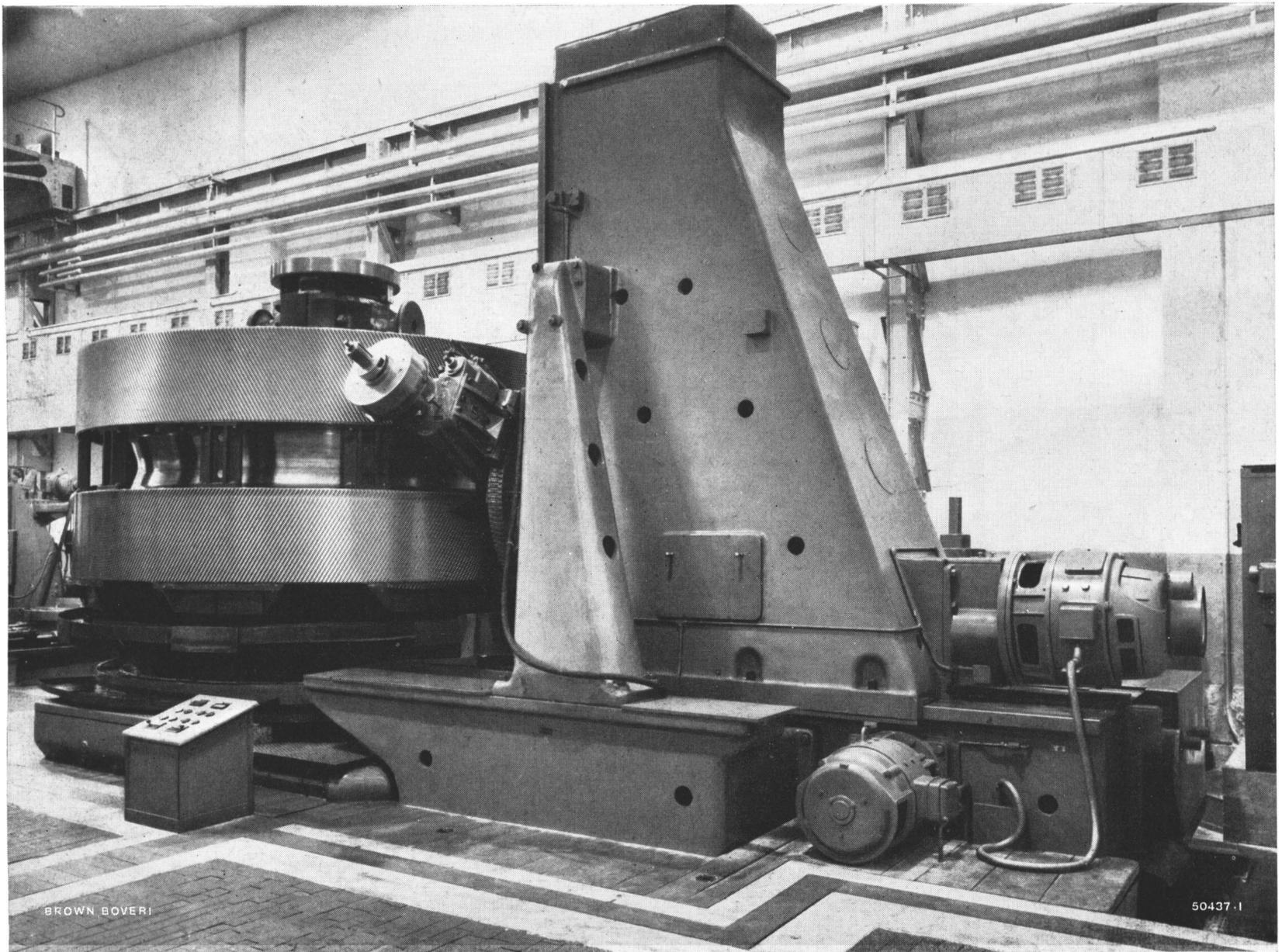


REVUE BROWN BOVERI

PUBLIÉE PAR LA SOCIÉTÉ ANONYME BROWN, BOVERI & C^{IE} A BADEN (SUISSE)



ÉQUIPEMENT SECTIONNEL D'UNE GRANDE FRAISEUSE POUR LA TAILLE DES ENGRÉNAGES, AVEC SIX MOTEURS ET COMMANDE A DISTANCE A DEUX PUPITRES.

SOMMAIRE :

	PAGES		PAGES
LA PRODUCTION DE COURANTS CONTINUS DE TRÈS FORTES INTENSITÉS PAR DES DYNAMOS UNIPOLAIRES	155	UNE LIGNE A HAUTE TENSION PRESQUE INSENSIBLE AUX COURTS-CIRCUITS ENTRE CONDUCTEURS AINSI QU'AUX MISES A LA TERRE MONO- OU POLY- PHASÉES	166
INFLUENCE DU SYSTÈME DE COMMANDE SUR LE DIMEN- SIONNEMENT ET LE FONCTIONNEMENT DES DYNAMOS DES VÉHICULES DIESEL-ÉLECTRIQUES.	157		



Vue partielle du stock de moteurs de la Sté An. Brown, Boveri & Cie,
à Baden.

Plusieurs milliers de moteurs

de petites et moyennes puissances, de diverses vitesses, tensions et modèles, avec leurs accessoires

**toujours en stock, assurent à nos clients
une livraison rapide.**

Un état de nos stocks paraissant mensuellement est à la disposition des intéressés.

REVUE BROWN BOVERI

PUBLIÉE PAR LA SOCIÉTÉ ANONYME BROWN, BOVERI & C^{IE}, A BADEN (SUISSE)

XXVII^{me} ANNÉE

AOÛT 1940

N° 8

La Revue Brown Boveri paraît mensuellement. La reproduction d'articles ou d'illustrations est permise, à condition de citer leur provenance. Prix de l'abonnement annuel pour la Suisse Fr. 10.—, prix du fascicule pour la Suisse Fr. 1.—, port et emballage non compris.

LA PRODUCTION DE COURANTS CONTINUS DE TRÈS FORTES INTENSITÉS PAR DES DYNAMOS UNIPOLAIRES.

Indice décimal 621.313.291.

La nécessité de produire des courants de très fortes intensités jusqu'à 100 000 A à très faibles tensions, quelques volts seulement, se fait sentir de plus en plus dans l'industrie. La dynamo unipolaire convient particulièrement à ce but. La simplicité de sa construction, son fonctionnement sûr et son rendement favorable font que la dynamo unipolaire est assez intéressante pour qu'on cherche à l'utiliser dans de nouveaux domaines.

I^o NÉCESSITÉ.

Le progrès continu de la technique et le perfectionnement de toutes les exploitations industrielles qu'il entraîne, demandent que l'on s'efforce toujours plus d'améliorer le rendement des installations. L'amélioration du rendement peut, entre autres, être obtenue en élevant la production ou la puissance, c'est-à-dire en réduisant la durée des opérations. S'il s'agit de procédés utilisant directement l'électricité, les facteurs déterminants d'une élévation de la puissance sont le courant et la tension. Pour l'électrolyse, la tension nécessaire, ne servant qu'à vaincre la résistance des bacs, est relativement faible,

que quelques volts, l'intensité du courant est par contre très élevée. En général, on connecte plusieurs bacs en série pour que la tension de la machine ne soit pas trop basse. Lors du couplage en série de plusieurs bacs, tous les bacs sont parcourus par la même intensité, ce qui, dans certains cas, est un désavantage. C'est pourquoi on tend de plus en plus à brancher les bacs en parallèle, et à augmenter leurs dimensions, ce qui entraîne le besoin de produire des courants à basse tension et de très fortes intensités. Ce besoin se fait aussi sentir pour la

galvanoplastie (zinguerie, etc.), les fours électriques (aluminium) et la soudure par résistance (soudure en bout de tuyaux, etc.) où l'on demande, au fur et à mesure du développement de ces techniques, des intensités toujours plus élevées jusqu'à 100 000 A avec une tension de quelques volts.

II^o POSSIBILITÉ DE CONSTRUCTION.

Brown Boveri a reconnu très tôt la nécessité de construire pour l'industrie de tels générateurs de courant et s'est occupé, il y a des années déjà, de l'étude de cette question. Des dynamos basse tension pour des intensités de courant très élevées, 10 000 à 15 000 A ont déjà été construites et travaillent bien. Toutefois, ces intensités ne suffisent plus à cause du rapide développement de l'électrochimie et de l'avenir qui l'attend; c'est pourquoi il faut chercher quelque chose de nouveau qui non seulement donne toutes garanties pour la sécurité de service, indispensable dans une telle installation, mais encore offre des

avantages au point de vue économique par rapport aux dynamos à basse tension utilisées jusqu'à présent.

Ces conditions sont remplies par la dynamo unipolaire, connue déjà depuis longtemps, mais dont le développement fut arrêté en partie parce que le besoin de fortes intensités ne se faisait pas sentir et en partie aussi par la difficulté de résoudre le problème du captage du courant.

Citons que, comme le montre la figure 1, il y a déjà 50 ans que C. E. L. Brown, un des fondateurs de la

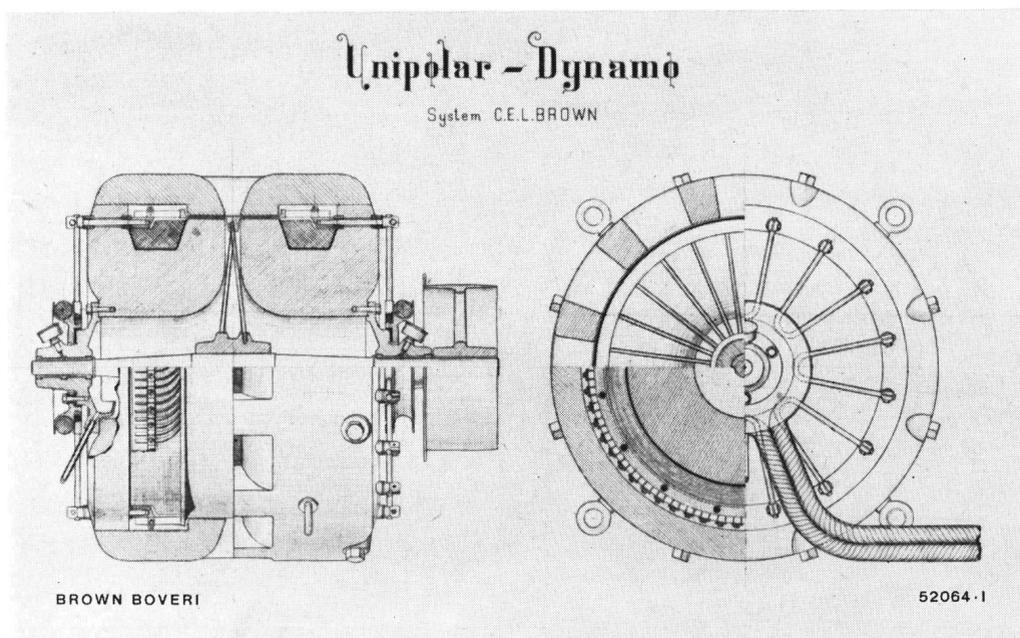


Fig. 1. — Dynamo unipolaire 10 V, 2000 A étudiée par C. E. L. Brown en 1889.

maison Brown Boveri, a étudié avec soin l'utilisation de la dynamo unipolaire pour la création de fortes intensités. Une nouvelle construction intéressante d'une dynamo unipolaire est celle de 50 000 A à 14 V que Poirson a présentée à l'Exposition Internationale de Paris, en 1937.

Par des études systématiques et approfondies, surtout de la question du captage du courant et de celle de l'évacuation de la chaleur, car les fortes intensités produisent un échauffement inévitable des surfaces de frottement, Brown Boveri a fait, de la dynamo unipolaire de laboratoire, un générateur de grandes intensités utilisable dans l'industrie.

III^o FONCTIONNEMENT ET CONSTRUCTION.

La dynamo unipolaire pour fortes intensités, construite par Brown Boveri repose sur le principe de l'induction unipolaire, découvert en 1831 par Faraday, qui dit que la déviation d'un galvanomètre branché entre deux balais

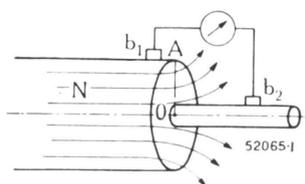


Fig. 2. — Schéma d'induction unipolaire dans un barreau aimanté tournant.

frottant l'un sur l'axe, l'autre sur la périphérie d'un barreau aimanté tournant autour de son axe, est toujours de même sens et proportionnelle à la vitesse (fig. 2). On peut dire que la force électromotrice est engendrée par chaque rayon OA qui coupe les lignes de forces du

champ magnétique stationnaire du pôle N. La force électromotrice est captée par les balais fixes b_1 et b_2 . Ce principe permet une construction relativement simple de machines à courant continu sans collecteur.

La dynamo unipolaire a à peu près la forme donnée dans la figure 3. F_1 et F_2 sont les bobines d'excitation

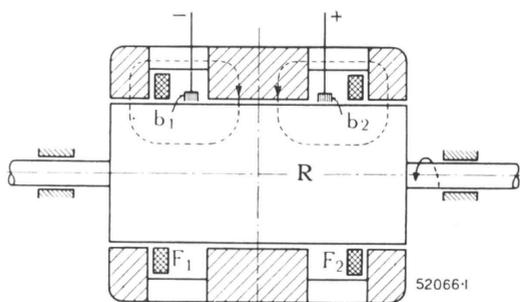


Fig. 3. — Représentation schématique d'une dynamo unipolaire.

qui sont concentriques à l'arbre de la machine. Ces bobines engendrent, dans le circuit magnétique qui les entoure, deux flux égaux dont le tracé et la direction sont indiqués sur la figure. Le corps du rotor, R, sert de circuit magnétique et de conducteur électrique d'induit. Les balais b_1 et b_2 , frottant directement sur le rotor peuvent être répartis en aussi grand nombre qu'on le veut sur toute la périphérie et sont placés dans les évidements contenant les bobines F_1 et F_2 . La génération de la force électromotrice s'explique, comme pour la figure 2, parce qu'un conducteur tournant situé entre les balais b_1 et b_2 , coupe un champ magnétique fixe.

La construction d'une telle machine est, grâce à l'absence d'enroulements tournants et de collecteur,

particulièrement simple et robuste. Le rotor, qui est le seul conducteur, siège d'une induction, est une pièce massive en acier forgé auquel les deux parties de l'arbre sont fixées par brides.

Comme, malgré la rotation, il ne se produit en aucun moment une variation de flux, dans une section quelconque du rotor, les pertes fer sont nulles en service normal. Les pertes joules dans le rotor sont négligeables, grâce à la grande section de passage et bien que les intensités de courant soient très élevées et la résistance spécifique de l'acier relativement grande comparée à celle du cuivre. Les seules pertes importantes pour le rotor sont celles des balais, dues à la résistance de contact et au frottement.

Des essais détaillés, qui ont précédé la construction de telles machines, ont montré que, grâce à un choix approprié des balais et un traitement des surfaces de contact, le métal du rotor (dans notre cas de l'acier) pouvait servir de surface de contact. Cette possibilité entraînant l'absence de toute liaison électrique soudée ou vissée entre des conducteurs et des bagues collectrices, permet une construction particulièrement simple et résistante de la machine.

L'évacuation de la chaleur due aux pertes, dont le siège principal est la surface de frottement des balais, est assurée d'une façon très efficace par une circulation d'eau dans le rotor (système pour lequel une demande de brevet a été déposée). La consommation d'eau de refroidissement est très faible, grâce au balayage intensif du voisinage immédiat des surfaces de frottement et à la grande chaleur spécifique de l'agent réfrigérant.

La formation de poussière est inévitable pour beaucoup de balais en charbon; c'est pourquoi, si les circonstances l'exigent, un dispositif séparé de ventilation peut être prévu.

Les chaises-paliers sont isolées, afin d'isoler de la terre le rotor qui sert en même temps de conducteur. La machine est entraînée par un accouplement isolant. Étant donné les tensions relativement faibles, cette isolation ne présente pas de difficultés.

Les enroulements inducteurs peuvent être prévus pour auto-excitation ou excitation séparée. Dans les deux cas, étant donné la basse tension d'excitation, ils sont formés de peu de spires de grandes sections, ce qui donne des enroulements très solides et faciles à isoler. L'excitation séparée est préférée, car elle permet d'employer de plus faibles intensités de courant et donc une construction plus légère du régulateur de champ.

La figure 4 montre une machine construite d'après les principes ci-dessus et qui est déjà depuis longtemps en service ininterrompu.

IV^o RENDEMENT.

La dynamo unipolaire offre des avantages importants au point de vue économique par rapport aux dynamos basses tensions ordinaires. Leur rendement est plus

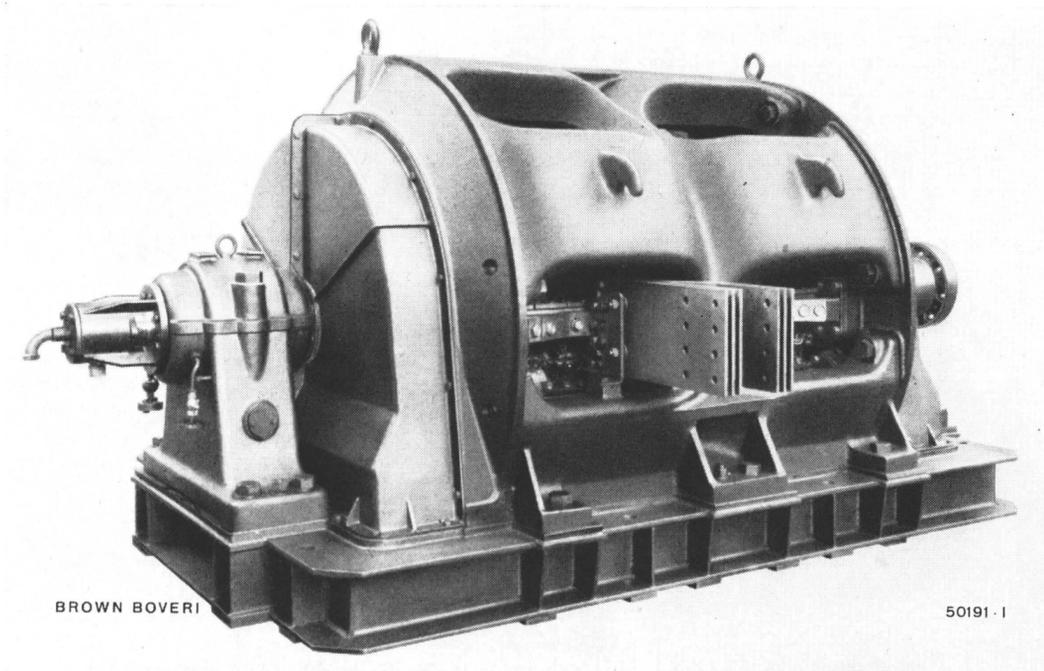


Fig. 4. — Dynamo unipolaire 15 V, 30 000 A.

élevé; en effet, le rendement d'une dynamo unipolaire de 15 V, 30 000 A est d'environ 87,5% et celui d'une dynamo basse tension ordinaire atteint au maximum 80%. Comme nous l'avons déjà dit, les dynamos unipolaires n'ont pas de pertes fer en service normal. Les pertes d'excitation sont faibles grâce à l'absence d'encoques dans le rotor entraînant des inductions élevées dans les dents. Les pertes dans les paliers et par ventilation sont également faibles, alors que le refroidissement des enroulements et surtout du collecteur des machines ordinaires demandent le montage de robustes ventilateurs sur le rotor. Comme nous l'avons déjà dit, la dynamo unipolaire Brown Boveri est pourvue d'une circulation d'eau dans le rotor, assurant le refroidissement des surfaces de frottement. Les principales pertes des dynamos unipolaires sont celles des balais, par frottement et par la résistance de contact. Celles-ci changent avec la qualité des balais et la vitesse circonférentielle des surfaces de contact. On peut admettre comme valeur moyenne des pertes totales en watt environ deux fois l'intensité de courant mesurée en ampères. Cela permet de déterminer à peu près le rendement à pleine charge pour chaque tension choisie.

En même temps, on a dessiné le rendement probable pour les tensions inférieures et supérieures en fonction de l'intensité pour les puissances représentées par la surface hachurée. Comme on le voit, ces valeurs sont assez élevées pour les puissances supérieures à environ 250 kW pour que l'utilisation de ces machines dans l'électro-chimie et la soudure par résistance, domaines qui leur étaient encore fermés, soit intéressante. La construction des dynamos unipolaires a fait de tels progrès, que celles-ci peuvent être utilisées avec avantage dans l'industrie à la place des dynamos à collecteur de basses tensions. Les expériences pratiques permettront de faire encore de nouveaux progrès.

(MS 721)

N. Widmer. (J. C.)

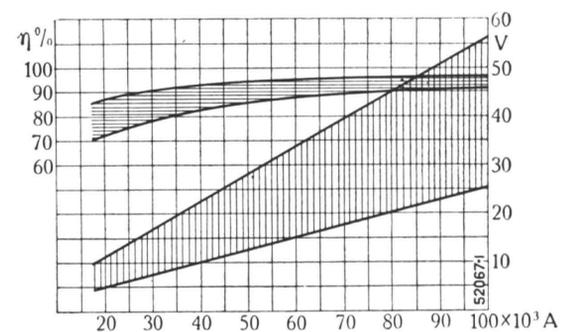


Fig. 5. — Domaine d'utilisation courant et tension d'une dynamo unipolaire (hachure verticale), ainsi que son rendement (hachure horizontale).

INFLUENCE DU SYSTÈME DE COMMANDE SUR LE DIMENSIONNEMENT ET LE FONCTIONNEMENT DES DYNAMOS DES VÉHICULES DIESEL-ÉLECTRIQUES.

Indice décimal 621.335—833.6 : 621.337.

Cet article traite à fond l'influence du système de commande des véhicules Diesel-électriques sur le dimensionnement et le fonctionnement de la dynamo principale. Une comparaison entre les divers systèmes de commande montre que celle par rhéostat de champ à servo-moteur Brown Boveri est actuellement la seule qui puisse adapter la puissance de la dynamo principale à la puissance momentanée du moteur Diesel et résout ainsi parfaitement le problème de la transmission électrique.

1° PRINCIPE.

La transmission électrique sur les véhicules Diesel n'utilise que le courant continu et comprend, quelle que

soit la solution choisie, une dynamo principale directement accouplée au moteur Diesel. La dynamo alimente les moteurs de traction à tension et courant variables suivant la vitesse de marche et l'effort de traction. Nous donnons, ci-après, les caractéristiques essentielles du groupe générateur et du système de commande qui serviront de base aux considérations qui vont suivre sur le dimensionnement et le fonctionnement de la dynamo.

- 1° Le moteur Diesel travaille le plus économiquement lorsqu'il fournit une puissance constante. Il faut donc s'efforcer de donner à la dynamo une caractéristique qui s'adapte aussi bien que possible à cette condition de fonctionnement du moteur Diesel. La puissance constante du moteur Diesel est représentée, dans le diagramme courant-tension, par une hyperbole équilatère.
- 2° La puissance de dimensionnement et la grandeur (poids et dimensions) de la dynamo ne sont pas déterminées uniquement par la puissance à transmettre¹⁾. La puissance de dimensionnement est d'autant plus élevée pour une puissance et une vitesse données du moteur Diesel que le courant maximum (effort de traction au démarrage) ou le courant unihoraire (effort de traction unihoraire) d'une part et la tension maximum (vitesse maximum du véhicule) d'autre part, sont élevés. La puissance de dimensionnement est en général déterminée correctement comme le montre l'expérience par le produit du courant unihoraire par la tension maximum. La grandeur de la dynamo (poids et dimensions) n'est cependant pas déterminée uniquement par la puissance de dimensionnement car le système de commande joue aussi un grand rôle. Outre la résistance mécanique, les conditions thermiques et magnétiques interviennent. Le courant de démarrage et le courant unihoraire déterminent l'échauffement du rotor (section cuivre, ventilation); le courant d'excitation nécessaire à l'obtention de la tension maximum détermine l'échauffement de l'enroulement d'excitation. Tandis que les sollicitations thermiques ne dépendent pas du genre de commande, il existe une dépendance étroite entre les diverses commandes et les sollicitations magnétiques de la dynamo (saturation du fer). La commutation au démarrage et l'allure de la caractéristique externe dépendent du degré de saturation.
- 3° Les différents systèmes de commande des transmissions électriques des véhicules Diesel peuvent être classés en deux groupes selon la disposition et le fonctionnement²⁾. Le premier groupe comprend les systèmes à dynamo autorégulatrice pour lesquels la tension de la dynamo est influencée par l'intensité de courant et par la variation de vitesse du moteur Diesel. L'autre groupe est celui des systèmes de régulation à puissance constante du moteur Diesel pour lesquels la puissance de la dynamo est maintenue constante par variation de l'excitation séparée au moyen d'un dispositif automatique de réglage.
- 4° Le domaine d'utilisation de l'équipement moteur du véhicule est délimité, par définition, d'un côté par l'effort de traction maximum et de l'autre par la vitesse maximum à pleine puissance. Un domaine d'utilisa-

tion étendu augmente les possibilités d'emploi du véhicule. Une commande parfaite au point de vue du moteur Diesel est celle qui n'exige pas du moteur un couple plus élevé que celui qu'il peut fournir à la vitesse considérée. Cette condition à laquelle doit satisfaire la transmission électrique pour réaliser une courbe hyperbolique des efforts de traction entraîne la réalisation des points suivants:

- a) Utilisation de la puissance disponible du moteur Diesel (en tout cas à la vitesse de pleine charge) pour tous les efforts de traction et vitesse de marche sans intervention du conducteur.
- b) Obtenir une allure hyperbolique des caractéristiques externes de la dynamo principale en évitant si possible une baisse de la vitesse du moteur Diesel. La baisse de la vitesse représente une sollicitation inopportune du moteur Diesel. Une baisse de la vitesse est tout à fait inadmissible si elle fait travailler le moteur dans le voisinage d'une vitesse critique (groupe Diesel dynamo avec accouplement rigide).
- c) Influence aussi réduite que possible de la température extérieure et de l'échauffement sur le fonctionnement de la dynamo.
- d) Possibilité, pour une vitesse donnée du moteur Diesel, de varier la charge. Ce point est très important pour obtenir suffisamment de gradins de réglage lors de l'emploi de moteurs Diesel qui n'ont, à cause des vitesses critiques, qu'une ou deux vitesses de régime (spécialement les moteurs de locomotive). Cette possibilité est nécessaire pour l'utilisation de la puissance maximum qui ne peut être obtenue pour les moteurs Diesel à vitesse constante que par augmentation de l'injection.
- e) Tenir compte des variations de la puissance absorbée par la dynamo auxiliaire en vue d'utiliser complètement, dans toutes les conditions de service, la puissance du moteur Diesel tout en évitant sûrement les surcharges.
- f) Éviter que le fonctionnement de la dynamo principale influe sur la tension de la dynamo auxiliaire. (La tension de cette dernière doit être aussi constante que possible, quelle que soit la vitesse, afin d'assurer un fonctionnement parfait des services auxiliaires.)
- g) Système de commande simple, léger et sûr permettant un domaine d'utilisation étendu.

Cet article présente une comparaison entre les principaux systèmes à dynamo autorégulatrice et la commande à rhéostat de champ à servo-moteur Brown Boveri¹⁾ et en déduit les éléments essentiels de dimensionnement des dynamos principales.

¹⁾ Revue Brown Boveri, novembre 1936, page 247.

²⁾ A. E. Müller, Steuerungen für Diesel-elektrische Fahrzeuge, Schweiz. Techn. Z. 1934, n° 42.

¹⁾ Revue Brown Boveri, décembre 1935, page 239 et Revue Brown Boveri, avril 1938, page 63.

II° SYSTÈMES DE COMMANDE A DYNAMO AUTORÉGULATRICE; DIMENSIONNEMENT DE LA DYNAMO PRINCIPALE.

Afin d'utiliser complètement la puissance du moteur Diesel, le produit $\frac{I \times E}{\eta}$ doit être constant (I = courant, E = tension, η = rendement). La représentation graphique de la tension en fonction du courant, pour des vitesses données, conduit à des caractéristiques hyperboliques que nous appellerons par la suite «hyperboles de puissance».

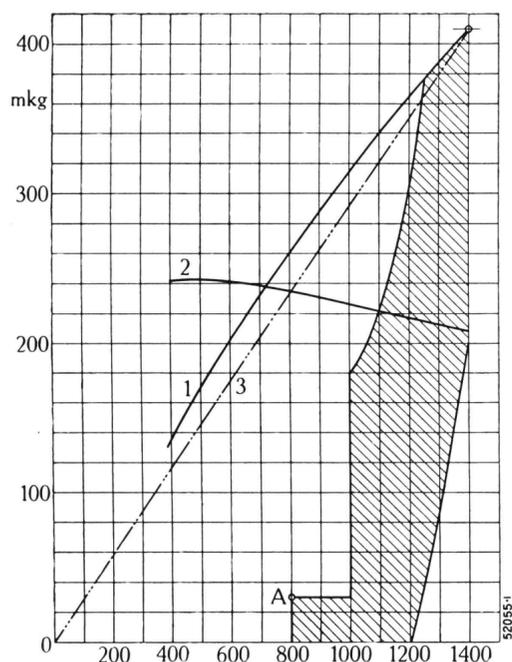


Fig. 1. — Courbe de fonctionnement d'un moteur Diesel d'une puissance nominale de 410 ch à 1400 t/min.

Abscisses: Vitesse en t/min.
Ordonnées: Puissance en ch.
Couple en mkg.

- 1 = Puissance maximum possible du moteur Diesel.
 - 2 = Couple maximum correspondant à la courbe 1.
 - 3 = Puissance du moteur Diesel pour un couple constant correspondant à la puissance nominale à 1400 t/min (régulateur contre la butée).
 - A = Point de fonctionnement pour la plus faible vitesse du moteur Diesel (services auxiliaires seuls).
- La surface hachurée = Domaine de puissance que peut fournir le moteur Diesel.

La figure 1 donne, à titre d'exemple, les courbes de travail d'un moteur Diesel dont la vitesse à pleine charge est 1400 t/min. La courbe 1 représente la puissance maximum possible du moteur Diesel correspondant au couple de la figure 2. Au couple constant à pleine injection, (régulateur contre la butée) correspond la courbe de puissance 3 en fonction de la vitesse. La surface hachurée représente le domaine de charge dans lequel le moteur Diesel fonctionne parfaitement et ne demande qu'un

minimum d'entretien (ce domaine varie selon le type et la provenance du moteur Diesel).

On a reporté dans la figure 2 les caractéristiques externes pour des vitesses de 1400 à 1000 t/min d'une dynamo avec excitation shunt et séparée et avec un enroulement anticompound, ainsi que les hyperboles de puissance pour un couple constant du moteur Diesel correspondant à ces vitesses. En A et A', B et B', se coupent les caractéristiques externes et les hyperboles de puissance correspondant aux mêmes vitesses. Ces points d'intersection correspondent aux points de fonctionnement pour lesquels la puissance du moteur Diesel est pleinement utilisée. Entre les points A et A', la caractéristique externe passe au-dessus de l'hyperbole de puissance; donc dans cette région la dynamo sur-

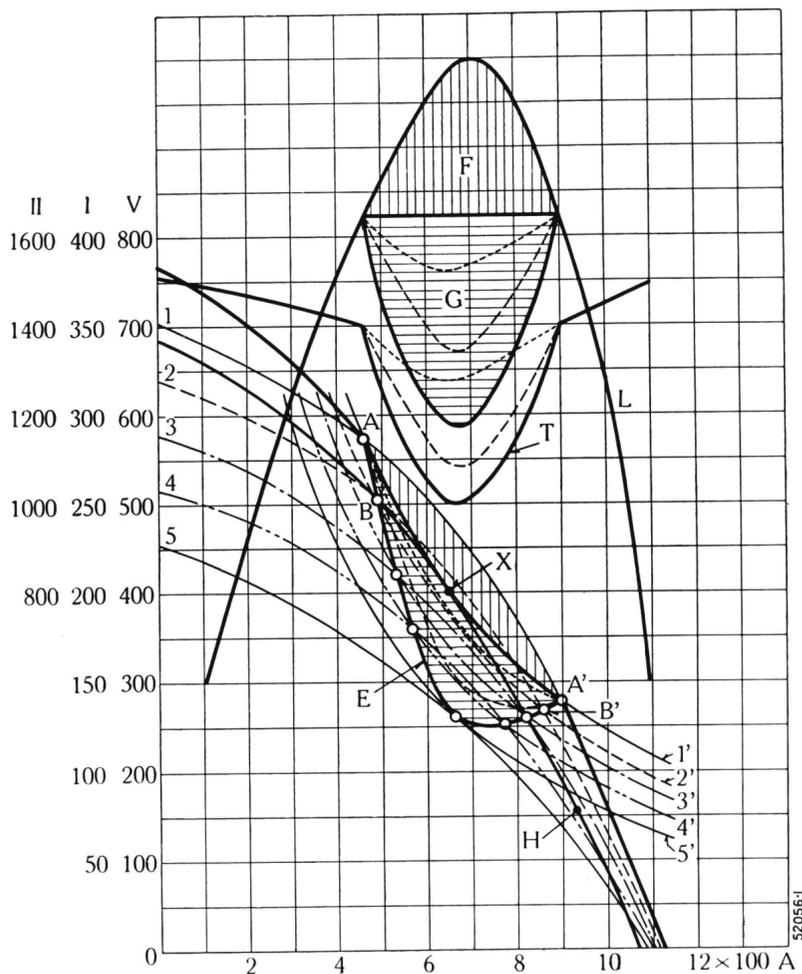


Fig. 2. — Courbes de fonctionnement d'un groupe Diesel-dynamo autorégulatrice.

Abscisses: Intensité en A.
Ordonnées: Tension en V.

I = Puissance à l'arbre du moteur Diesel en ch.
II = Vitesse en t/min.

Courbes 1, 2, ... 5 = Caractéristiques externes pour une excitation séparée constante et une vitesse constante de 1400, 1300, ... 1000 t/min.

Courbes 1', 2', ... 5' = Hyperboles de puissance pour un couple constant du moteur Diesel (régulateur contre la butée) et pour des vitesses de 1400, 1300, ... 1000 t/min.

Courbe L = Puissance à l'arbre du moteur Diesel.

Courbe T = Vitesse du groupe Diesel-dynamo.

Courbe E = Tension de la dynamo lors de «baisse de vitesse».

Courbe H = Caractéristique externe de la dynamo à 1400 t/min ne provoquant pas de «baisse de vitesse».

Suppositions: Echauffement moyen des enroulements d'excitation, par définition résistance des enroulements 100%, correspondant à la caractéristique d'excitation 3' de la figure 3.

Les courbes en traits continus correspondent à un couple constant du moteur Diesel et à une excitation séparée constante de la dynamo.

Les courbes pointillées correspondent au couple maximum du moteur Diesel d'après la courbe 2 de la figure 1 et à une excitation séparée constante de la dynamo.

Les courbes ponctuées correspondent au couple maximum du moteur Diesel d'après la courbe 2 de la figure 1 et à une excitation séparée de la dynamo, variant proportionnellement à la vitesse par suite de la baisse de tension de la dynamo auxiliaire.

charge le moteur Diesel. La surface hachurée F donne une image de la surcharge. Comme d'après les caractéristiques de fonctionnement du moteur Diesel une surcharge provoque forcément une baisse de la vitesse, il se produit donc aussi une réduction de la puissance aux bornes de la dynamo. La baisse de vitesse est d'autant plus faible que les caractéristiques externes sont peu incurvées ou qu'elles coupent moins les hyperboles de puissance correspondantes. Il ne se produit aucune baisse de vitesse si les caractéristiques externes sont tangentes aux hyperboles de puissance comme la

courbe H de la figure 2 ou ne les coupent pas du tout. Toutefois, la courbe H ne permet l'utilisation complète de la puissance qu'au point X.

En admettant que le moteur Diesel travaille à pleine injection (limitée par la butée) et donne à 1400 t/min sa puissance normale (courbe 3 de la fig. 1), la courbe de travail effectif du groupe Diesel-dynamo autorégulatrice dépendant des caractéristiques du moteur et de la dynamo, peut être déterminée comme suit: la courbe 1 de la figure 2 est la caractéristique externe de la dynamo à 1400 t/min et excitation séparée maximum. Aux points A et A', toute la puissance du moteur Diesel est utilisée. Les courbes 2 à 5 sont les caractéristiques externes de la dynamo, aussi pour excitation séparée maximum et pour les vitesses de 1300—1000 t/min. Les hyperboles de puissance sont tracées pour les vitesses de 1400—1000 t/min en admettant que pour ces vitesses le moteur Diesel travaille à couple constant (régulateur contre la butée).

La courbe reliant les points d'intersection des caractéristiques externes et des hyperboles de puissance correspondantes est la courbe de travail E telle qu'elle s'établit automatiquement par suite de la baisse de vitesse du moteur Diesel. Au lieu de la surcharge théorique représentée par la surface F, il y a en réalité une puissance non utilisée correspondant à la surface G. La courbe des vitesses est donnée par la courbe T. Au point de vue de l'exploitation, la perte de puissance G et la baisse de vitesse doivent être maintenues aussi faibles que possible. Par des artifices de couplage et d'autres mesures, les pertes de vitesse peuvent être fortement réduites. Si, par exemple, le couple du moteur Diesel croît lorsque la vitesse diminue selon la courbe 2 de la figure 1, les conditions s'améliorent et l'on obtient les courbes pointillées de la figure 2. Si l'on admet, en outre, que l'excitation séparée, par suite de la baisse de tension de la dynamo auxiliaire, varie proportionnellement à la vitesse, les conditions sont encore plus favorables et l'on obtient les courbes ponctuées de la figure 2.

Un autre moyen de réduire la baisse de vitesse du moteur Diesel est d'avoir une excitation à deux gradins; l'excitation réduite n'étant utilisée que dans le

domaine où la dynamo à pleine excitation surchargerait le moteur Diesel (système R. Z. M.)¹⁾.

Mentionnons finalement que pour augmenter le domaine d'utilisation de l'équipement moteur, on peut

¹⁾ A. E. Müller, Steuerungen für diesel-elektrische Fahrzeuge; Schweiz. Techn. Z. 1934, n° 42.

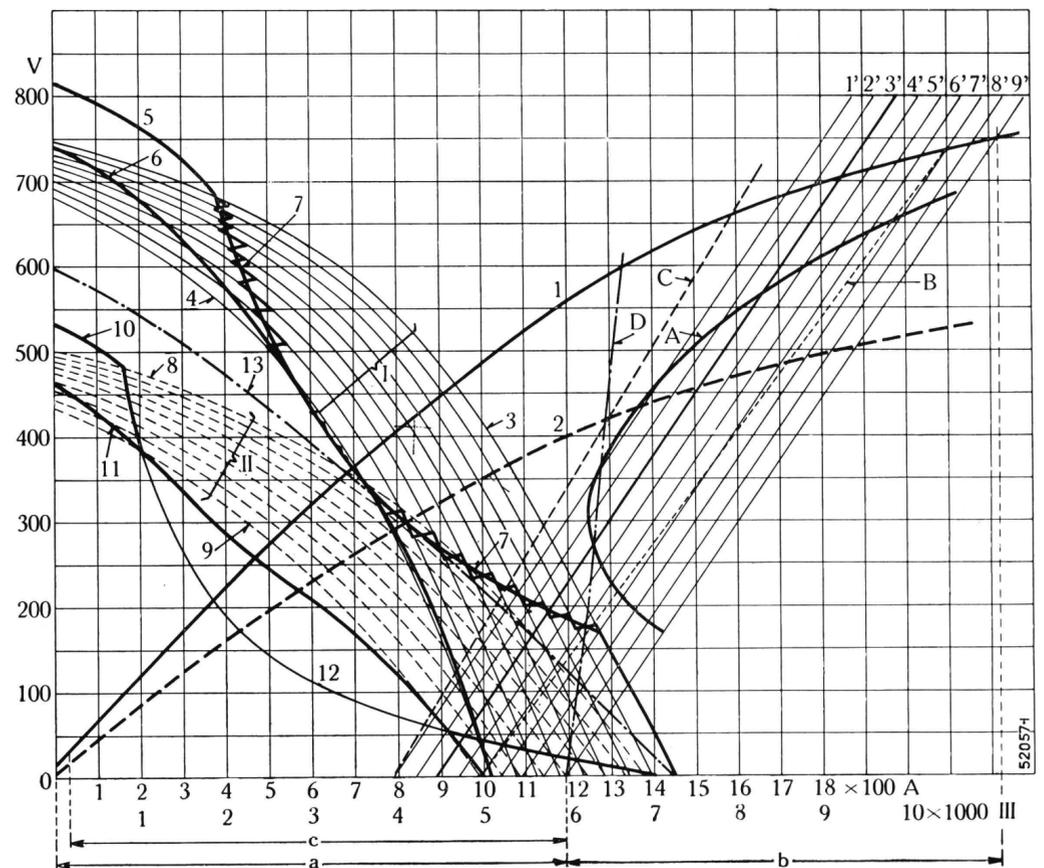


Fig. 3. — Courbe de fonctionnement d'un groupe Diesel-dynamo à commande par régulateur de champ à servo-moteur.

Abscisses: Intensité du courant d'induit en A.

III = Excitation totale en ampères-tours.

Ordonnées: Tension aux bornes en V.

Courbe 1 = Tension à vide à 1400 t/min.

Courbe 2 = Tension à vide à 1000 t/min.

Famille de courbes I = Caractéristiques externes pour une vitesse constante de 1400 t/min et divers réglages de l'excitation séparée.

La courbe 3 correspond à l'excitation séparée maximum.

La courbe 4 correspond à l'excitation séparée minimum.

Le tronçon de courbe 5 correspond à l'excitation séparée maximum et à une augmentation de la vitesse du moteur Diesel par suite de la baisse de la charge.

Le tronçon de courbe 6 correspond à l'excitation séparée minimum et à une augmentation de la vitesse du moteur Diesel par suite de la baisse de la charge.

Courbe 7 = Tension réglée de la dynamo principale à 1400 t/min pour une puissance de traction de 391 ch (puissance totale du moteur Diesel, décompte fait de 19 ch pour les services auxiliaires).

Famille de courbes II = Caractéristiques externes pour une vitesse constante de 1000 t/min et divers réglages de l'excitation séparée.

La courbe 8 correspond à l'excitation séparée maximum.

La courbe 9 correspond à l'excitation séparée minimum.

Le tronçon de courbe 10 correspond à l'excitation séparée maximum et à une augmentation de la vitesse du moteur Diesel par suite de la baisse de la charge.

Le tronçon de courbe 11 correspond à l'excitation séparée minimum et à une augmentation de la vitesse du moteur Diesel par suite de la baisse de la charge.

Courbe A = Courbe d'excitation pour une puissance constante du moteur Diesel de 410 ch à 1400 t/min (19 ch pour les services auxiliaires).

1', 2', ... 9' = Droites d'excitation.

Courbe B = Droite d'excitation pour la machine froide (correspondant par définition à 90% de la résistance des enroulements d'excitation).

Courbe 3' = Droite d'excitation pour machine de température moyenne, correspondant par définition à une résistance de 100% des enroulements d'excitation.

Courbe C = Droite d'excitation pour la machine chaude (correspond par définition à la résistance de 110% des enroulements d'excitation).

Courbe D = Droite d'excitation shunt affaiblie.

Courbe 12 = Tension réglée de la dynamo principale à 1000 t/min pour une puissance de traction de 121 ch (puissance du moteur Diesel à 1000 t/min décompte fait de 19 ch pour les services auxiliaires).

Courbe 13 = Caractéristique externe avec courant de démarrage maximum et tension maximum réduite dans le but d'éviter l'intersection avec l'hyperbole de puissance.

établir un système de commande à deux ou plusieurs caractéristiques (comme 6 et 13 de la figure 3).

Ces quelques considérations sommaires montrent que les systèmes à dynamo autorégulatrice donnent un bon réglage automatique de la puissance du moteur Diesel sans toutefois être parfaits. Ces systèmes demandent, pour réduire au minimum la baisse de vitesse, que les caractéristiques externes soient peu incurvées, se rapprochant autant que possible de droites. Au point de vue dimensionnement de la dynamo, cela signifie qu'elle doit avoir un fort enroulement anticompound. Une faible saturation est en outre nécessaire pour que les variations de vitesse aient une grande influence sur la tension. En outre, pour compenser la très grande influence de la température des enroulements sur le courant d'excitation et donc sur le rapport des diverses excitations, il est nécessaire d'insérer de grandes résistances dans les circuits des excitations shunt et séparée. Toutefois, on ne peut pas éviter que la baisse de vitesse pour les enroulements froids soit environ le double que lorsqu'ils sont chauds. L'expérience montre que dans des conditions normales (enroulements d'excitation chauds), il faut compter avec une baisse de vitesse de 5—10 %.

III° DIMENSIONNEMENT DE LA DYNAMO LORSQU'ON UTILISE LA COMMANDE A RHÉOSTAT DE CHAMP A SERVO-MOTEUR (COMMANDE R. C. S.).

Alors qu'avec les systèmes de commande à dynamo autorégulatrice, chaque surcharge provoque une baisse de la vitesse du moteur Diesel, la commande R. C. S., qui ramène la tringlerie d'injection à une position invariable, chaque baisse de vitesse dans le domaine d'utilisation est aussitôt supprimée. Les charges partielles sont aussi réglées à une valeur constante, d'où il résulte des conditions de charge clairement définies. Le choix des diverses vitesses de régime et des couples est arbitraire. A une vitesse donnée peuvent correspondre plusieurs couples et un couple déterminé peut être exercé à plusieurs vitesses de régime, ce qui permet de réaliser, à volonté, tous les gradins de puissance nécessaires. La commande R. C. S. est le seul système qui permet au moteur Diesel de travailler pour chaque gradin à une vitesse constante indépendamment de toutes les influences extérieures. Les conditions de fonctionnement du moteur Diesel sont ainsi grandement simplifiées et le moteur est ménagé. La commande R. C. S. supprime l'influence des faits suivants :

a) Les variations de la puissance absorbée par les services auxiliaires. A chaque instant, toute la différence entre la puissance du moteur Diesel et la consommation des services auxiliaires est absorbée par la dynamo principale.

b) La qualité du combustible. Si le combustible est de mauvaise qualité, la dynamo principale n'absorbe que la puissance correspondant au couple réduit.

c) L'état du moteur Diesel. Si pour une raison quelconque le moteur Diesel ne peut pas fournir son couple nominal, la dynamo principale est réglée pour exiger du moteur que le couple réduit. Par exemple, si un cylindre d'un moteur à six cylindres ne fonctionne plus, la dynamo ne fournit alors que les 5/6 de sa puissance de sorte que les cylindres en bon état ne sont ainsi pas surchargés.

d) La commande R. C. S. compense automatiquement les différences de résistance des enroulements d'excitation dues aux variations de température ainsi que l'influence sur la tension des variations d'aimantation.

e) Il est avantageux de maintenir constante la tension de la dynamo auxiliaire à l'aide d'un régulateur de tension. Tout réglage tenant compte des besoins de la dynamo principale (nécessaire avec les systèmes dynamo autorégulatrice) est superflu.

Les considérations suivantes donnent un aperçu de l'influence du fonctionnement du R. C. S. sur le dimensionnement de la dynamo. Dans le diagramme de la figure 3 sont dessinées les courbes de tension d'un groupe Diesel dynamo, 1 à 1400 t/min, 2 à 1000 t/min. On suppose que les ampères-tours totaux d'excitation sont répartis entre les excitations séparées, shunt et anticompound. Le réglage peut s'effectuer dans les excitations shunt ou séparée. Nous choisissons l'excitation séparée.

La courbe A est la courbe d'excitation, nombre d'ampères-tours des excitations shunt et séparée nécessaires pour l'utilisation de la puissance constante du moteur Diesel à 1400 t/min. Aux neuf valeurs d'excitation séparée, droites 1' à 9', correspondent les familles de caractéristiques externes I et II pour 1400 et 1000 t/min. Le R. C. S. tend à régler le long de l'hyperbole de puissance. Plus le R. C. S. a de gradins, plus la courbe de réglage, en dents de scie, se rapproche de l'hyperbole. Si l'on voulait éviter la baisse de vitesse sans R. C. S., on devrait régler l'excitation séparée à sa plus petite valeur, droite 1', ce qui réduirait le courant de démarrage de 1400 à 1000 A, c'est-à-dire d'environ 30 %. De plus, la tension maximum à 200 A se trouverait réduite d'environ 11 %, de 765 à 680 V. La pleine excitation séparée est nécessaire pour obtenir le courant maximum au démarrage. Si avec un système à dynamo autorégulatrice on veut obtenir le courant maximum de démarrage sans que pour cela la caractéristique externe ne coupe l'hyperbole de puissance, il faut réduire l'excitation shunt selon la caractéristique D. On obtient alors la caractéristique externe 13, la tension maximum pour un courant de

200 A, de 760 V avec R. C. S., est alors abaissée à 540 V. Si l'on emploie le système à deux caractéristiques à 1400 t/min, par exemple, les courbes 13 et 6, on a le courant maximum et une tension de 680 V pour 200 A.

La figure 4 montre les courbes de réglage obtenues avec la commande R. C. S. pour des vitesses de 1000 à 1400 t/min, le réglage de l'excitation étant choisi de sorte que la puissance du moteur Diesel soit constante à 1400 t/min. On voit sur ce diagramme que pour une étendue de réglage correspondant aux droites d'excitation 1' à 9' de la figure 3, la puissance n'est pas maintenue constante aux vitesses inférieures à 1400 t/min pour tout le domaine d'utilisation. Si l'on veut maintenir la puissance constante à toutes les vitesses de régime, il faut étendre l'étendue de réglage du R. C. S. de

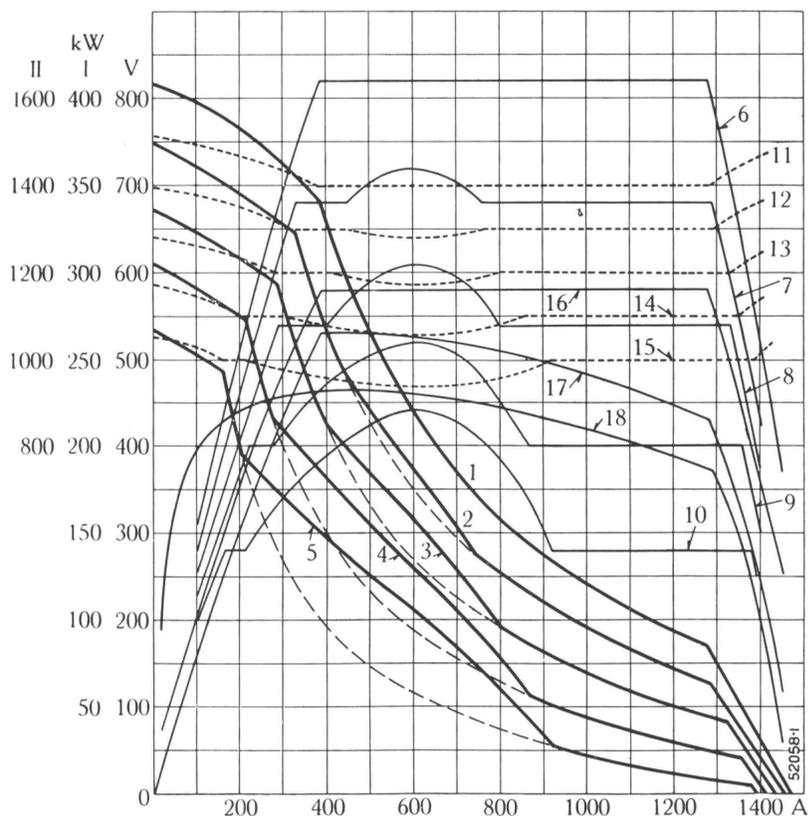


Fig. 4. — Courbes de fonctionnement d'un groupe Diesel-dynamo, avec régulateur de champ à servo-moteur.

La puissance n'est pas maintenue constante aux charges partielles dans tout le domaine d'utilisation.

Abscisses: Courant de la dynamo principale en A.

Ordonnées: Tension aux bornes en V.

I = Puissance du moteur Diesel en ch et puissance de la dynamo principale en kW.

II = Vitesse en t/min.

- Courbe 1 = Tension de la dynamo principale à 1400 t/min réglée par régulateur de champ à servo-moteur. Puissance de traction 391 ch à l'arbre du moteur Diesel (410 ch, moins 19 ch pour les services auxiliaires).
- Courbes 2-5 = Tension de la dynamo pour charges partielles du moteur Diesel à 1300, 1200, 1100 et 1000 t/min. Par suite de la faible étendue de réglage de l'excitation séparée, ces courbes ne suivent qu'imparfaitement les hyperboles de puissance correspondantes.
- Courbes pointillées = Hyperboles de puissance pour les charges partielles de 1300, 1200, 1100 et 1000 t/min. L'augmentation de l'étendue de réglage de l'excitation séparée a permis de maintenir les puissances constantes même aux charges partielles.
- Courbes 6-10 = Puissances totales à l'arbre du moteur Diesel pour les vitesses de 1400, 1300, 1200, 1100 et 1000 t/min.
- Courbes 11-15 = Vitesse du groupe Diesel-dynamo correspondant aux courbes de fonctionnement de 1-5 et 6-10.
- Courbes 16 = Puissance en kW, absorbée par la dynamo principale à 1400 t/min (on a tenu compte des 19 ch nécessaires aux services auxiliaires).
- Courbe 17 = Puissance en kW fournie par la dynamo principale à 1400 t/min.
- Courbe 18 = Rendement de la dynamo principale à 1400 t/min.

façon que l'excitation soit suffisamment réduite pour que la caractéristique externe à 1000 t/min soit tangente à l'hyperbole de puissance 12 de la figure 3. Le moteur Diesel n'est alors pas surchargé car il travaille suivant les hyperboles de puissance dessinées en pointillés sur la figure 4 et choisies pour des puissances admissibles, conformément au domaine d'utilisation du moteur Diesel, surface hachurée de la figure 1.

Dans la figure 5, on a porté les courbes de fonctionnement du groupe Diesel-dynamo pour une étendue de réglage du R. C. S. plus grande que dans le diagramme de la figure 4, avec excitation séparée maximum pour 1400 t/min et minimum à 1000 t/min.

La figure 6 donne une idée de l'influence des diverses répartitions des ampères-tours entre les excitations

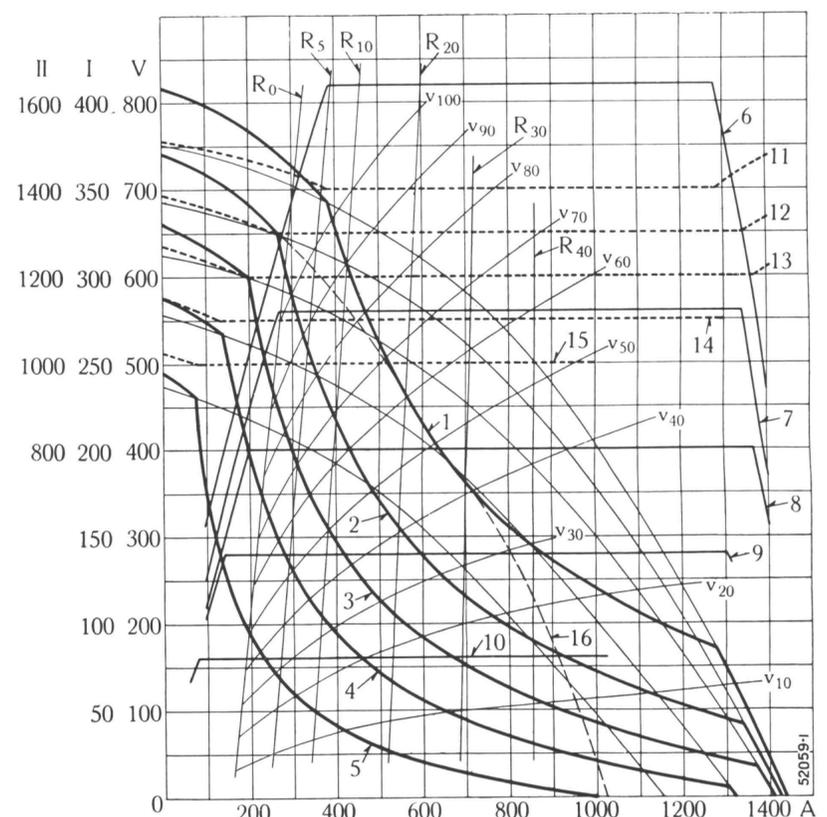


Fig. 5. — Courbes de fonctionnement d'un groupe Diesel-dynamo à régulateur de champ à servo-moteur avec maintien constant de la puissance à toutes les charges; excitation séparée maximum à 1400 t/min et minimum à 1000 t/min.

Abscisses: Courant de la dynamo principale en A.

Ordonnées: Tension aux bornes en V.

I = Puissance du moteur Diesel en ch.

II = Vitesse en t/min.

- Courbes 1-5 = Tension réglée de la dynamo principale à 1400, 1300, 1200, 1100 et 1000 t/min; la charge du moteur Diesel est comprise à l'intérieur de la surface hachurée de la figure 1 (on a tenu compte des 19 ch nécessaires pour les services auxiliaires).
- Courbes 6-10 = Puissances totales à l'arbre du moteur Diesel pour 1400, 1300, 1200, 1100 et 1000 t/min.
- Courbes 11-15 = Vitesses du groupe Diesel-dynamo correspondant aux courbes de travail 1-5 et 6-10.
- Courbe 16 = Caractéristique externe pour excitation séparée minimum à 1400 t/min.
- Courbes V_{10} , V_{20} , ... V_{100} = Vitesse de marche en km/h.
- Courbes R_0 , R_5 , R_{10} , ... R_{40} = Courbes de résistance au roulement pour des rampes de 0, 5, 10 ... 40‰ et pour un poids donné du train.

A l'aide des familles de courbes V_0 - V_{100} et R_0 - R_{40} , on peut calculer aisément le courant et la tension de la dynamo principale pour chaque régime de marche.

séparée et anticompound. Comme base de l'étude, on admet que l'hyperbole de puissance 1 doit être respectée et que la puissance du moteur Diesel est complètement utilisée à 685 V, 380 A et 1400 t/min. On obtient alors les conditions suivantes :

- 1° Si la dynamo n'a qu'une excitation shunt, la caractéristique externe correspondant à la droite d'excitation 2' est la courbe 2. Le courant de démarrage désiré, environ 1400 A, n'est pas atteint.
- 2° Si l'on ajoute à l'excitation shunt selon 1° une faible excitation séparée (droite d'excitation 3'), on obtient la caractéristique externe 3.

- 3° Si l'excitation séparée est augmentée (droite d'excitation 4') et que l'on prévoit simultanément une excitation anticompound, on obtient la caractéristique externe 4.
- 4° Si l'on supprime l'excitation shunt et que la dynamo ne travaille qu'avec excitation séparée (droite d'excitation 5') et excitation anticompound, la caractéristique externe prend la forme de la courbe 5.
- 5° Si la dynamo travaille exclusivement avec excitation séparée (donc sans excitation shunt et anticompound), on a la droite d'excitation 6' et la caractéristique externe 6.

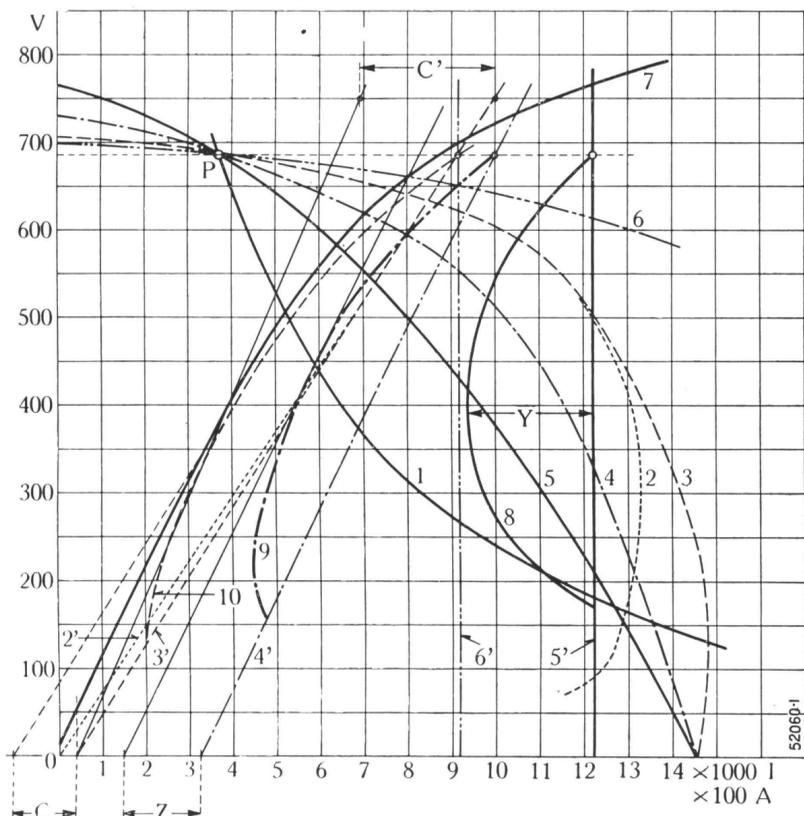


Fig. 6. — Courbes de fonctionnement de la dynamo pour diverses combinaisons des excitations.

Abscisses : Intensité du courant d'induit en A.
I = Intensité du champ en A-t.
Ordonnées : Tension aux bornes en V.

- Courbe 1 = Hyperbole de puissance pour une puissance constante donnée du moteur Diesel à 1400 t/min.
 - Point de fonctionnement P = Tension maximum pour l'utilisation complète de la puissance du moteur Diesel.
 - Courbe 2 = Caractéristique externe pour une excitation shunt pure de la dynamo, correspondant à la droite d'excitation 2'.
 - Courbe 3 = Caractéristique externe avec excitation shunt semblable à celle de la courbe 2 et avec une légère excitation séparée, courbe correspondant à la droite d'excitation 3'.
 - Courbe 4 = Caractéristique externe avec excitation séparée et anticompound, correspondant à la droite d'excitation 4'.
 - Courbe 5 = Caractéristique externe avec excitation séparée correspondant à la droite d'excitation 5', excitation anti-compound.
 - Courbe 6 = Caractéristique externe avec excitation séparée seule, correspondant à la droite d'excitation 6'.
 - Courbe 7 = Tension à vide.
 - Courbe 8 = Courbe d'excitation nécessaire pour maintenir le réglage sur l'hyperbole de puissance 1, lorsque la dynamo a une excitation séparée et anticompound. (Y = Etendue de réglage.)
 - Courbe 9 = Courbe d'excitation nécessaire pour maintenir le réglage sur l'hyperbole de puissance 1 lorsque la dynamo a une excitation séparée shunt et anticompound. (Z = Etendue de réglage.)
 - Courbe 10 = Courbe d'excitation nécessaire pour maintenir le réglage sur l'hyperbole de puissance 1 lorsque la dynamo est sans excitation anticompound.
- C est l'étendue de réglage par excitation séparée, C' l'étendue de réglage par excitation shunt.

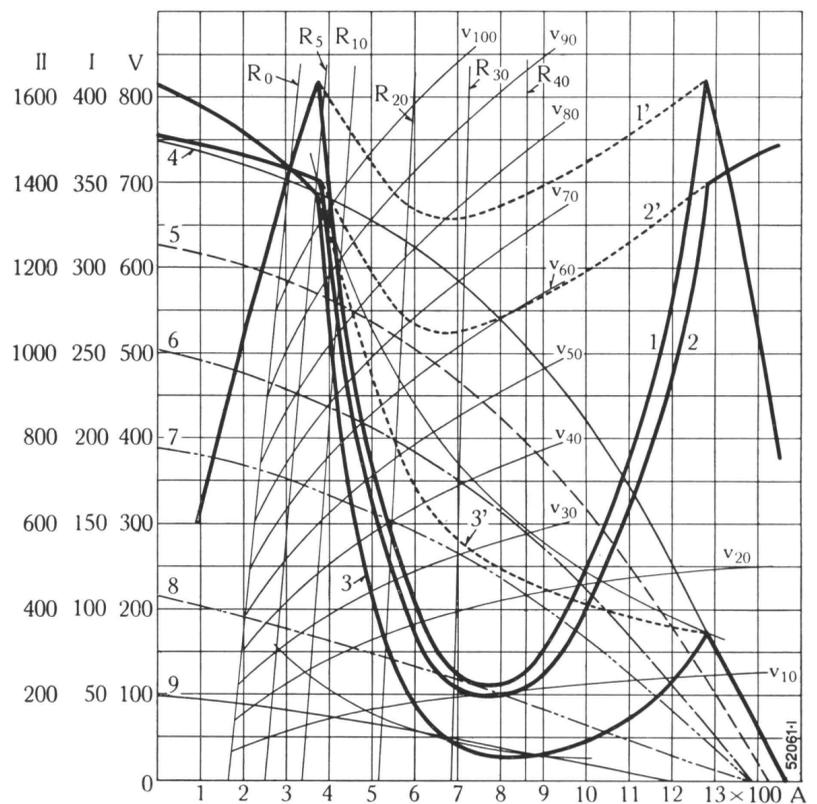


Fig. 7. — Courbes de fonctionnement d'un groupe Diesel-dynamo autorégulatrice.

(Même courant de démarrage et même vitesse maximum qu'avec la commande par régulateur de champ à servo-moteur.)

Abscisses : Courant de la dynamo en A.
Ordonnées : Tension de la dynamo en V.
I = Puissance du moteur Diesel en ch.
II = Vitesse en t/min.

Les courbes en traits forts 1, 2 et 3 correspondent à un couple constant du moteur Diesel, ainsi qu'à une excitation séparée indépendante de la vitesse.

- Courbe 1 = Puissance fournie par le moteur Diesel.
- Courbe 2 = Vitesse du groupe.
- Courbe 3 = Tension aux bornes de la dynamo.

Les courbes ponctuées correspondent au couple maximum du moteur Diesel d'après la courbe 2 de la figure 1 et à une excitation variant proportionnellement à la vitesse.

Les courbes 4, 5; 6, 7, 8 et 9 = caractéristiques externes pour une vitesse constante de 1400, 1200, 1000, 800, 475, 240 t/min.

Les familles de courbes $V_{10}, V_{20} \dots R_0, R_5 \dots$ semblables à celles de la figure 5.

L'étude précédente montre : 1° qu'une dynamo à excitation séparée pure, semblable à celle employée souvent sur les véhicules Diesel-électriques à commande Léonard à réglage à main, ne limite pas le courant de démarrage car la caractéristique externe ne tombe que légèrement et 2° que plus l'excitation séparée et l'enroulement anticompound sont forts, plus la caractéristique externe est droite (courbes 3, 4 et 5).

IV° COMPARAISON ENTRE LE SYSTÈME DE COMMANDE A DYNAMO AUTORÉGULATRICE ET CELUI A RHÉOSTAT DE CHAMP A SERVO-MOTEUR.

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre II, le système de commande à dynamo autorégulatrice demande que les caractéristiques externes soient aussi peu incurvées que possible, c'est-à-dire qu'il faut choisir des excitations séparée et anticompound aussi fortes que possible. Par contre, la commande R. C. S. permet d'avoir les caractéristiques plus bombées, par conséquent une excitation séparée plus faible. Pour le système de commande à dynamo autorégulatrice, il est avantageux de choisir la caractéristique 5 et pour le système R. C. S. la caractéristique 4 de la figure 6. Pour une dynamo déterminée déjà construite, les ampères-tours se répartissent comme suit pour le point de fonctionnement correspondant au courant unihoraire :

Courbe 5

Système à dynamo autorégulatrice :

Excitation séparée: env.	51 %
Excitation anticompound:	49 %
Total:	100 %

Courbe 4

Système R. C. S. Excitation séparée: env.	14 %
Excitation shunt: »	28 %
Excitation anticompound:	12 %
Total:	54 %

100 % = Nombre d'ampères-tours total du système précédent.

Il faut donc, avec le système de commande à dynamo autorégulatrice, presque le double d'ampères-tours sur les pôles.

La courbe d'excitation 8 de la figure 6 permet de déterminer l'étendue nécessaire de réglage de l'excitation séparée pour suivre l'hyperbole de puissance 1 si la dynamo est construite avec excitations séparée et anticompound. Le domaine maximum de réglage Y s'étend de 9300 à 12 200 A-t. Donc, si l'enroulement possède 1000 spires, le courant doit varier de 9,3 à 12,2 A. L'étendue de réglage est relativement faible mais par contre l'excitation séparée importante.

La courbe d'excitation 9 permet de déterminer cette étendue de réglage si la dynamo est construite avec *excitations séparée, shunt et anticompound*. L'étendue de réglage Z s'étend de 1500 à 3300 A-t correspondant à 1,5—3,3 A. Cette étendue de réglage est plus grande que la précédente mais l'excitation séparée est aussi beaucoup plus faible.

Si l'excitation séparée est plus faible, la shunt plus forte et l'excitation anticompound supprimée, on obtient la courbe d'excitation 10. Si le réglage est assuré par l'excitation séparée, l'étendue de réglage nécessaire est C; s'il est assuré par l'excitation shunt c'est C'.

Si l'on pousse la comparaison plus loin entre les deux systèmes de commande, en ce qui concerne le dimensionnement et le fonctionnement de la dynamo principale, on arrive aux conclusions suivantes :

Dans la figure 5, les courbes 1—15 se rapportent au fonctionnement avec le système R. C. S.; le courant de démarrage est ici d'environ 1400 A et la vitesse de marche sur une rampe de 7 ‰ atteint 100 km/h. Si *la même dynamo* travaillait en autorégulatrice sans baisse importante de la vitesse, le courant de démarrage se trouverait réduit à 1000 A et la vitesse maximum de marche sur la même rampe serait réduite à 90 km/h.

Dans la figure 7, on a réuni les caractéristiques de fonctionnement pour le système à dynamo autorégulatrice en posant comme condition que le courant de démarrage et la vitesse maximum de marche doivent être les mêmes qu'avec la commande R. C. S. Les courbes en traits forts correspondent à un couple constant du moteur Diesel et à une excitation séparée constante. Les courbes pointillées se rapportent à un couple maximum du moteur Diesel d'après la courbe 2 de la figure 1 et à une variation d'excitation séparée proportionnelle à la vitesse. A une vitesse du moteur Diesel de 1400 t/min, la vitesse de marche en régime permanent, correspondant à la courbe en trait plein, est d'environ 19 km/h sur une rampe de 20 ‰ et suivant la courbe pointillée d'environ 53 km/h. Par contre, avec la commande R. C. S., la vitesse de marche en régime permanent est d'environ 61 km/h. Il va sans dire qu'une baisse de vitesse comme celle de la figure 7 est absolument inadmissible. La variation de l'excitation séparée proportionnellement à la vitesse du moteur (permettant de travailler suivant les courbes pointillées) demande que la tension d'excitation séparée puisse être abaissée de 140 à 105 V; cependant, une telle baisse de la tension est inadmissible car elle empêche un fonctionnement correct des services auxiliaires. Il n'est donc pas possible, avec le système de commande à dynamo autorégulatrice, d'utiliser le moteur Diesel dans un domaine courant-tension aussi étendu qu'avec la commande R. C. S. Autrement dit: les mêmes conditions électriques de fonctionnement ne peuvent être atteintes avec le système de commande à dynamo autorégulatrice que si on choisit un moteur Diesel plus puissant.

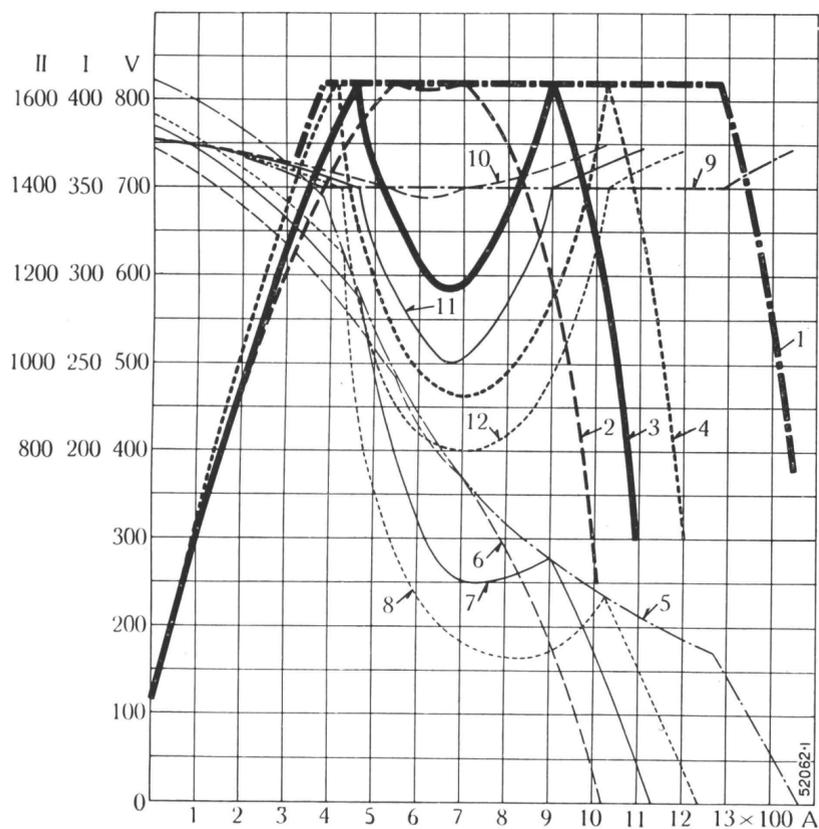


Fig. 8. — Influence de l'échauffement de la dynamo sur l'allure des caractéristiques de fonctionnement pour le système à dynamo auto-régulatrice et la commande à régulateur de champ à servo-moteur.

Abscisses: Intensité en A.
Ordonnées: Tension aux bornes en V.
I = Puissance du moteur en ch.
II = Vitesse en t/min.

L'état d'échauffement de la dynamo est défini comme suit:

Etat froid correspond à 90% de la résistance de l'enroulement d'excitation.
Echauffement moyen correspond à 100% de la résistance de l'enroulement d'excitation.

Machine chaude correspond à 110% de la résistance de l'enroulement d'excitation.

On admet en outre un couple constant du moteur Diesel, une excitation séparée indépendante de la vitesse, et une vitesse nominale de 1400 t/min.

Courbe 1 = Puissance fournie par le moteur Diesel avec commande par régulateur de champ à servo-moteur.

Courbe 2 = Puissance du moteur Diesel avec dynamo autorégulatrice (dynamo à l'état chaud).

Courbe 3 = Puissance fournie par le moteur Diesel avec dynamo autorégulatrice (échauffement moyen de la dynamo).

Courbe 4 = Puissance fournie par le moteur Diesel avec dynamo autorégulatrice (état froid de la dynamo).

Courbe 5 = Tension de la dynamo principale avec commande R. C. S. (l'influence de l'échauffement est compensée).

Courbes 6, 7, 8 = Tension avec dynamo autorégulatrice, à l'état chaud, moyen et froid de la dynamo.

Courbe 9 = Vitesse avec la commande R. C. S.

Courbes 10, 11 et 12 = Vitesse avec le système à dynamo autorégulatrice et à l'état chaud, moyen et froid de la dynamo.

Dans la figure 8, on a mis en évidence l'influence de l'échauffement de la machine en supposant les conditions de la figure 2 pour le système de commande à dynamo autorégulatrice, la courbe en trait plein correspond à l'échauffement moyen de la machine (résistance de l'excitation 100%). A l'état froid (résistance de l'excitation 90%), on obtient la courbe ponctuée et à l'état chaud (résistance d'excitation 110%) la courbe pointillée. L'influence de la température bien marquée avec ce système de commande est complètement compensée par la commande R. C. S. Si l'excitation séparée peut être réglée suivant les droites 1'

à 9' de la figure 3, la constance de la puissance fournie est assurée quel que soit l'échauffement entre les limites de 1270 A, 175 V et 380 A, 690 V (courbe en trait mixte.¹⁾)

L'influence de la variation de l'aimantation sur les dynamos principale et auxiliaire est semblable à celle de la température.

Disons encore quelques mots de l'influence du couplage série parallèle des moteurs de traction sur les dimensions de la dynamo principale. Ce couplage était utilisé souvent autrefois sur les véhicules Diesel-électriques par analogie avec les véhicules recevant leur énergie d'une ligne de contact et à cause du manque de systèmes de commande appropriés. Actuellement ce couplage est encore parfois recommandé, car on en attend une réduction des dimensions de la dynamo et une meilleure utilisation de l'installation. Cette attente n'est toutefois réalisée que dans des cas assez rares comme le montre une étude parue dans la Revue Brown Boveri, novembre 1936, pages 247 et suivantes.

Si l'on étudie plus à fond les conditions du couplage série-parallèle en admettant: a) que les conditions d'échauffement sont les mêmes pour la dynamo principale et pour les moteurs de traction ou que les deux genres de machines ont la même courbe de temps de charge en fonction de la vitesse du véhicule, b) que le dimensionnement de la dynamo ne dépend que du produit courant en régime continu \times tension maximum, on voit que le couplage en série des moteurs de traction pendant la période de démarrage ne produit une diminution de la puissance de dimensionnement de la dynamo que si la tension maximum d'un moteur de traction, E_{max} , correspondant à la vitesse maximum de marche utilisant toute la puissance, est plus grande que la somme des tensions E_d des moteurs de traction en service permanent. Ce cas ne se produit que rarement, par exemple marche avec pleine charge sur de fortes et longues rampes à faible vitesse, tout en exigeant une vitesse élevée en palier. (Donc utilisation de la pleine puissance du moteur Diesel pour un domaine de vitesse de marche très étendu.) La dépense occasionnée par l'appareillage de commutation se justifie aussi par l'amélioration du rendement de la dynamo en couplage série, le courant d'induit étant plus faible.

Dans tous les autres cas (déterminant la règle) pour lesquels $E_{max} \leq \sum E_d$, le couplage série n'apporte aucune réduction de la puissance de dimensionnement de la dynamo.

(MS 720)

H. Weier et A. E. Muller. (J. C.)

¹⁾ Revue Brown Boveri, avril 1938, page 63.

UNE LIGNE A HAUTE TENSION PRESQUE INSENSIBLE AUX COURTS-CIRCUITS ENTRE CONDUCTEURS AINSI QU'AUX MISES A LA TERRE MONO- OU POLYPHASÉES.

Indice décimal 621. 315. 05. 025.

La transmission à haute tension, proposée par l'auteur, par trois phases non composées a, comme principal avantage, que même les arcs simultanés à la terre sur plus d'une phase et les arcs directs entre phases peuvent, à très peu d'exceptions près, être éteints automatiquement sans déclenchement d'un disjoncteur.

La plupart des perturbations des lignes à haute tension sont dues aux surtensions d'origine atmosphérique, les plus mauvaises par coup de foudre direct sur les conducteurs de phase, le câble de terre ou les pylônes. Les surtensions entre les conducteurs ou entre ceux-ci et le pylône ou le câble de terre peuvent atteindre des valeurs assez élevées pour provoquer un claquage, par exemple, des isolateurs. Les coups de foudre indirects ne sont actuellement pas considérés comme dangereux pour les lignes aériennes de plus de 70 000 V, car ils ne provoquent pas de surtensions capables de faire claquer les isolateurs.

Des recherches sur divers réseaux aériens à haute tension ont montré que le 75 % des claquages dus aux orages ne touche qu'une phase, c'est-à-dire produit une mise à la terre d'une phase; le 20 % affecte deux phases, par exemple claquage simultané de deux isolateurs; environ le 5 %, seulement, intéresse les trois phases.

Tandis qu'en Amérique les réseaux haute tension ont le plus souvent leur point neutre directement à la terre, en Europe, la mise à la terre est réalisée par une bobine d'extinction (bobine d'inductance). Ces bobines d'extinction permettent de supprimer le déclenchement des disjoncteurs, et donc d'éviter l'interruption du service pour des mises à la terre unipolaires par coup de foudre (le 75 % des perturbations comme nous l'avons déjà dit). Lorsque la bobine est correctement dimensionnée, l'arc de mise à la terre est soufflé dès sa parution, et l'exploitant ne remarquerait rien si des dispositifs spéciaux n'enregistraient le phénomène. Contre les autres coups de foudre, touchant directement deux ou trois phases, la bobine d'extinction est inefficace et les disjoncteurs doivent alors déclencher.

On peut se demander s'il n'est pas possible de construire des lignes à haute tension de façon qu'elles puissent aussi être protégées contre les arcs simultanés à la terre de plus d'une phase et contre les courts-circuits par arcs directs entre phases, en évitant dans ces cas le déclenchement des disjoncteurs. Nous montrerons que cela est possible pour le plus grand nombre des claquages affectant simultanément plus d'une phase. On peut alors estimer que seulement 5 à 7 % de tous

les arcs dus aux coups de foudre entraîneront encore le déclenchement des disjoncteurs au lieu de 25 % comme sur les réseaux haute tension actuels avec bobines d'extinction, ainsi 93 à 95 % de ces arcs s'éteindront pour ainsi dire sans laisser de traces.

Les lignes aériennes très importantes sont, pour la plupart, des lignes triphasées doubles à six conducteurs. Les explications suivantes ne se rapportent qu'à ces lignes à six conducteurs. D'après la nouvelle proposition, ces lignes doivent être exploitées avec des phases indépendantes, c'est-à-dire que les six conducteurs doivent être alimentés par trois tensions monophasées, décalées de 120° électriques les unes par rapport aux autres et qui n'ont pas de points communs; les six conducteurs sont parcourus par du courant hexaphasé. Le couplage de trois phases dans un système composé a surtout pour but de réduire le nombre des conducteurs de six à trois. Pour une ligne à six conducteurs, l'intérêt du couplage des phases disparaît. Le couplage des phases a le gros inconvénient que chaque liaison conductrice entre deux phases est, comme chaque mise à la terre dans un réseau à point neutre à la terre, un court-circuit.

Considérons, par exemple, le type de pylône, très employé, de la figure 1. Le diagramme des tensions des trois phases non couplées est donné par la figure 2. Si l'ordre des conducteurs dans l'espace coïncide avec la succession des tensions dans le temps, comme c'est le cas pour les figures 1 et 2, la figure 2 représente aussi en quelque sorte la disposition dans l'espace des conducteurs U, V, W, X, Y, Z. Les trois paires de conducteurs UX, VY et WZ sont alimentées par trois tensions monophasées décalées dans le temps de 120° électriques et non couplées. Le transformateur d'alimentation peut être un transformateur triphasé, mais en couplage «ouvert» des trois phases du côté haute tension, tout au plus les points milieux des trois phases peuvent être reliés tout à fait élastiquement par des bobines d'inductance. Un contact direct de deux ou trois conducteurs voisins ne produit dans ce cas aucun court-circuit, mais seulement un déplacement relatif des tensions des phases affectées. La figure 3 montre le déplacement des tensions si un court-circuit se produit entre les conducteurs W et X. La figure 4 montre le déplacement des tensions, si les trois conducteurs à la droite du pylône de la figure 1 sont en contact. On aurait le même diagramme des tensions si les trois conducteurs VXW avaient simultanément une mise à

la terre, mais dans ce cas le point VXW de la figure 4 serait au potentiel de la terre.

Les déplacements des tensions, mentionnés ci-dessus, ne dérangent pas plus la transmission d'énergie qu'une mise à la terre dans un réseau, dont le point neutre est isolé. Les courants capacitifs s'écoulant au point de défaut par suite du déplacement des tensions peuvent être compensés par des bobines d'inductance, comme l'est le courant de terre par la bobine d'extinction. Considérons encore une fois, par exemple dans la figure 5, le déplacement des tensions pour un court-circuit entre W et X; pour plus de clarté la phase ne participant pas au court-circuit n'a pas été dessinée. Avant que le court-circuit ne se produise les points milieux, m_1 et m_2 , des deux phases UX et ZW avaient le même potentiel, après ils présentent la différence de potentiel visible sur la figure. Le courant qui s'écoule au

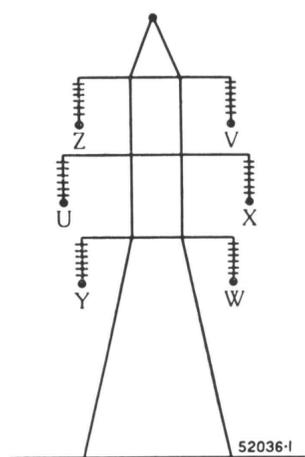


Fig. 1. — Disposition sur un pylône des conducteurs d'une transmission d'énergie à haute tension à trois phases séparées.

point de défaut XW est donné par la tension entre m_1 et m_2 et par la capacité mutuelle des phases UX et ZW. Si l'on relie les points m_1 et m_2 par une bobine d'inductance d , le courant de la bobine passe aussi au point de défaut XW et compense, pour un dimensionnement correct de la bobine, le courant capacitif. Comme nous avons trois phases, nous employons une bobine d'inductance triphasée pour réunir les points milieux des trois phases haute tension du transformateur d'alimentation. Le principe de fonctionnement de cette

bobine triphasée est le même que celui exposé plus haut à l'aide de la figure 5. En outre, chacun des points milieux m_1 , m_2 , m_3 est séparément mis à la terre par une bobine d'inductance. La disposition des bobines d'inductance est donnée dans la figure 6, qui est le schéma de principe d'une transmission d'énergie par trois phases indépendantes. U_0 , X_0 , V_0 , Y_0 , W_0 et Z_0 sont les bornes des enroulements haute tension du trans-

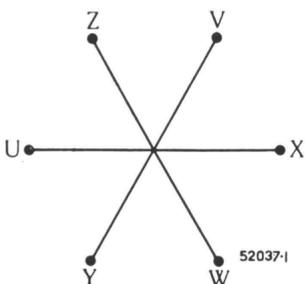


Fig. 2. — Diagramme des tensions d'une ligne à haute tension à trois phases séparées en service normal.

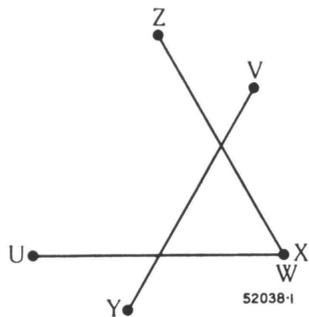


Fig. 3. — Déplacement des tensions d'une ligne à haute tension à trois phases séparées lors d'un court-circuit entre les conducteurs X et W.

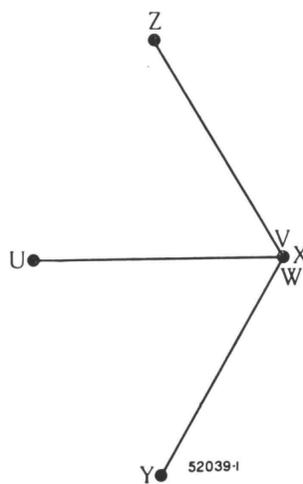


Fig. 4. — Déplacement des tensions d'une ligne à haute tension à trois phases séparées lors d'un court-circuit ou de mise à la terre simultanée des conducteurs V X W.

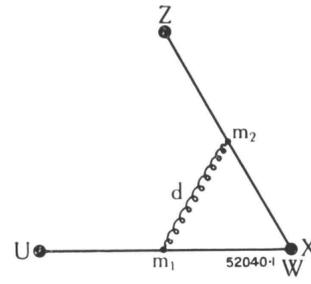


Fig. 5. — Déplacement des tensions des phases U, X et W, Z lors d'un court-circuit ou de mise à la terre simultanée des conducteurs X et W.

formateur alimentant la ligne. La bobine d'inductance triphasée est désignée par d et les trois bobines monophasées de mise à la terre par D . En service normal, les interrupteurs u, v, w, x, y, z sont fermés et les interrupteurs u', x' et s ouverts. L'état des tensions de la ligne haute tension en service normal et lors de court-circuit entre deux ou trois phases est donné par les figures 2 à 5. Un dimensionnement correct des bobines d'inductance d et D permettra de souffler automatiquement presque tous les arcs amorcés par les orages, même si plus d'un conducteur est touché simultanément, sans faire déclencher les disjoncteurs. Seuls sont encore dangereux les claquages frappant simultanément les deux conducteurs d'une même phase, donc deux conducteurs diamétralement opposés dans les figures 1 et 2. Par exemple s'il se produit un arc entre les conducteurs U et X, ou si ces conducteurs sont mis simultanément à la terre, cela met la phase en court-circuit et il faut alors que les disjoncteurs de cette phase déclenchent. Les deux autres phases forment alors un système biphasé déformé et sont tout de même capables d'assurer la transmission d'énergie et de maintenir la stabilité.

Jusqu'à présent nous n'avons parlé que de perturbations passagères, qui disparaissent lorsque l'arc de défaut est soufflé sous l'effet des bobines d'extinction. S'il s'agit de défauts permanents, par exemple des isolateurs défectueux sur une ou plusieurs phases, les conducteurs avariés peuvent rester en service, comme sur un réseau normal avec bobine d'extinction, lorsqu'un défaut permanent à la terre se produit.

Le but de la construction de la plupart des lignes de transmission très importantes en lignes triphasées doubles, est de pouvoir maintenir en service une des deux lignes triphasées, lorsqu'un défaut se produit sur l'autre. Ce but peut aussi être atteint par la transmission établie d'après le schéma de la figure 6, car l'on peut commuter sur le service triphasé composé, n'employant que trois conducteurs.

La commutation peut se faire sans interrompre le service. Si, par exemple, dans la figure 6 le conducteur X a une chaîne d'isolateurs

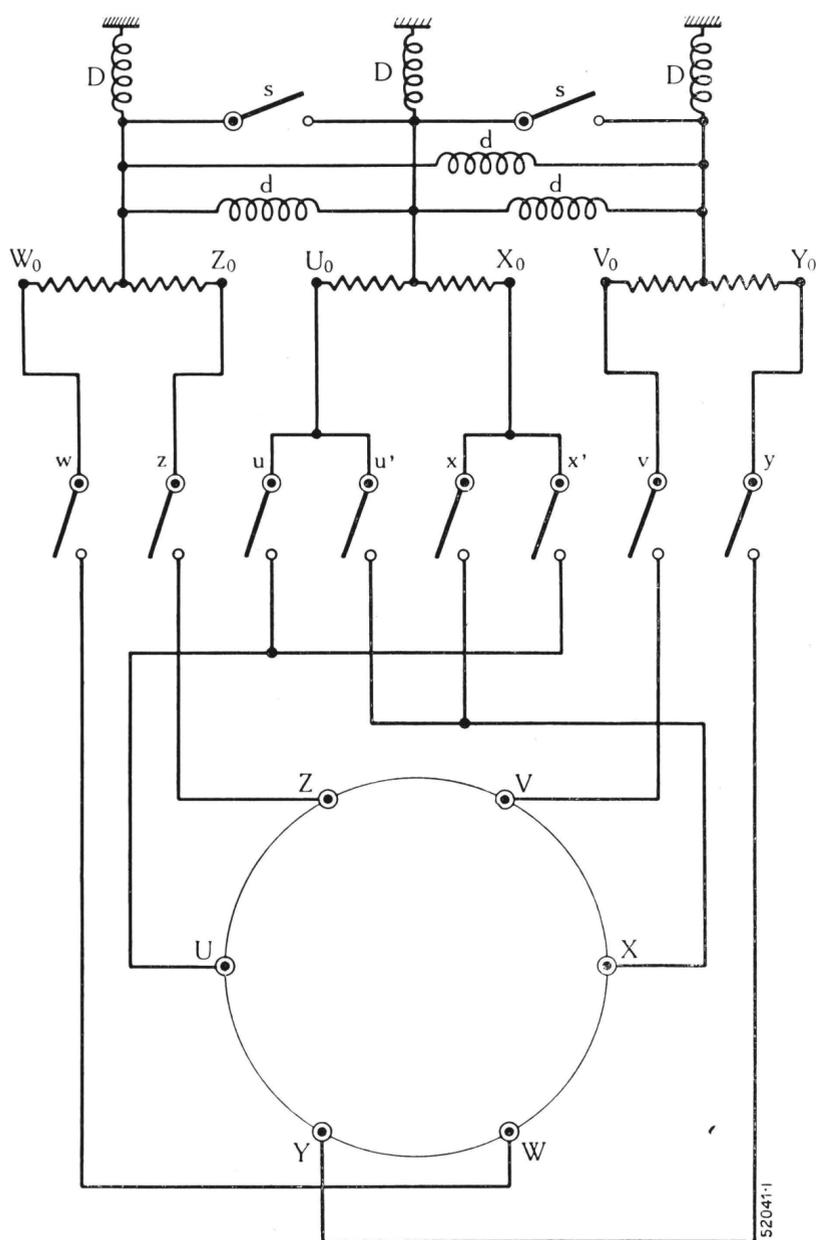


Fig. 6. — Schéma de principe d'une transmission d'énergie à haute tension à trois phases séparées.

défectueuse qu'il faut remplacer, la moitié de la ligne de transmission, dans ce cas les conducteurs VXW, doit être coupée de l'alimentation pour permettre la réparation. Dans ce but on ferme tout d'abord les interrupteurs s pour former le point neutre, puis on ouvre les disjoncteurs u, v, w, on ferme x' et on ouvre x. Après cette commutation les conducteurs UYZ sont alimentés par les bornes X₀, Y₀, Z₀ et les conducteurs VXW sont sans tension. Il faut, bien entendu, faire les mêmes commutations aux deux extrémités de la ligne. Les opérations doivent être effectuées dans le même ordre, mais la simultanéité n'est pas nécessaire¹⁾.

Comme nous l'avons dit, la ligne de transmission décrite, avec trois phases séparées, est protégée contre

¹⁾ Si les conducteurs U et X sont déjà permutés dans la ligne normale, la commutation à l'aide des interrupteurs u' et x' n'est plus nécessaire. Cette nouvelle disposition des conducteurs est toutefois moins avantageuse à d'autres points de vue.

presque tous les arcs dus aux coups de foudre, seul un faible pour-cent des défauts, ceux qui affectent simultanément les deux conducteurs d'une même phase provoqueront un déclenchement de disjoncteurs. Si la protection dans ces cas est obtenue par des disjoncteurs ultra-rapides à réenclenchement, le système à phases séparées a encore l'avantage sur les réseaux triphasés dont le point neutre n'est pas directement à la terre, que la mise hors service de la phase défectueuse permet de continuer la transmission en biphasé au lieu de monophasé, ce qui assure mieux la stabilité. La durée de la mise hors service de la phase avariée est alors beaucoup moins limitée que pour un réseau à point neutre isolé.

Résumé des avantages de la transmission d'énergie à trois phases séparées :

Les arcs entre conducteurs de phases ou les arcs simultanés à la terre de plus d'un conducteur de phase ne produisent qu'exceptionnellement des courts-circuits, puisque dans la plupart des cas cela ne provoque qu'un déplacement des tensions de phases les unes par rapport aux autres et pas de déclenchement de disjoncteurs. Les déclenchements de disjoncteurs ne se produisent qu'environ pour le 7% des arcs dus aux coups de foudre, alors que dans les réseaux ordinaires pourvus de bobines d'extinction dans le 25%. Le 93% des arcs allumés par les coups de foudre sont soufflés automatiquement, ce qui représente une notable amélioration de la sécurité de service.

Même lors de défauts permanents entre conducteurs ou entre conducteurs et terre, le service peut être maintenu assez longtemps sans modification du couplage, le courant de défaut étant réduit à une faible valeur par l'effet des bobines d'extinction. Si pour effectuer des réparations, une moitié de la ligne haute tension doit être mise sans tension, le service pourra être maintenu par le système triphasé composé avec trois conducteurs. La commutation d'un système à l'autre se fait alors sans interrompre le service.

Si une des trois phases séparées est coupée à cause d'une perturbation quelconque, une transmission biphasée stable est maintenue, ce qui est favorable à l'emploi de disjoncteurs ultra-rapides à réenclenchement.

Ces avantages réels ne sont pas achetés trop chers par la complication de la station de transformation due au couplage « ouvert » du transformateur.

(MS 718)

H. K. Schrage. (J. C.)