Commande automatique du système d'orientation des héliostats d'une centrale solaire à tour

A. M. Malykoff et R. R. Aparissi

(Reçu le 20 décembre 1979, accepté le 21 décembre 1979)

Selon les calculs préliminaires, le coût de l'installation de commande automatique du système d'orientation des héliostats représente 10-15 % du coût global estimé pour une centrale solaire (C.S.) de puissance élevée. Si, au surplus, on prend en considération les équipements spéciaux pour assurer la précision de pointage et la stabilité des miroirs en présence de vent ainsi que l'introduction des fonctions de contrôle dans le schéma de commande, le prix peut atteindre 20 % du coût global de la C.S. Par conséquent, il faut employer des systèmes suffisamment simples et de coût peu élevé. En outre, cela influence le choix du schéma de commande automatique des orienteurs de la C.S. de puissance élevée [12].

La création d'une centrale solaire électrique de grande puissance nécessite la construction et l'exploitation de grandes surfaces réfléchissantes. Les calculs montrent que pour obtenir une puissance de 2-3 MW, il faut de l'ordre de 1 600 héliostats, chacun de 15 m² (3 m × 5 m), répartis sur une surface du sol égale au moins à 16 ha (400 m × 400 m). Dans ce cas, la hauteur de la tour où sera placée la chaudière sera, par exemple, de 40 m (dans le projet américain de C.S. de 100 MW, la tour atteint 450 m et le nombre d'héliostats — 80 000 environ [3]).

Afin d'utiliser l'énergie solaire rationnellement, chaque héliostat doit être muni d'un système d'orientation qui contrôle la concentration de l'énergie renvoyée par l'ensemble des héliostats sur la surface du générateur de vapeur. Le système de commande automatique doit effectuer le contrôle en fonction non seulement de la position du Soleil, mais, également des variations propres de l'inclinaison de chaque héliostat provoquées par les vents.

L'équation du mouvement de chaque héliostat prend la forme suivante, l'origine du système des coordonnées étant située au milieu de la base de la tour :

$$\operatorname{tg} \beta =$$

$$\operatorname{tg} z =$$

où

$$\sin h =$$

$$\sin a \cdot \cos h =$$

$$\cos a \cdot \cos h =$$

$$\sin \theta = \quad \cos \theta =$$

avec

ΔH = distance entre les niveaux des centres du générateur de vapeur et de l'héliostat considéré ;

R_i ; t_i = distance de l'héliostat à la tour ; angle formé par le rayon vecteur du centre de l'héliostat et le sens sud du méridien correspondant ;

φ = latitude ;

δ = angle de déclinaison ;

Kt = angle horaire.

Les quantités β (coordonnée angulaire d'azimut) et z (angle de site) sont les paramètres déterminant l'orientation de l'héliostat dont il faut assurer le réglage permanent.

Examinons les deux principaux schémas de commande automatique d'une C.S. — commande individuelle et centralisée.

Schémas de la commande individuelle. — Dans ce cas, on admet que chaque héliostat dispose d'une installation propre d'orientation automatique, installation qui assure sa rotation indépendamment des autres héliostats. Comme tout système automatique de régulation, l'installation de commande d'orientation comprend trois éléments de base (Fig. 1) :

- équipement de mesure (1),
- amplificateur (2),
- équipement de fonctionnement (3).

Fig. 1. — Structure de l'installation de commande automatique. Schéma généralisé. 1) Équipement de mesure. 2) Amplificateur. 3) Équipement de fonctionnement.

Le rôle de l'équipement de mesure est d'effectuer la comparaison entre la valeur réelle du paramètre et sa valeur souhaitée, comparaison dont le résultat est exprimé sous la forme d'un signal (signal d'erreur). Le deuxième élément amplifie l'amplitude et la puissance du signal d'erreur. L'équipement de fonctionnement entraîne l'objet.

Un convertisseur d'énergie lumineuse en énergie électrique fait nécessairement partie de l'équipement de mesure. Les principaux types de convertisseurs

sont les photorésistances, les photodiodes et les phototriodes.

Le choix d'un type de convertisseur est déterminé par les facteurs suivants :

- sensibilité,
- tension d'alimentation,
- flux lumineux maximal admissible,
- temps de réponse,
- caractéristique spectrale et caractéristique tension-courant.

Tout en étant d'une grande sensibilité, le convertisseur, destiné à une installation d'orientation, doit fonctionner dans les conditions de température et d'éclairement très variables; il doit être stable et solide pendant une longue période d'exploitation, résister à l'action de l'humidité ainsi que pouvoir fonctionner en accord avec différents types de transformateurs et d'installations électroniques d'enregistrement.

Les travaux [4-6] contiennent des informations concernant le principe de fonctionnement et les particularités des divers types de photorécepteurs, par exemple : photodiodes, photorésistances et éléments thermoélectriques.

Les caractéristiques de ces éléments ont été mesurées dans des conditions bien déterminées; notamment, la lumière provenant des sources-étalons ne correspond pas tout à fait au rayonnement solaire. C'est pourquoi, il est nécessaire de préciser les caractéristiques des photorécepteurs branchés à l'entrée de systèmes électroniques concrets dans des conditions réelles, et plus exactement, en présence du rayonnement solaire.

Afin de décider du choix d'un type de photorécepteur il faut, soit connaître sa caractéristique spectrale, soit pouvoir la calculer.

Nous allons désigner désormais par l'installation de mesure, l'ensemble photo-électrique du système d'orientation à la sortie duquel est produit un signal électrique primaire. (Il apparaît sous forme des variations de tension ou des variations d'intensité du courant.) Les paramètres de ce signal déterminent, d'une manière univoque le sens et la valeur de la différence détectée.

Pour étudier les systèmes photo-électriques, on a construit différents types d'installations de mesure [7]. Dans le système considéré, doit exister un appareil qui contrôlera la différence entre le signal obtenu et le signal de référence; le réglage des héliostats est effectué en fonction de cette différence. Pour cette technique de réglage la nature des facteurs qui provoquent l'écart de la quantité mesurée à la valeur de référence est sans importance. On effectue la compensation de cet écart, indépendamment de la cause de ce dernier. L'amplification de l'amplitude du signal doit être relativement grande car le signal lumineux est habituellement de faible intensité.

L'utilisation d'une liaison bilatérale dans le schéma de l'installation d'orientation permet d'obtenir des

caractéristiques linéaires de ce schéma, d'assurer la stabilité du coefficient de transmission, d'atteindre la quasi-indépendance du signal produit des paramètres du schéma d'une part et des fluctuations des sources d'alimentation d'autre part.

A l'Institut d'Energie de G. M. Kijjanovsky on a étudié quelques versions des schémas de commande automatique [8-10] s'appliquant au guidage des héliostats d'une C.S. Selon le schéma, décrit en [8], l'orientation de la surface de l'héliostat est réglée grâce à un système à deux axes de rotation; à cet effet on emploie deux électromoteurs, des réducteurs et des mécanismes de rotation. L'utilisation des électromoteurs comme mécanisme d'entraînement standardise le système; c'est avantageux, surtout lorsqu'il s'agit de milliers ou de dizaines de milliers d'installations semblables. Par l'intermédiaire d'un réducteur, la force motrice de l'électromoteur est transmise à l'axe vertical ou horizontal, de rotation de l'héliostat; chaque réducteur assure deux régimes de fonctionnement — normal et accéléré.

Le fonctionnement à deux vitesses permet d'effectuer un préréglage et d'ajuster l'orientation de l'héliostat lorsqu'elle est proche de la position souhaitée; c'est surtout important pour un régime variable de travail pendant un temps nuageux. Ce mode de fonctionnement est conditionné par la valeur de l'écart entre le signal enregistré et sa référence; autrement dit, il dépend de la valeur d'angle formé par la direction observée et calculée d'un rayon solaire qui, après sa réflexion à la surface du miroir, sera dirigé vers le centre de la chaudière.

La grande vitesse de fonctionnement permet d'effectuer le mouvement d'orientation assez rapidement; sa durée ne dépassant pas 15-30 s, on assure harmonieusement le réglage de la position des héliostats. Examinons les opérations qui doivent être effectuées par chaque système de commande automatique d'un orienteur :

a) Alimentation en énergie électrique de tous les centres du système de commande automatique des héliostats au lever du soleil.

b) Retour de chaque héliostat vers son inclinaison initiale, calculée de manière qu'aucun héliostat ne soit recouvert par l'ombre des voisins.

c) « Recherche » du Soleil dans le cas des courtes interruptions d'ensoleillement (passage des cumulus) ou des interruptions prolongées.

d) Commande des héliostats pendant les périodes d'ensoleillement, c'est-à-dire le « guidage » continu des rayons solaires réfléchis pour les concentrer à la surface du générateur de vapeur.

e) Arrêt total du fonctionnement du système de commande pendant les interruptions d'ensoleillement importantes.

f) Arrêt partiel, de certains groupes d'héliostats, pour rendre possible la régulation de la puissance

de la C.S., lorsque l'intensité de la radiation solaire devient variable.

g) Contrôle périodique du fonctionnement du système d'orientation de chaque héliostat et signalement des héliostats dont le système est défectueux.

h) Limitation du débattement des héliostats lorsque leur orientation atteint des positions critiques.

Dans le système de commande automatique il faut prévoir un moyen de protection des héliostats lorsque les conditions atmosphériques sont défavorables (par exemple : des vents forts, des chutes de neige et de grêle, etc.), chaque héliostat doit rester figé dans une position déterminée de survie.

Afin de permettre l'exécution des opérations que nous venons d'évoquer, il faut prévoir des organes de simulation, de sécurité et de mesure :

- Mesure de l'intensité du flux solaire incident.
- Mesure de la vitesse des vents.
- Système de simulation de la rotation journalière et de la rotation accélérée selon la direction azimutale.
- Système de simulation de la rotation journalière et de la rotation accélérée selon la direction zénitale.
- Système de blocage sur les deux axes de rotation de l'héliostat.

Certains dispositifs de mesure comme celui de l'ensoleillement et de la vitesse des vents peuvent être communs à tous les héliostats.

Le système de commande automatique de l'héliostat est un système à relais ; lors du réglage de l'inclinaison, l'électromoteur est appelé à fonctionner par intermittence.

Le principe de construction d'une installation d'orientation automatique est décrit dans les travaux [9] et [10].

On peut employer dans les schémas les moyens offerts par l'électronique, à savoir : éléments magnétiques, semiconducteurs, installations pour fonctionnement à relais. Cela permet d'obtenir un très bon rendement (car les installations considérées ont une faible consommation d'énergie) et une fiabilité de fonctionnement relativement grande.

Dans ces conditions, on peut concevoir un système qui commanderait plusieurs points de l'installation en même temps, points où les vitesses de rotation sont différentes ; on peut donner des solutions nouvelles aux problèmes de commande automatique et de régulation.

Pour assurer une bonne précision de pointage, on doit satisfaire quelques conditions concernant les mécanismes de rotation des héliostats ; la réalisation de ces mécanismes doit être effectuée avec une très grande précision et le rapport choisi des réducteurs tel que la vitesse finale soit 0,75 fois supérieure à la vitesse calculée.

Schémas de commande centralisée. — L'existence d'un grand nombre d'héliostats, commandés en même temps, a créé le besoin d'étudier la version d'une commande centralisée.

Cependant, la mise en place d'une commande centralisée n'exclut pas l'utilisation de la commande individuelle, sans laquelle on ne peut imaginer un fonctionnement correct de chaque héliostat avec l'enchaînement de ses mouvements. Ainsi, la commande centrale remplit la fonction de *liaison bilatérale* et de contrôle des mesures.

La figure 2 représente le schéma général d'un tel système de commande automatique.

Fig. 2. — Installation à commande multiple de tous les héliostats de la C.S. avec un seul canal de liaison. Schéma de structure : I) Générateurs des commandes. II) Installation de programmation. III) Bloc de traitement des commandes. IV) Synchroniseur. V) Interrupteurs. 1, 2, 3, ..., n : équipement de fonctionnement pour chaque groupe des héliostats.

Le mouvement de chaque héliostat de la C.S. considérée est commandé à partir d'un pupitre central, où, pour chaque groupe d'héliostats séparément, sont prises les décisions (dans l'ordre) concernant : le début du travail, le mouvement, l'arrêt, la fin de travail et le retour à la position initiale.

Les commandes des signaux électriques peuvent être transmises par radio ou au moyen de câbles. Le codage spécial des signaux permet d'introduire une identification entre un signal et l'exécution d'une opération. La précision de pointage sera déterminée, en général, par la précision dans le travail du système de commande automatique.

Selon le schéma considéré, on peut effectuer la commande à partir du système primaire, au moyen de signaux ou d'impulsions envoyés régulièrement, ou en fonction de la position du Soleil.

Les commandes sont élaborées (générées) dans le système primaire. Ce système commande une installation de programmation qui indique la succession de différentes opérations ainsi que leur durée (cf. Fig. 2).

Le fonctionnement de l'installation de programmation, subordonné à l'arrivée des informations, variables au cours du temps, consiste dans la création des séries d'impulsions (ou des impulsions isolées) synchronisées avec le signal du temps réel.

L'installation de programmation comprend les éléments suivants :

- installation pour déterminer le temps, par exemple, mécanisme d'horlogerie ou générateur électronique,
- système de classement des impulsions de comptage horaire, permettant d'établir leur chronologie,
- installation de commande programmable, intervenant au niveau du fonctionnement d'un groupe d'héliostats.

Lorsqu'on utilise le schéma de commande automatique, considéré ci-dessus, on doit associer à chaque héliostat deux électromoteurs qui assureront la rotation autour de deux axes, les réducteurs appropriés et quatre repères de pointage.

Le système de commande automatique des héliostats fait partie de l'ensemble des systèmes de mesure-information et de commande automatique, ensemble représenté par le complexe d'installations de mesure et de moyens de traitement des informations. Il est caractéristique, pour ces systèmes, de recevoir des informations concernant les valeurs des paramètres de travail, sous forme d'expressions du type : *valeur atteinte* ou *écart constaté*, directement de l'objet qu'ils commandent. Pour cette raison, ces systèmes doivent avoir une liaison directe avec l'objet commandé (groupe d'héliostats).

Contrairement aux autres systèmes informatiques de mesure, le système d'orientation des héliostats, que nous avons choisi, fonctionne uniquement lorsque les écarts des paramètres observés tendent vers leurs valeurs maximales possibles. Ainsi, dans le cadre de notre système, les opérations que l'on doit effectuer pour égaler les paramètres observés aux paramètres imposés, deviennent beaucoup plus simples.

Notons que l'on peut utiliser des mécanismes d'horlogerie ou des générateurs électroniques à la place de l'installation de programmation.

Cependant, au cours du temps, on observe des irrégularités dans le fonctionnement de chaque système mécanique; les mécanismes d'horlogerie ne peuvent pas assurer une précision satisfaisante de pointage à chaque instant.

En utilisant les générateurs électroniques on relève également les imprécisions de fonctionnement. Il est bien connu, que la fréquence des vibrations émises par un générateur électronique varie au cours du temps, ce phénomène étant provoqué par l'action de différents facteurs, par exemple, la température du milieu ambiant, l'humidité, la tension des sources électriques, etc. Néanmoins, la dispersion mesurée est de l'ordre de 10 μ s, ce qui a peu d'importance pour le fonctionnement de l'ensemble des héliostats. Pour les installations mécaniques, on observe une dispersion qui atteint 0,1 s.

Le fonctionnement des horloges programmantes est décrit dans la littérature [11-12].

Le rôle de l'installation de programmation commutative est de sélectionner les signaux de commande, générés par des commutateurs du type oscillatoire, pour diriger tour à tour, chaque groupe d'héliostats.

La sélection des signaux des commutateurs est effectuée à l'aide de deux groupes de commutateurs-sélecteurs.

1) *Premier groupe*. — Les signaux déterminant les moments du branchement du dispositif d'orientation.

2) *Deuxième groupe*. — Les signaux correspondant aux moments du débranchement.

Les sorties de chaque groupe de sélecteurs doivent être reliées à l'aide d'un schéma logique (par exemple, par l'élément logique « et »). Un signal de commande sera créé à la sortie de ce schéma logique, uniquement lorsque à chaque entrée les signaux de tous les commutateurs annulaires ont été captés au même moment.

Pour cette technique, le nombre de sélecteurs correspondant à un groupe d'objets commandés (héliostats) dépend non seulement du nombre des commutateurs, mais également, du nombre nécessaire des cycles : « branchement-débranchement ».

Dans le cas envisagé ici, le programme est établi pour une longue période d'exploitation et l'on prévoit de multiples branchements et débranchements, durant la journée, la saison et l'année.

Canaux de liaison. — Dans les C.S. avec de grandes quantités d'héliostats, le problème de la transmission des informations à distance devient très important.

Le système de commande automatique des héliostats fait intervenir des signaux, porteurs d'informations à distance qui sont transmis à l'aide de câbles électriques (canaux de liaison).

On exige un bon rendement d'une liaison, autrement dit, on veut transmettre le plus grand nombre d'informations durant le minimum de temps pour un coût peu élevé. De plus la déformation des signaux, provoquée par les effets parasites doit être la plus faible possible.

Les signaux de commande d'orientation doivent être envoyés, aux différents groupes d'héliostats, par les canaux de liaison en respectant l'ordre selon lequel les opérations correspondantes seront exécutées.

Cette condition peut être satisfaite en utilisant un système de transmission à canaux multiples avec la répartition de leur fonctionnement au cours du temps.

Dans le système à canaux multiples, on représente les valeurs des quantités considérées à l'aide d'un paramètre quelconque, par exemple, par la tension du courant continu, la résistance, etc. Pour la transmission ce paramètre est remplacé par un autre paramètre intermédiaire, pour lequel les déformations du signal seront moindres.

Au point de réception, le paramètre intermédiaire est transformé, soit en courant continu, soit en une autre forme de signal; ce qui permettra l'enregistrement des quantités considérées ou leur reproduction. Lorsqu'on utilise la transmission par radio, les signaux doivent subir une modulation de fréquence.

Aujourd'hui, on observe un développement rela-

tivement grand des systèmes d'interruption électromécanique et électronique équipés avec des semi-conducteurs : transistors et diodes [12]. Les générateurs d'impulsions de commande (Fig. 3) émettent les impulsions vers les centres qui laissent passer, à la sortie 0, les signaux contenant l'information d'orientation provenant du connecteur.

Fig. 3. — Système de commande électronique de transmetteur; schéma de structure. I) Transmetteurs des commandes. II) Installation de commutation. III) Installation de programmation horaire. IV) Générateur d'envoi des impulsions. 1, 2, 3, ..., n : canaux de liaison; 0 : sortie.

Certains générateurs sont décrits en [13].

Dans les systèmes de commande automatique des héliostats présentant un grand nombre de canaux de commande, il convient d'utiliser des générateurs d'impulsions basés sur le schéma logique du type *compteur double*. Ce type de schéma est plus économique du point de vue du nombre des éléments.

La figure 4 représente le schéma de structure de la partie récepteur du système de commande des groupes d'héliostats. Le fonctionnement synchronisé des sources K_1, K_2, K_3, K_n avec les signaux arrivant assure la répartition de ces derniers sur les sorties 1, 2, 3, ..., n pour la création des signaux de commande.

La sélection des canaux dans le récepteur s'effectue par la technique opposée à la technique employée dans le système de transmission; on utilise les mêmes

Fig. 4. — Schéma de structure du système d'interruption électronique pour la partie récepteur. V) Bloc de synchronisation circulaire. VI) Bloc de synchronisation à l'intérieur du cycle. VII) Générateurs de commande d'interrupteurs. 1, 2, 3, ..., n : canaux; 0 : sortie.

systèmes d'interruption dans le récepteur et dans l'émetteur, les schémas de branchement étant légèrement modifiés.

La différence provient du fait que le générateur des impulsions de commande, utilisé dans la partie récepteur, traite les signaux arrivant par les canaux de liaison, tandis que le générateur des impulsions de commande de la partie émetteur fonctionne en traitant les signaux d'un générateur spécial.

Afin d'améliorer le fonctionnement du système de commande centralisée, il est souhaitable de pouvoir contrôler le canal de liaison entre la partie émetteur, la partie récepteur et les mécanismes d'orientation des héliostats. La technique d'adressage rend possible la commande des groupes d'héliostats. Il s'agit ici d'une technique utilisée habituellement pour les ordinateurs.

Cette technique consiste à appeler d'abord l'adresse de la commande; cette adresse indique à quel groupe d'héliostats s'adresse la commande qui suivra.

Dans la partie récepteur, le système de déchiffrement doit être composé de deux éléments: pour déchiffrer l'adresse et le signal de commande. Lorsqu'il s'agit d'une adresse destinée à un groupe d'héliostats, le signal déchiffré du code d'adresse est envoyé à l'élément qui déchiffre le signal de commande.

Afin de diriger, au même instant, un ensemble d'héliostats, on introduit un code commun d'adressage. L'adressage permet, non seulement de révéler les erreurs incontrôlées, toujours possibles lors de la transmission, mais aussi, de contrôler le canal de liaison, d'introduire les systèmes et de faciliter la synchronisation.

Récemment, on a étudié un type spécial d'ordinateur [13], dont le rôle sera d'analyser les situations critiques et de chercher les liaisons cause-effet. Le système de commande automatique associé à un tel ordinateur est capable de déterminer la cause principale d'une situation critique et d'indiquer les objets (héliostats) qui sont en panne.

En observant les symptômes, on peut relever les imprécisions dans le fonctionnement d'un objet et les corriger en utilisant les commandes correspondantes. L'ordinateur, en analysant les informations, isole les groupes de signaux liés aux défauts et permet de découvrir leur cause. En relevant les défauts dans le système, l'ordinateur donne des signaux d'avertissement.

La commande automatique, ainsi conçue, exclut le fonctionnement erroné du système de formulation des commandes et permet de contrôler tous les centres de la C.S.

En outre, on peut introduire dans l'ordinateur d'autres instructions en vue de déterminer les directives en cas d'alerte, d'effectuer des mesures supplémentaires et aussi en vue d'une gestion rentable de l'énergie solaire convertie dans la centrale. Ces problèmes peuvent être résolus assez rapidement par l'ordinateur du type M-40 fabriqué en URSS [14].

Bibliographie

- [1] APARISSI, R. R., BAHOU, V. A., GARF, B. A., *Installations solaires de puissance élevée dans Exploitation de l'énergie solaire* (M., Académie des Sciences, URSS) 1957, p. 84.
 - [2] APARISSI, R. R., GARF, B. A., KOLOS, I. G., TIEPLIAKOFF, D. I., *Centrales solaires* (Héliotechnique) 1968, n° 1.
 - [4] OLESK, A. O., *Photorésistances*, M.-L. ed. *Energie*, 1966.
 - [5] GRINESTEIN, L. L., *Photorésistances dans les installations d'automatique industrielle* (ed. M. Gos-energo-izdat) 1962.
 - [6] TOURHOULETZ, V. I., OUDALOFF, N. P., *Photodiodes et phototriodes* (ed. M. Gos-energo-izdat) 1962.
 - [7] NIKOLAYEV, P. V., SABININE, I. A., *Systèmes photoélectriques d'orientation*, M. ed. *Energie*, 1969.
 - [8] GARF, B. A., GORSCHKOVA, L. V., *Quelques aspects de la construction des parties électro-mécaniques des centrales solaires* (Publication de l'Institut de Kijjanovsky) 6^e ed., 1973, p. 76-83.
 - [9] CHERMAZANIANE, Ia. T., APARISSI, R. R., *Eléments de commande automatique de la centrale solaire thermique* (ed. Académie des Sciences, URSS) vol. XIII, n° 1, 1960, p. 57-70.
 - [10] APARISSI, R. R., CHERMAZANIANE, Ia. T., *Etude des éléments de commande automatique pour les centrales solaires dans Installations thermiques utilisant l'énergie solaire* (M. Académie des Sciences, URSS) 1960.
 - [11] STOPSKY, S. B., *Schémas logiques avec des semiconducteurs et leurs applications* (L. Energie), 1960.
 - [12] FRÉMKÉ, A. V., *Télémesure* (M. ed. Ecole supérieure) 1968.
 - [14] *Système national d'installations automatiques d'industrie. Catalogue T. 3, éd. 12. Institut central de l'information et des études technico-économiques concernant des appareils de contrôle et de mesure, des moyens d'automatisation et des systèmes de commande*, M., 1975.
-