

Initiation à la pratique de l'électronique

Les capteurs de position (2)

(PREMIERE PARTIE : VOIR LE HAUT-PARLEUR N° 1832 PAGE 88)

Un bon capteur : le « resolver »

La petite machine électromagnétique nommée « resolver » est peut-être un peu moins connue que les « selsyns » ou « synchros », dont nous dirons quelques mots, mais elle est parfaitement utilisable comme capteur de position et, en outre, elle peut servir à de nombreuses applications pour des amateurs. Avec un peu de chance, en cherchant chez des vendeurs de surplus de l'Armée, on peut en trouver pour un prix modique, surtout si l'on est prêt à le remettre à neuf (généralement par nettoyage des balais et bagues de contact).

Cette machine, qui se présente comme un petit moteur électrique, comporte (fig. 11) un « rotor » (partie mobile) et un « stator » (partie fixe). Le rotor a un enroulement qui, quand il est parcouru par un courant, donne une induction magnétique dirigée perpendiculairement à l'axe de rotation. Le stator comporte deux enroulements perpendiculaires, désignés par S (comme Sinus) et C (comme Cosinus). Pourquoi de tels noms ? Tout simplement parce que, si l'on ap-

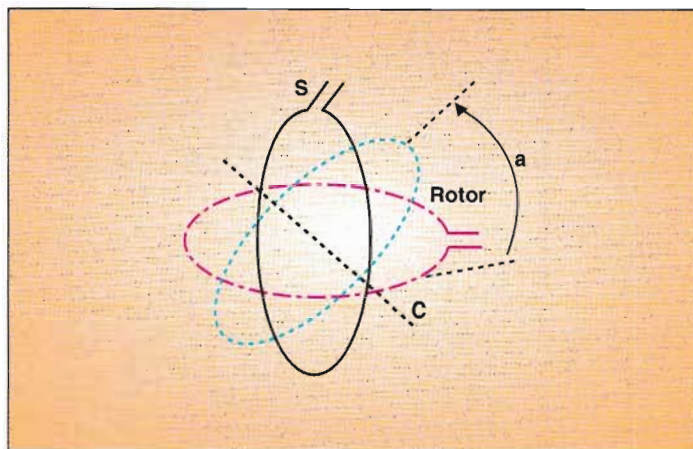


Fig. 11. - Un « resolver » comporte un rotor et deux enroulements fixes, C et S, dans lesquels le champ alternatif produit par le rotor induit deux tensions.

plique au rotor une tension alternative, les amplitudes des tensions induites dans les enroulements S et C seront respectivement proportionnelles au sinus et au cosinus de l'angle a qui repère la position du rotor.

En effet, si l'angle a est nul, le plan des spires du rotor est le même que celui des spires de l'enroulement C : la tension induite dans ce dernier est maximale, alors que, dans l'enroulement S, dont le plan des spires est perpendiculaire à celui des spires du rotor, il n'y a aucune tension induite.

On voit que, si l'on augmente l'angle a , la tension induite dans C diminue, alors que celle qui est induite dans S

augmente, passant par un maximum pour $a = 90^\circ$, valeur pour laquelle la tension induite dans C s'annule. Si l'on augmente l'angle a , il y a de nouveau une tension induite dans l'enroulement C, mais elle est en opposition de phase avec la tension appliquée au rotor.

Evidemment, l'alternatif... « c'est comme un bétet, ça n'a pas de sens », mais cela a... une phase. Donc, nous enverrons la tension induite dans C vers un « démodulateur cohérent ». Nous ne donnons, ci-après, que quelques indications sur cette technique, ayant déjà traité le sujet en détail dans *Le Haut-Parleur*, numéros 1776 (mai 1990) pages 76 à 82,

1777 (juin 1990) pages 147 à 154 et 1778 (juillet 1990) pages 50 à 57.

Soyons cohérents !

Soit (fig. 12a) la tension dite « de référence » qui, dans notre cas, sera celle que l'on applique au rotor du resolver. La tension induite dans un des stators, est, par exemple, celle qui est tracée en trait plein sur la figure 12(b). Si l'on fait tourner le rotor de 180° , la tension induite dans ce même enroulement sera celle qui est tracée en tirets sur la figure 12(b).

Il est à noter que, si l'on veut observer à l'oscilloscope la tension induite et obtenir réellement ces courbes, il faut que le balayage de l'oscilloscope soit synchronisé « en externe » par la tension de référence. Si l'on synchronise l'oscilloscope « en interne » par le signal à examiner, on verra la même courbe sur l'écran pour les deux positions du rotor.

Si l'on pratique, sur la tension induite, une détection « simple » (en ne conservant que les alternances positives), les tensions obtenues seront celles que représente la figure 12(c). En prenant la valeur moyenne de la tension, nous aurons,

dans les deux cas, une tension positive. La détection classique n'est pas sensible à la phase du signal détecté.

Pour réaliser une démodulation cohérente, ce qui nous donnera les courbes de la figure 13, on pourra, par exemple, ne laisser passer la tension induite que pendant les moments où la tension de référence est positive.

On voit tout de suite, sur la figure 13(c), qu'en prenant la valeur moyenne du signal ainsi obtenu nous aurons une tension proportionnelle à l'amplitude du signal mais que cette tension sera positive ou négative. Elle sera positive si le signal démodulé est en phase avec la tension de référence et négative si ce signal est en opposition de phase avec la référence.

Autrement dit, la détection classique consiste à éliminer, dans le signal à démoduler, les alternances négatives, alors que la démodulation cohérente consiste à éliminer, dans ce signal, les parties correspondant aux instants où la référence est négative.

Comment y arriver ? Sans donner de détails, nous indiquerons une bonne solution possible : l'emploi des « portes analogiques ». Ces circuits, comme le HEF 4096, fonctionnent à la façon d'un relais. Ils ont deux « bornes », B et B' (on ne peut pas parler d'« entrée » ni de « sortie »), et une commande C.

Quand la commande C est au niveau logique bas, les bornes sont déconnectées l'une de l'autre.

Quand on applique sur l'entrée C un niveau haut, tout se passe comme si B et B' étaient reliées par un résistor de résistance assez faible (100 à 50 Ω).

Donc, une telle porte, commandée par la tension de référence (mise sous forme rectangulaire par un trigger de Schmitt), ne laissera passer le

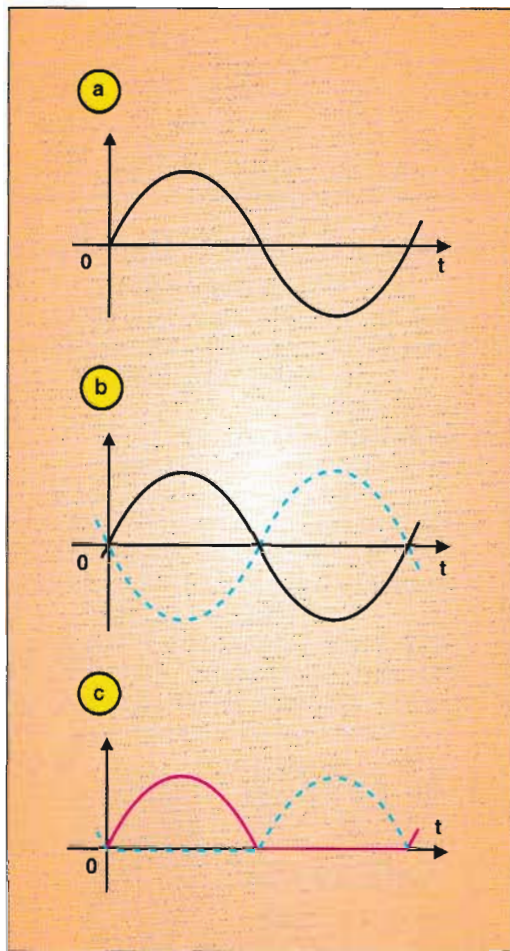


Fig. 12. – Par rapport à la tension « de référence » (a) appliquée au rotor, la tension induite sur un des bobinages en trait plein peut être en phase avec la référence (courbe en trait plein) ou en opposition de phase (courbe en pointillé). Dans les deux cas, ce que l'on obtient par une détection classique (c) donne toujours une tension positive.

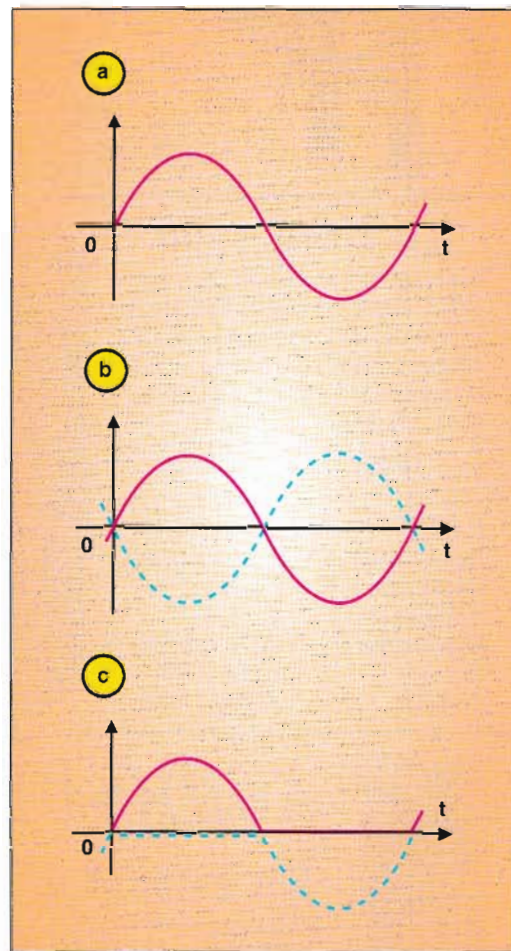


Fig. 13. – Si, au contraire, on retient de la tension induite (b) la partie correspondant aux instants où la référence (a) est positive, on obtient (c) un signal positif ou négatif selon la phase de la tension induite. C'est la « démodulation cohérente ».

signal à démoduler que quand la référence est positive.

Donc, en utilisant la démodulation cohérente pour les signaux induits dans les enroulements S et C du resolver, nous obtiendrons deux tensions continues qui seront respectivement proportionnelles au sinus et au cosinus de l'angle dont on a tourné le rotor du resolver. Ce dernier, avec les ensembles de démodulations, se comporte alors comme le potentiomètre sinus-cosinus dont nous avons parlé plus haut.

Le système de « télé-affichage »

Certains diront peut-être que tout n'est pas résolu quand on dispose du sinus et du cosinus

de l'angle. On peut donc faire plus si on le désire, à savoir obtenir un axe qui « recopie » la position de l'axe du rotor.

Il nous faut, pour cela, un second resolver, et nous aurons deux moyens différents pour l'utiliser. De toute façon, nous connecterons l'enroulement S du premier resolver à l'enroulement homologue, S', du second resolver, par exemple en utilisant un amplificateur opérationnel A, monté en gain unité, pour ne pas « charger » l'enroulement S. De même, nous allons envoyer la tension induite dans C à l'enroulement C', par l'intermédiaire du second amplificateur « suiveur », B.

Ces amplificateurs ne sont pas toujours nécessaires, mais il est souvent préférable de les utiliser.

Que se passe-t-il alors ? Les bobines B' et C' du second resolver, donnant chacune un champ magnétique alternatif, fournissent un « champ résultant », orienté exactement comme celui qu'avait créé le rotor R.

Si, alors, on envoie au rotor R' la même tension alternative que celle qui alimente R, le champ alternatif produit par R' va agir sur le « champ résultant » et produire un couple moteur qui va faire tourner le rotor R'. Jusqu'à ce que, à chaque instant, ces champs se compensent.

Donc, le rotor du second resolver va tourner jusqu'à ce qu'il occupe la même position que le rotor R du premier resolver. Il faudra, bien sûr, le laisser libre de son mouvement

et ne pas le freiner. Cette méthode se nomme le « téléaffichage », car on affiche à distance la position du rotor R en la recopiant sur le rotor R'.

Transmission réversible ou non

Dans le montage de la figure 14, la position du rotor R commande celle du rotor R', mais la réciproque n'est pas vraie, en raison de la présence des deux amplificateurs. On pourrait se passer de ces derniers : la tension envoyée se trouverait alors réduite, parce que les enroulements S' et C' consomment alors du courant aux tensions induites dans S et C.

Mais il se produirait quelque chose d'autre. Dans un montage ne comportant pas d'amplificateurs, on distingue mal celui des deux resolvers qui est « émetteur » et celui qui est « récepteur ». Et, en effet, en faisant tourner le rotor du premier, on commande celui du second, et réciproquement. Tout se passe alors comme si les deux rotors étaient reliés par un flexible, qui tend à les maintenir dans la même position.

Il existe une autre façon d'utiliser les resolvers couplés : le montage dit « synchrodélec-

tion ». On monte les deux resolvers comme sur la figure 14 (avec ou sans amplificateurs), mais, au lieu d'alimenter le rotor R' par la même tension alternative u que celle qui est appliquée au rotor R, on utilise la tension induite dans R' par le champ composé, produit par C' et S'.

Si l'axe du bobinage du rotor R' est dirigé comme le champ résultant fourni par C' et S', la tension induite dans ce rotor est maximale. A l'opposé, si l'on tourne alors le rotor R' de 90° , la tension induite s'annule.

Nous allons donc réaliser un servomécanisme qui maintienne en permanence à zéro (ou presque) la tension induite dans R'. Par rapport à la position d'annulation de la tension induite, si l'on déplace légèrement R' dans un sens ou dans un autre, il apparaît une petite tension alternative, en phase ou en opposition de phase avec celle qui alimente R, selon le sens dans lequel on décale le rotor R'.

Comme il faut connaître ce sens pour commander le rotor par un moteur et le ramener à une position où la tension induite est presque nulle, il nous faudra, là aussi, employer la « démodulation cohérente » pour obtenir la « tension d'erreur », c'est-à-dire la tension positive ou négative, propor-

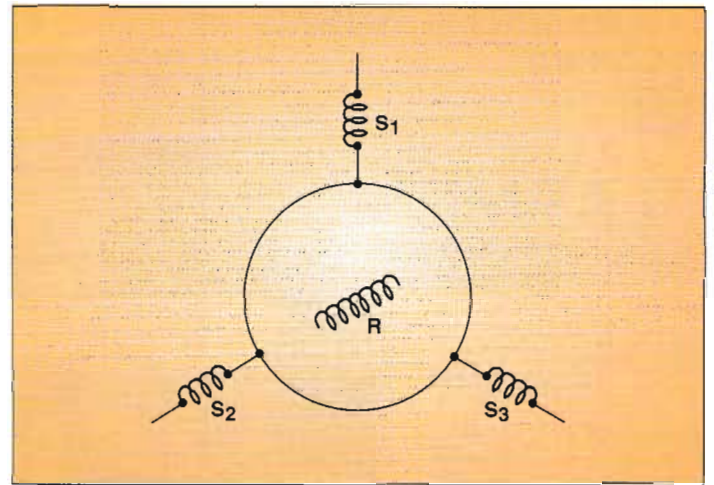


Fig. 15. – Le « selsyn » ou « synchro » comporte, sur son stator, trois enroulements décalés de 120° . Il est plus « classique » comme capteur de position, mais se prête moins à d'autres utilisations intéressantes que le resolver.

tionnelle à l'écart entre la position du rotor R' et celle où il y aurait une tension induite nulle dans ce rotor.

La tension d'erreur en question, après amplification, commande un moteur, qui agit mécaniquement sur l'axe du rotor R' et le ramène toujours dans une position correspondant à une tension induite quasi nulle.

Pourquoi des resolvers et pas des selsyns ?

Il y a certainement des lecteurs qui ont déjà entendu parler de petites machines prévues pour transmettre des positions (donc jouant le rôle de capteurs de position) et qui ne sont pas des resolvers, mais des engins nommés « selsyns » ou « synchros ».

Ils comportent, comme le resolver, un rotor à un enroulement, mais le stator, au lieu d'être fait de deux enroulements perpendiculaires, comporte TROIS enroulements disposés à 120° les uns des autres, ainsi que le montre la figure 15. Cela dit, on utilise les selsyns exactement comme nous l'avons indiqué pour les resolvers, en couplant les trois

enroulements du stator du premier selsyn aux trois enroulements du second.

Là aussi, on peut réaliser un « téléaffichage », en alimentant le rotor du second selsyn par la même tension alternative que celle du premier, ou une « synchrodétection », en amenant, par asservissement, la tension induite dans le second rotor à rester pratiquement nulle.

Il est à signaler qu'il ne faut pas quatre fils pour lier les deux stators dans le cas d'un selsyn, mais seulement trois, car on peut montrer facilement que, à chaque instant, la somme algébrique des tensions induites dans les trois enroulements du stator est nulle. C'est pourquoi l'on a relié « en étoile » les trois enroulements. Dans le resolver, à l'opposé, les tensions induites dans S et C n'ont pas une somme nulle, il faut donc trois fils de liaison.

Pourquoi faire simple quand on peut faire compliqué ?

C'est sûrement ce que vont demander les lecteurs, ayant compris que, avec deux enroulements sur chaque stator, on fait aussi bien que quand il y en a trois.

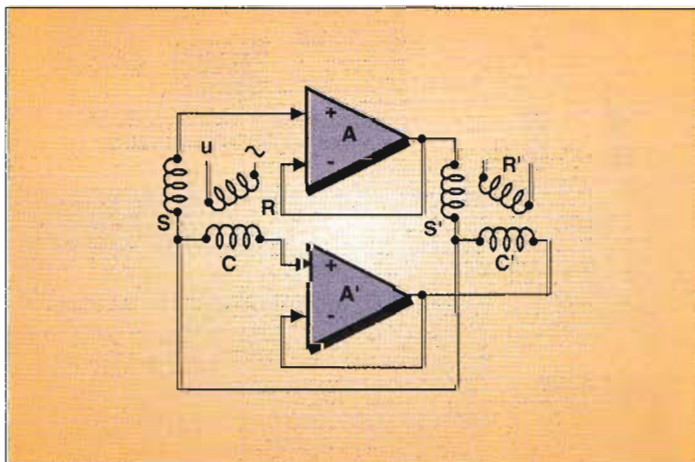


Fig. 14. – Le rotor d'un premier resolver reçoit une tension alternative u . On envoie les tensions induites dans S et C aux enroulements S' et C' d'un autre resolver, en interposant éventuellement des amplificateurs. Les courants passant dans S' et C' « recomposent » dans le second resolver un champ magnétique orienté comme celui de R.

Ce qui semble encore aggraver les choses est le fait suivant : les selsyns sont des machines bien plus répandues (et bien plus utilisées) que les resolvers, et on les trouve plus facilement dans les surplus, pour des prix moindres. Le fait de disposer de trois tensions induites ayant une somme constamment nulle n'est qu'une petite simplification à l'actif du selsyn. Alors, l'auteur s'attend à une autre question : « Si l'on n'utilise pratiquement que les selsyns, pourquoi avez-vous décrit les réalisations avec des resolvers ? »

La raison est la suivante. Si les lecteurs arrivent à trouver des resolvers, ils pourront, avec ces machines, faire bien plus que des transmissions de position, et nous allons revenir là-dessus. Les applications « non-capteurs » des resolvers, que nous allons voir plus en détail, sont éventuellement réalisables avec des selsyns, mais bien moins facilement.

Pourquoi les selsyns sont-ils utilisés d'une façon quasi exclusive là où l'on pourrait employer des resolvers ? Cela tient sans doute au fait que l'on a probablement utilisé comme premiers selsyns des petits moteurs triphasés qui existaient depuis longtemps. En effet, un selsyn dans le rotor duquel on envoie un courant continu, et dont on fait tourner le rotor d'un mouvement uniforme, engendre, sur ses trois enroulements statoriques, une tension triphasée. De même, en envoyant une tension triphasée aux trois enroulements d'un selsyn et en chargeant son rotor par un résistor, on le transforme en un moteur asynchrone triphasé.

Précisons bien que, dans l'emploi normal des selsyns, avec une tension alternative envoyée au rotor, ce dernier étant fixe, les tensions produites dans les trois enroulements NE SONT PAS DU TRI-PHASÉ, contrairement à ce

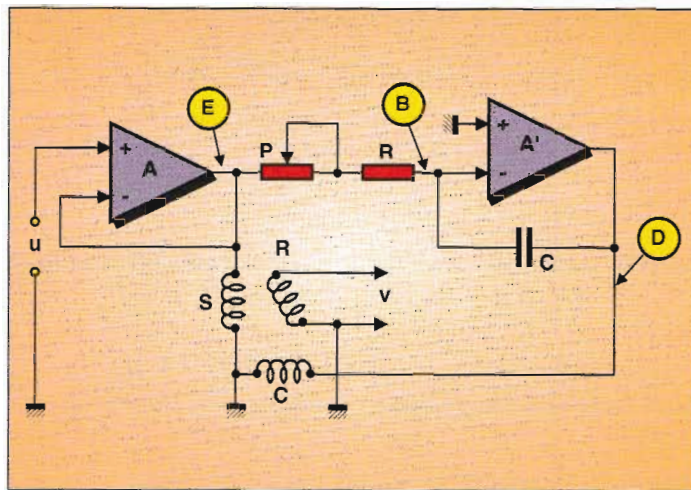


Fig. 16. — On applique, par un amplificateur « suiveur », la tension u à l'enroulement S d'un resolver. L'amplificateur A' est monté en « intégrateur », il déphase de 90° la tension u et l'applique à l'enroulement C . On obtient alors, dans le resolver, un « champ tournant », induisant dans le rotor une tension que l'on peut déphaser comme on veut, en tournant ce rotor.

que croient bien des gens. Les tensions induites s'annulent toutes EN MEME TEMPS, elles sont en phase ou en opposition de phase avec la tension appliquée au rotor.

Un déphaseur à déphasage illimité

Nous arrivons ici à une première application des resolvers. Il s'agit, à partir d'une tension sinusoïdale u , de produire une autre tension sinusoïdale v , dont on peut faire varier la phase comme on veut, en avance ou en retard, autant qu'on le veut (de plusieurs périodes si on le souhaite) par rapport à u .

Un tel « déphaseur illimité » est extrêmement intéressant pour étudier les différents phasemètres que l'on peut réaliser. De tels phasemètres, très utiles dans de nombreuses applications (boucles verrouillées en phase ou « PLL », multiplication de fréquence, étude d'amplificateurs), sont faciles à réaliser mais quelquefois difficiles à étalonner.

Soit (fig. 16) un resolver auquel nous envoyons, sur son enroulement S , une tension alternative sinusoïdale u . On l'envoie par l'intermédiaire

d'un amplificateur opérationnel monté en gain unité, qui la « recopie » exactement, mais nous donne, en sortie, une source de tension qui « n'a plus la résistance interne » (cet horrible fléau des sources), ce qui la rend « idéale ».

A partir de cette tension u obtenue à la sortie du premier amplificateur opérationnel A , alimentant S , on attaque un second amplificateur opérationnel, A' , monté en « intégrateur ». Le nom peut inquiéter, mais le montage est d'une simplicité exemplaire. Comme un amplificateur opérationnel maintient toujours, quand il le peut, le potentiel de son entrée « - » à la même valeur que celui de son entrée « + », le point (B) sera maintenu au potentiel zéro. Il y aura donc, arrivant au point (B) par R et P , un courant proportionnel au potentiel du point (E), soit à u .

Comme un amplificateur opérationnel a des courants d'entrée négligeables, tout le courant arrivant en (B) va dans le condensateur C . Or, quand un condensateur reçoit un courant alternatif sinusoïdal, la tension à ses bornes est déphasée de 90° en retard par rapport à ce courant.

C'est cette tension que l'on trouve en (D) (puisque l'ar-

mature de gauche de C est maintenue par l'amplificateur opérationnel au potentiel fixe zéro). On l'applique à l'enroulement C du resolver.

En ajustant la valeur de P , on fait en sorte que la tension u' (entre le point D et la masse) ait la même valeur rms que la tension u . Il suffit, pour cela, que la résistance totale de R et P soit égale à la valeur absolue de l'impédance de C à la fréquence considérée. Rappelons que, pour un condensateur de capacité C , à la fréquence F , cette impédance est égale à $Z = 1/(6,28 F C)$, en exprimant C en farads et F en hertz.

En appliquant ainsi aux deux enroulements statoriques du resolver deux tensions sinusoïdales de même amplitude, déphasées de 90° , nous avons produit un « champ tournant » dans le resolver. Tout se passe comme si, autour du rotor de ce dernier, tournait un aimant qui ferait F tours par seconde.

Ce champ tournant induit dans le rotor une tension, dont la phase est fonction de la position du rotor. En agissant sur l'axe du rotor, on modifie donc la phase de cette tension comme on le désire.

Si l'on fait tourner l'axe du rotor dans le même sens que le champ, on obtient une tension induite qui prend un retard de phase croissant par rapport à u (autrement dit, une tension dont la fréquence est légèrement inférieure à F). Si la rotation du rotor a lieu en sens contraire de celle du champ, la tension induite prend une avance de phase croissante par rapport à u (elle a donc une fréquence un peu supérieure à F).

Pour obtenir le même résultat avec selsyn, il faudrait engendrer, à partir de u , deux tensions, déphasées respectivement de 120° et 240° par rapport à u , ce qui est bien moins facile.

(à suivre)

J.P. Ehmichen