

Machines synchrones

Excitation

par **Pierre WETZER**

*Ingénieur de l'École nationale supérieure d'électricité et de mécanique de Nancy (ENSEM)
Responsable support technique
European Gas Turbines (EGT), division Régulation et contrôle*

1. Généralités.....	D 3 545 - 2
1.1 Définition du système d'excitation.....	— 2
1.2 Fonctions devant être assurées par le système d'excitation	— 2
1.3 Comportement vis-à-vis des petites perturbations	— 2
1.3.1 Réglage de tension	— 2
1.3.2 Critères de performance	— 3
1.4 Comportement vis-à-vis des grandes perturbations	— 4
2. Description des différentes sortes de sources de puissance.....	— 4
2.1 Généralités	— 4
2.2 Excitatrice à courant continu	— 5
2.3 Alternateur-exciteur débitant sur redresseurs	— 5
2.4 Auto-alimentation	— 5
2.4.1 Auto-alimentation à dérivation pure	— 5
2.4.2 Auto-alimentation avec compoundage série	— 6
2.4.3 Auto-alimentation avec compoundage parallèle	— 6
2.5 Alimentation par alternateur à aimants permanents	— 7
3. Détermination des systèmes compound.....	— 7
3.1 Compoundage série	— 7
3.1.1 Mise en série des circuits alternatifs	— 7
3.1.2 Mise en série des circuits continus	— 8
3.2 Compoundage parallèle	— 9
3.2.1 Mise en parallèle des circuits alternatifs	— 9
3.2.2 Mise en parallèle des circuits continus	— 9
4. Modalités de réglage et performances des systèmes d'excitation	— 10
4.1 Réglage statique	— 10
4.2 Réglage dynamique.....	— 10
5. Dimensionnement des systèmes d'excitation à redresseurs	— 11
6. Utilisation spécifique des systèmes d'excitation	— 11
Références bibliographiques	— 11

Les **machines électriques synchrones** qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique (alternateurs) ou **vice versa** (moteurs synchrones) nécessitent une alimentation en courant continu de leur inducteur ou **système d'excitation**. En outre, l'existence de ce dispositif permet, suivant les cas, de régler la tension ou la puissance réactive de la machine synchrone. Les performances obtenues doivent être en accord avec les conditions d'exploitation de la machine, en particulier les protections de la machine synchrone elle-même et, éventuellement, celles du réseau électrique auquel elle est reliée.

Le comportement vis-à-vis des **petites perturbations** dépend principalement de la présence ou de l'absence d'une machine amplificatrice intermédiaire à flux variable, **excitatrice à courant continu** ou **alternateur-exciteur**, et de la conception du régulateur qui lui est associé.

Le comportement vis-à-vis des **grandes perturbations** dépend, lui, principalement de la source de puissance du système d'excitation. Une source réellement indépendante des perturbations subies par la machine synchrone peut être obtenue d'un **alternateur à aimants permanents** monté sur la ligne d'arbre, mais cela implique l'utilisation d'une machine amplificatrice intermédiaire et reste limité aux machines de plus petite puissance. Une **auto-alimentation à dérivation pure** est la plus facile et la plus économique à réaliser, mais ses performances dépendent directement des perturbations subies par la machine synchrone. Enfin, de nombreuses combinaisons d'**auto-alimentation compound** permettent d'obtenir un bon comportement de la machine synchrone en régime perturbé, au prix d'une conception plus complexe et également d'un coût plus élevé.

Le **dimensionnement** des systèmes d'excitation doit également prendre en compte les contraintes de **tenue en tension** et de **tenue en courant** correspondant à leurs conditions d'utilisation.

Cet article reprend de larges extraits de l'ancien texte rédigé par **Philippe BARRET**.

1. Généralités

1.1 Définition du système d'excitation

Le courant d'excitation des machines synchrones est obtenu à partir d'un ensemble appelé **système d'excitation** comportant, dans la majorité des cas :

- la **source de puissance** proprement dite, fournissant la puissance d'excitation ; des exemples de telles sources sont décrits au paragraphe 2 ;
- le **régulateur de tension**, servomécanisme ayant, dans le cas le plus simple, pour grandeur de sortie une tension commandant la puissance délivrée par la source d'excitation et, pour grandeur d'entrée, l'écart entre la tension aux bornes de la machine synchrone principale et une tension de consigne ;
- éventuellement, des **étages amplificateurs intermédiaires**, intercalés entre le régulateur et la source de puissance.

1.2 Fonctions devant être assurées par le système d'excitation

Le système d'excitation des machines synchrones est amené à jouer un rôle important dans deux catégories de circonstances :

- d'une part, il assure le **réglage de tension** dans les conditions normales de fonctionnement, c'est-à-dire lorsque les conditions extérieures appliquées, et notamment la tension aux bornes, ne varient pas avec simultanément une grande amplitude et une grande rapidité. On considère dans ce cas le comportement du système d'excitation vis-à-vis des **petites perturbations** ;
- d'autre part, il contribue au **rétablissement de conditions normales** de fonctionnement, à la suite de variations brutales et de grande amplitude, des conditions extérieures appliquées, et notamment de la tension aux bornes. On considère alors le comportement du système d'excitation vis-à-vis des **grandes perturbations**.

1.3 Comportement vis-à-vis des petites perturbations

1.3.1 Réglage de tension

■ La première qualité du réglage de tension est la **précision**. La précision statique, c'est-à-dire la réponse du système d'excitation, une fois éteints les régimes transitoires, peut être caractérisée :

- soit par la **variation maximale de tension** $\Delta V_G / V_{Gn}$ admissible lorsque l'on modifie le régime des puissances active et réactive (exemple : $\Delta V_G / V_{Gn} = 1\%$ lorsque l'on passe du régime à vide au régime nominal) ;

Nota : le lecteur pourra se reporter pour la définition des symboles à l'article *Machines synchrones. Fonctionnement en régime permanent* [D 480].

- soit par le **gain statique** :

$$G = \frac{\Delta V_f / V_{fn}}{\Delta V_G / V_{Gn}}$$

caractérisant la variation relative de la tension d'excitation V_f que le régulateur de tension doit provoquer lorsque se produit une variation de tension ΔV_G aux bornes de la machine synchrone. Un ordre de grandeur usuel est $G \approx 30$.

■ La deuxième qualité du réglage de tension est la **rapidité**. Le système d'excitation doit réagir rapidement à une variation de tension de moyenne importance (par exemple, $\Delta V_G / V_{Gn} = 5$ à 10%). Pour cela, il faut un temps de réponse faible ; on est aussi amené, parfois, à adopter un **gain transitoire** plus élevé que le gain statique.

■ La rapidité peut entrer en conflit avec la **stabilité**. On peut alors être conduit à adjoindre au système d'excitation des dispositifs stabilisateurs au moyen de divers asservissements (par exemple, asservissements à la puissance active, à l'angle électrique et à ses dérivées, etc.).

■ Enfin, le système d'excitation peut avoir à assurer des fonctions de **limitation**, destinées à éviter que les paramètres de fonctionnement de la machine synchrone (courants, tensions, angle interne) n'atteignent des valeurs dangereuses.

1.3.2 Critères de performance

Les qualités de précision, de rapidité et de stabilité vis-à-vis des petites perturbations peuvent être définies et quantifiées en faisant appel aux critères classiques de la théorie des systèmes asservis.

Pour cela, nous allons considérer l'ensemble du système d'excitation et de la machine synchrone selon le diagramme de la figure 1

avec V_c tension de consigne ;
 V_f tension d'excitation ;
 V_G tension de la machine synchrone ;
 V_e tension d'erreur, égale à $V_c - V_G$ lorsque le système fonctionne en boucle fermée et à V_c lorsqu'il fonctionne en boucle ouverte ;
 E et F fonctions de transfert, sous forme opérationnelle ou harmonique selon le cas, qui traduisent les relations qui existent entre V_f et V_e , d'une part, et entre V_G et V_f , d'autre part.

Indiquons alors sommairement trois méthodes parmi les plus usuellement adoptées pour caractériser les performances du système d'excitation.

■ **Courbe de réponse unitaire** : la machine synchrone se trouvant à un régime de fonctionnement spécifié (souvent à vide, à tension normale, pour des raisons évidentes de commodité) et le système d'excitation fonctionnant en boucle fermée (interrupteur D fermé, figure 1), on impose à V_c une variation en échelon de faible amplitude (1 à 2 %) et on observe la loi de variation de V_G en fonction du temps.

Une forme typique de la courbe de réponse est celle de la figure 2 ; les principales grandeurs caractéristiques que l'on peut mesurer sur cette courbe sont :

- le **temps de montée** t_m , généralement défini entre 10 % et 90 % de la valeur de régime établi, qui caractérise la **rapidité** ;
- le **dépassement** d , par rapport à la valeur finale ;
- le **temps d'établissement** t_e , c'est-à-dire le temps à partir duquel la tension reste comprise dans une fourchette spécifiée Δ de part et d'autre de la valeur finale (par exemple, ± 5 %), qui caractérise l'amortissement, donc la **stabilité**.

Les deux paramètres les plus importants sont, dans l'ordre, le temps d'établissement et le temps de montée.

■ **Réponse harmonique en boucle ouverte** : la machine synchrone se trouvant à un régime de fonctionnement spécifié (par exemple à vide, comme dans la méthode précédente), et l'**interrupteur** D de la figure 1 étant **ouvert**, on impose à V_c (donc à V_e) une variation sinusoïdale de fréquence donnée, et on mesure l'amplitude du rapport V_G/V_c ainsi que l'écart de phase entre V_G et V_c .

Le rapport des amplitudes est caractérisé par la quantité :

$$G_1 = 20 \lg \left| \frac{V_G}{V_c} \right|$$

appelée **gain harmonique en boucle ouverte** et exprimée en décibels.

On mesure alors le gain G_1 et la phase φ pour différentes valeurs de la pulsation appliquée, couvrant une gamme suffisamment étendue. Les courbes ont l'allure typique de la figure 3, à laquelle on se réfère pour la définition des principales grandeurs caractéristiques suivantes :

- la **valeur du gain** aux fréquences basses, qui caractérise la **précision** ;
- la **pulsation de coupure** ω_C , pour laquelle $G_1 = 0$;
- la **marge de gain** G_m (valeur du gain lorsque la phase vaut -180°) ;
- la **marge de phase** φ_m (valeur algébrique de $\varphi + 180^\circ$ lorsque φ a la valeur φ_C correspondant à ω_C).

Les deux dernières grandeurs caractérisent la **stabilité**.

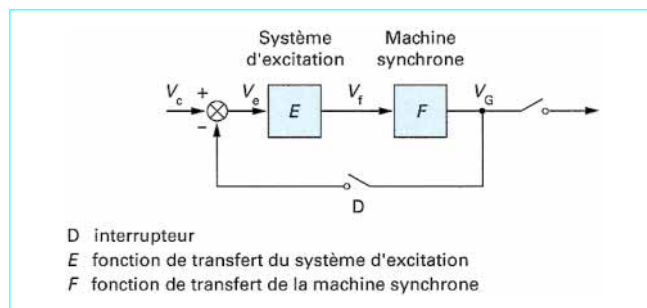


Figure 1 – Schématisation de la machine synchrone et de son système d'excitation

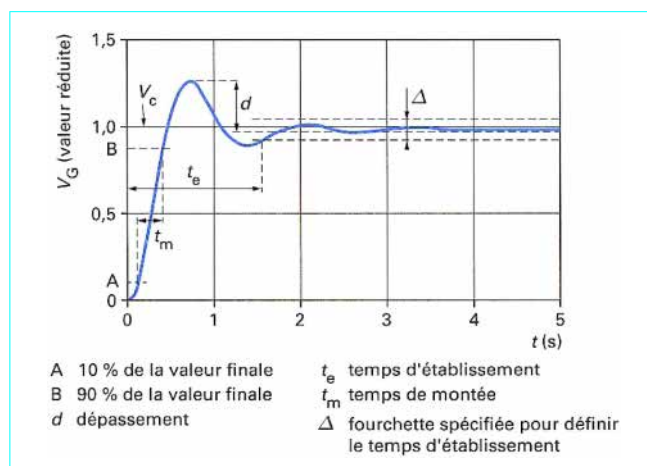


Figure 2 – Forme typique de la courbe de réponse unitaire

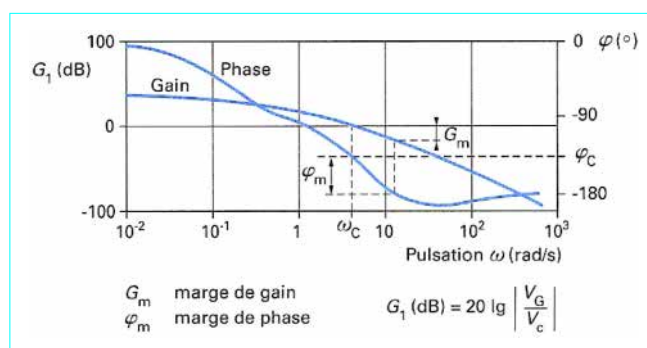


Figure 3 – Forme typique de la réponse harmonique en boucle ouverte

■ **Réponse harmonique en boucle fermée** (figure 4) : la machine synchrone se trouvant à un régime de fonctionnement spécifié (par exemple à vide, comme dans les deux méthodes précédentes) et l'**interrupteur** D de la figure 1 étant **fermé**, on relève les valeurs de gain et de phase, en fonction de la pulsation, obtenues et définies comme précédemment.

Le rapport des amplitudes est caractérisé par la quantité :

$$G_2 = 20 \lg \left| \frac{V_G}{V_c} \right|$$

appelée *gain harmonique en boucle fermée* et exprimée en décibels.

Les courbes ont l'allure typique de la figure 4 ; les principales grandeurs caractéristiques que l'on mesure directement sur cette courbe sont :

- le *coefficient de résonance en boucle fermée* Q , valeur maximale du gain exprimé en dB, caractérisant la stabilité ;
- la *bande passante* BP , valeur de la pulsation lorsque $G_2 = -3$ dB, caractérisant la rapidité.

1.4 Comportement vis-à-vis des grandes perturbations

Les deux exemples types de grandes perturbations vis-à-vis desquelles le système d'excitation a un rôle à jouer sont :

- d'une part, la chute de tension ou de puissance active importante et brutale aux bornes, due à un court-circuit survenant dans le voisinage de la machine synchrone ou à une manœuvre de ligne dans le réseau. Le système d'excitation doit être conçu pour donner rapidement une **surexcitation** notable qui, en freinant la diminution du flux magnétique de la machine, peut éviter la perte de synchronisme si le défaut n'est pas trop sévère ou s'il est éliminé rapidement. D'une manière générale d'ailleurs, cette surexcitation réduit la chute de tension transitoire que subissent les récepteurs proches de la machine synchrone ;
- d'autre part, la surtension qui se produit lors d'un déclenchement de la machine synchrone fonctionnant initialement en charge. Le système d'excitation doit alors **désexciter** de manière à maintenir la surtension aux bornes de la machine synchrone dans des limites non dangereuses.

Les paramètres caractérisant la surexcitation sont le *plafond* et le *facteur de réponse*.

Le **plafond** est la tension maximale que peut délivrer le système d'excitation. Sa durée maximale d'application est généralement précisée. Il est exprimé par le rapport V_{fp}/V_{fn} de la tension de plafond à la tension d'excitation nominale en charge. Un ordre de grandeur courant est de 1,6 à 2, valeurs pour lesquelles les performances sont satisfaisantes tout en n'entraînant pas un surdimensionnement trop coûteux.

Le **facteur de réponse** est la vitesse d'accroissement de la tension d'excitation, en valeur relative, calculée en remplaçant la variation réelle de la tension d'excitation par une variation linéaire en fonction du temps, correspondant à la même valeur moyenne de la tension d'excitation au cours de la première demi-seconde, lorsque le système d'excitation est sollicité par une perturbation conduisant à la montée au plafond.

La figure 5 illustre cette notion. La courbe ABC représente l'évolution réelle de la tension d'excitation et le segment AD, dont l'extrémité a pour ordonnée $V_{fm(0,5)}$, est tel que :

$$\text{aire OABCE} = \text{aire OADE}$$

Le facteur de réponse est alors donné par la formule :

$$R = (V_{fm(0,5)} - V_{fn}) / 0,5 V_{fn}$$

La quantité ainsi définie s'est avérée caractériser de façon satisfaisante l'aptitude au maintien du flux en cas de défaut.

De même, la désexcitation peut être caractérisée par le plafond négatif et un paramètre traduisant la vitesse de décroissance de la tension d'excitation.

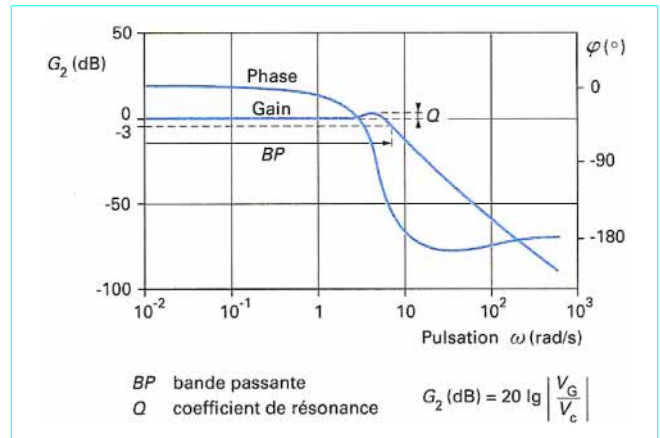


Figure 4 – Forme typique de la réponse harmonique en boucle fermée

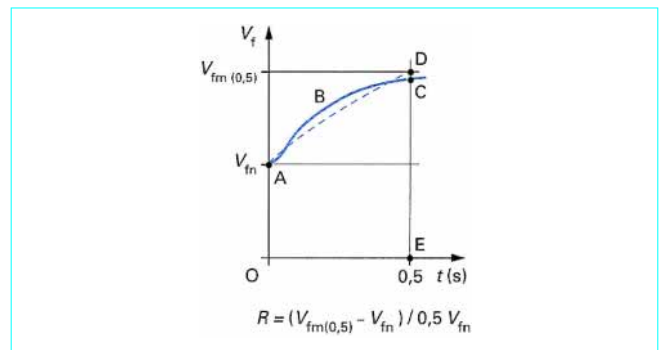


Figure 5 – Définition du facteur de réponse R

2. Description des différentes sortes de sources de puissance

2.1 Généralités

Pour fournir le courant continu d'excitation d'une machine synchrone, il est nécessaire de disposer d'une source de tension continue, variable dans d'assez larges proportions, puisque, entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement en régime nominal, le courant d'excitation d'une machine à pôles saillants varie environ du simple au double et, dans le cas d'une machine à entrefer constant, il peut varier environ du simple au triple.

Dans l'étude du système d'excitation intervient donc, d'une part, le choix des sources d'excitation, objet du présent paragraphe, et, d'autre part, les moyens mis en œuvre pour faire varier le courant d'excitation (§ 3 et 4).

On peut distinguer trois grandes catégories de sources principales d'excitation :

- excitatrice à courant continu ;
- alternateur-exciteur débitant sur redresseurs ;
- redresseur alimenté directement à partir des bornes de la machine synchrone principale (auto-alimentation).

Toutes ces sources tirent leur énergie de la machine synchrone, soit sous forme mécanique à partir de la ligne d'arbre dans les deux premiers cas, soit directement sous forme électrique dans le troisième.

Les catégories excitatrice et alternateur-excitateur nécessitent une source secondaire de puissance pour exciter ces machines intermédiaires. Le choix de cette source secondaire, bien que de plus bas niveau, est également important, notamment pour les caractéristiques d'autonomie de l'équipement.

La source secondaire peut être constituée :

- d'un redresseur alimenté à partir des bornes de la machine synchrone principale (auto-alimentation) comme une source principale ;
- d'un alternateur à aimant permanent monté sur la ligne d'arbre en plus de la machine d'excitation principale ;
- d'une source électriquement indépendante, ce qui en réalité est rare, un lien existant souvent entre la source dite indépendante et l'alternateur à exciter.

2.2 Excitatrice à courant continu

L'excitatrice (figure 6) doit nécessairement être munie d'un enroulement d'excitation séparée $L_{\text{sép}}$ par lequel seront obtenues les variations de flux permettant la variation de sa tension aux bornes V_f . Dans le but de diminuer l'importance de la source alimentant l'enroulement $L_{\text{sép}}$, l'excitatrice peut être munie d'un enroulement d'auto-excitation en dérivation L_d qui, à lui seul, est capable de permettre la fourniture de la tension V_f et du courant I_f correspondant au fonctionnement à vide de la machine principale.

Il faut noter que le courant I_f est nécessairement transféré au rotor de la machine synchrone par l'intermédiaire de bagues et balais.

L'excitatrice est généralement accouplée sur le même arbre que le rotor de la machine principale. Lorsque les conditions de puissance et de vitesse correspondent à une machine à courant continu difficilement réalisable, on peut soit utiliser un réducteur à engrenage, soit entraîner l'excitatrice par un moteur asynchrone, mais cette dernière solution est plus coûteuse et moins fiable.

2.3 Alternateur-excitateur débitant sur redresseurs

Il existe deux variantes selon que l'alternateur-excitateur est de conception classique, c'est-à-dire à inducteur tournant et induit fixe, ou l'inverse. La figure 7 représente schématiquement ces deux variantes et, pour les rendre plus claires, on a indiqué la démarcation entre les éléments fixes et les éléments tournants. Lorsque les courants doivent traverser cette démarcation, il est nécessaire d'utiliser bagues et balais.

L'alternateur-excitateur est accouplé sur le même arbre que le rotor de la machine principale, si bien que l'avantage de la solution de la figure 7b est de ne nécessiter aucun contact glissant. Cet avantage est très important dans le cas des très gros alternateurs, dont le courant d'excitation atteint des valeurs élevées (plus de 3 000 A pour un alternateur de 600 MW).

Cependant, la solution de la figure 7b est délicate constructivement : d'une part, il est plus difficile de faire tourner un induit qu'un inducteur, car le premier supporte des tensions et des courants beaucoup plus élevés, et, d'autre part, les redresseurs, tournant à grande vitesse, sont soumis à des contraintes mécaniques importantes.

C'est pourquoi les deux solutions sont utilisées à l'heure actuelle pour l'excitation des très gros turboalternateurs.

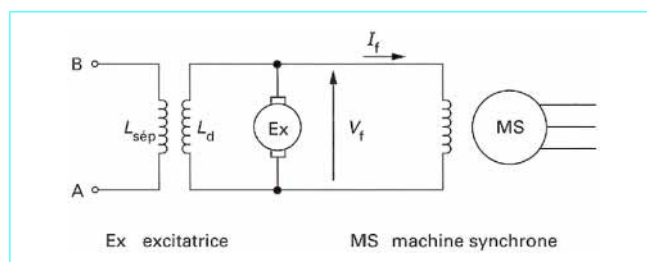


Figure 6 – Principe de l'excitation par machine à courant continu

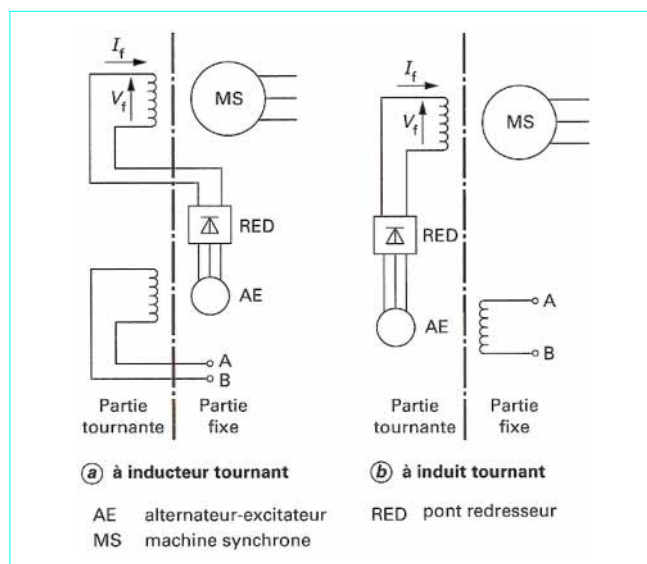


Figure 7 – Principe de l'excitation par alternateur-excitateur

2.4 Auto-alimentation

Il existe deux procédés d'auto-alimentation : à dérivation pure et à compoundage ; la théorie de fonctionnement de ce dernier est exposée au paragraphe 3.

2.4.1 Auto-alimentation à dérivation pure

Le pont de thyristors alimentant l'enroulement inducteur est lui-même alimenté par un système de tensions alternatives par le secondaire d'un transformateur triphasé dont le primaire est connecté aux bornes de la machine synchrone principale (figure 8).

Il est nécessaire que les redresseurs soient des thyristors, et non des diodes, de façon à pouvoir faire varier la tension V_f , en fonction de la charge, de telle sorte que la tension aux bornes de la machine synchrone reste constante.

L'amorçage et la stabilité de ce système bouclé s'étudient de la même façon que pour une génératrice à courant continu à excitation en dérivation. En général, la tension, due au flux rémanent de la machine principale, est trop faible pour permettre l'amorçage (compte tenu de la chute de tension dans les thyristors) et il faut donc utiliser une source auxiliaire.

2.4.2 Auto-alimentation avec compoundage série

Un exemple d'une telle réalisation est représenté sur la figure 9. La tension d'excitation :

$$V_f = V_T + V_I$$

est la somme de deux termes :

- une tension continue V_T , proportionnelle à la tension aux bornes de la machine synchrone, obtenue par un transformateur et un pont de thyristors comme dans le cas de la figure 8 ;
- une tension continue V_I , fonction du courant débité par la machine synchrone, obtenue à l'aide de trois transformateurs d'intensité placés dans les sorties côté neutre des phases de la machine synchrone. Ces trois transformateurs d'intensité débitent dans un pont de diodes. Il ne peut s'agir de transformateurs d'intensité au sens strict, c'est-à-dire tels que le courant secondaire soit strictement proportionnel au courant primaire, sinon I_f serait imposé par ce courant primaire quel que soit V_T : il n'y aurait pas compoundage. On est donc obligé de désolidariser partiellement les courants primaire et secondaire des transformateurs d'intensité, en leur imposant un courant magnétisant élevé, ce qui s'obtient en disposant un entrefer dans leur circuit magnétique. Il en résulte un surdimensionnement non négligeable.

Avec ce système, la tension d'excitation croît en même temps que le courant induit de la machine synchrone, ce qui correspond justement à ce qu'exige la théorie. Mais la tension d'excitation ne s'ajuste pas exactement à la valeur désirée ; c'est pourquoi on parait le réglage à l'aide des thyristors du pont *tension* Th.

La réalisation de la figure 9 correspond à la mise en série de deux tensions continues.

Il est possible de réaliser la mise en série par le côté alternatif conformément à la figure 10. Dans ce cas (§ 3.1.1), la tension d'excitation est proportionnelle non plus à la somme arithmétique de V_T et de V_I , mais à une composition vectorielle de ces deux grandeurs qui se rapproche davantage de la loi naturelle de variation de la tension et du courant d'excitation avec la charge.

2.4.3 Auto-alimentation avec compoundage parallèle

On peut réaliser un compoundage par la mise en parallèle des circuits alternatifs, conformément à la figure 11, en utilisant un **transformateur** de courant T à trois enroulements :

- le **primaire**, placé côté neutre, est traversé par le courant de la machine synchrone ;
- le **secondaire** est alimenté en dérivation sur la sortie de la machine synchrone par l'intermédiaire d'une inductance L en série ;
- le **tertiaire** débite dans un pont redresseur à diodes D, destiné à alimenter l'inducteur de la machine synchrone.

Le courant dans l'enroulement tertiaire résultant de l'addition vectorielle des courants des enroulements primaires et secondaires approche la loi naturelle de variation du courant d'excitation.

La mise en parallèle des circuits tension et courant peut également être réalisée de façon plus simple côté continu suivant la figure 12.

En fonctionnement normal, le pont de diodes D alimenté par les transformateurs de courant TI délivre un courant proportionnel au courant stator de la machine synchrone MS. La tension d'excitation est entièrement contrôlée par le pont de thyristors Th alimenté par le transformateur de tension TT tant que le courant d'excitation de MS est inférieur au courant délivré par le pont de diodes D. Ce principe restreint les possibilités d'absorption de puissance réactive.

Le pont de diodes D étant connecté en parallèle avec le redresseur Th, la tension V_f ne peut pas devenir négative. Le redresseur

Th peut donc être entièrement contrôlé, c'est-à-dire composé uniquement de thyristors, ou mixte, c'est-à-dire composé de thyristors sur une polarité de redressement et de diodes sur l'autre.

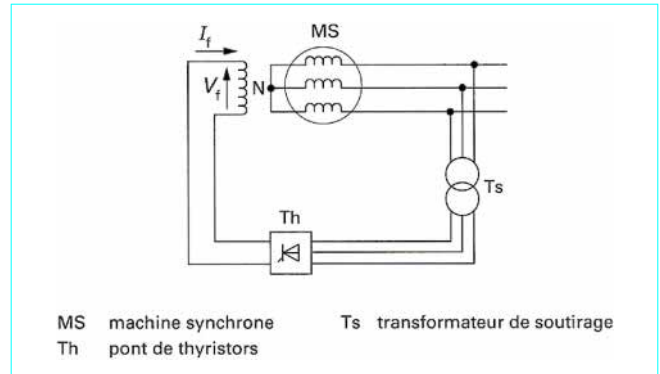


Figure 8 – Principe de l'excitation par auto-alimentation à dérivation pure

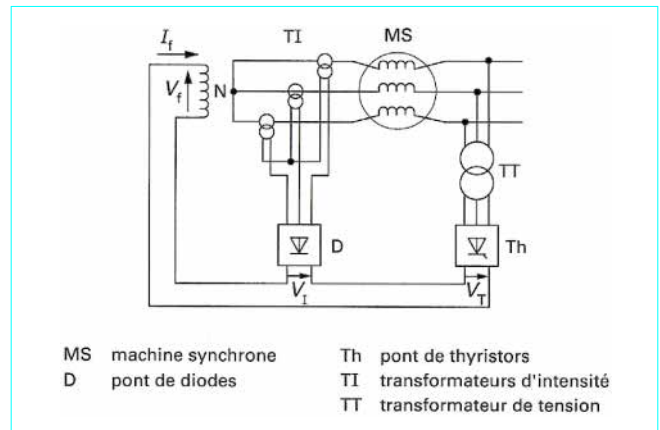


Figure 9 – Principe de l'excitation par auto-alimentation avec compoundage continu série

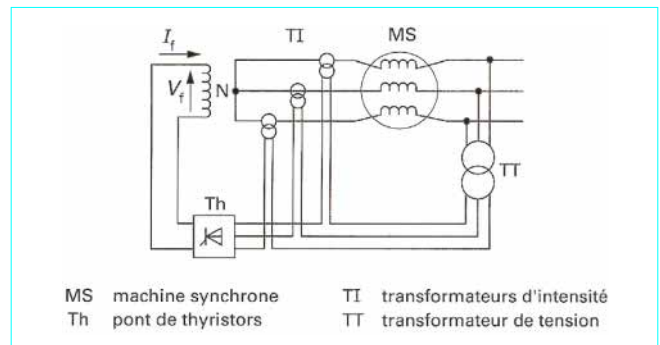


Figure 10 – Principe de l'excitation par auto-alimentation avec compoundage alternatif série

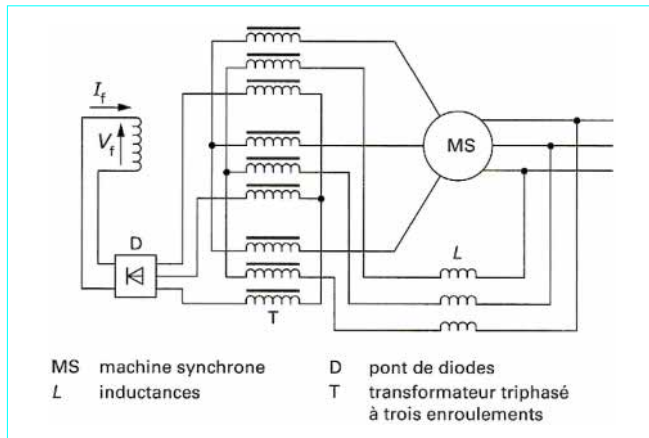


Figure 11 – Principe de l'excitation par auto-alimentation avec compoundage alternatif parallèle

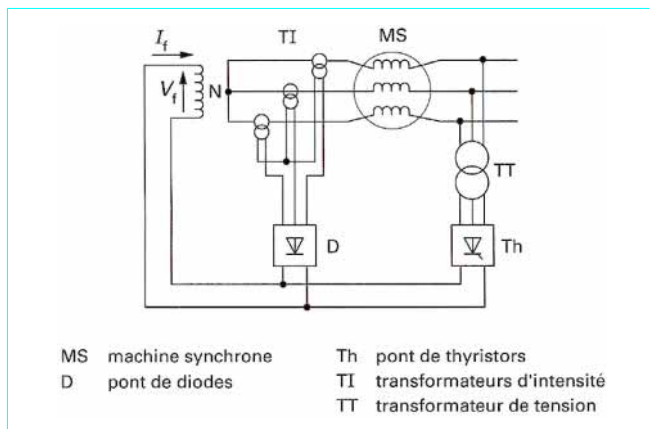


Figure 12 – Principe de l'excitation par auto-alimentation avec compoundage continu parallèle

2.5 Alimentation par alternateur à aimants permanents

Un alternateur dont l'inducteur est constitué d'aimants permanents, généralement monté en bout d'arbre de la machine synchrone, permet d'alimenter un pont de thyristors qui fournit la tension d'excitation à une excitatrice à courant continu ou un alternateur-excitateur. Cet alternateur constitue une source réellement indépendante des autres circuits électriques du site. Ceci permet de fournir une puissance d'excitation même en cas de court-circuit triphasé aux bornes de la machine synchrone et de maintenir un courant de court-circuit nécessaire au fonctionnement de certaines protections.

Pour des raisons technologiques et économiques, cette solution ne peut s'appliquer à l'excitation directe d'une machine synchrone que dans le cas de faibles puissances (quelques dizaines de kW).

3. Détermination des systèmes compound

3.1 Compoundage série

Le compoundage série nécessite que les enroulements secondaires ou tertiaires des transformateurs d'intensité soient parcourus par un courant proportionnel au courant d'excitation et non pas à leur courant primaire. Cela implique qu'ils aient un courant magnétisant non négligeable, dont l'importance conditionne d'ailleurs le taux de compoundage. Pour obtenir ce résultat, leur circuit magnétique comporte un entrefer (§ 2.4.2).

3.1.1 Mise en série des circuits alternatifs

Ce cas correspond au schéma de la figure 10. Nous allons établir la loi de compoundage à partir du schéma monophasé équivalent de l'équipement en ne considérant que le premier harmonique des grandeurs alternatives, ce qui permet de raisonner en nombres complexes.

Le schéma monophasé équivalent comporte (figure 13) :

- la *machine synchrone principale* avec sa tension \underline{V}_G et son courant \underline{I}_G ;
- le *transformateur d'intensité* dont le schéma équivalent avec fuites totales ramenées au primaire comporte :
 - un transformateur parfait de rapport $-L_{2I}/M_I$ (différant quelque peu du rapport du nombre des spires à cause de l'entrefer),
 - une inductance de magnétisation L_{2I} au secondaire,
 - une inductance de fuites totales N_{1I} au primaire, définie par :

$$N_{1I} = L_{1I} - (M_I^2/L_{2I})$$

L_{1I} étant l'inductance propre du primaire ;

- le *transformateur de tension*, dont le schéma équivalent peut être réduit à un transformateur parfait de rapport $-m$ et une inductance de fuites totales ramenée au secondaire N_{2T} .

Appelons \underline{I}_s le courant secondaire commun aux deux transformateurs et \underline{V}_s la tension aux bornes du pont redresseur ; nous allons d'abord supposer que le pont est constitué de diodes à commutation parfaite. Dans ces conditions \underline{V}_s et \underline{I}_s sont respectivement proportionnels à la tension et au courant d'excitation ; ils sont en phase et leur quotient est une résistance pure R proportionnelle à la résistance du circuit inducteur, le coefficient de proportionnalité dépendant de la nature du pont redresseur.

En considérant les enroulements secondaires des deux transformateurs comme générateurs, et en supposant que la tension au primaire du transformateur de tension peut être considérée comme égale à \underline{V}_G (du fait de la faible puissance du transformateur de tension), on peut écrire :

$$-\underline{V}_I = jL_{2I}\omega\underline{I}_s + jM_I\omega\underline{I}_G \quad (1)$$

$$-\underline{V}_T = m\underline{V}_G + jN_{2T}\omega\underline{I}_s \quad (2)$$

d'où :

$$\underline{V}_s = \underline{V}_I + \underline{V}_T = -m\underline{V}_G - j\omega\underline{I}_s(L_{2I} + N_{2T}) - jM_I\omega\underline{I}_G = R\underline{I}_s \quad (3)$$

d'où l'expression du courant :

$$\underline{I}_s = -\frac{m\underline{V}_G + jM_I\omega\underline{I}_G}{R + j\omega(L_{2I} + N_{2T})} \quad (4)$$

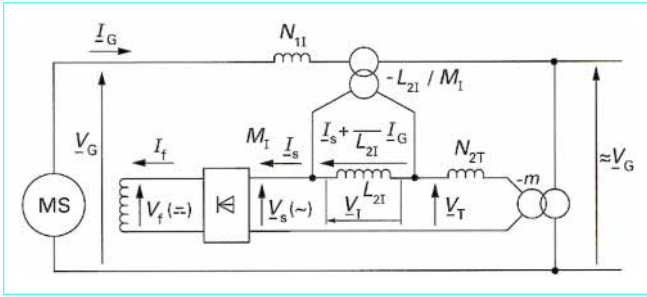


Figure 13 – Schéma monophasé équivalent de l'auto-alimentation avec compoundage alternatif série

Le courant I_s dont le module est proportionnel au courant d'excitation apparaît donc comme une combinaison linéaire des deux nombres complexes V_G et I_G et on constate que le numérateur de l'expression (4) reproduit le principe du diagramme simplifié des machines synchrones conduisant à la détermination du courant d'excitation. En l'absence de saturation de la machine synchrone, on pourrait donc choisir le taux de compoundage conditionné par les paramètres m et M_1 de façon qu'il conduise automatiquement, pour tout régime, à la valeur souhaitée du courant d'excitation. En réalité, à cause de la saturation, cette situation idéale n'est pas atteinte et il faut prévoir un réajustement du courant d'excitation en utilisant non pas un pont de diodes, mais un pont de thyristors ou un pont mixte.

La théorie doit être complétée par les éléments suivants, ce qui ne présente pas de difficulté majeure.

— La prise en compte de la résistance des enroulements des transformateurs peut se faire au niveau des équations (1) et (2).

— Lorsque le pont comporte des thyristors, les grandeurs V_s et I_s présentent un déphasage fonction de l'angle d'allumage, ce qui peut être pris en compte dans l'équation (3) en ajoutant à R un nombre complexe fonction de cet angle.

— La prise en compte de la commutation correspond à une chute de tension continue proportionnelle au courant I_s et dépendant notamment des réactances de fuites des deux transformateurs.

3.1.2 Mise en série des circuits continus

Ce cas correspond au schéma de la figure 9. Les tensions V_T et V_I étant des grandeurs continues, elles s'additionnent algébriquement et non plus vectoriellement comme dans le cas précédent. Le système ne reproduit plus naturellement le diagramme simplifié des machines synchrones. La détermination des caractéristiques des différents éléments, principalement des transformateurs, est basée sur des considérations plus pratiques dans des situations particulières.

La partie compound est constituée des transformateurs, de courant à entrefer TI et du redresseur à diodes D. Son fonctionnement correspond au cas général des redresseurs à diodes.

La figure 14 décrit cette caractéristique pour le redresseur triphasé double alternance exprimée en valeur relative par rapport à la tension redressée à vide V_{max} et au courant de court-circuit I_{cc} . Cette caractéristique est composée de trois parties correspondant à différentes valeurs de l'angle de commutation entre les phases :

- un segment de droite AB de pente $-1/\sqrt{3}$ pour des commutations simples de moins de 60 degrés ;
- un arc de cercle BC de rayon $\sqrt{3}/2$ pour des commutations de plus de 60 degrés débutant sur une polarité avant la fin des commutations sur la polarité opposée ;
- un segment de droite CD de pente $-\sqrt{3}$ pour des commutations de plus de 120 degrés.

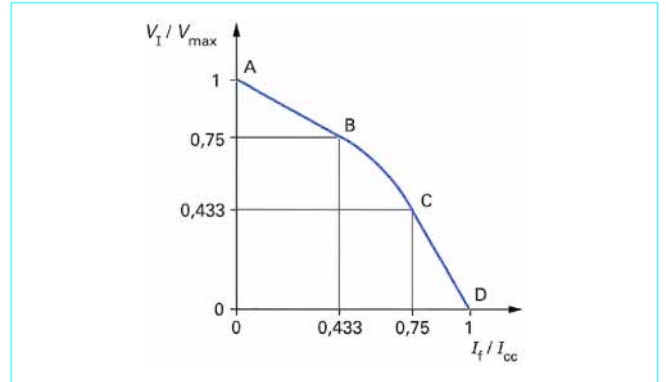


Figure 14 – Caractéristique du pont de diodes triphasé double alternance

En conservant les notations du § 3.1.1, la tension alternative V_I au secondaire du transformateur TI, le redresseur étant à vide, est :

$$V_I = jM_1 \omega I_G$$

et la tension redressée correspondante :

$$V_{max} = 3\sqrt{2}/\pi |V_I| = 3\sqrt{2}/\pi M_1 \omega |I_G|$$

Le courant de court-circuit du transformateur étant :

$$I_s = -M_1 / L_{21} I_G$$

le courant de court-circuit du redresseur est :

$$I_{cc} = \sqrt{2} |I_s| = \sqrt{2} M_1 / L_{21} |I_G|$$

À chaque régime de fonctionnement de la machine synchrone il correspond un courant d'excitation I_f et un courant statorique I_G , d'où une valeur V_{max} et un courant de court-circuit I_{cc} . À partir de I_f / I_{cc} , la caractéristique donne le rapport V_I / V_{max} , d'où la tension redressée V_I .

■ Dimensionnement de la partie courant

Le but d'un système compound est de permettre de fournir la tension d'excitation nécessaire à chaque cas de fonctionnement. En particulier, il est souvent demandé aux systèmes compound d'être capables de maintenir un courant permanent pour un court-circuit triphasé aux bornes de la machine synchrone. Cette condition fixe un minimum de taux de compoundage à assurer. En effet, la participation de la partie tension (Th) est nulle, le redresseur D doit fournir toute la tension d'excitation V_f . D'autre part dans ce cas, la valeur de V_f nécessaire au maintien du courant I_G est proportionnelle à $|I_G|$. La caractéristique en court-circuit de la machine synchrone peut être définie par :

$$I_{fcc} = K_{fcc} |I_G|$$

d'où :

$$V_{fcc} = R_f I_{fcc} = R_f K_{fcc} |I_G|$$

Donc, pour un courant I_G , la tension fournie par le redresseur D débitant le courant I_{fcc} doit être supérieure ou égale à V_{fcc} . Cela constitue une condition nécessaire de dimensionnement de la partie compound. La caractéristique doit être complétée par une autre condition, par exemple usuellement $V_{fcc} / V_{max} = 0,7$ à $0,8$.

■ Dimensionnement de la partie tension

Le système ne reproduisant naturellement pas le diagramme de la machine synchrone et l'action de la partie courant ayant été déterminée, la partie tension doit être dimensionnée pour permettre un fonctionnement stable à tout régime de la machine synchrone. Le problème se pose aux régimes d'absorption de puissance réactive où la partie courant fournit une tension V_1 croissante en fonction de \underline{I}_G , alors que la tension totale nécessaire V_f est décroissante. Cet écart doit être compensé par la partie tension (Th). L'écart pouvant être négatif, le redresseur Th est entièrement contrôlé, c'est-à-dire composé uniquement de thyristors. Pour chaque régime, les tensions V_f et V_1 sont connues, la partie tension doit pouvoir fournir :

$$V_T = V_f - V_1$$

Ce calcul doit être effectué pour la puissance réactive absorbée maximale, à puissance active nulle et maximale. Généralement, ce calcul définit les possibilités que doit avoir Th en onduleur. Par ailleurs, les conditions de surexcitation demandées définissent les possibilités que doit avoir Th en redresseur. La plus contraignante de ces conditions définit enfin la tension secondaire du transformateur de tension TT.

3.2 Compoundage parallèle

La connexion des circuits en parallèle élimine l'égalité des courants traversant les différents circuits. Cela supprime l'obligation de munir le transformateur de courant d'un entrefer, donc une cause de surdimensionnement.

3.2.1 Mise en parallèle des circuits alternatifs

Le compoundage parallèle peut être obtenu à l'aide d'un seul transformateur à trois enroulements, conformément à la figure 11. Le primaire est parcouru par le courant de la machine synchrone ; le secondaire est en dérivation sur la tension de l'alternateur mais par l'intermédiaire d'une inductance série indispensable à l'obtention du compoundage ; le tertiaire débite sur le pont redresseur.

Avec les mêmes hypothèses que dans le cas du compoundage série, on peut dessiner le schéma monophasé équivalent (figure 15) et associer des nombres complexes aux grandeurs alternatives. Nous supposons en outre, dans cette première approche, que le transformateur est parfait, c'est-à-dire que le courant magnétisant est nul et qu'il n'y a pas de fuites magnétiques.

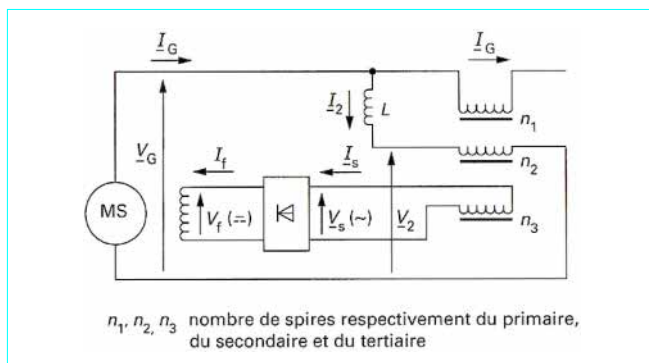


Figure 15 – Schéma monophasé équivalent de l'auto-alimentation avec compoundage alternatif parallèle

Dans ces conditions, et avec les conventions de signes et notations de la figure 15, les équations sont :

$$n_1 \underline{I}_G + n_2 \underline{I}_2 + n_3 \underline{I}_s = 0 \quad (5)$$

$$\underline{V}_G - \underline{V}_2 = j L \omega \underline{I}_2 \quad (6)$$

$$\underline{V}_2 / \underline{V}_s = -n_2 / n_3 \quad (7)$$

$$\underline{V}_s = R \underline{I}_s \quad (8)$$

On en déduit \underline{I}_s en fonction de \underline{V}_G et \underline{I}_G :

$$\underline{I}_s = - \frac{(n_3 n_2) \underline{V}_G + j (n_1 n_3 n_2^2) L \omega \underline{I}_G}{R + j (n_3 / n_2)^2 L \omega} \quad (9)$$

Cette équation est de même forme que l'équation (4), et les mêmes remarques lui sont applicables. Le taux de compoudage est conditionné par le choix de l'inductance L et celui du rapport de transformation n_1/n_2 .

On peut perfectionner le calcul en tenant compte, en plus des éléments déjà mentionnés à propos du compoudage série, du courant magnétisant au niveau de l'équation (5) et des fuites magnétiques au niveau de l'équation (7).

3.2.2 Mise en parallèle des circuits continus

Ce cas correspond au schéma de la figure 12. La tension V_f est commune aux deux redresseurs. Les transformateurs de courant sont sans entrefer, donc le courant débité par D est proportionnel à $|\underline{I}_G|$.

Comme dans le cas de la connexion série côté continu, un objectif important est la capacité de la partie courant à maintenir un courant de court-circuit. La relation :

$$I_{fcc} = K_{fcc} |\underline{I}_G|$$

donne le courant minimum que doit fournir D pour remplir cette condition (compoundage à 100 %).

Le dimensionnement en courant de la partie compound se déduit directement du rapport du transformateur et du courant de la machine synchrone.

Le courant I_T débité par le redresseur Th est la différence entre le courant I_f du régime considéré et le courant I_s fourni par le redresseur D. Le maximum est obtenu pour le régime de fourniture de puissance réactive maximale et à puissance active nulle où le courant stator \underline{I}_G est relativement faible et le courant d'excitation I_f maximal.

Par contre, lorsque le courant I_T devient nul, le redresseur Th ne peut plus contrôler la tension d'excitation V_f , ce qui limite les possibilités de la machine synchrone d'absorber de la puissance réactive. La figure 16 montre cette limitation dans le plan puissance active/puissance réactive pour une machine synchrone. Suivant le diagramme simplifié, avec la réactance synchrone X_d et un compoundage exact de 100 %, la limitation se produit à :

$$Q = -V^2 / (2X_d)$$

alors que la possibilité d'absorption de puissance réactive de la machine synchrone est au moins de :

$$Q = -V^2 / X_d$$

Comme le montre la figure 16, avec un réglage hypercompound de 110 %, la limitation est encore plus restrictive.

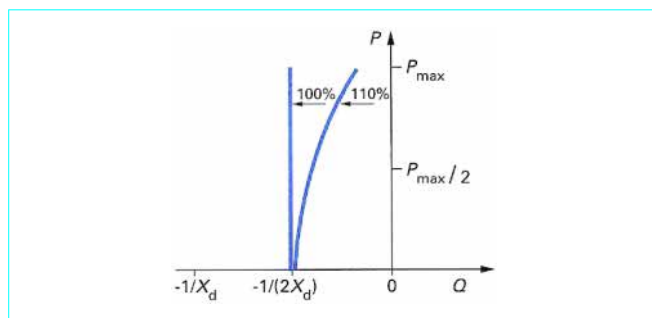


Figure 16 – Limitation d'absorption de puissance réactive par un système compound parallèle continu

4. Modalités de réglage et performances des systèmes d'excitation

4.1 Réglage statique

Dans les paragraphes 2 et 3, les sources possibles d'excitation et leur fonctionnement ont été décrits. Ces sources peuvent être classées en trois catégories :

- les systèmes compound alternatifs qui reproduisent approximativement le diagramme de la machine synchrone et fournissent donc naturellement une tension ou un courant correspondant aux besoins d'excitation ;
- les systèmes où la tension d'excitation est entièrement réglée par la partie dérivation (dérivation pure, compound continu parallèle, source indépendante) ;
- le système compound continu série dont la partie courant réagit soit dans le sens des besoins d'excitation (régimes de fourniture de puissance réactive), soit en sens inverse (régimes d'absorption de puissance réactive). La partie dérivation doit donc tantôt apporter seulement le complément d'excitation, tantôt suivre les variations d'excitation et contrer l'effet négatif de la partie courant. Il suffit que le régulateur de tension comporte une fonction intégrale donnant un gain infini à fréquence nulle pour résoudre aisément ce problème en réglage statique.

4.2 Réglage dynamique

Si, dans la partie statique, la présence d'une excitatrice à courant continu ou d'un excitateur-alternateur n'est pas prise en compte, en dynamique la présence d'une telle machine à flux variable introduit toujours au moins une constante de temps supplémentaire. De plus, l'excitateur-alternateur associé à un pont de diodes limite la tension d'excitation de la machine synchrone aux valeurs positives ou nulle.

■ Système compound alternatif série (figure 10)

La tension de sortie peut être réglée rapidement par le redresseur Th. Les possibilités de surexcitation (*plafond*) sont limitées si le compoundage est choisi suivant la théorie, la source ne fournissant que la tension nécessaire en statique. Par contre, si le compoundage est augmenté, les possibilités de surexcitation augmentent, mais le système ne reproduit plus naturellement les besoins statiques.

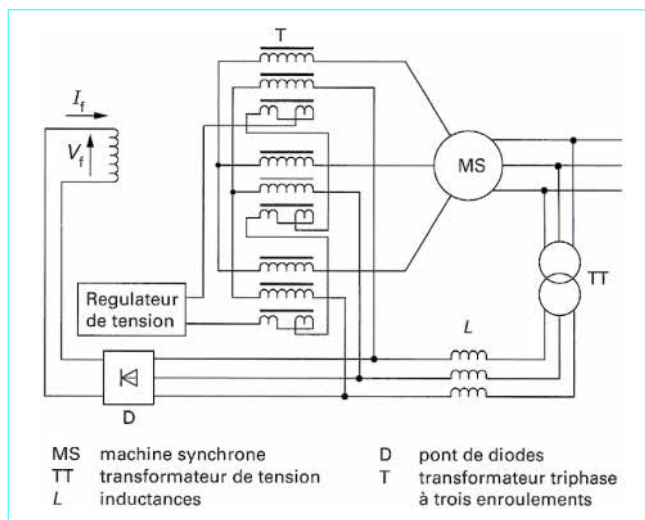


Figure 17 – Principe de l'excitation par auto-alimentation avec compoundage parallèle (mise en parallèle des circuits alternatifs)

■ Système compound alternatif parallèle (figure 11)

Le transformateur de courant T, sans entrefer, constitue une source de courant. Le redresseur de sortie D doit donc être constitué de diodes pour écouler entièrement ce courant. Pour permettre un réglage, le compoundage doit être surabondant (hypercompound).

Le réglage peut être effectué :

- en aval, par une résistance variable contrôlée par le régulateur de tension ;
- en amont, le transformateur T est alors construit comme un amplificateur magnétique (figure 12). Le circuit magnétique de chaque phase est divisé en 2 parties. Un enroulement supplémentaire est parcouru par un courant continu contrôlé par le régulateur de tension de la machine synchrone en sens opposé sur chacun des circuits magnétiques. Les ampères-tours de l'enroulement de contrôle se déduisent des ampères-tours de l'enroulement primaire.

Nota : dans la figure 12, l'addition vectorielle des courants de circuits de dérivation et de compoundage est réalisée directement par la connexion des circuits alternatifs. La théorie est similaire à celle du § 3.

■ Contrôle direct par le régulateur (dérivation pure, compound continu parallèle, source indépendante)

Le contrôle se fait toujours rapidement avec les restrictions évidentes dues à la nature de la source d'alimentation, en particulier en dérivation pure où la tension disponible est faible et à la limite nulle dans les perturbations de type court-circuit. Cette restriction a souvent peu d'importance, la durée des courts-circuits étant limitée par le temps d'action des protections (100 à 200 ms), alors que les constantes de temps transitoires des grosses machines synchrones sont de plusieurs secondes.

■ Système compound continu série (figure 9)

Les variations des tensions sont aussi rapides dans ce système et la tension de plafond disponible est variable suivant le cas de fonctionnement. Les cas demandant une surexcitation importante correspondent généralement aux perturbations de type court-circuit où la machine synchrone fournit du courant réactif. La participation de la partie compound qui pouvait être nuisible en statique redevient alors utile. Le gain dynamique du régulateur est toujours nettement plus important (≥ 30) que celui de la partie série (1 à 5) ; sa commande est donc fortement prédominante.

5. Dimensionnement des systèmes d'excitation à redresseurs

La source de puissance des systèmes d'excitation doit être à même de supporter les contraintes liées au fonctionnement en régulation de tension et aux régimes anormaux que la machine synchrone peut subir. Du fait de leur faible inertie thermique, les redresseurs doivent être prévus en fonction de l'amplitude et de la durée de ces contraintes.

■ En ce qui concerne la **tenue en tension**, le fonctionnement au plafond ne correspond pas à la contrainte la plus sévère. Les principales perturbations donnant lieu à surtension sont :

- le fonctionnement hors synchronisme consécutif à une réduction du courant d'excitation ;
- le faux couplage ;

et, dans le cas d'auto-excitation :

- les surtensions en provenance du réseau ;
- la désexcitation rapide.

Pour l'ensemble de ces perturbations, la surtension maximale est de l'ordre de 5 fois la tension d'excitation nominale en charge, et les redresseurs sont généralement dimensionnés et essayés pour cette valeur. Compte tenu des performances des redresseurs actuellement disponibles, ce résultat peut généralement être atteint avec un seul redresseur en série par bras de pont. Des dispositifs peuvent être prévus pour limiter les surtensions de courte durée.

Une attention particulière doit cependant être apportée aux machines synchrones à rotor feuilleté (notamment les machines à pôles saillants), pour lesquelles le fonctionnement hors synchronisme peut conduire à des surtensions nettement supérieures (plus de 10 fois la tension d'excitation), nécessitant la mise en service automatique d'une résistance de décharge aux bornes de l'inducteur.

■ En ce qui concerne la **tenue en courant**, le défaut le plus sévère est le court-circuit à la sortie du pont redresseur, le courant correspondant pouvant dépasser 5 fois le courant d'excitation nominal.

Une autre cause de surintensité dans les redresseurs est le court-circuit aux bornes de la machine synchrone ou aux bornes à haute tension de son transformateur.

Comme indiqué au début du paragraphe, l'aptitude des redresseurs à supporter une surintensité dépend de la durée d'application.

On peut donner comme ordre de grandeur de l'aptitude requise :

- environ 3 à 4 I_{fn} , pendant 0,2 s ;
- environ 2 à 3 I_{fn} , pendant 1 s ;
- environ 1,2 à 1,6 I_{fn} , en permanence.

Généralement plusieurs redresseurs en parallèle sont nécessaires par bras de pont et, lorsque la fiabilité de l'installation l'exige, on en installe un et quelquefois deux en supplément.

6. Utilisation spécifique des systèmes d'excitation

Il existe des réalisations correspondant à pratiquement tous les systèmes décrits au paragraphe 2. Cependant, les machines à courant continu tendent à être de moins en moins utilisées et les réalisations à thyristors tournants sont encore extrêmement rares. Pour des renseignements plus généraux sur les machines synchrones, le lecteur pourra se reporter aux références [1] [2] [3] [4].

Examinons maintenant, selon les diverses catégories d'utilisation, les dispositifs les plus employés.

■ Pour les **turboalternateurs débitant sur le réseau**, il n'y a pas de préférence marquée entre les alternateurs-exciteurs (le plus souvent à diodes, fixes ou tournants) et l'auto-excitation (plus fréquemment à dérivation pure). Pour les très grosses puissances (supérieures à 500 MVA), on rencontre davantage d'alternateurs-exciteurs.

■ Pour les **alternateurs hydrauliques débitant sur le réseau**, on rencontre le plus souvent l'auto-alimentation à dérivation pure ; lorsque les alternateurs-exciteurs sont utilisés, ils sont le plus souvent à diodes tournants.

■ Pour les **alternateurs débitant sur charge séparée**, la solution la plus fréquente est l'auto-excitation avec compoundage série.

■ Pour les **moteurs synchrones**, on utilise généralement le soutirage en dérivation pure permettant l'excitation pendant la période de démarrage.

Références bibliographiques

- [1] BARRET (P.). – *Régimes transitoires des machines tournantes électriques*. Eyrolles (1987).
- [2] CHATELAIN (J.). – *Machines électriques*. Dunod (1983).
- [3] PARK (R.H.). – *Two reaction theory of synchronous machines*. Harrap (1967).
- [4] CONCORDIA (C.). – *Synchronous machines. Theory and performance*. John Wiley and Sons (1951).