

# LE GENERATEUR SYNCHRON

## 1. Construction du générateur synchrone

Un courant DC appliqué à l'enfillement du rotor produit un champ magnétique dans ce dernier. Lorsque le rotor est en rotation (par effet de vapeur, eau etc.) il produit un champ magnétique tournant. Ce champ magnétique tournant induit un ensemble de voltages triphasés dans l'enfillement du stator du générateur.

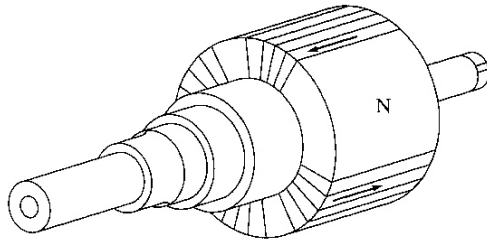
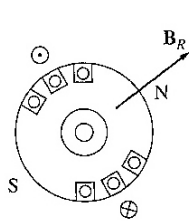
La notion "d'enfillement de champ" s'applique aux enfillements qui produisent le champ magnétique principal dans une machine, et "enfillement d'armature" s'applique aux enfillements où le voltage principal est induit.

Dans le cas des machines synchrones, l'enfillement de champ se situe sur le rotor, et donc le terme "enfillement de rotor" et "enfillement de champ" s'utilisent de façon interchangeable.

Généralement un générateur synchrone doit avoir au moins 2 composantes:

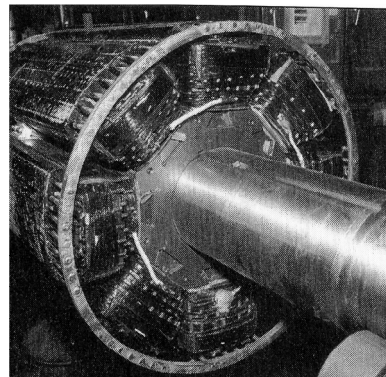
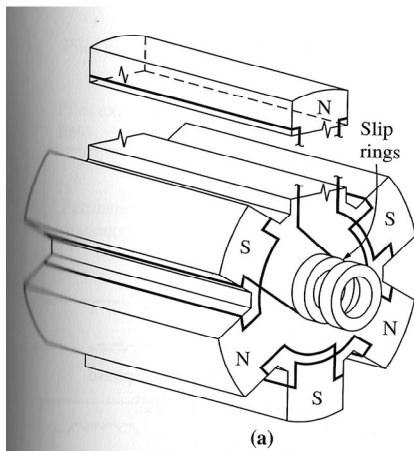
- a) Un enfillement de rotor ou de champ
  - a. A pôle saillant
  - b. A pôle non saillant
- b) Un enfillement de stator ou d'armature

Le rotor d'un générateur synchrone est un large électroaimant dont les pôles peuvent être construits de façon saillant ou pas. Les rotors à pôles non saillants sont normalement utilisés pour des rotors à 2 ou 4 pôles, alors que les rotors à pôles saillants sont utilisés pour des rotors ayant 4 pôles ou plus.



Side View

Rotor non saillant d'une machine synchrone



Rotor saillant

Un courant DC doit être fourni au circuit de champ du rotor. Puisque le rotor tourne, un arrangement spécial est requis pour faire parvenir la puissance DC aux enfillements de champ. L'arrangement commun est:

- Fournir de la puissance DC à partir d'une source DC externe au rotor à l'aide de collecteurs à bague rotatif et de balais (broches).
- Fournir de la puissance DC à partir d'une source DC spéciale montée directement sur l'arbre du générateur synchrone.

Un collecteur à bague rotatif est un anneau métallique conducteur qui encercle complètement l'arbre tout en étant isolé de lui. L'extrémité de l'enfillement du rotor est connectée à chacun des deux collecteurs à bague rotatif sur l'arbre de la machine synchrone, et un balai stationnaire surmonte chacun des deux collecteurs à bague rotatif.

Un "balai" est un bloque fait de carbone et qui ressemble à du graphite, il conduit de l'électricité avec très peu de friction, et n'utilise donc pas le collecteur à bague rotatif. Si la borne positive d'une source de voltage DC est connectée à un balai et que la borne négative connectée à l'autre balai, alors le même voltage DC sera appliqué en tout temps à l'enfillement de champ quelque soit la position angulaire ou la vitesse du rotor.

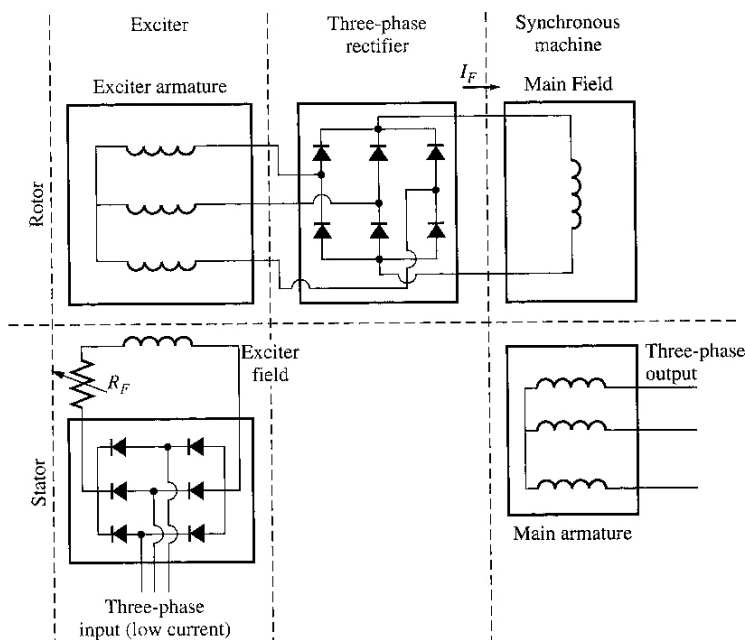
Issues avec les collecteurs à bagues rotatifs et les balais:

- Ils augmentent la maintenance requise de la machine, puisque l'on doit contrôler régulièrement l'usure des balais.
- La chute de tension des balais peut causer une perte importante de puissance dans les machines à hauts courants de champ.

Les petites machines synchrones – utilisent des collecteurs à bague rotatif et des balais.

Les grosses machines – utilisent des stimulateurs sans balai pour fournir le courant de champ DC.

Un stimulateur sans broche est un petit générateur AC dont le circuit de champ est installé sur le stator et le circuit de l'armature est installé sur l'arbre du rotor. La sortie triphasée du générateur stimulateur est redressée, par un circuit redresseur triphasé situé sur l'arbre du générateur, afin de véhiculer le courant et alimenter le circuit principal du champ DC. En contrôlant le faible courant DC du champ du générateur stimulateur (situé sur le stator), on peut ajuster le courant de champ de la machine principale sans collecteur à bague rotatif et balai. Comme aucun contact mécanique ne se produit entre le rotor et le stator, un stimulateur sans broche requiert moins de maintenance.



Le circuit d'un stimulateur sans broche : Un faible courant triphasé est redressé et utilisé pour alimenter le circuit de champ du stimulateur situé sur le stator. La sortie du circuit d'armature du stimulateur (sur le rotor) est alors redressée et utilisé pour alimenter le courant de champ de la machine principale.

On peut utiliser un petit stimulateur pilote pour que la stimulation du générateur soit complètement indépendante de toute source de puissance externe.

Un stimulateur pilote est un petit générateur AC ayant des aimants permanents installés sur l'arbre du rotor et un enfillement triphasé dans le stator. Il produit de la puissance au circuit de champ du stimulateur qui, de son côté, contrôle le courant de champ de la machine principale. Lorsqu'un stimulateur pilote est inclus sur l'arbre du générateur, il s'en suit qu'aucune énergie électrique n'est requise.

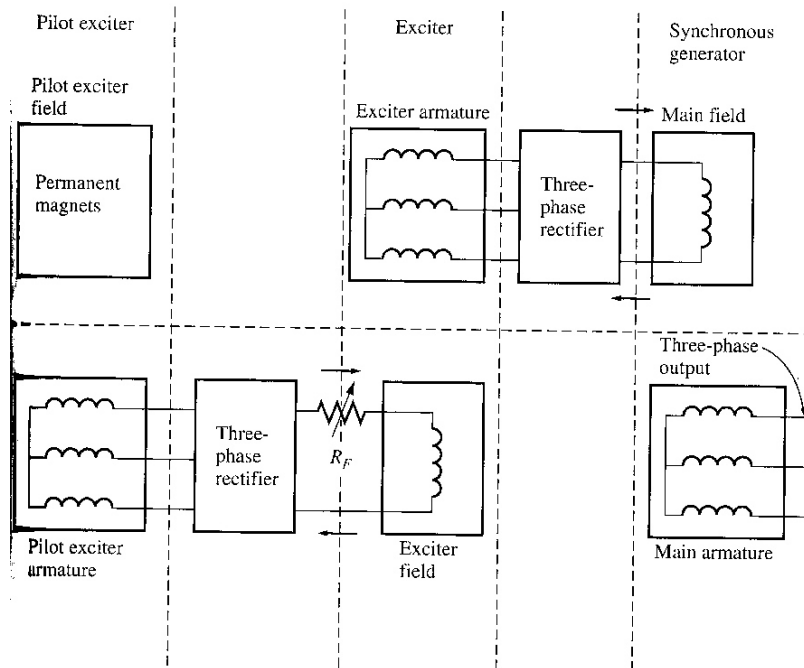


Schéma d'un stimulateur sans broche ayant un stimulateur pilote. Les aimants permanents du pilote produisent le courant de champ du stimulateur qui, de son côté, produit le courant de champ de la machine principale.

Bien que les machines avec des stimulateurs sans broche ne nécessitent pas de collecteur à bague rotatif ni balai, elles en contiennent quand même afin qu'une source DC auxiliaire de courant de champ soit disponible en cas d'urgence.

## 2. Vitesse de rotation d'un générateur synchrone

Les générateurs synchrones sont, par définition, *synchrones* ce qui signifie que la fréquence électrique produite est en phase ou synchronisée avec la vitesse de rotation mécanique du générateur. Le rotor d'un générateur synchrone est constitué d'un électroaimant que l'on alimente directement de courant. Le champ magnétique du rotor pointe dans la direction de rotation de ce dernier. Par conséquent, la vitesse de rotation du champ magnétique dans la machine est liée à la fréquence électrique du stator par la relation suivante

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

### 3. Voltage interne généré d'un générateur synchrone

Le voltage induit est fonction du flux et de la vitesse de rotation, par conséquent, est basé sur ce que l'on a vu jusqu'à présent, le voltage induit est caractérisé par l'expression suivante:

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_c \phi f$$

Par simplicité, on peut l'exprimer comme:

$$E_A = K\phi\omega$$

$$K = \frac{N_c P}{\sqrt{2}} \text{ (if } \omega \text{ in electrical rads/s)} \quad K = \frac{N_c P}{2\sqrt{2}} \text{ (if } \omega \text{ in mechanical rads/s)}$$

### 4. Circuit équivalent d'un générateur synchrone

Le voltage  $E_A$  est le voltage interne généré produit dans une phase du générateur synchrone. Si la machine n'est pas connectée à une charge (pas de circulation de courant d'armature), le voltage du terminal sera équivalent au voltage induit dans les bobines du stator. Cela résulte de l'absence de circulation de courant dans les bobines du stator et donc d'absence de perte. En présence d'une charge connectée au générateur, des différences apparaissent entre  $E_A$  et  $V_\phi$  causées par:

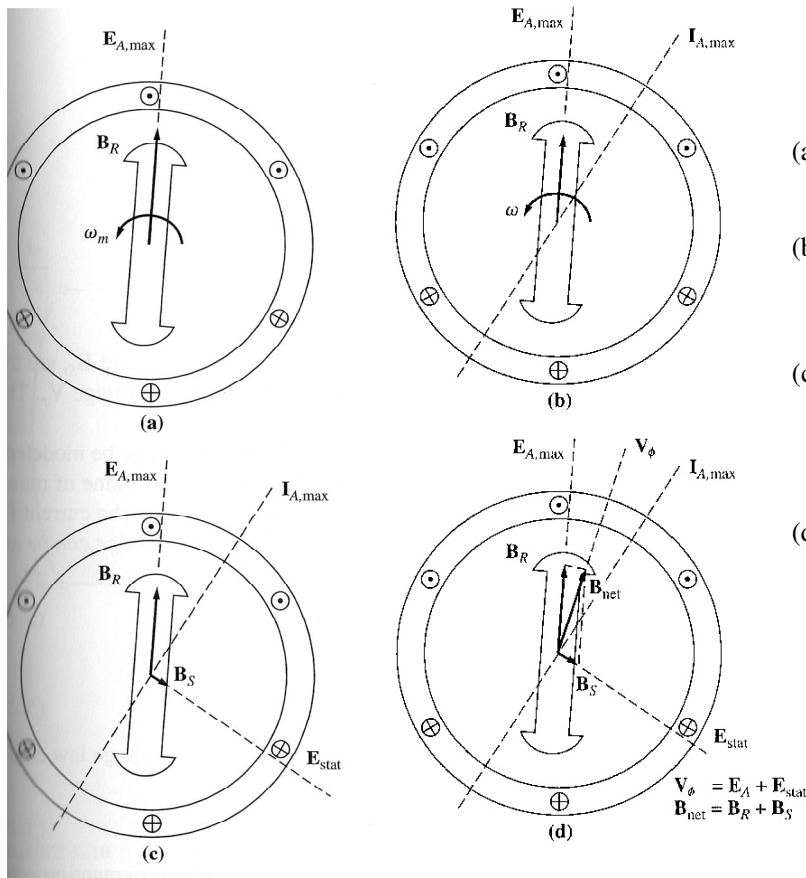
- a) La distorsion du champ magnétique du gap d'air à cause du courant circulant dans le stator appelé **réaction de l'armature**.
- b) La self inductance de la bobine de l'armature.
- c) La résistance des bobines de l'armature.
- d) L'effet de l'allure du rotor à pôle saillant.

Nous allons explorer les facteurs a, b, et c puis en dériver un model de la machine. Le dernier facteur sera ignoré, toutes les machines de ce chapitre sont considérées avoir un rotor non saillant ou cylindrique.

#### ***Réaction de l'armature***

Quand un rotor est en rotation, un voltage  $E_A$  est induit dans l'enfillement du stator. Si une charge est connectée aux bornes du générateur, un courant circule. Sachant que la circulation d'un courant triphasé d'un stator produira un champ magnétique de lui-même, ce dernier engendrera une distorsion du champ magnétique original du rotor modifiant ainsi le voltage de phase résultant. Cet effet est dénommé la réaction d'armature par ce que le courant d'armature (stator) affecte le champ magnétique qui l'a engendré en premier lieu.

Referez vous aux diagrammes ci-dessous qui montrent un rotor à deux pôles en rotation dans un stator triphasé.



- Un champ magnétique tournant produit le voltage interne généré  $E_A$ .
- Le voltage résultant produit une circulation de courant en retard lorsqu'une charge en retard y est connectée.
- Le courant du stator produit son propre champ magnétique  $B_S$  qui a son tour produit son propre  $E_{stat}$  dans l'enfillement du stator.
- Le champ  $B_S$  se superpose à  $B_R$  le distordant en  $B_{net}$ . Le voltage  $E_{stat}$  se superpose à  $E_A$  et produit  $V_\phi$  à la sortie de la phase.

- Il n'y a pas de charge connectée au stator. Le champ magnétique  $B_R$  du rotor produit un voltage interne génère  $E_A$  dont le pic est dans la direction de  $B_R$ . En l'absence de charge, il n'y a pas de courant d'armature et  $E_A$  sera égale au voltage de phase  $V_\phi$ .
- Lorsqu'une charge en retard est connectée, le courant pic se produira à un angle en retard à celui du voltage pic.
- Le courant circulant dans l'enfillement du stator produira de lui-même un champ magnétique. Ce champ magnétique  $B_S$  du stator ainsi que sa direction sont déterminés par la règle de la main droite. Le champ du stator produit son propre voltage  $E_{stat}$ .
- Avec 2 voltages et 2 champs magnétiques présents dans l'enroulement du stator, le voltage total et le champ magnétique net sont:

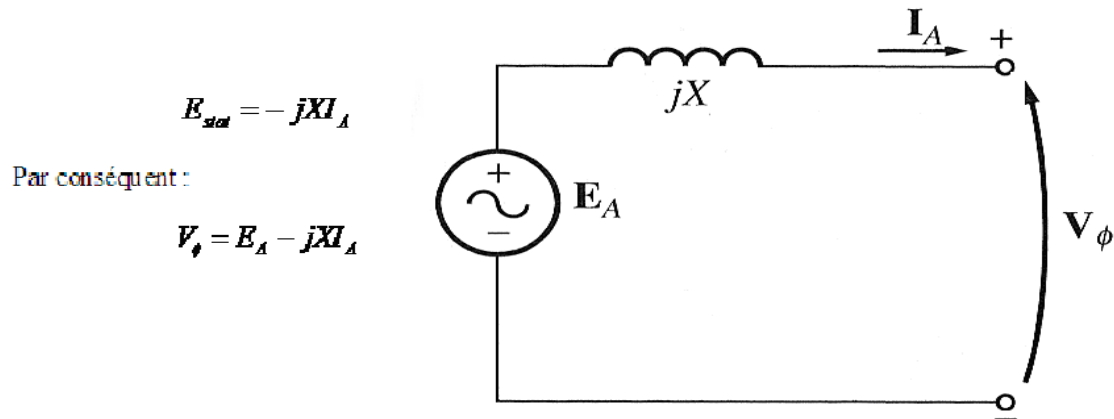
$$V_\phi = E_A + E_{Stat}$$

$$B_{net} = B_R + B_S$$

Comment ces effets de la réaction d'armature du voltage de phase peuvent ils être modélisés?

- Le voltage  $E_{stat}$  est à un angle de  $90^\circ$  derrière le plan de  $I_A$ .
- Le voltage  $E_{stat}$  est directement proportionnel au courant  $I_A$ .

Si  $X$  est une constante de proportionnalité, alors le voltage de la réaction d'armature peut être exprimé de la façon suivante :



Le voltage de la réaction d'armature peut donc être modélisé comme une inductance en série avec le voltage interne généré.

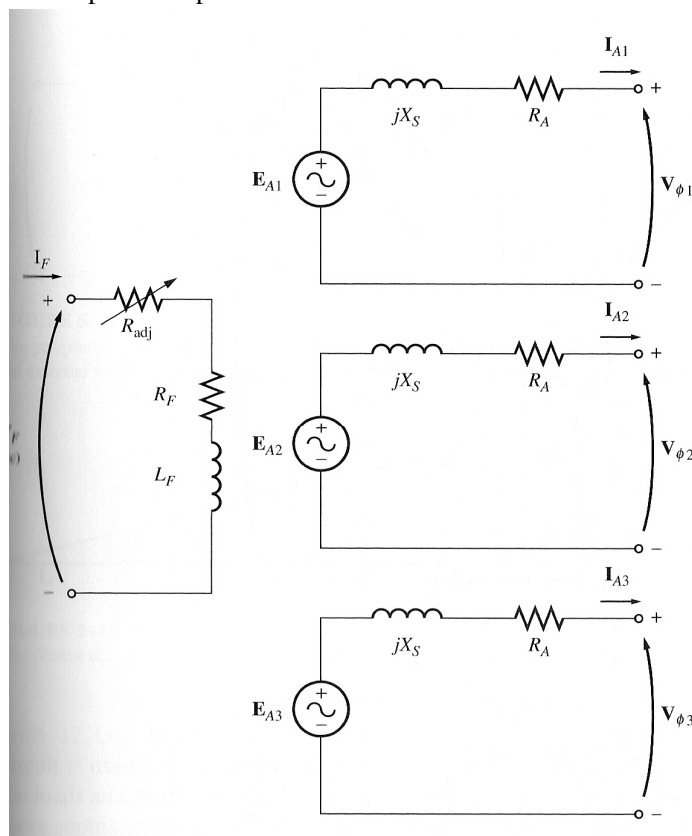
### Self-inductance et résistance des bobines de l'armature

Si la self-inductance du stator est dénommée  $L_A$  (la réactance est  $X_A$ ) et que la résistance du stator est appelée  $R_A$ , alors la différence totale entre  $E_A$  et  $V_\phi$  est:

$$\begin{aligned} V_\phi &= E_A - jXI_A - jX_A I_A - R_A I_A \\ &= E_A - jX_s I_A - R_A I_A \end{aligned}$$

Où  $X_s = X + X_A$

Le circuit équivalent complet est représenté ci-dessous :



Une source d'alimentation DC nourrit le circuit de champ du rotor, qui est modélisé par l'inductance des bobines et la résistance en série. Il y a, en série avec  $R_F$ , une résistance ajustable  $R_{adj}$  qui contrôle la circulation du courant de champ. Le reste du circuit équivalent consiste des modèles de chacune des phases. Chacune d'elles a un voltage interne généré avec une inductance en série  $X_S$  (consistant de la somme de la réactance de l'armature et de la self-inductance de la bobine) et une résistance en série  $R_A$ .

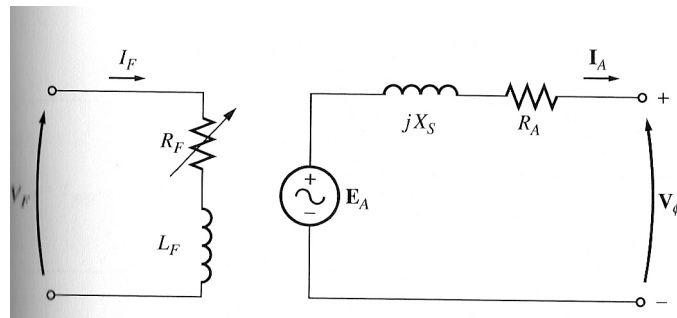
Si les 3 phases sont connectées en Y ou  $\Delta$ , le voltage terminal peut s'exprimer comme:

$$V_T = \sqrt{3}V_\phi \quad (\text{for } Y \text{ connection})$$

$$V_T = V_\phi \quad (\text{for } \Delta \text{ connection})$$

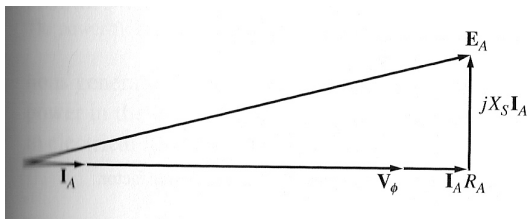
Idéalement, le voltage du terminal des 3 phases doit être identique puisqu'on assume que la charge connectée est balancée. Si ce n'est pas le cas, une technique plus approfondie est requise.

#### Circuit équivalent par phase:

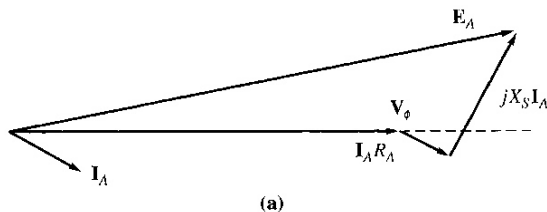


#### 5. Diagrammes de phase d'un générateur synchrone

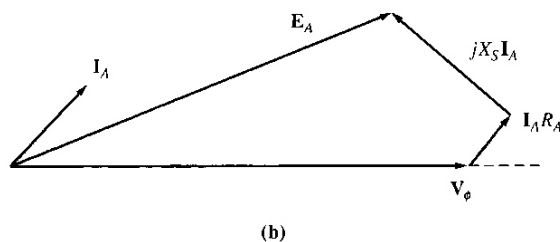
Les diagrammes de phases sont représentés ci-dessous:



Facteur unitaire de puissance en phase



Facteur de puissance en retard



Facteur de puissance en avance

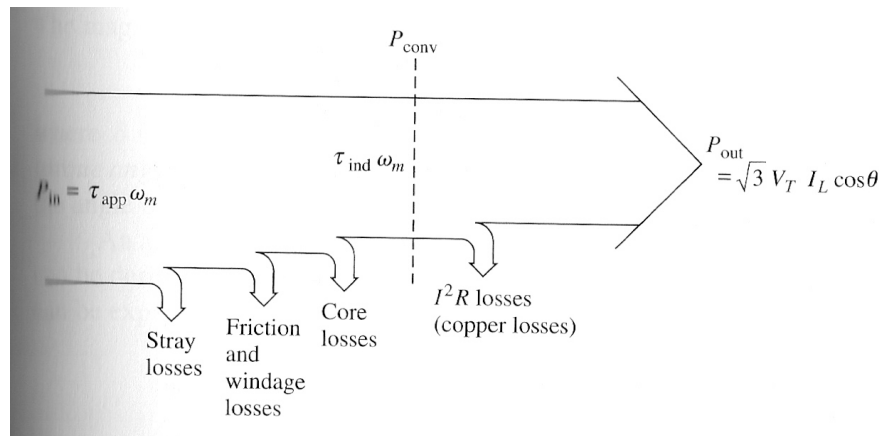
Pour un voltage de phase et un courant d'armature donnés, un plus grand voltage interne  $E_A$  est nécessaire pour des charges en retards que pour celles en avances. Par conséquent, un plus grand courant de champ est nécessaire pour le même voltage du terminal par ce que  $E_A = k\phi\omega$  et que  $\omega$  doit être gardé constant pour maintenir une fréquence constante.

Alternativement, pour un courant de champ et une amplitude de courant de charge donnés, le voltage du terminal est plus petit pour des charges en retards et plus grande pour des charges en avances.

## 6. Puissance et torque d'un générateur synchrone

Un générateur convertit de l'énergie mécanique en énergie électrique, par conséquent la puissance d'entrée sera principalement un engin mécanique de mouvement, ex. moteur diesel, turbine à vapeur, turbine à eau, etc... Dans tous les cas, la vélocité du rotor doit rester constante pour maintenir une fréquence de système stable.

Le diagramme de distribution de puissance d'un générateur synchrone est:



**Entrée:**  $P_{in} = \tau_{app} \omega_m$

**Pertes:** Pertes dues au câblage, pertes dues à la friction et à l'enfilement, perte due au noyau

**Puissance convertie:**  $P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m = 3E_A I_A \cos \gamma$

Où  $\gamma$  est l'angle entre  $E_A$  et  $I_A$ .

**Pertes:** Pertes dues au cuivre

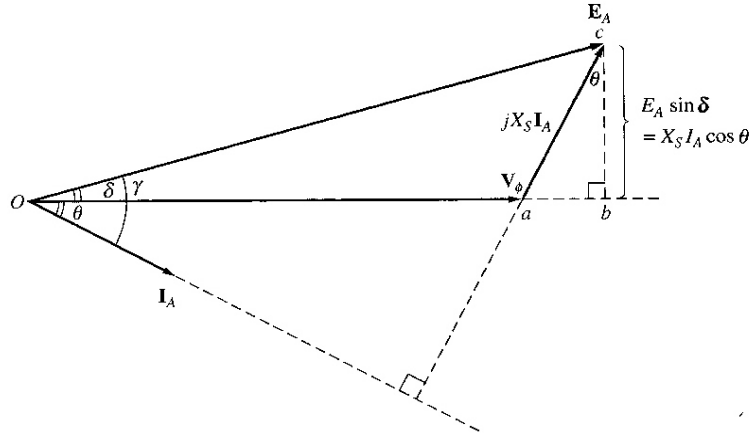
**Sortie:**

$$P_{out} = \sqrt{3} V_T I_L \cos \theta \quad \text{or} \quad P_{out} = 3V_{\phi} I_A \cos \theta$$

$$Q_{out} = \sqrt{3} V_T I_L \sin \theta \quad \text{or} \quad Q_{out} = 3V_{\phi} I_A \sin \theta$$



On peut simplifier le diagramme de phases en considérant que la résistance de l'armature  $R_A$  est négligeable et en assumant que la charge connectée est en retard par défaut.



A partir du diagramme simplifié on a :

$$I_A \cos \theta = \frac{E_A \sin \delta}{X_s}$$

D'où l'on tire une nouvelle expression de la puissance de sortie (avec  $R_A \sim 0$ ) :

$$P = \frac{3V_\phi E_A \sin \delta}{X_s}$$

On peut voir, à partir de cette équation, que la puissance est fonction de::

- L'angle  $\delta$  entre  $V_\phi$  et  $E_A$ .
- $\delta$  est défini comme l'angle de torque de la machine.
- Le torque maximum peut être dérivé quand  $\sin \delta = 1$  qui fournit la puissance maximum (aussi connue comme la limite de stabilité statique) comme suit :

$$P_{\max} = \frac{3V_\phi E_A}{X_s}$$

L'équation de base du torque est donc:

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_s = k B_R \times B_{net} = k B_R B_{net} \sin \delta$$

Une expression alternative peut être dérivée à partir de l'expression de la puissance sachant que  $P_{out} = P_{conv}$  lorsque  $R_A$  est assumée égale à zéro. Comme  $P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m$ , le voltage induit est:

$$\tau_{ind} = \frac{3V_\phi E_A \sin \delta}{\omega_m X_s}$$

## 7. Mesures des paramètres du model du générateur synchrone

Il y a 3 types de relation de base qui doivent être connues dans un générateur synchrone:

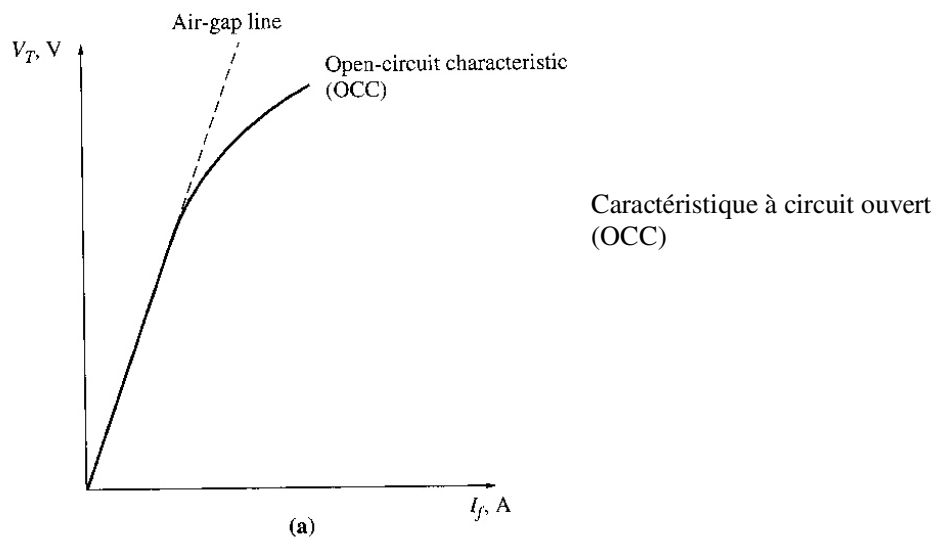
- La relation entre le courant de champ et le flux (et donc entre le courant de champ et  $E_A$ )
- La réactance synchrone
- La résistance de l'armature

### Test à circuit ouvert

Etapes:

- On tourne le générateur à la vitesse désirée.
- Aucune charge n'est connectée aux terminaux.
- Le courant de champ passe de 0 à sa valeur maximum.
- On enregistre les valeurs du voltage au terminal et celle du courant de champ.

Avec les terminaux ouverts (CO),  $I_A=0$ , et  $E_A = V_\phi$ . Il est donc possible de construire un graphe de la caractéristique à circuit ouvert (OCC)  $E_A$  ou  $V_T$  versus  $I_F$  du générateur. A partir de cette caractéristique, il est possible de dériver le voltage interne généré du générateur pour n'importe quel courant de champ.



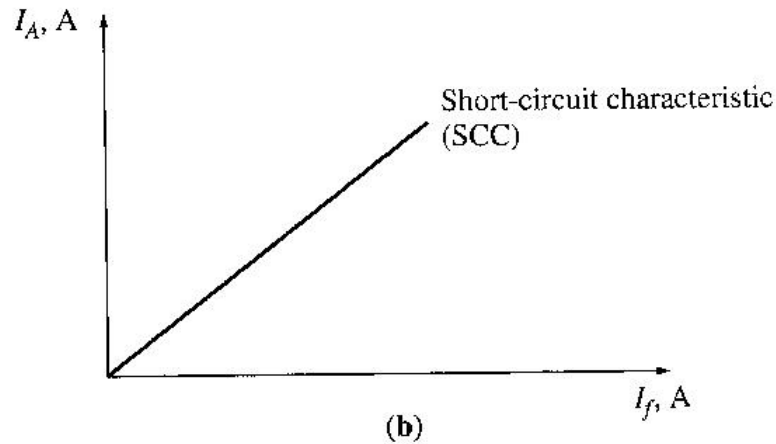
On constate qu'au début, la courbe est parfaitement linéaire, puis une saturation apparaît aux hauts courants de champ. La partie métallique non saturée du châssis de la machine synchrone a une réluctance plusieurs fois plus petite que celle du gap d'air, donc au départ la FMM aux bornes du gap d'air et du flux résultant est linéaire. Lorsque le métal finalement sature, sa réluctance augmente dramatiquement, et le flux augmente beaucoup plus lentement lors d'une augmentation de la FMM. La portion linéaire de l'OCC est connue sous l'appellation de la caractéristique du gap d'air.

### Test à court circuit test

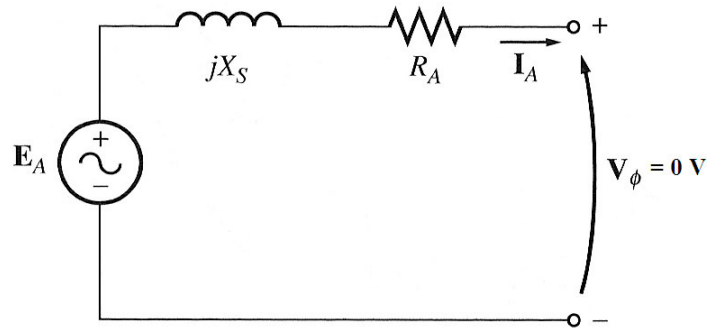
Etapes:

- On tourne le générateur à la vitesse désirée.
- On ajuste le courant de champ à 0.
- Les terminaux sont court circuités.
- On mesure le courant d'armature, ou courant de ligne, en augmentant le courant de champ.

Remarque: Durant l'analyse en court circuit, le champ magnétique net est très petit, par conséquent le noyau n'est pas saturé ce qui explique pourquoi la relation est linéaire.



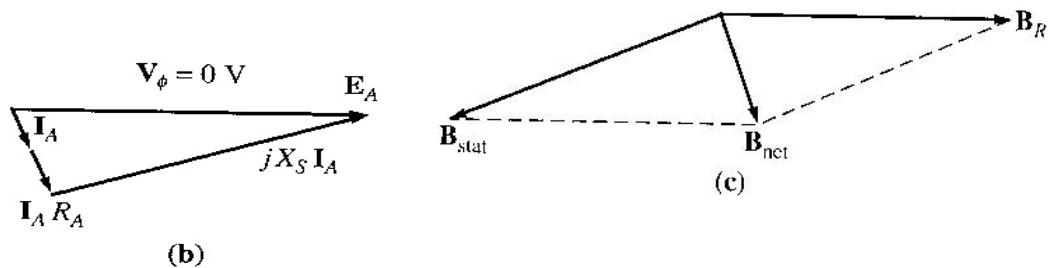
La caractéristique à court circuit (SCC) est essentiellement une ligne droite. Ce qui peut être expliqué à travers le circuit équivalent qui suit où les bornes sont en court circuits.



Avec les terminaux en court circuits, le courant d'armature est : 
$$I_A = \frac{E_A}{R_A + jX_S}$$

Et son amplitude est : 
$$I_A = \frac{E_A}{\sqrt{R_A^2 + X_S^2}}$$

Le diagramme de phase résultant ainsi que les champs magnétiques correspondants sont représentés ci-dessous:



Puisque  $B_S$  annule presque  $B_R$ , le champ magnétique net  $B_{net}$  est donc très petit (équivalent à celui d'une résistance interne et la chute d'une inductance). Du fait de ce si petit champ magnétique, la machine n'est pas saturée et le SCC est linéaire.

A partir de ces deux tests, on peut trouver l'impédance interne de la machine ( $E_A$  à partir de OCC,  $I_A$  de SCC):

$$Z_s = \sqrt{R_A^2 + X_s^2} = \frac{E_A}{I_A}$$

Puisque  $X_s \gg R_A$ , l'équation se simplifie à:

$$X_s \approx \frac{E_A}{I_A} = \frac{V_{\phi oc}}{I_A}$$

Par conséquent il est possible d'obtenir la réactance synchrone.

A cet effet on utilise une méthode approximative pour déterminer la réactance synchrone  $X_s$  pour un courant de champ donné:

1. On détermine le voltage interne généré  $E_A$  à partir de l'OCC à ce courant de champ.
2. On détermine le courant de court circuit  $I_{A,SC}$  à ce courant de champ à partir du SCC.
3. on obtient  $X_s$  en appliquant l'équation du dessus.

#### **Problème engendré par cette méthode:**

$E_A$  est obtenu à partir de OCC où le noyau est *partiellement saturé* aux hauts courants de champ,  $I_A$  est obtenu à partir de SCC où le noyau *n'est pas saturé* quelque soit le niveau de courant de champ. Par conséquent la valeur de  $E_A$  obtenue durant OCC peut ne pas être la même la valeur durant le test de SCC. Donc la valeur de  $X_s$  est uniquement une approximation.

Pour obtenir une meilleure précision, le test doit se faire aux bas courants de champ dans la région linéaire du test OCC.

L'élément résistif de la machine est obtenu en appliquant un voltage DC aux bornes de cette dernière et en maintenant le rotor immobile. La valeur obtenue ainsi ( $R_A$ ) peut augmenter la précision de  $X_s$ .

#### **Rapport de court circuit**

Définition:

Le rapport du courant de champ requis pour la tension nominale en circuit ouvert sur le courant de champ requis pour le courant d'armature nominale en court circuit.

### **8. Le générateur synchrone opérant seul**

Le comportement du générateur synchrone avec une charge varie considérablement en fonction du facteur de puissance de la charge et dépendamment s'il opère seul ou en parallèle avec d'autres générateurs synchrones. Dans la discussion qui suit, nous omettrons  $R_A$  et assumeront que le flux du rotor est constant à moins qu'il soit mentionné que le courant de champ est changé. De plus, on assumera que la vitesse du générateur est constante, et que toutes les caractéristiques des terminaux sont dérivées en assumant une vitesse constante.

## L'Effet de charge change dans un générateur synchrone opérant seul

On assume que le générateur est connecté à une charge.

### **Augmentation de la charge:**

Cela correspond à une augmentation de la puissance réelle et réactive puisée du générateur. Une telle augmentation de la charge augmentera le courant de charge puisé du générateur.

### **Assomptions:**

- La résistance de champ n'a pas été changée, le courant de champ est maintenu constant, donc le flux est constant.
- La vitesse du rotor du générateur est maintenue constante.
- Par conséquent  $E_A$  est constant.

Si  $E_A$  est constant, qu'est-ce qu'un changement de charge fera varier?

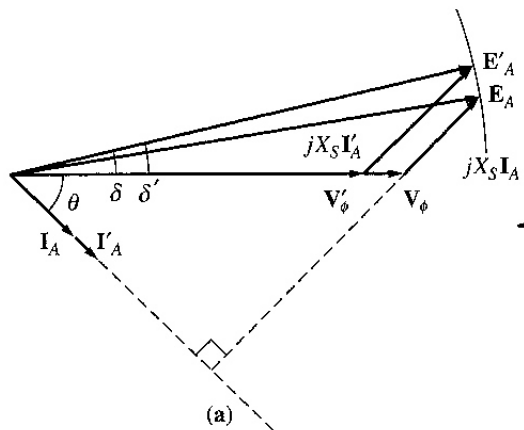
### **Charge initialement en retard:**

- La charge augmente avec le facteur de puissance en retard maintenu.
- L'amplitude de  $I_A$  augmentera mais maintiendra le même angle par rapport à  $V_\phi$ . (parce que le facteur de puissance maintient un retard)
- $X_S I_A$  augmentera aussi et gardera le même angle. Puisque

$$E_A = V_\phi + jX_S I_A$$

$j X_S I_A$  doit coulisser entre  $V_\phi$ , à un angle de  $0^\circ$ , et  $E_A$  tout en gardant la même amplitude qu'avant que la charge n'augmente.

- On remarque que  $E_A$  doit rester constant (assomption établie plus haut)
- Donc le seul élément qui change, pour compenser, doit être  $V_\phi$ . Ce changement peut être visualisé dans le diagramme de phases.



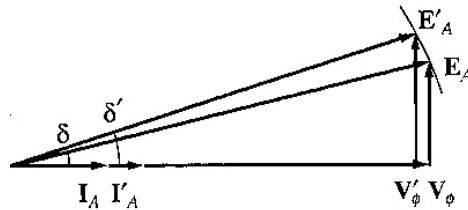
Effet d'augmentation de charge du générateur à un facteur de puissance constant sur le voltage du terminal – facteur de puissance en retard.

### Charge initialement unitaire:

- La charge augmente avec le facteur de puissance unitaire maintenu.
- L'amplitude de  $I_A$  augmentera mais maintiendra le même angle par rapport à  $V_\phi$ . (parce que le facteur de puissance unitaire est maintenu)
- $X_S I_A$  augmentera aussi et gardera le même angle. Puisque

$$E_A = V_\phi + jX_S I_A$$

- On remarque que  $E_A$  doit rester constant (assumption établie plus haut)
- Donc le seul élément qui change, pour compenser, doit être  $V_\phi$ . Ce changement peut être visualisé dans le diagramme de phases.



(b)

Effet d'augmentation de charge du générateur à un facteur de puissance constant sur le voltage du terminal – facteur de puissance unitaire

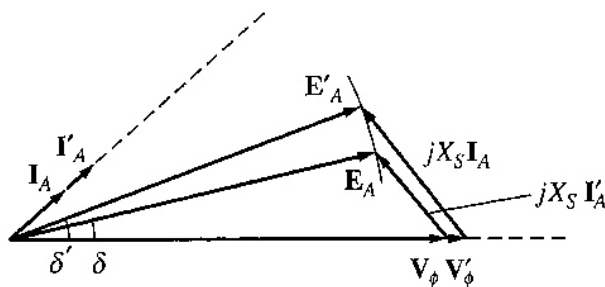
- Les variations de  $V_\phi$  diminuent et sont moins significatif que lorsque la charge est en retard.

### Charge initialement en avance:

- La charge augmente avec une facteur de puissance en avance maintenu.
- L'amplitude de  $I_A$  augmentera mais maintiendra le même angle par rapport à  $V_\phi$ . (parce que le facteur de puissance unitaire maintenu)
- $X_S I_A$  augmentera aussi est gardera le même angle. Puisque :

$$E_A = V_\phi + jX_S I_A$$

- On remarque que  $E_A$  doit rester constant (assumption établie plus haut)
- Donc le seul élément qui change, pour compenser, doit être  $V_\phi$ . Ce changement peut être visualisé dans le diagramme de phases.



(c)

Effet d'augmentation de charge du générateur à un facteur de puissance constant sur le voltage du terminal – facteur de puissance en avance

Une explication alternative via la **formule du voltage de régulation**.

- Dans le cas de charge en retard, VR sera très positif.
- Dans le cas de charge en avance, VR sera très négatif.
- Dans le cas de charge unitaire, VR sera positif.

Cependant, en pratique il est plus avantageux de garder le **voltage de sortie d'un générateur constant**, et donc de **Controler  $E_A$  en contrôlant le courant de champ  $I_F$** . Varier  $I_F$  aura pour effet de varier le flux dans le noyau qui à son tour variera  $E_A$  en accordance (référence à OCC).

## 9. Opération en parallèle de générateurs AC

Besoin d'opération en parallèle:

- a) Pour supporter de large charges.
- b) La maintenance peut être effectuée sans interruption de puissance.
- c) Augmentation de la fiabilité du système.
- d) Augmentation de l'efficacité.

### Conditions requises pour le parallélisme

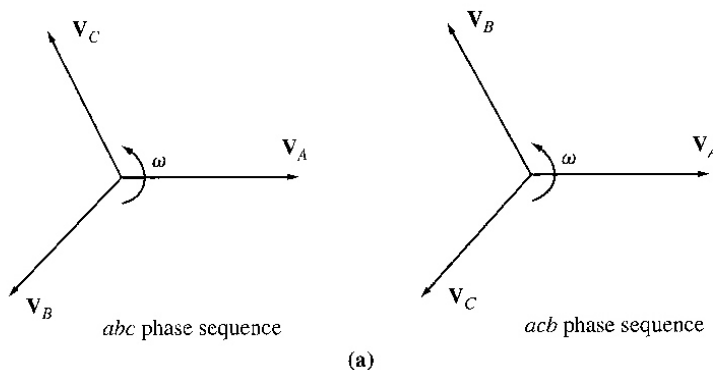
la figure qui suit montre un générateur synchrone G1 qui fournit de la puissance à une charge, et un générateur G2 en processus d'être mis en parallèle avec G1 en fermant le commutateur S1. Quelles conditions doivent être réunies avant que le commutateur puisse être fermé et que le générateur 2 soit connecté?

La fermeture aléatoire, à n'importe quel moment, du commutateur peut endommager sévèrement les générateurs et la charge peut perdre de la puissance.

Si les voltages ne sont pas exactement les mêmes dans chacun des conducteurs connectés ensemble, il s'en suit une circulation d'un courant très large lorsque le commutateur est fermé. Pour éviter ce problème chacune des trois phases doit avoir exactement la même amplitude de voltage ainsi que le même angle de phase que le conducteur auquel elle est connectée.

Donc, le parallélisme de 2 ou plusieurs générateurs doit être réalisé avec beaucoup d'attention afin d'éviter de les endommager. Les conditions à suivre sont les suivantes:

- a) Les voltages RMS des lignes doivent être égaux.
- b) Les générateurs à utiliser en parallèles doivent avoir la même séquence d'angles de phase. Si ce n'est pas le cas (voir schéma), alors bien qu'une paire d'angles de voltages (la phase  $a$ ) soit en phase, les 2 autres paires de voltages sont en déphasage de  $120^\circ$ . Si les générateurs étaient connectés ainsi, il n'y aurait pas de problème avec la phase  $a$ , mais de très larges courants circuleraient dans les phases  $b$  et  $c$ , endommageant toutes les machines.

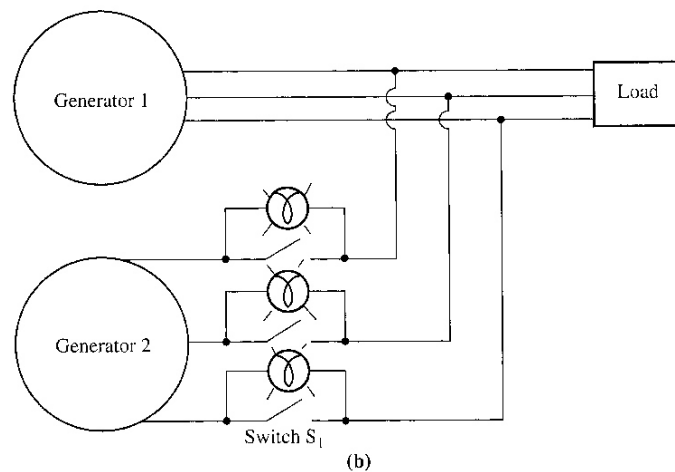


- c) Les angles de phase de sortie doivent être les mêmes.

- d) Le **générateur se connectant** (le nouveau générateur) doit avoir une fréquence d'opération légèrement plus grande que celle du système afin que les angles de phase du nouveau générateur se synchronisent progressivement avec ceux du système en marche.

### Procédure générale de mise en parallèle de générateurs

Assumons que le générateur G2 doit se connecter à un système de machines en marche, comme il est illustré ci-dessous:



1. On ajuste, à l'aide de voltmètres, le **courant de champ** du nouveau générateur jusqu'à ce que son **voltage au terminal soit égale à celui du de la ligne** du système en marche.
2. On vérifie que la **séquence de phases** soit identique à celle du système en marche. On procède de la façon suivante:
  - i. On connecte, tour à tour, une petite inductance aux terminaux de chacun des 2 générateurs. Si le moteur tourne à chaque fois dans la même direction, alors la séquence de phases est la même pour les 2 générateurs. Si le moteur tourne dans des directions opposées, alors la séquence de phases est différente et 2 des conducteurs du nouveau générateur doivent être inversés.
  - ii. Alternativement, on peut utiliser la méthode des 3 ampoules qui consiste à les répartir parmi les bornes ouvertes des commutateurs connectant le générateur au système (voir figure ci-dessus). Au fur et à mesure que la phase change entre les 2 systèmes, la lumière des ampoules s'illuminent fortement (pour de grandes différences de phase) puis diminuent d'intensité (pour de petites différences de phase). Si les 3 ampoules s'illuminent et faiblissent en même temps, alors les systèmes ont la même séquence de phases. Si les ampoules s'illuminent en succession, alors les systèmes ont une séquence de phases opposé et une des séquences doit être inversée.
  - iii. On utilise un synchroscope – un appareil qui mesure la différence d'angle de phase (pas la séquence de phase).
3. On vérifie que la **fréquence du générateur** soit légèrement plus haute que celle du système. Cela est réalisé en observant le rapprochement des fréquences et le changement de phase entre les systèmes.
4. Une fois les fréquences presque égales, la phase du voltage des 2 systèmes changera lentement par rapport à chacune d'entre elles. Les changements de phases sont observés et une fois qu'elles sont égales, le commutateur connectant les 2 systèmes est fermé.



### Caractéristiques de la puissance versus fréquence et de la puissance réactive versus fréquence du générateur synchrone

Tous les générateurs sont entraînés par un instigateur/stimulateur principal qui est la source de la puissance mécanique du générateur. Ces sources tendent à se comporter de la même façon – l'augmentation de la quantité de puissance puisée d'elles cause une diminution de leur vitesse de rotation. Cette diminution est généralement non linéaire, mais une forme de mécanisme de gouvernance est généralement incluse pour que la diminution en question se fasse linéairement avec l'augmentation de demande de puissance.

Quelque soit le type de mécanisme de gouvernance présent sur l'instigateur principal, il sera toujours ajusté de façon à ce qu'il présente une légère diminution de caractéristique lorsque la charge augmente. La diminution de vitesse (SD) de l'instigateur principal est défini par:

$$SD = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100\%$$

Où  $n_{nl}$  est la vitesse de l'instigateur principal à vide (sans charge) alors que  $n_{fl}$  et celle à pleine charge.

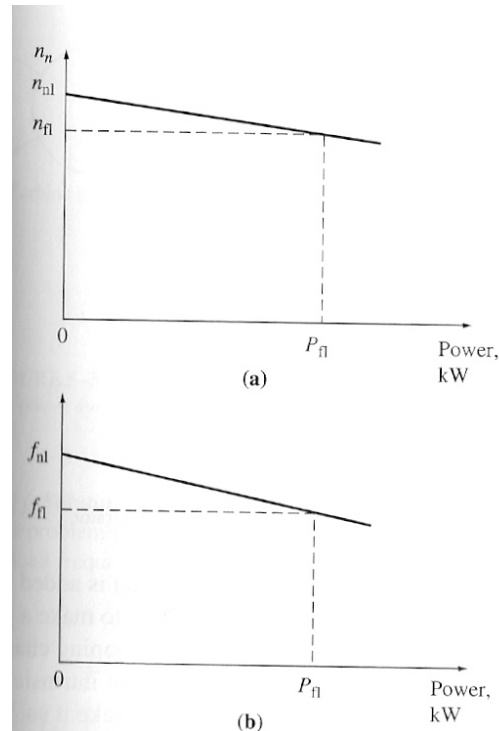
Les valeurs typiques de SD sont de 2% – 4%. La plus part des gouvernances ont un mécanisme d'ajustement qui permet à la vitesse à vide de la turbine de varier. Un plot d'une vitesse typique fonction de la puissance est illustré ci-dessous.

Comme la vitesse mécanique est reliée à la fréquence électrique et que cette dernière est reliée à la puissance de sortie, alors nous avons:

$$P = s_p (f_{nl} - f_{sys})$$

Où  
P = puissance de sortie  
 $f_{nl}$  = fréquence du générateur à vide (sans charge)  
 $f_{sys}$  = fréquence opérationnelle du système  
 $s_p$  = pente de la courbe en kW/Hz ou MW/Hz

La relation entre la puissance de sortie et le voltage au terminal produit la même allure de courbe que celle affichée par celle de la fréquence-puissance.



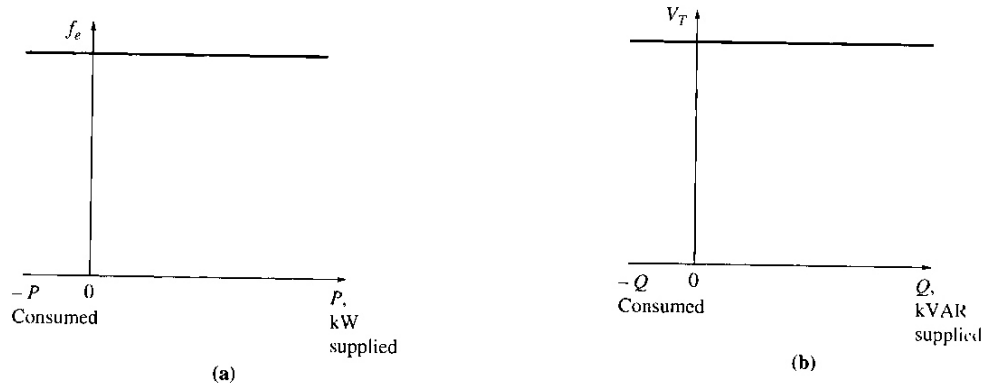
En conclusion, pour un générateur **singulier**:

- a) Pour n'importe quel niveau de puissance réelle, le calibrage de gouvernance contrôle la fréquence opérationnelle du générateur
- b) Pour n'importe quel niveau de puissance réactive, le courant de champ contrôle le voltage du terminal du générateur.
- c) La puissance réactive et réelle fournie est la quantité demandée par la charge connectée au générateur – P et Q fournie ne peut pas être contrôlée par le réglage du générateur.

### Opération de générateurs en parallèles avec des systèmes à grande puissance

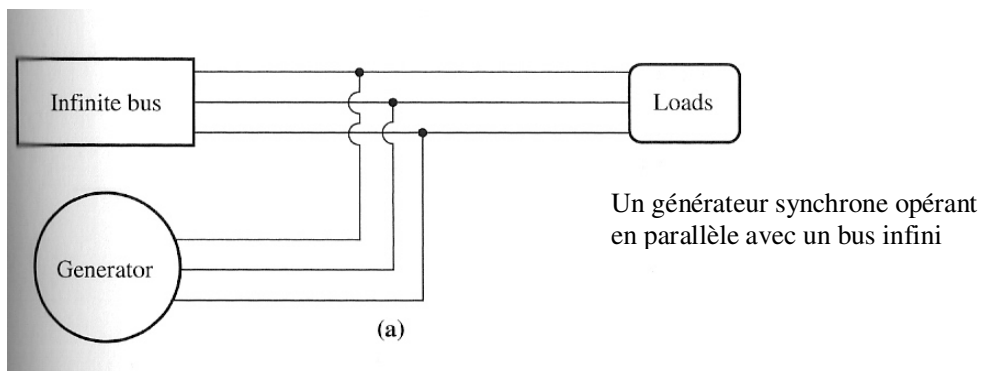
Les changements dans un générateur de système à grande puissance peuvent ne pas avoir d'effet sur le reste du système.

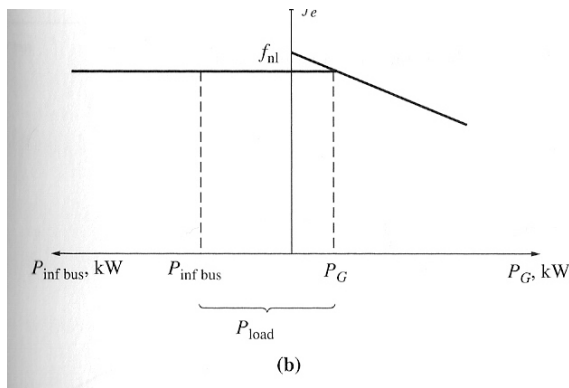
Un système à grande puissance peut être représenté comme un système de **bus infini**. Un bus infini est un système d'une telle grandeur que son voltage et sa fréquence ne varie pas indépendamment de la puissance réactive et réelle qui lui sont fournies ou qui y sont puisées. La caractéristique fréquence-puissance et celle du voltage-puissance réactive sont illustrées ci-dessous:



Considérons maintenant qu'un générateur soit connecté à un bus infini alimentant une charge et étudions les changements qui se produisent dans le générateur ainsi que leurs effets sur le système. Assumons que l'instigateur principal du générateur a un mécanisme de gouvernance et que le champ est contrôlé manuellement par une résistance.

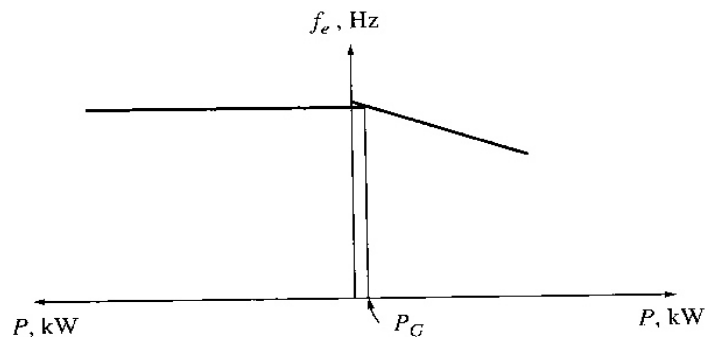
Lorsqu'un générateur est connecté en parallèle à un autre générateur ou à un large système, la fréquence et le voltage du terminal de toutes les machines doivent être égaux puisque les sorties des conducteurs sont connectées ensembles. Par conséquence, leurs caractéristiques fréquence-puissance réelle ainsi que voltage-puissance réactive peuvent être plotées ensemble avec un axe vertical commun. Un tel plot est appelé un *diagramme de maison*, et est illustré ci-dessous:



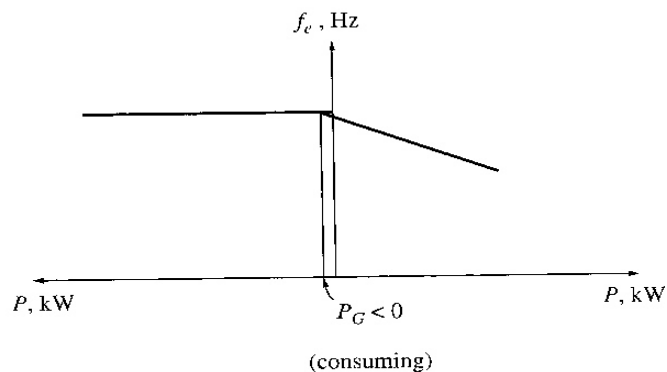


Le diagramme fréquence-puissance (diagramme de maison) d'un générateur synchrone en parallèle avec un bus infini.

Assumons que le générateur vient tout juste d'être mis en parallèle en accordance avec la procédure décrite précédemment. Le générateur est "flottant" sur la ligne et fournit une petite quantité de puissance réelle et peu ou pas de puissance réactive comme il est illustré ci-dessous:



Supposons que le générateur a été mis en parallèle avec la ligne mais au lieu d'être à une fréquence légèrement plus haute que celle du système en marche, il est à une fréquence légèrement plus basse. Dans ce cas, lorsque le parallélisme est complété, il se trouve dans la situation illustrée ci-dessous:

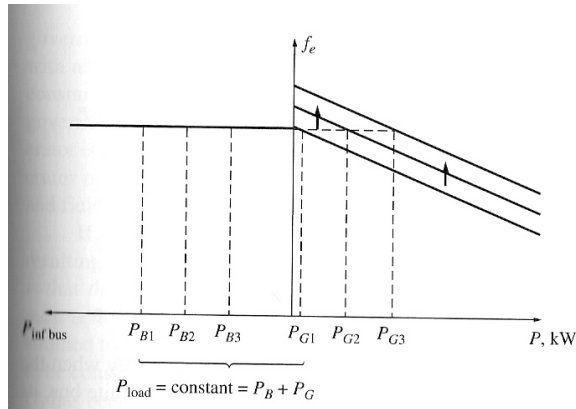


Remarquons que, dans ce cas, la fréquence à vide du générateur est plus basse que celle du système. Actuellement, à cette fréquence, la puissance fournie au générateur est négative. Dans d'autres mots, lorsque la fréquence à vide du générateur est plus basse que la fréquence opérationnelle du système, le générateur actuellement consomme de la puissance électrique et fonctionne comme un moteur. Cela assure que le générateur s'aligne en fournissant de la puissance au lieu d'en consommer et que la fréquence de la nouvelle machine est ajustée de façon à être légèrement plus haute que celle du système en marche.

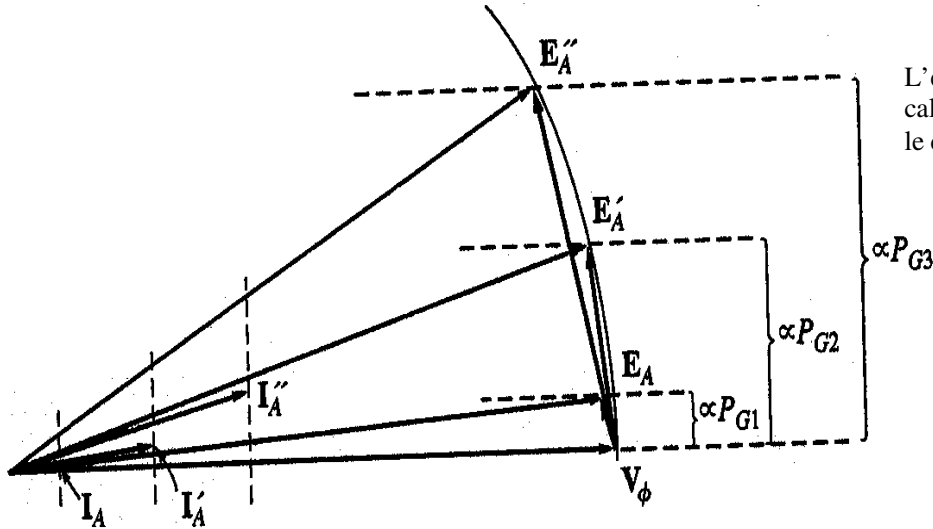
Assumons que le générateur est déjà connecté, quel contrôle de gouvernance et de courant de champ a le générateur?

### Effets de contrôle de gouvernance:

En théorie, si le calibrage de gouvernance est augmenté, la fréquence à vide augmente aussi. Sachant que la fréquence d'un bus infini ne varie pas, Cela aura pour effet d'augmenter la puissance de sortie du générateur (similaire à une augmentation de charge du générateur). Donc le courant de sortie augmente.



L'effet d'augmentation le calibrage de gouvernance sur le diagramme de maison



L'effet d'augmentation du calibrage de gouvernance sur le diagramme de phases

On Remarque à partir du diagramme de phases que  $E_A \sin \delta$  (qui est proportionnel à la puissance fournie aussi longtemps que  $V_T$  est constant) a augmenté alors que l'amplitude de  $E_A$  ( $=K\phi\omega$ ) reste constante, puisque le courant de champ  $I_F$  et la vitesse de rotation  $\omega$  n'ont pas changé. Au fur et à mesure que le calibrage de gouvernance augmente la fréquence à vide augmente et la puissance fournie au générateur augmentent. Durant l'augmentation de la puissance de sortie,  $E_A$  reste à une amplitude constante alors que  $E_A \sin \delta$  continue à augmenter.

Si la gouvernance est établie tel qu'elle excède les conditions de charge, l'excès de puissance retournera dans le système de bus infini. Le bus infini, de par sa définition, peut fournir ou consommer n'importe quel montant de puissance, sans modifier la fréquence, de façon à consommer l'excès de puissance.

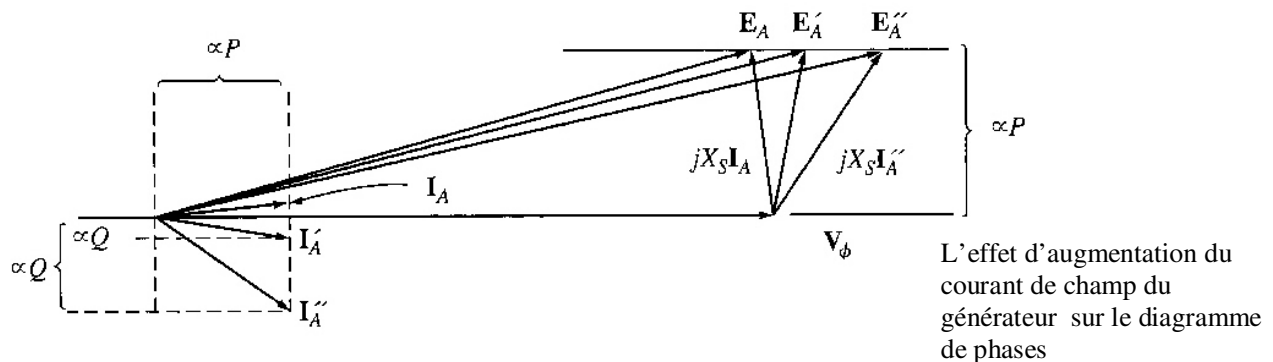
### Effets de contrôle de courant de champ:

Augmenter le calibrage de gouvernance augmentera la puissance mais causera le générateur à absorber de la puissance réactive. La question est maintenant de savoir comment on fournit de la puissance

réactive  $Q$  dans le système au lieu de l'absorber? Cela peut être réalisé en ajustant le courant de champ du générateur.

**Contraintes:** La puissance dans le générateur doit rester constante lorsqu'IF est modifié pour que la puissance de sortie du générateur puisse aussi rester constante. La puissance dans le générateur est donnée par l'équation  $P_m = \tau_{ind} \omega_m$ . Le stimulateur principal d'un générateur synchrone a une caractéristique de vitesse de torque fixe pour un calibrage de gouvernance donné. L'allure ne changera qu'avec le calibrage. Puisque le générateur est connecté à un bus infini, sa vitesse ne peut pas changer. Si la vitesse du générateur ne change pas et que le calibrage de gouvernance n'a pas changé, la puissance fournie par le générateur doit rester constante.

Si la puissance fournie est constante alors que le courant change, alors les distances proportionnelles à la puissance dans le diagramme de phase ( $I_A \cos \theta$  et  $E_A \sin \delta$ ) ne peuvent pas changer. Lorsque le courant de champ augmente, le flux  $\phi$  augmente, et par conséquent  $E_A (=K \phi \omega)$  augmente. Si  $E_A \sin \delta$  doit rester constant, alors le phaseur  $E_A$  doit "glisser" le long de la ligne de puissance qui est constante, comme il est illustré ci-dessous.



Puisque  $V_\phi$  est constant, l'angle de  $jX_s I_A$  change, par conséquent l'angle et l'amplitude de  $I_A$  changent. Remarquons qu'il en résulte que la distance proportionnelle à  $Q$  ( $I_A \sin \theta$ ) augmente.

En d'autres mots, l'augmentation du courant de champ dans un générateur synchrone opérant en parallèle avec un bus infini augmente la puissance de sortie réactive du générateur.

**Donc, dans un générateur opérant en parallèle avec un bus infini:**

- La fréquence et le voltage du terminal du générateur sont contrôlés par le système connecté.
- Les changements de calibrage de gouvernance contrôleront la puissance réelle à fournir.
- Les changements de courant de champ contrôleront la quantité de puissance réactive à fournir.

*Il est à noter que ces effets ne sont applicables qu'aux générateurs de grands systèmes.*

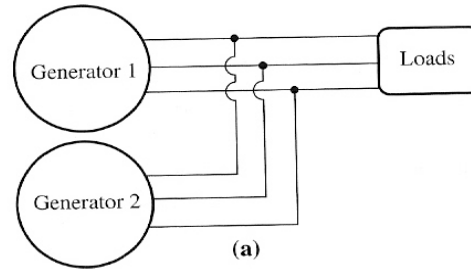
### Opération de générateurs en parallèles avec d'autres générateurs de même taille

Quand un générateur opère seul, les puissances réelle et réactive fournies par le générateur sont fixes, contraintes à être égales à la puissance demandée, et la fréquence et le voltage du terminal sont variés par le calibrage de gouvernance et le courant de champ.

Lorsqu'un générateur opère en parallèle avec un bus infini, la fréquence et le voltage du terminal sont maintenus constants par le bus infini, les puissances réactive et réelle varient en fonction du calibrage de gouvernance et du courant de champ.

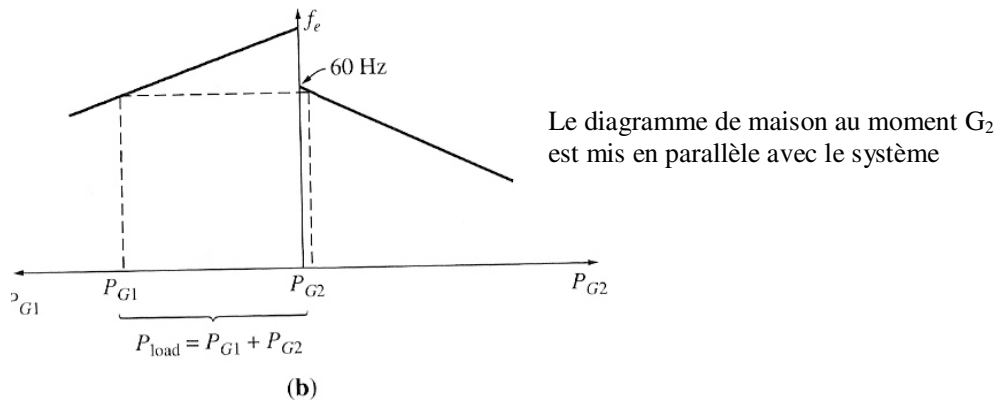
Que se passe-t-il lorsqu'un générateur synchrone n'est pas connecté en parallèle avec un bus infini mais avec un autre générateur de même taille?  
 Quels sont les effets de changer le calibrage de gouvernance et les courants de champ?

Cette situation illustrée ci-dessous:



Dans ce cas, la contrainte de base stipule que la somme des puissances réelle et réactive fournies par les deux générateurs doit être égale à  $P$  et  $Q$  demandées par la charge. Ni la fréquence du système ni la puissance des générateurs n'ont la contrainte de rester constante.

Le diagramme fréquence-puissance pour un tel système, immédiatement après que  $G_2$  ait été mis en parallèle suit:



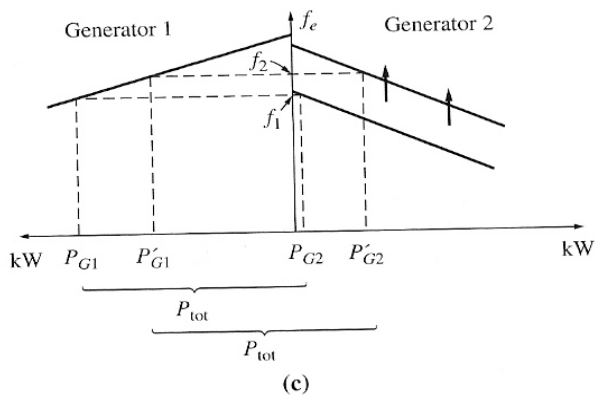
La puissance totale  $P_{tot}$  (qui est égale à  $P_{load}$ ) et la puissance réactive sont respectivement:

$$P_{tot} = P_{load} = P_{G1} + P_{G2}$$

$$Q_{tot} = Q_{load} = Q_{G1} + Q_{G2}$$

Que se passe-t-il lorsque le calibrage de gouvernance de  $G_2$  augmente?

Il en résulte un déplacement de la courbe fréquence-puissance de  $G_2$  shifts vers le haut:



L'effet d'augmentation du calibrage de gouvernance de  $G_2$  sur l'opération du système.

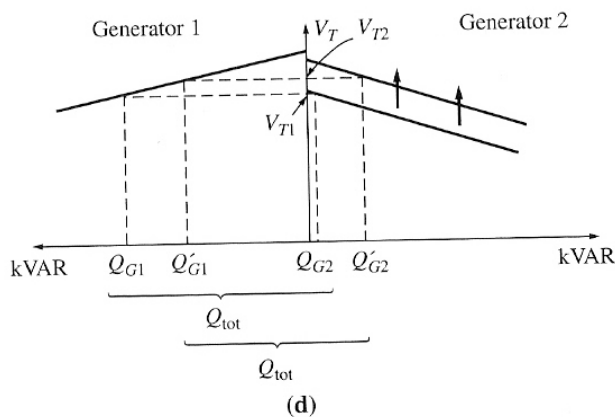
La puissance totale fournie à la charge ne doit pas changer. A la fréquence d'origine  $f_1$ , la puissance fournie par  $G_1$  et  $G_2$  sera plus grande que celle demandée par la charge pour que le système ne puisse pas continuer à opérer à la même fréquence qui la précédait. Actuellement, il n'y a qu'une fréquence où la somme des puissances de sortie des deux générateurs est égale à  $P_{load}$ . Cette fréquence  $f_2$  est plus élevée que la fréquence d'opération d'origine du système. A cette fréquence,  $G_2$  fournit plus de puissance qu'auparavant, et  $G_1$  fournit moins de puissance qu'auparavant.

Donc, quand 2 générateurs opèrent ensemble, l'augmentation du calibrage de gouvernance de l'un d'entre eux

1. Augmente la fréquence de système.
2. Augmente la puissance fournie par ce générateur et réduit la puissance par l'autre.

*Que se passe-t-il si le courant de champ de  $G_2$  augmente?*

Le comportement résultant est similaire à la situation de la puissance réelle:



L'effet d'augmentation de courant de champ de  $G_2$  sur l'opération du système.

Quand 2 générateurs opèrent ensemble et que le courant de champ de  $G_2$  augmente,

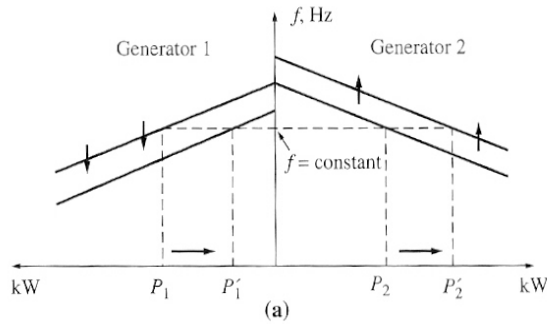
1. Le voltage du terminal du système augmente.
2. La puissance réactive  $Q$  fournie par le générateur augmente alors que la puissance réactive fournie par l'autre générateur diminue.

Si les pentes et les fréquences sans charge de la chute de vitesse du générateur (fréquence-puissance) sont connues, alors les puissances fournies par chaque générateur et la fréquence résultante du système peuvent être déterminées quantitativement.

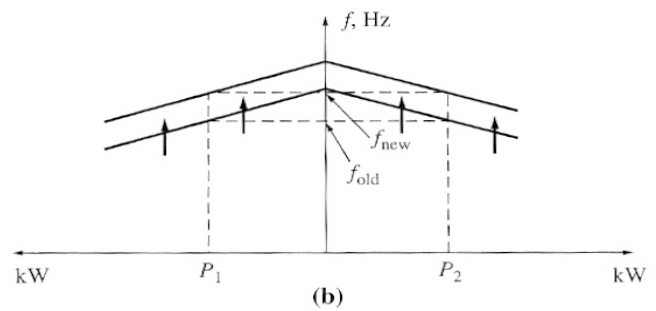
Lorsque 2 générateurs de même taille opèrent en parallèle, un changement de calibrage de gouvernance de l'un d'entre eux modifie la fréquence du système ainsi que la puissance partagée parmi eux.

*Comment le partage de puissance du système peut être partagé indépendamment de la fréquence du système, et vice versa?*

Une augmentation du calibrage de gouvernance d'un des générateurs a pour effet d'augmenter la puissance de cette machine ainsi que la fréquence du système. Une diminution de calibrage de gouvernance de l'autre générateur a pour effet de diminuer la puissance de ce dernier ainsi que la fréquence du système. Par conséquent, pour ajuster le partage de puissance sans changer la fréquence du système, on augmente le calibrage de gouvernance d'un générateur et on diminue simultanément le calibrage de gouvernance de l'autre générateur, (on procède de la même manière pour ajuster la fréquence du système) :

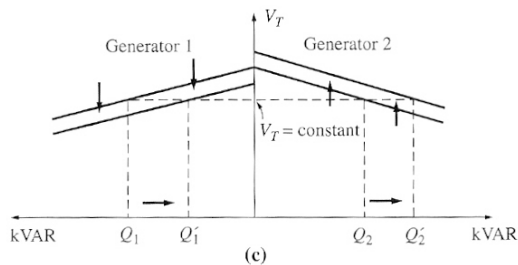


Ajustement du partage de puissance sans affecter la fréquence du système

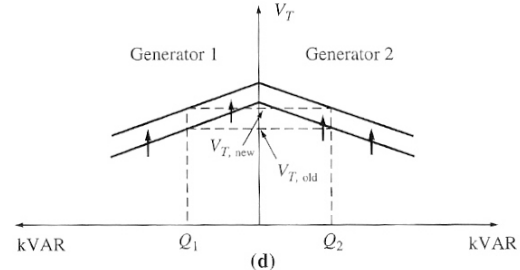


Ajustement de la fréquence du système sans affecter le partage de puissance

L'ajustement de la puissance réactive et du voltage du terminal se fait de façon analogue. Pour ajuster la puissance réactive sans changer  $V_T$ , on augmente simultanément le courant de champ d'un générateur et diminue le courant de champ de l'autre, (même procédure pour ajuster le voltage de terminal):

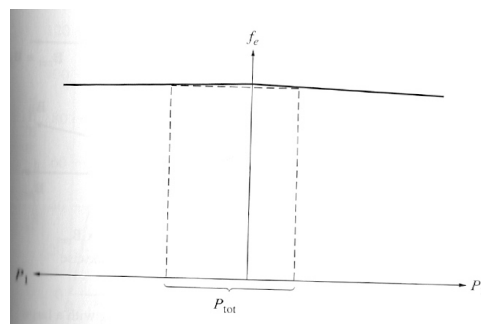


Ajustement de la puissance réactive sans changer le voltage de terminal



Ajustement du voltage de terminal sans affecter la puissance réactive

Il est très important qu'un générateur synchrone qui doit opérer en parallèle avec d'autres machines ait une diminution ou chute de sa caractéristique fréquence-puissance. Si deux générateurs ont une caractéristique inchangée ou presque, alors le partage de puissance entre eux peut varier abruptement avec la plus petite variation de vitesse à vide. Ce problème est illustré ci-dessous



On remarque que le plus petit changement de  $f_{nl}$  d'un des générateurs cause un changement abrupt du partage de puissance. Pour s'assurer du bon contrôle de partage de puissance entre les générateurs, toute chute de leur vitesse dans l'intervalle de 2-5%.

## 10. Calibrage de générateurs synchrones

### Calibrage du voltage, vitesse et fréquence

**Calibrage de la fréquence:** Il dépendra du système dans lequel le générateur est connecté.



**Calibrage du voltage:** le voltage généré est fonction du flux, vitesse de rotation et de constantes mécaniques. Cependant, Il y a une limite plafond du niveau de flux puisqu'il dépend du matériau du générateur. Par conséquent le calibrage du voltage peut donner une idée approximative du niveau de flux maximum possible ainsi que du voltage maximum avant que les bobines d'isolation ne se détériorent.

### Calibrage de la puissance apparente et du facteur de puissance

Les contraintes électriques des machines dépendent généralement de la robustesse mécanique (torque mécanique de l'arbre de la machine) ainsi que des limites de l'enroulement d'isolation (échauffement de l'enfillement). Pour un générateur il y a deux différents enroulements qui nécessitent une protection du type:

- a) Enfillement d'armature
- b) Enfillement du champ

Par conséquent le flux de courant maximum d'armature peut être obtenu à partir du maximum de la puissance apparente S:

$$S = 3V_{\phi} I_A$$

Si le calibrage de voltage est connu, on peut trouver le  $I_A$  maximum permis.

L'effet de perte due à l'échauffement du cuivre du stator est fourni par:

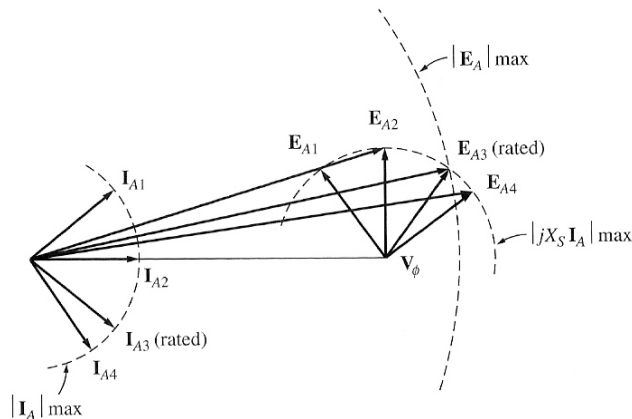
$$P_{SCL} = 3 I_A^2 R_A$$

Les pertes dues au cuivre du champ:

$$P_{RCL} = I_F^2 R_F$$

Le courant de champ maximum imposera le  $E_A$  maximum permissible. Et comme nous pouvons trouver le courant de champ maximum et le  $E_A$  maximum possible, nous pouvons possiblement déterminer le plus petit changement possible de FP du générateur pour qu'il opère à la puissance apparente nominale.

La figure ci-dessous montre le diagramme de phases du générateur synchrone avec le voltage nominale et le courant d'armature. Le courant peut assumer plusieurs angles différents.



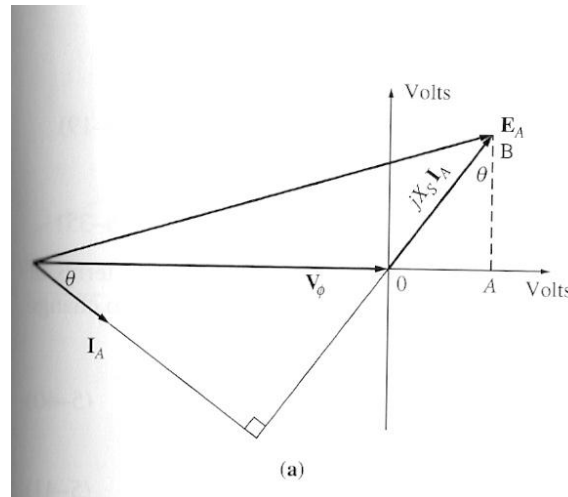
Le voltage interne généré  $E_A$  est la somme de  $V_{\phi}$  et de  $jX_S I_A$ . On Remarque que pour certains angles de courant le  $E_A$  requis excède  $E_{A,\max}$ . Si le générateur opérait au courant d'armature nominale et à ses facteurs de puissance, l'enfillement du champ brulerait.

L'angle de  $I_A$  qui nécessite le  $E_A$  max possible alors que  $V\phi$  reste à la valeur nominale fournit le facteur de puissance nominale du générateur. Il est possible d'opérer le générateur à un facteur de puissance plus bas (plus en retard) que celui de la valeur nominale mais uniquement en diminuant du kVA fournit par le générateur.

### Diagramme de faisabilité du générateur synchrone.

A cause des limites énumérées, il y a un besoin de construire un diagramme de faisabilité du générateur synchrone qui graphiquement illustre les limites du générateur.

Un diagramme de faisabilité est un graphe de puissance complexe  $S=P+jQ$ . La courbe de faisabilité peut être dérivée du phaseur de voltage du générateur synchrone. Assumons un phaseur de voltage, comme il est montré ci-dessous, opérant à un facteur de puissance en retard et à sa valeur nominale:



On remarque que la courbe doit représenter les limites des puissances du générateur, donc il y a un besoin de convertir le **phaseur de voltage** en **phaseur de puissance**.

Ces puissances sont obtenues avec:

$$P = 3 V\phi I_A \cos(\theta)$$

$$Q = 3 V\phi I_A \sin(\theta)$$

$$S = 3 V\phi I_A$$

Donc :

$$P = 3 V\phi I_A \cos(\theta) = 3(V\phi/X_s) (X_s I_A \cos(\theta))$$

$$Q = 3 V\phi I_A \sin(\theta) = 3(V\phi/X_s) (X_s I_A \sin(\theta))$$

Le facteur de conversion pour changer l'échelle des axes de V à  $V_A$  est  $3 V\phi/X_s$ .

Sur l'axe des voltages, l'origine du diagramme des phaseurs est à  $-V\phi$  sur l'axe horizontal, tel que l'origine sur le diagramme des puissances est à:

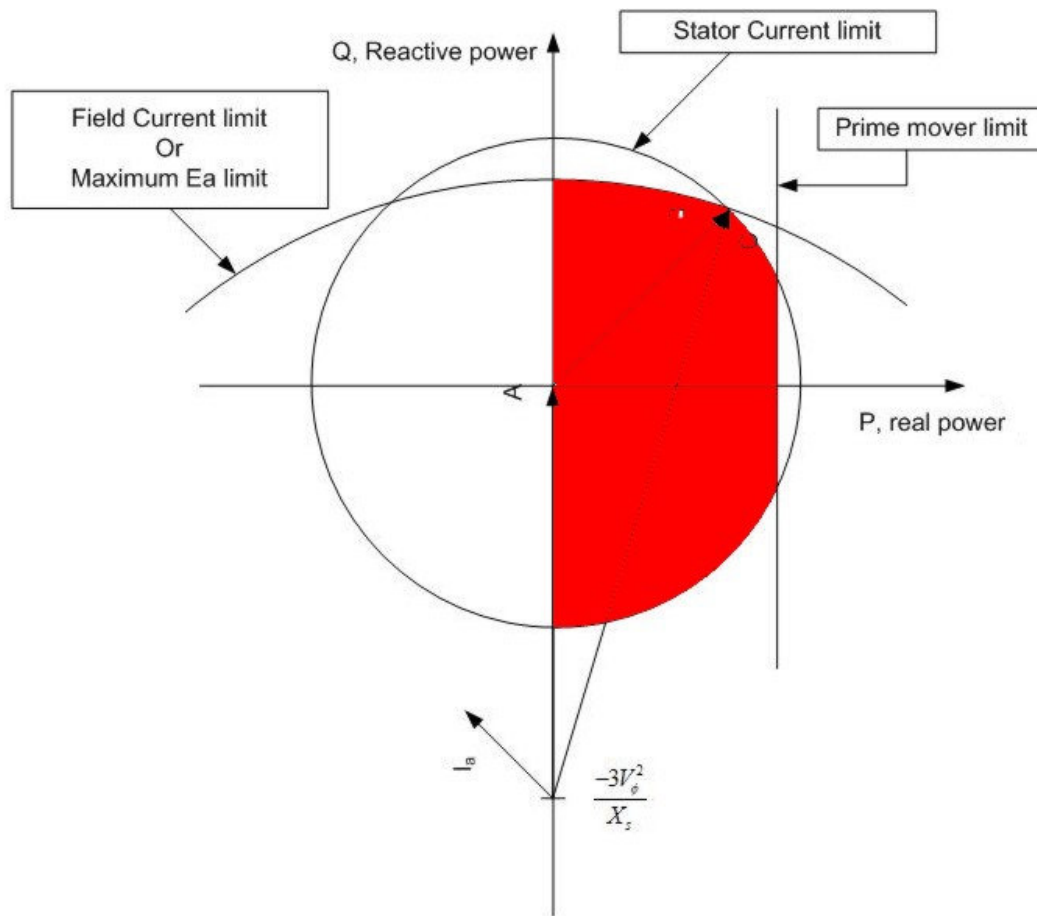
$$Q = \frac{3V\phi}{X_s} (-V\phi) = -\frac{3V\phi^2}{X_s}$$

Le courant de champ est proportionnel au flux de la machine, et le flux est proportionnel à  $E_A = K\phi\omega$ . La longueur correspondante à  $E_A$  sur le diagramme des puissances est:

$$D_E = \frac{3E_A V\phi}{X_s}$$

Le courant d'armature  $I_A$  est proportionnel à  $X_S I_A$ , et la longueur correspondant à  $X_S I_A$  sur le diagramme des puissances est  $3V\phi I_A$ .

La courbe finale de faisabilité est illustrée ci-dessous:



C'est le graphe de P vs Q. Les lignes des courants d'armature constants  $I_A$  apparaissent comme des lignes de la constante  $S = 3V\phi I_A$ , qui sont des cercles concentriques autour de l'origine. Les lignes des courants de champ constants correspondent aux lignes de  $E_A$  constants qui sont illustrées comme des cercles d'amplitude  $3E_A V\phi / X_S$  centrées autour du point :

$$Q = -\frac{3V_\phi^2}{X_s}$$

La limite du courant d'armature apparaît comme le cercle correspondant au  $I_A$  nominale KVA, et la limite du courant de champ apparaît comme le cercle correspondant au  $I_F$  nominale ou  $E_A$ . Tout point qui se situe dans ces cercles est à un point d'opération sécuritaire pour le générateur.