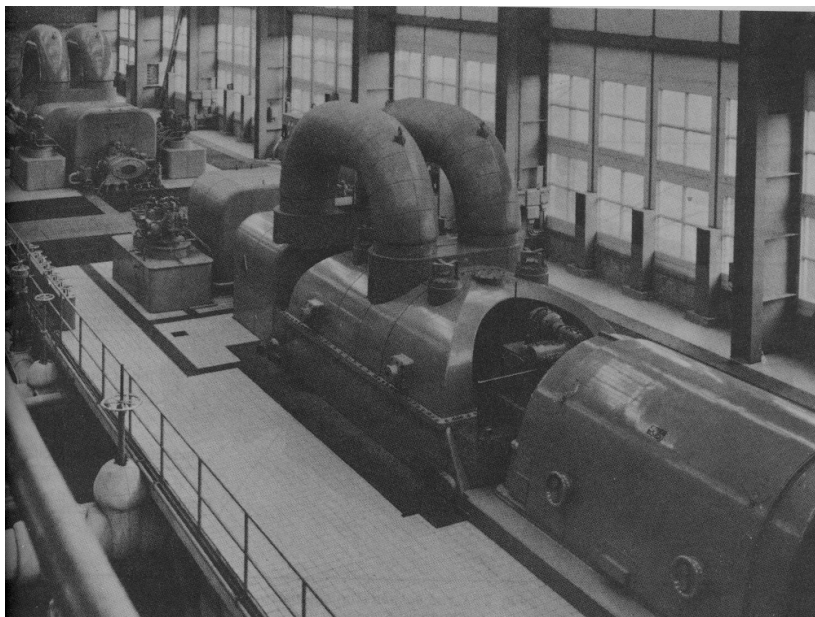


Cours d'électrotechnique

MACHINE TOURNANTE A COURANT ALTERNATIF

LES MACHINES SYNCHRONES



PARTIE N°2 :

L'ALTERNATEUR

TABLE DES MATIERES

1.	Principe de fonctionnement.....	3
1.1.	Principe de base.....	3
1.2.	Création d'une tension alternative triphasée	4
1.3.	Génération d'une tension utilisable.....	6
1.4.	Conclusion.....	7
2.	La force électromotrice	7
2.1.	La FEM à vide.....	7
2.1.1.	Pour un conducteur.....	7
2.1.2.	Pour N conducteurs	8
2.1.3.	Les modifications	8
2.1.3.1.	Le facteur de forme	8
2.1.3.2.	Le facteur de bobinage	8
2.1.3.3.	Le coefficient de KAPP.....	8
2.2.	La FEM en charge	9
2.2.1.	La résistance	9
2.2.2.	Le circuit magnétique.....	9
2.2.3.	La FCEM d'auto induction	10
2.2.4.	La réaction d'induit	10
2.2.4.1.	Cas d'une charge résistive.....	10
2.2.4.2.	Cas d'une charge selfique.....	11
2.2.4.3.	Cas d'une charge capacitive.....	12
2.2.4.4.	Cas d'une charge quelconque.....	13
3.	La fréquence	14
4.	Etude de l'alternateur	16
4.1.	Caractéristique interne ou essai à vide	16
4.1.1.	Schéma de câblage	16
4.1.2.	Mode opératoire	16
4.1.3.	Courbe	17
4.1.4.	Explication physique	17
4.2.	Caractéristique externe	18
4.2.1.	Schéma de câblage	18
4.2.2.	Mode opératoire	18
4.2.3.	Courbe	19
4.2.4.	Explication physique	19
4.2.4.1.	Sur charge Résistive	19
4.2.4.2.	Sur charge selfique	20
4.2.4.3.	Sur charge capacitive	20
4.3.	Courbe de réglage.....	21
4.3.1.	Schéma de câblage	21
4.3.2.	Mode opératoire	21
4.3.3.	Courbe	22
4.3.4.	Explication physique	22
4.3.4.1.	Sur charge Résistive	22
4.3.4.2.	Sur charge selfique	22
4.3.4.3.	Sur charge capacitive	23
4.4.	Essai en court-circuit	23

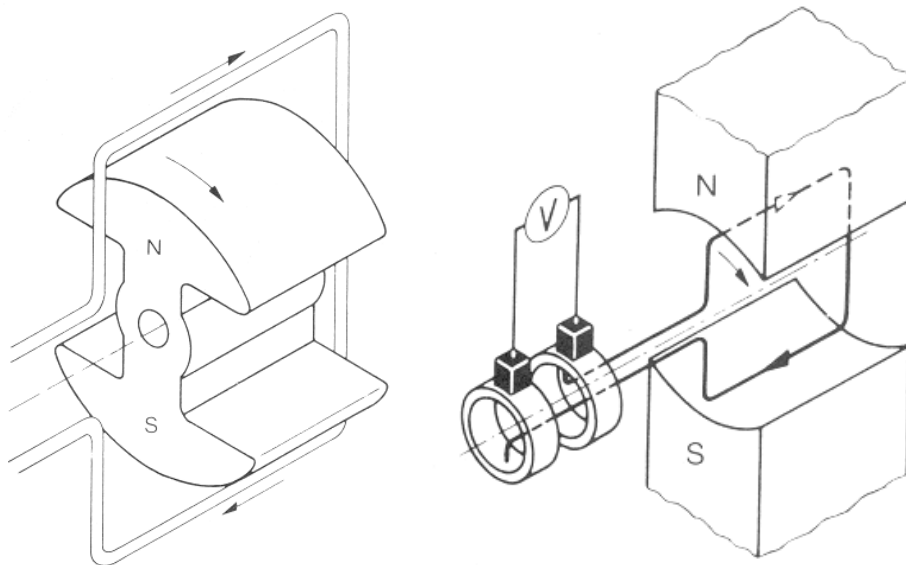
4.4.1.	Schéma de câblage	23
4.4.2.	Mode opératoire	24
4.4.3.	Courbe	24
4.4.4.	Explication physique	24
5.	Le diagramme de FRESNEL.....	25
6.	Le bilan énergétique	26
6.1.	La puissance utile	26
6.2.	Les pertes constantes	26
6.3.	Les pertes par effet joule	26
6.4.	Les pertes supplémentaires.....	26
6.5.	Le rendement.....	26
7.	Le schéma équivalent de l'alternateur.....	27
8.	L'équation de fonctionnement de l'alternateur	27
9.	Détermination de la réactance synchrone.....	27
10.	L'alternateur dans l'hypothèse de FRESNEL.....	28
10.1.	Hypothèse.....	28
10.2.	Comment évolue U si I augmente et $i = \text{constant}$?.....	28
10.3.	Comment évolue E_v si I augmente et $U = \text{constant}$?	28
10.4.	Comment fournir une tension à puissance active constante ?	29
11.	L'alternateur dans l'hypothèse de BEHN-ESCHENBURG	31
11.1.	Hypothèse.....	31
11.2.	Comment évolue U pour i et α constants ?	31
12.	La taille des alternateurs.....	32
13.	Mise en parallèle d'alternateur	33
13.1.	Généralités.....	33
13.2.	Conditions de couplage	33
13.2.1.	La même fréquence	33
13.2.2.	La même tension	33
13.2.3.	La même succession des phases.....	34
13.3.	En pratique	35
13.3.1.	Les feux clignotants	35
13.3.2.	Les feux tournants	36
14.	Exercices	39

1. Principe de fonctionnement

1.1. Principe de base

La chose à ne pas perdre de vue est que la seule chose que nous attendons d'un alternateur c'est qu'il produise une tension triphasée alternative constante et symétrique. A cela doit être lié la constance de la fréquence de cette tension. Nous savons déjà que la fréquence sera fonction de la vitesse de variation du flux au droit des enroulements statoriques. Cette vitesse est fonction d'une part de la vitesse de rotation du rotor et d'autre part du nombre de paire de pôle au stator et au rotor.

Il existe deux manières de construire un alternateur, soit l'inducteur est tournant soit l'inducteur est fixe.



Deux conditions sont nécessaires pour qu'un alternateur débite une tension.

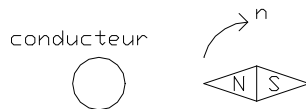
- Premièrement : la mise en rotation du rotor qui se fait par l'intermédiaire d'un autre organe dit moteur. Ce dernier peut être un moteur d'entraînement électrique, un moteur à explosion ou une turbine alimentée en eau ou en vapeur. Dans tous les cas, la vitesse sera réglée par réglage du débit d'un fluide.
- Deuxièmement : la polarisation des pôles du rotor qui sera obtenue en injectant une tension continue dans le rotor (balais et bagues) et qui aura pour effet de permettre la circulation d'un courant dans les enroulements inducteurs suite à la résistance propre de ces derniers. Le sens de la polarisation des bobines sera donc fonction du sens de bobinage des enroulements. Un pôle nord doit suivre un pôle sud et précéder un pôle sud.

Je peux donc dire que si les deux conditions ci-dessus sont respectées, les enroulements du stator vont voir un champs tournant. Ils vont donc être soumis à une variation de flux. Les conducteurs soumis à une variation de flux sont donc le siège d'une FEM, je peux conclure que mon alternateur débite une tension.

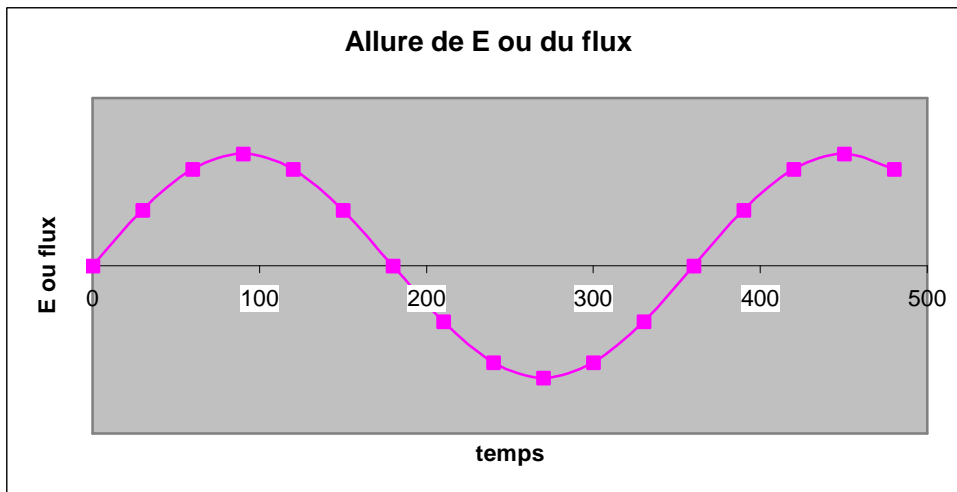
1.2. Création d'une tension alternative triphasée

Afin de vérifier que notre alternateur débite bien une tension alternative sinusoïdale et triphasée, réalisons une analyse pas à pas.

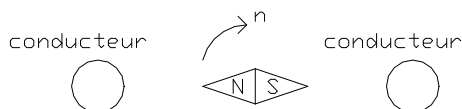
Supposons dans un premier temps un conducteurs représentant une bobine placée au stator et un aimant caractérisant le rotor. Ce dernier étant mis en rotation, vérifions l'allure de la FEM induite aux bornes de notre conducteur. Le conducteur sera placé de telle sorte qu'il soit perpendiculaire au flux inducteur.

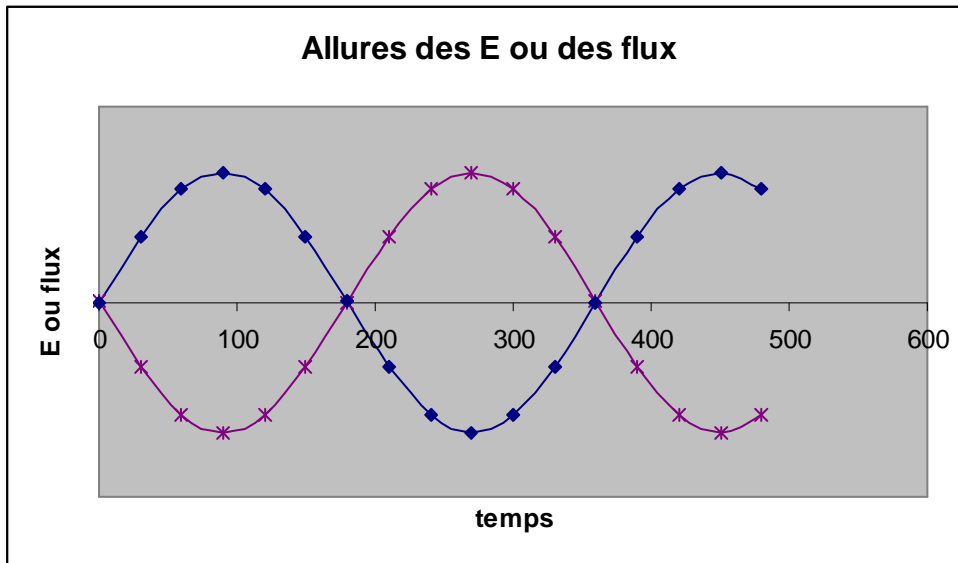


Nous savons que la FEM sera l'image du flux inducteur et que dès lors les allures seront identiques aux pertes près.

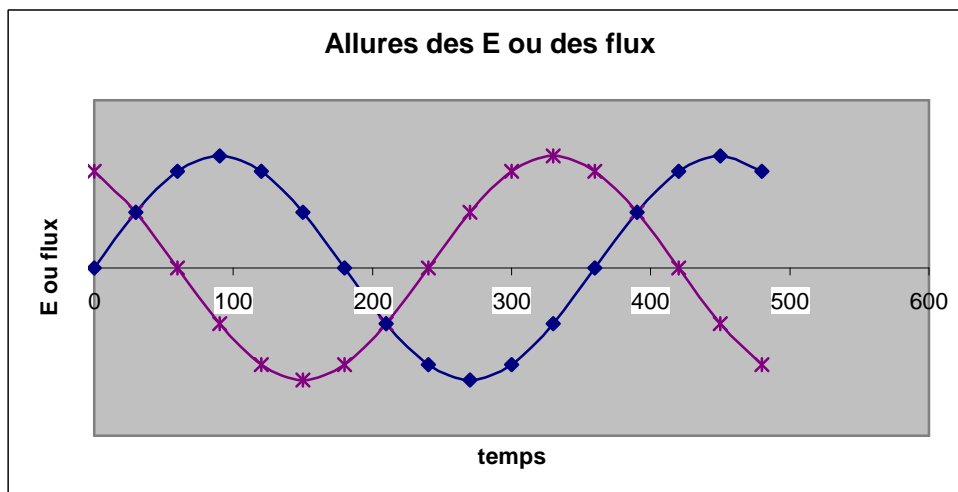
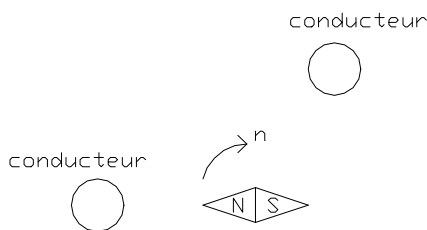


Plaçons un second conducteur à 180° du premier de sorte qu'il soit aussi soumis au flux inducteur. Il sera placé perpendiculairement au flux afin d'être lui aussi induit et être le siège de la génération d'une FEM. Analysons l'allure entre les deux tensions ainsi générées.

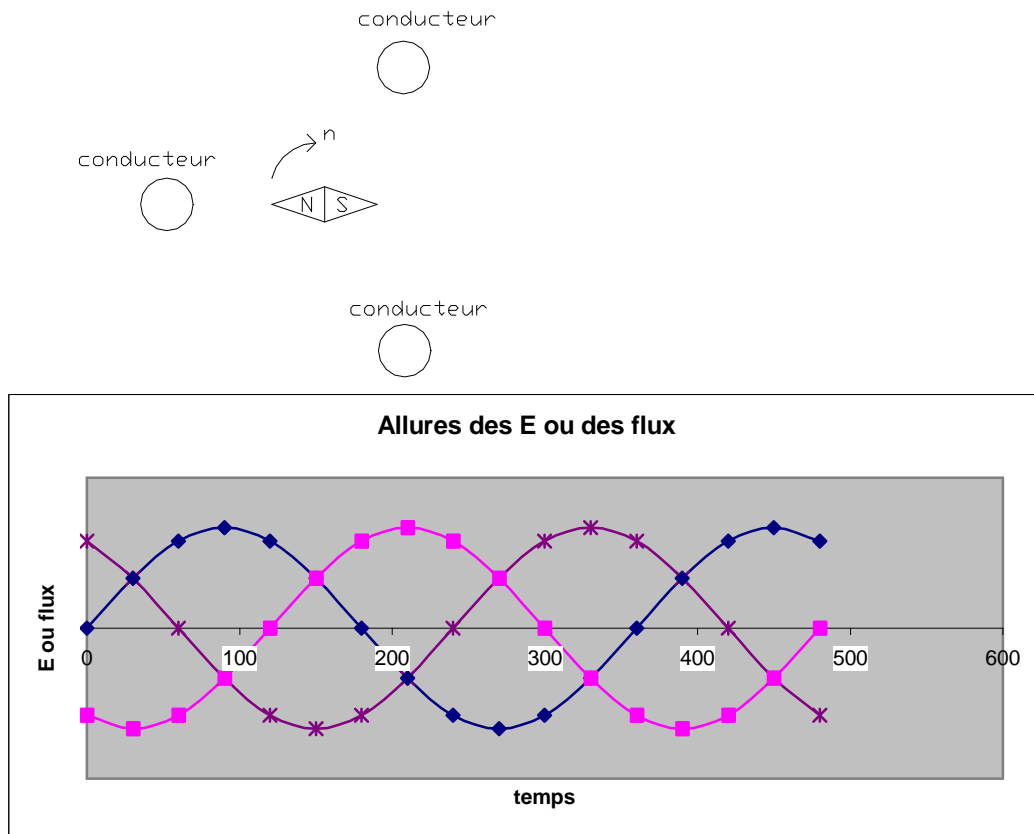




Nous savons que les tensions délivrées par un système triphasé doivent être déphasées d'un angle fixe et fixé à 120° . L'essai réalisé ci-dessus nous montre qu'un déphasage de 180° mécanique correspond à un déphasage électrique de 180° . Je peux donc par projection déduire que si je souhaite un déphasage de 120° électrique entre mes deux tensions je dois décaler mes deux conducteurs de 120° mécanique. Vérifions ce que l'on obtiens.

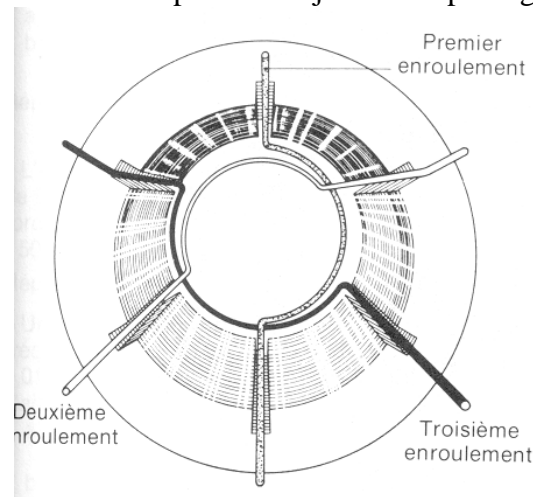


Nous voici en présence d'une source de tension biphasée dont les tensions sont déphasées de 120° . Il me suffit donc pour obtenir un réseau triphasé de placer un troisième conducteur lui même déphasé de 120° par rapport aux deux autres. Vérifions le résultat.



1.3. Génération d'une tension utilisable

Nous venons de construire ensemble le bobinage de notre stator, nous avons sur base des résultats obtenu au droit de chacun de mes conducteurs une tension « e » avec lesquelles je ne pourrais rien faire. Pour réaliser la génération d'une tension utilisable, il me suffit donc d'amplifier le nombre de FEM « e ». Pour parvenir à cela, nous devons simplement augmenter le nombre de conducteur au stator. En lieu et place d'un seul conducteur comme représenté sur notre dessin ci-dessus, nous aurons X conducteurs formant X spires. L'idéale pour limiter le nombre de conducteur de chaque bobine est que ces derniers soient soumis en même temps par le flux maximum. Cela sous-entend que tous les conducteurs soient placés dans la même encoche. En pratique, cela est irréalisable et nous devons placé nos conducteurs sur la périphérie du stator mais en respectant toujours le déphasage de 120° .



1.4. Conclusion

Soit une tension continue appliquée sur l'enroulement inducteur de la machine, ce dernier ayant une résistance, je vais obtenir la circulation d'un courant continu qui va créer au sein de chaque bobine un flux. Ces derniers vont ainsi polariser les noyaux du rotor qui vont générer le flux inducteur. Ce dernier via le circuit magnétique du stator pourra se refermer et ainsi traverser les bobinages statoriques. Si le rotor est en rotation, les enroulements statoriques vont être soumis à un champ rotorique tournant qui sera pour ces derniers variable. Les enroulements statoriques seront donc le siège de force électro motrice. J'obtiendrai donc au droit des bornes de chaque bobine une tension alternative sinusoïdale qui majorée des chutes de tension nous donnera la tension d'exploitation alternative sinusoïdale triphasée qui pourra ainsi pousser un courant alternatif sinusoïdale.

2. La force électromotrice

2.1. La FEM à vide

2.1.1. Pour un conducteur

Nous savons que les conducteurs formant les bobines du stator sont placés perpendiculairement au champ rotorique. Comme ce dernier champ rotorique est tournant, il sera donc vu du stator comme un champ variable. Je conclus donc que les enroulements rotoriques produisent un flux dont l'expression sera

$\phi = \phi_{Max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$. Vu du stator, ce flux est variable et donc caractérise une

variation de flux qui s'exprime $\frac{d\phi}{dt}$. Si je remplace l'expression du flux rotorique

dans la formule ci-joint on obtient : $e = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d(\phi_M \cdot \sin(\omega \cdot t))}{dt} = \omega \cdot \phi_M \cdot \sin(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2})$

La valeur maximale de cette FEM sera : $E_M = \omega \cdot \phi_M$ et sa valeur efficace sera

$$E_{eff} = \frac{\omega \cdot \phi_M}{\sqrt{2}}$$

En supposant que la pulsation soit égale à $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, la valeur de la FEM efficace devient $E = 4,44 \cdot f \cdot \phi_M \cdot \sin(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2})$.

2.1.2. Pour N conducteurs

Nous savons que notre machine est composée d'un nombre de conducteur soit N, nous savons également que ces conducteurs placés en série forment des spires qui elles mêmes forme les bobines. Je sais encore que chaque conducteurs actifs soumis aux variations de flux est le siège d'une FEM « e ». Comme j'ai besoin de deux conducteurs actif pour former une spire, je peux dire que pour N conducteurs actifs, j'ai N/2 spires. La FEM totale devient dès lors

$$E=2,22.N.f.\phi_M.\sin(\omega.t-\frac{\pi}{2}) \text{ avec :}$$

- E la Force Electro Motrice en volt
- F la fréquence et hertz
- ϕ_M le flux inducteur en wéber
- N le nombre de spire au stator

Je peux encore tirer comme conclusion que à vide, U est égale à E.

2.1.3. Les modifications

2.1.3.1.Le facteur de forme

Nous avons vu dans la description que le passage du flux inducteur dans l'entrefer entraîne une déformation de ce dernier. Cette déformation avait pour effet de déformer l'allure sinusoïdale de notre FEM. Nous pouvons appliquer un coefficient de correction appelé facteur de forme et noté K1.

$$E=2,22.K1.N.f.\phi_M.\sin(\omega.t-\frac{\pi}{2}).$$

Précisons encore que K1 est toujours supérieur à 1.

2.1.3.2.Le facteur de bobinage

Nous savons que la tension d'exploitation est obtenue aux bornes de notre machine en déterminant un nombre de spires qui permettra par cumul des petite « e » d'obtenir le potentiel souhaité. Nous avons encore vu dans la description que pour des raisons purement pratique, il nous était impossible de placer la totalité des conducteurs dans une même encoches. Nous avons donc réparti les conducteurs sur la périphérie du stator dans plusieurs encoches. Cette façon de faire a nécessité un nombre plus important de spires puisque tous les conducteurs ne voient pas le flux maximum en même temps. Nous pourrions donc appliquer un coefficient de correction noté K2 et appelé facteur de bobinage qui tiendra compte de cette artifice.

$$E=2,22.N.f.K1.K2\phi_M.\sin(\omega.t-\frac{\pi}{2})$$

Précisons encore que K2 est toujours inférieur à 1.

2.1.3.3.Le coefficient de KAPP

Le produit de $2,22.K2.K2$ est appelé facteur de KAPP. La valeur est souvent proche de 2,22 ce qui explique que en pratique on oublie ces facteurs.

2.2. La FEM en charge

En charge, il se fait que la tension n'est plus égale à la FEM, tentons d'expliquer ce phénomène et les causes qui y sont associées. Trois phénomènes bien connus en électrotechnique permettent d'expliquer ces différents types de chute de tension.

2.2.1. La résistance

Nous savons que l'enroulement induit (stator) par qui est produit la FEM est composé de fils de cuivre. Donc cette bobine constituée de cuivre offre une résistance électrique. Nous savons encore que sur charge, un courant circulera au sein de ma machine. Ce courant traversera donc les enroulements induits. Hors, nous savons que toute résistance parcourue par un courant entraîne une chute de tension. Cette dernière devra donc être soustraite à la FEM. Je peux déjà sur base de cette première analyse que la tension d'exploitation sera plus petite que la FEM débitée. Nous maintiendrons la tension d'exploitation constante en régulant le champ inducteur. Les variations de ce dernier devront compenser les variations de la chute de tension.

2.2.2. Le circuit magnétique

Nous savons que la FEM est créée par la combinaison d'un flux et d'une rotation, si l'un des deux varie, la FEM va varier et la tension d'exploitation également. Dans le fonctionnement d'un alternateur, nous exigeons une chose, c'est la constance de la tension d'exploitation.

Si la tension devait s'effondrer, nous pourrions via le courant d'excitation créer au sein des enroulement du rotor un flux inducteur plus important afin de stabiliser cette tension d'exploitation. Noter que l'ajustement du courant d'excitation se fera via un rhéostat de champ placé en série dans le circuit inducteur.

Si cette façon de procéder est d'un point de vue théorique correcte, en est-il de même en pratique. Nous savons que le flux inducteur est conduit par les circuits magnétiques, celui du rotor et celui du stator. Hors nous savons également qu'un circuit magnétique possède des limites dans ces capacités à conduire le flux. Je peux donc tirer comme conclusion que les circuits magnétiques vont à un moment donné se saturer. Dans cette plage de saturation, il nous sera devenu impossible de maintenir la tension d'exploitation constante. Toute augmentation du courant d'excitation sera inutile. Vous pourriez dès lors reprendre la première phrase de ce paragraphe et dire que si nous ne pouvons plus modifier la tension en jouant sur le flux, nous allons la modifier en jouant sur la vitesse. S'il est vrais que cette procédure donnerait un résultat, cela sous entend que le moteur d'entraînement puisse être régulé en vitesse.

Dans notre raisonnement actuel, nous avons négligé un des facteurs liés à l'allure sinusoïdale de notre tension d'exploitation. Il s'agit bien entendu de la fréquence de notre signal. Nous savons que la fréquence est l'image de la période et que cette dernière caractérise le temps d'un cycle complet d'un signal alternatif. Hors en exploitation, cette fréquence nous est fixée. La

période associée est donc fixée également. Sachant que sur un cycle, les bobinages ont vu un pôle nord et un pôle sud, je peux faire un lien entre le déplacement électrique de 360° et le déplacement mécanique lié à la rotation du rotor. Je suis donc obligé pour garantir une tension d'exploitation à fréquence constante de maintenir la vitesse de rotation constante également. Je ne pourrait donc pas en pratique modifier la vitesse de rotation du moteur pour récupérer une variation de la tension d'exploitation si la machine est saturée en flux. Toutes ces remarques vont dans le sens de faire apparaître que notre alternateur est une machine qui possèdent des limites dans la production d'énergie.

2.2.3. La FCEM d'auto induction

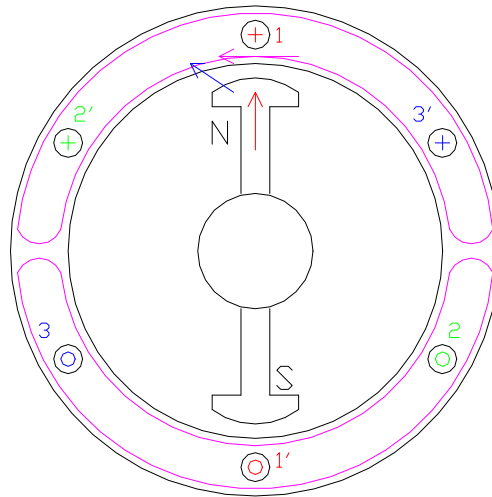
Rappelons que nous avons au stator trois bobinages placés à 120° l'un de l'autre afin de former un réseau triphasé. Chacun de ces enroulements va donc en charge être parcouru par un courant alternatif qui induira dans chaque bobine un flux alternatif. Nous avons vu dans le chapitre sur la description qu'un tel réseau nous donnais un champ tournant. Ce champ tournant étant un nord et un sud mis en rotation. J'en conclu que les enroulements statoriques vont aussi être soumis à ce champ tournant statorique. Tout comme par l'influence du champ rotorique, les enroulements statorique vont être influencé par ce champ statorique et ainsi créer une Force Contre Electro Motrice. Nous avons là l'application de la loi de LENZ qui nous dit que la bobine va ainsi générer une FCEM afin de s'opposer à ce qui lui à donné naissance à savoir la FEM débitée par les mêmes enroulements. Une nouvelle fois, ce phénomène va aller dans le sens de réduire la valeur de la tension d'exploitation. Noter que toute ces chutes de tension ne sont pas en phase, il s'agit d'une somme vectorielle.

2.2.4. La réaction d'induit

La réaction d'induit est un phénomène particulier qui apparaît au sein de la machine. Ce phénomène peu être résumé en disant qu'il s'agit d'une déformation du flux sous l'influence d'un autre flux. Pour analyser correctement les conséquences réelles de la réaction d'induit, nous devons tenir compte de la charge placée sur l'alternateur. Nous analyserons donc le phénomène sur charge résistive, sur charge selfique et sur charge capacitive.

2.2.4.1. Cas d'une charge résistive

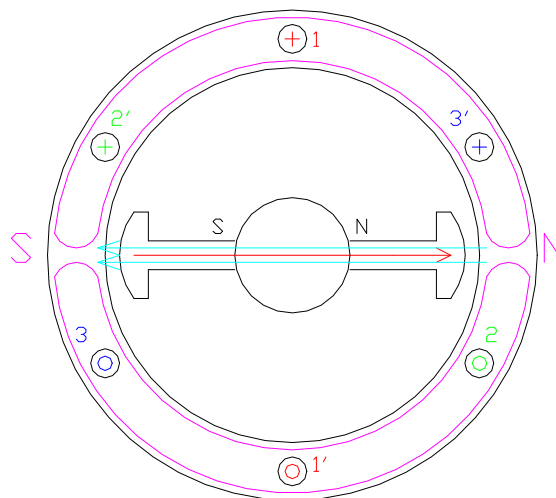
Prenons comme hypothèse que notre charge est du type résistive. Ce type de charge nous dit que le courant est donc en phase avec la tension. Si la tension est maximum, le courant est donc maximum. Hors la tension sera maximum si l'enroulement du stator est soumis au flux inducteur maximum. Nous pouvons donc résumer cette position sur le dessin ci-dessous au droit du conducteur n°1.



Je peux donc visualiser sur le dessin ci-dessus que le flux rotorique va être dévié par le flux statorique. Les conséquences seront que la FEM induite au stator qui en théorie devrait être maximum ne le sera pas et que dès lors la tension d'exploitation sera plus petite. Nous avons bien un nouveau phénomène qui va dans le sens de réduire la tension d'exploitation en jouant ici directement sur la FEM via le flux. Noter que la déformation sera d'autant plus grande que le champ statorique sera important. Comme ce dernier est lié au courant de charge, plus le courant sera grand dans les enroulements statoriques et plus la déformation sera forte avec une diminution proportionnelle de la tension d'exploitation. La réaction d'induite est transversale.

2.2.4.2. Cas d'une charge selfique

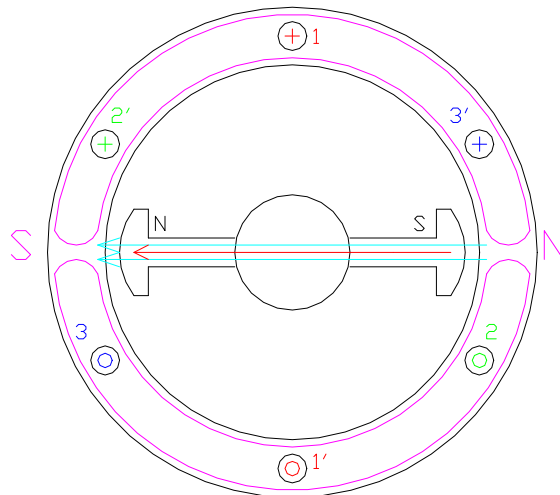
Prenons comme hypothèse que notre charge est du type selfique. Ce type de charge nous dit que le courant est donc en arrière sur la tension. Si la tension est maximum, le courant est donc minimum. Hors la tension sera minimum si l'enroulement du stator est soumis au flux inducteur minimum. Nous aurons cette situation si le pôle du rotor est en quadrature sur l'enroulement du stator. Nous pouvons donc résumer cette position sur le dessin ci-dessus au droit du conducteur n°1.



Je peux donc visualiser sur le dessin ci-dessus que le flux rotorique va être en opposition direct avec le flux statorique. Il est aisé de comprendre ici que sur une telle charge, l'influence de la réaction d'induit est la plus néfaste. Noter que la destruction du flux rotorique sera d'autant plus grande que le champ statorique sera important. Comme ce dernier est lié au courant de charge, plus le courant sera grand dans les enroulements statoriques et plus la destruction sera forte avec une diminution proportionnelle de la tension d'exploitation. La réaction d'induit est longitudinale démagnétisante.

2.2.4.3. Cas d'une charge capacitive

Prenons comme hypothèse que notre charge est du type capacitive. Ce type de charge nous dit que le courant est donc en avance sur la tension. Si la tension est maximum, le courant est donc minimum. Hors la tension sera minimum si l'enroulement du stator est soumis au flux inducteur minimum. Nous aurons cette situation si le pôle du rotor est en quadrature sur l'enroulement du stator. Nous pouvons donc résumer cette position sur le dessin ci-dessous au droit du conducteur n°1.



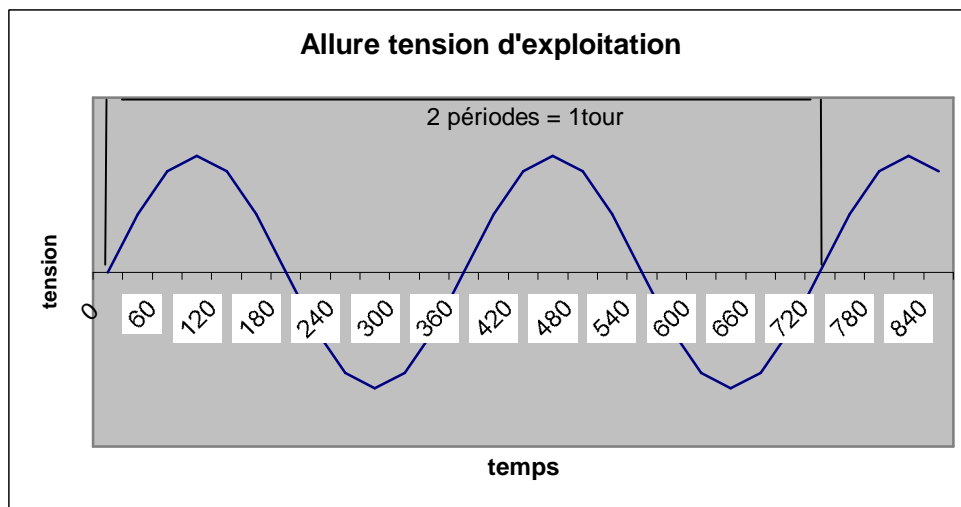
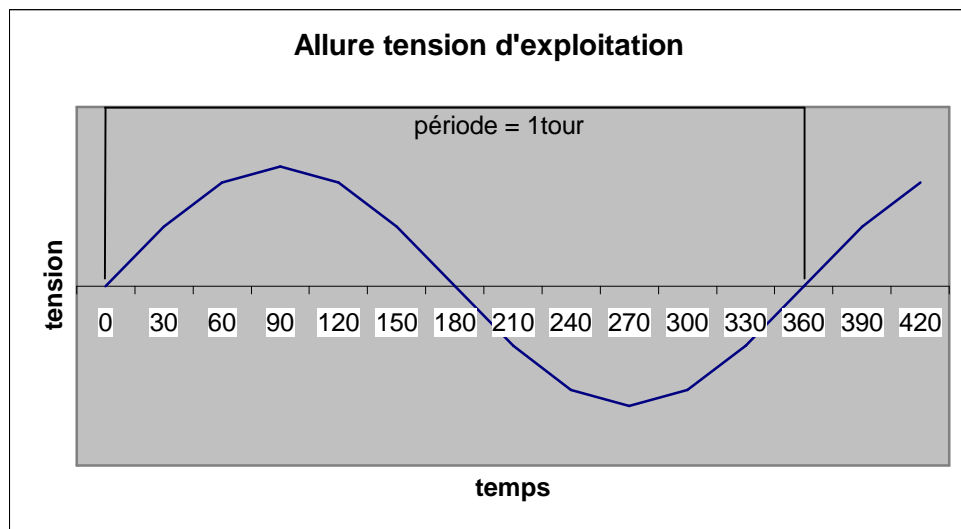
Je peux donc visualiser sur le dessin ci-dessus que le flux rotorique va être en phase avec le flux statorique. Il est aisé de comprendre ici que sur une telle charge, l'influence de la réaction d'induit est la plus intéressante mais peu aussi devenir néfaste. Noter que nous avons une amplification du flux rotorique et qu'elle sera d'autant plus grande que le champ statorique sera important. Comme ce dernier est lié au courant de charge, plus le courant sera grand dans les enroulements statoriques et plus le renforcement sera fort avec une augmentation proportionnelle de la tension d'exploitation. Rappelons que l'alternateur doit fournir une tension constante. La réaction d'induit est longitudinal magnétisante.

2.2.4.4. Cas d'une charge quelconque

Dans la pratique, l'alternateur débite sur des circuits de type R-L ou R-C et le déphasage du courant sur la FEM sera donc compris entre 0 et 90°. Que devient l'influence de la réaction d'induit ? Nous aurons dans ce cas une réaction d'induit composée d'une partie transversale et d'une partie longitudinale. En fonction du déphasage, l'on tendra plus vers l'une ou vers l'autre. Dans tous les cas, une augmentation du courant de charge exigera une adaptation du courant d'excitation afin de tenter de maintenir la tension d'exploitation constante.

3. La fréquence

Nous savons qu'il existe un lien entre la fréquence du signal sinusoïdale débité par l'alternateur et la vitesse de rotation du rotor. Je sais que la fréquence est l'image de la période et que cette dernière détermine le cycle complet du signal. Cela sous-entend que lors d'un cycle, j'aurai vu un pôle nord et un pôle sud. Je peux donc me dire que le nombre de pôle du rotor aura aussi une influence sur la fréquence. Visualisons sur les graphes suivants les allures des tensions pour une machine bipolaire et tétrapolaire.



Je peux conclure que pour quatre pôles, la vitesse de rotation de la machine peut être divisée par deux en regard à une machine de deux pôles. De cette façon, je conserve une fréquence constante.

La formule devient dès lors : $f = p.n$

- f = la fréquence en hertz
- n la vitesse de rotation en t/sec
- p le nombre de paire de pôle

Un tableau de synthèse permettra de visualiser les liens entre nombre de pôles et vitesse pour garantir une fréquence fixe.

P	N (t/min)
1	3000
2	1500
3	1000
4	750
5	600
6	500
7	428
8	375
16	188
24	125
32	94
72	42

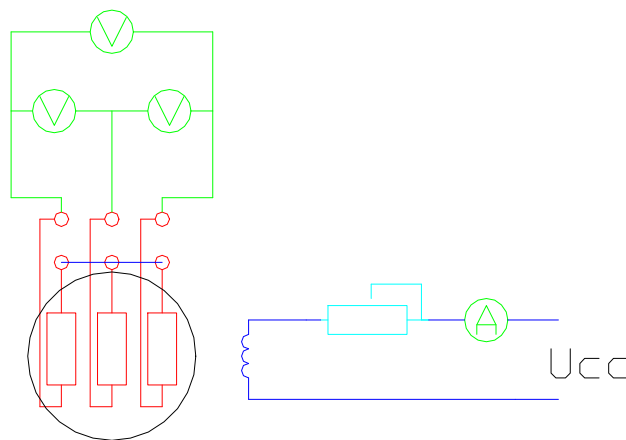
4. Etude de l'alternateur

4.1. Caractéristique interne ou essai à vide

Paramètres constants	Paramètres variables
Vitesse de rotation	Courant excitation

Cette courbe nous donnera un graphe montrant l'évolution de la FEM « E » en fonction du courant d'excitation ($E=f(i)$ ou $U=f(i)$). On pourra avancer l'hypothèse que E_v est égale à U .

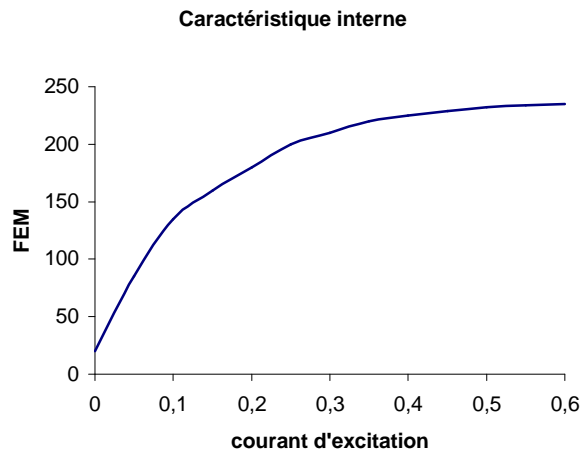
4.1.1. Schéma de câblage



4.1.2. Mode opératoire

- Câbler la machine en fonction du schéma de câblage et placer les appareils de mesure de façon judicieuse en choisissant les bons calibres en fonction des mesures à relever.
- Vérifier que le rhéostat de champ est bien placé en série avec l'inducteur et que la valeur de la résistance est maximum afin d'avoir le courant d'excitation minimum.
- Alimenter l'inducteur de la machine
- Mettre le rotor en rotation et stabiliser la vitesse pour obtenir la fréquence souhaitée.
- A l'aide du rhéostat de champs, par pallier constant relever la valeur du courant d'excitation et de la FEM. Nous diminuons la valeur de R_h pour augmenter le courant d'excitation. Cet essai se poursuit jusqu'à avoir dépasser la valeur de la tension d'exploitation souhaitée.

4.1.3. Courbe



4.1.4. Explication physique

Une première constatation est que la courbe ne commence pas à tension nulle, en effet pour une excitation nulle, la mise en rotation seul suffit à faire débiter une tension à notre alternateur. La raison en est simple, n'oublions pas que le rotor est constitué de noyaux et que ces vont être polarisé. Il est dès lors aisé de comprendre que ces noyaux conserveront toujours un petit peu de flux et que ce seul flux dit rémanent suffira à créer une tension au stator.

Si nous analysons à présent la courbe, nous remarquons deux zones. Pour l'une il s'agit d'une droite et pour l'autre une courbe. La droite nous montre bien le lien proportionnel entre le courant d'excitation, le flux rotorique et la FEM. Cette courbe est visible car nous sommes à vide, aucune perte n'est à déplorée puisque nous n'avons pas de courant de charge.

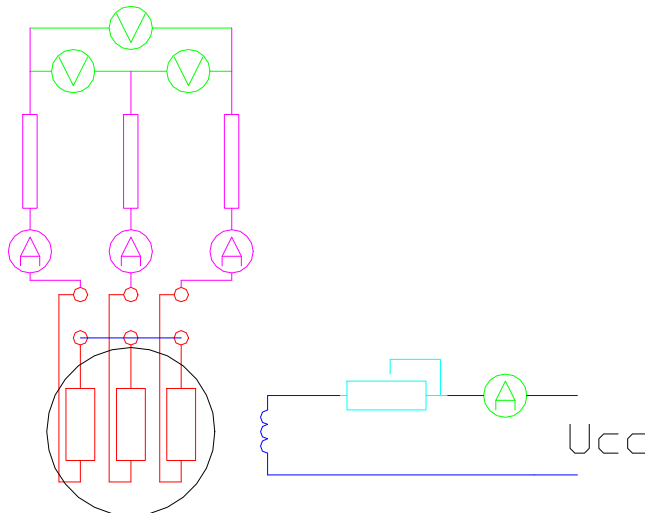
Pour la seconde partie de la courbe, nous devons constater que ce phénomène de proportionnalité n'est plus respecté. Nous sommes pourtant toujours à vide. Quelles sont les causes pouvant expliquer une telle allure. La FEM est fonction du flux inducteur, ce dernier doit augmenter puisque nous augmentons l'excitation. La raison proviens du fait que si le flux inducteur interne augmente au droit des bobines inductrices, le circuit magnétique lui offre une saturation ce qui explique que le flux induisant le stator n'est plus l'image proportionnel du flux côté rotor. Nous voyons donc clairement sur notre courbe que la FEM tend vers une valeur ce qui est bien l'image d'un circuit magnétique qui se sature avec le flux qui tend vers une valeur maximum. Je peux donc conclure sur cette courbe que pour un fonctionnement à vide, le seul phénomène qui peut venir déformer la FEM est la saturation du circuit magnétique.

4.2. Caractéristique externe

Paramètres constants	Paramètres variables
Vitesse de rotation	Courant de charge
Courant excitation	

Cette courbe nous donnera un graphe montrant l'évolution de la tension « U » en fonction du courant de charge $U=f(I)$.

4.2.1. Schéma de câblage

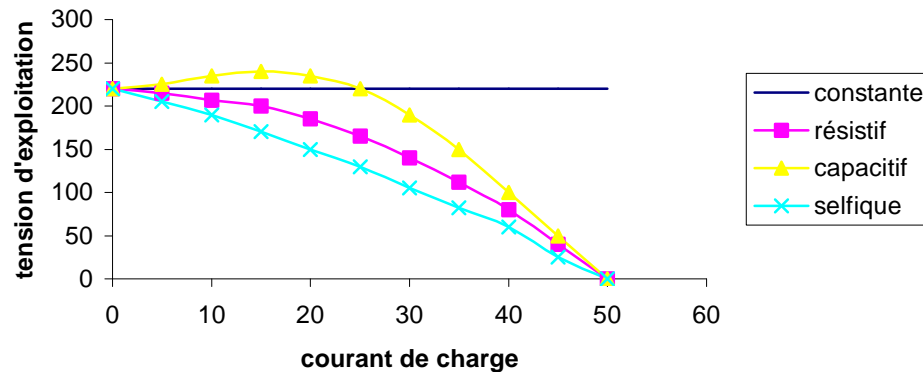


4.2.2. Mode opératoire

- Câbler la machine en fonction du schéma de câblage et placer les appareils de mesure de façon judicieuse en choisissant les bons calibres en fonction des mesures à relever.
- Vérifier que le rhéostat de champ est bien placé en série avec l'inducteur et que la valeur de la résistance est maximum afin d'avoir le courant d'excitation minimum.
- Alimenter l'inducteur de la machine
- Mettre le rotor en rotation et stabiliser la vitesse pour obtenir la fréquence souhaitée.
- A l'aide du rhéostat de champs, régler la tension d'exploitation souhaitée aux bornes des enroulements du stator.
- Par palier constant, appliquer des charges et relever la valeur du courant de charge et de la FEM. Nous chargerons la machine en veillant à ne jamais dépasser le courant maximale de la machine.

4.2.3. Courbe

Caractéristique externe



4.2.4. Explication physique

4.2.4.1. Sur charge Résistive

Nous pouvons vérifier que sur ce type de charge, la tension d'exploitation diminue lorsque la charge augmente. Nous connaissons les causes de cette chute de tension, elles sont au nombre de trois. La première est la chute de tension au droit des bobinages statoriques. La loi d'ohm nous dit que si la résistance ne bouge pas mais que le courant qui traverse cette dernière augmente, la tension est proportionnelle au courant. Nous devrions donc avoir une première chute de tension à l'image d'une droite. La seconde est la chute due à la FCEM. En effet, nous savons que les enroulements du stator sont balayés par le champs tournant statorique et que dès lors ils sont le siège d'une FCEM qui va s'opposer à ce qui a donné naissance à cette variation autrement dit la FEM. Cette variation sera directement proportionnelle au courant de charge et aura également comme image une droite. Pour la troisième chute de tension, nous devons parler de la réaction d'induit qui sera dans le cas d'une charge résistive du type transversale. Nous avons donc une déformation du flux rotorique qui sera d'autant plus important que le courant de charge sera grand. Dans ce cas, la déformation n'est plus proportionnelle mais aura l'allure d'une courbe. La somme de ces trois chutes de tension ne peut dès lors nous donner qu'une chute de tension globale définie par une autre courbe qui soustraite à la tension d'exploitation de départ nous donne une allure située entre la charge selfique et capacitive.

4.2.4.2. Sur charge selfique

L'allure de la courbe s'explique de la même façon que pour la charge résistive, nous retrouvons une chute de tension ohmique, une chute de tension liée à la FCEM et une dernière fonction de la réaction d'induit. La seule différence réside dans cette dernière. Pour une charge selfique, la réaction d'induit est du type longitudinale démagnétisante ce qui sous-entend que le flux rotorique est en opposition avec le flux statorique. Le flux rotorique résultant sera donc plus faible diminuant automatiquement la valeur de la tension d'exploitation. Noter que la réaction d'induit étant plus néfaste sur charge selfique que sur charge résistive, l'effondrement de la tension d'exploitation sera d'autant plus importante.

4.2.4.3. Sur charge capacitive

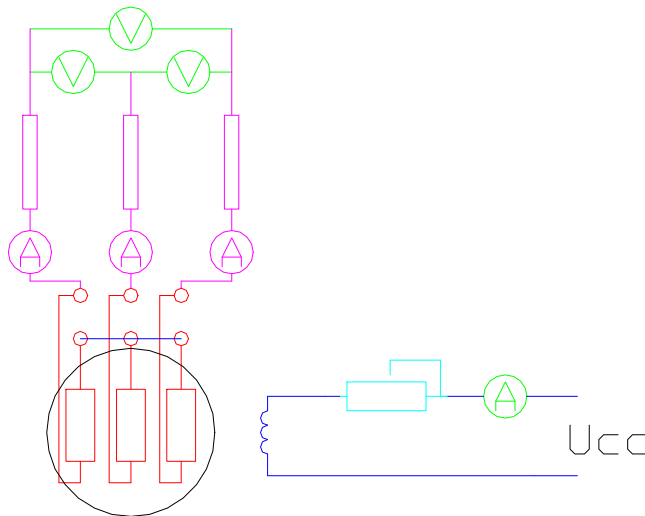
L'allure de la courbe s'explique de la même façon que pour la charge résistive ou selfique, nous retrouvons une chute de tension ohmique, une chute de tension liée à la FCEM toutes deux allant dans le sens de réduire la tension d'exploitation. La chute de tension due à la réaction d'induit complètera les deux premières. Sur base de ce qui vient d'être dit, l'augmentation de la tension d'exploitation que l'on peut voir sur la courbe ne peut être due qu'à cette réaction d'induit. Pour une charge capacitive, la réaction d'induit est du type longitudinale magnétisante ce qui sous-entend que le flux rotorique est dans le même sens que le flux statorique. Le flux rotorique résultant sera donc plus important augmentant automatiquement la valeur de la tension d'exploitation. Noter que la réaction d'induit restera toujours positive. Rappelons nous toutefois que le circuit magnétique possède ces limites dans la conduction du flux et que viendra un moment où le flux rotorique deviendra constant. A partir de ce moment, les deux autres types de chute de tension prendront le dessus pour créer une résultante qui amènera comme pour les autres charges l'effondrement de la tension d'exploitation.

4.3. Courbe de réglage

Paramètres constants	Paramètres variables
Vitesse de rotation	Courant excitation
Tension d'exploitation	

Cette courbe nous donnera un graphe montrant l'évolution du courant d'excitation « i » en fonction du courant de charge « I » $i=f(I)$.

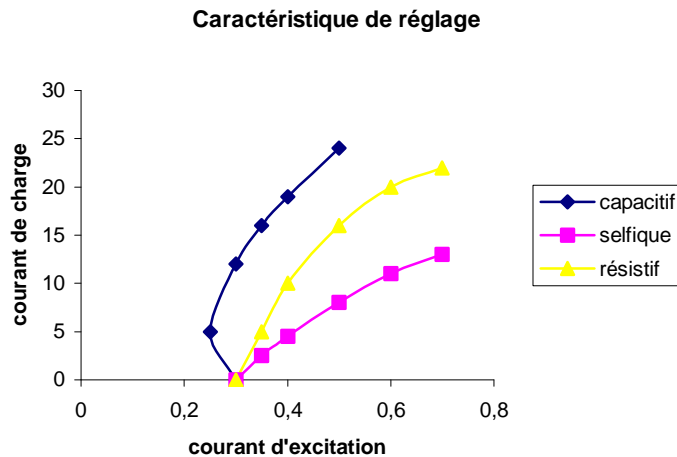
4.3.1. Schéma de câblage



4.3.2. Mode opératoire

- Câbler la machine en fonction du schéma de câblage et placer les appareils de mesure de façon judicieuse en choisissant les bons calibres en fonction des mesures à relever.
- Vérifier que le rhéostat de champ est bien placé en série avec l'inducteur et que la valeur de la résistance est maximum afin d'avoir le courant d'excitation minimum.
- Alimenter l'inducteur de la machine
- Mettre le rotor en rotation et stabiliser la vitesse pour obtenir la fréquence souhaitée.
- A l'aide du rhéostat de champs, régler la tension d'exploitation souhaitée aux bornes des enroulements du stator.
- Par palier constant, appliquer des charges et ajuster à l'aide du rhéostat de champ la valeur de la tension d'exploitation afin de la maintenir constante. Nous chargerons la machine en veillant à ne jamais dépasser le courant maximale de la machine.

4.3.3. Courbe



4.3.4. Explication physique

4.3.4.1. Sur charge Résistive

Ces courbes nous montrent que pour maintenir une tension d'exploitation constante, nous devons ajuster pour chaque variation de charge la valeur du courant d'excitation. Cette variation sera donc d'autant plus importante que la somme des différentes chutes de tension sera élevée. Nous devons donc créer plus de FEM afin de récupérer la chute de tension ohmique, la chute de tension due à la FCEM et la chute de tension due à la réaction d'induit. Comme toutes ces chutes de tension vont dans le sens de réduire la FEM, nous pouvons vérifier que nous devons toujours augmenter le courant d'excitation. Les deux premiers types de chute de tension étant proportionnelle, nous aurions pour ces dernières une augmentation proportionnelle de l'excitation en fonction du courant de charge. Pour ce qui est de l'influence de la réaction d'induit qui dans ce cas est transversale, la variation du courant d'excitation n'est pas proportionnel avec la charge. La somme des FEM supplémentaires ne nous donne donc pas une droite mais une courbe dont voyons l'image sur notre courbe dans l'évolution du courant d'excitation.

4.3.4.2. Sur charge selfique

L'allure de cette courbe est du même type que pour la charge résistive si ce n'est que l'augmentation du courant d'excitation doit être plus important pour chaque palier de charge. Nous savons déjà que les chutes de tension ohmique et due à la FCEM sont similaires et proportionnelles. Rien jusque là ne justifie une telle différence dans les courbes. Si nous tenons compte de la réaction d'induit, nous parvenons à justifier que pour une charge selfique elle est du type longitudinale démagnétisante, ce qui sous entend que plus je charge et plus je détruit le flux rotorique qui bien évidemment se répercute sur la FEM. Je dois donc compenser une chute de tension plus forte en augmentant pour de même palier de charge beaucoup plus le courant d'excitation.

4.3.4.3. Sur charge capacitive

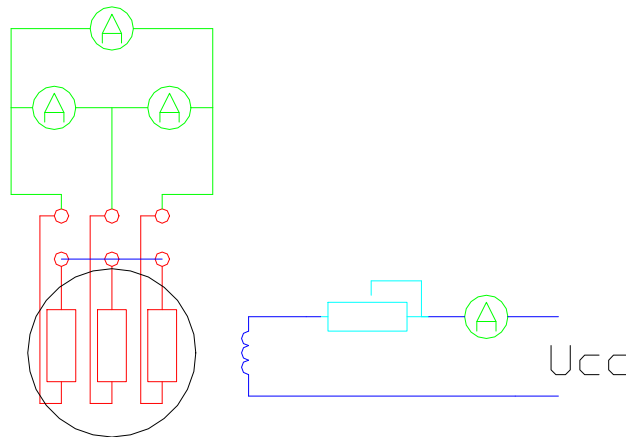
Dans ce cas, nous devons au vu de la courbe non plus augmenter le courant d'excitation mais le diminuer durant un certain pallier de charge. Ce phénomène est lui aussi lié à la réaction d'induit, car n'oublions pas que dans ce cas il s'agit du type longitudinal magnétisant. Nous avons donc augmentation du flux rotorique en fonction de la charge jusque la saturation du circuit magnétique. Cette augmentation nous laisse apparaître une augmentation de la FEM qui se traduit par une tension d'exploitation trop élevée que l'on doit réduire en diminuant l'excitation. Une fois la saturation atteinte, les deux autres chutes de tension prennent le dessus et nous avons une diminution de la tension d'exploitation que nous devons compenser en augmentant cette fois le courant d'excitation.

4.4. Essai en court-circuit

Paramètres constants	Paramètres variables
Vitesse de rotation	Courant excitation

Cette courbe donnera un graphe montrant l'évolution du courant d'excitation « i » en fonction du courant de court-circuit « I_{cc} » $i=f(I_{cc})$.

4.4.1. Schéma de câblage

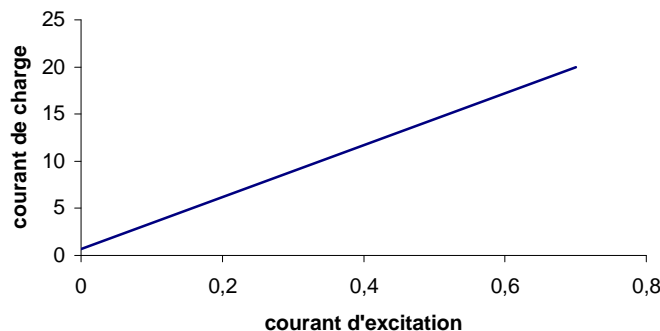


4.4.2. Mode opératoire

- Câbler la machine en fonction du schéma de câblage et placer les appareils de mesure de façon judicieuse en choisissant les bons calibres en fonction des mesures à relever.
- Vérifier que le rhéostat de champ est bien placé en série avec l'inducteur et que la valeur de la résistance est maximum afin d'avoir le courant d'excitation minimum.
- Alimenter l'inducteur de la machine
- Mettre le rotor en rotation et stabiliser la vitesse pour obtenir la fréquence souhaitée.
- A l'aide du rhéostat de champs, régler le courant statorique à sa valeur nominale.
- Par palier constant, modifier le courant d'excitation à l'aide du rhéostat de champ et relever le courant de charge équivalent. Nous chargerons la machine en veillant à ne jamais dépasser le courant maximale de la machine.

4.4.3. Courbe

Caractéristique de court-circuit



4.4.4. Explication physique

Etant donné que le courant de court-circuit est directement lié à la FEM puisque la tension est nulle. Dès lors comme la FEM est proportionnelle au courant d'excitation, je peux déduire que le courant de charge est proportionnel au courant d'excitation donc nous retrouvons bien une droite.

5. Le diagramme de FRESNEL

Ce diagramme permet de mettre sur un même graphe l'ensemble des caractéristiques de la machine synchrone.

Nous prendrons comme hypothèse que le circuit magnétique de l'alternateur n'est pas saturé. Selon cette hypothèse, nous pouvons dire que le flux est proportionnel au courant qui le produit. Dans la même idée, on peut conclure que l'allure de la tension d'exploitation est sinusoïdale.

Sachant que le flux inducteur est engendré par le courant d'excitation,

$\phi_{\text{inducteur}} = \frac{N \cdot i_{\text{inducteur}}}{l} \cdot \mu \cdot S$. L'équation nous exprime que le courant et le flux sont en phase

puisque les autres termes sont des constantes liées aux caractéristiques constitutive de la machine.

Comme le flux inducteur engendre au sein des enroulements du stator une FEM

$E = 2,22 \cdot N \cdot f \cdot \phi_M \cdot \sin(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2})$ je peux en déduire que cette dernière est déphasée de 90° en

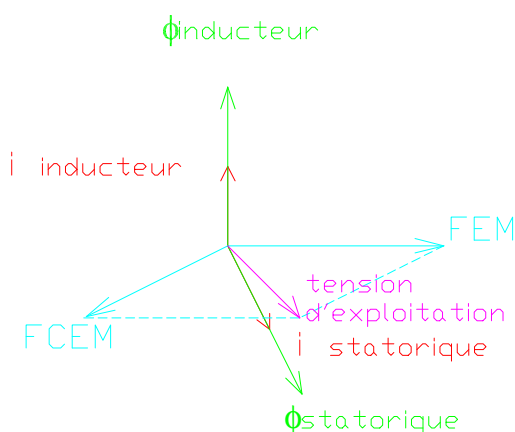
arrière sur le flux. Je sais que de part sa constitution, la machine est inductive ce qui me permet de placer le courant statorique en arrière sur la FEM. Rappelons que la réactance de l'impédance n'est pas négligeable. Comme ce courant en traversant les enroulements

statoriques y induit un flux statorique, $\phi_{\text{statorique}} = \frac{N \cdot i_{\text{statorique}}}{l} \cdot \mu \cdot S$

Ce dernier flux sera donc comme le montre l'équation en phase avec son courant. Ce flux ainsi créé va en vertu de la loi de LENZ s'opposé à ce qui lui à donné naissance et va donc créer une FCEM d'équation $E' = 2,22 \cdot N \cdot f \cdot \phi_{M\text{statorique}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2})$. Cette équation nous donne

le déphasage entre la FCEM et le flux statorique soit 90° en arrière. Je peux donc déduire la tension d'exploitation en réalisant la somme vectorielle de la FEM et de la FCEM.

Le diagramme ci-dessous illustre l'ensemble de ces données.



6. Le bilan énergétique

6.1. La puissance utile

La puissance utile vaut : en monophasé : $P=U.I.\cos\varphi$

En triphasé : $P=\sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$

- U= tension composée
- I = courant composé
- $\cos\varphi$ = déphasage entre courant simple et tension simple

6.2. Les pertes constantes

Lorsque l'on parle des pertes d'un alternateur, on mentionne souvent les pertes dites « constantes ». Elles sont constituées de pertes mécaniques et magnétiques.

En réalité, ces pertes varient en fonction de la vitesse et de l'induction. En pratique étant donné que l'on fonctionne à vitesse constante pour garantir une fréquence constante et à induction constante on pourra considérer ces pertes comme constante.

Ces pertes sont mesurées pendant un essai à vide. Lors de cet essai, la vitesse de la machine est égale à la vitesse nominale afin de débiter la tension d'exploitation qui sera dans ce cas égale à la FEM à vide. La puissance mesurée représentera les pertes fer.

6.3. Les pertes par effet joule

Dans le rotor elles valent $p_{j_{ex}}=u_{ex}.i_{ex}$.

Dans le stator elles valent pour un couplage étoile $p_{j_{st}}=3.R.P^2$ et pour un couplage triangle $p_{j_{st}}=3.R.\left(\frac{I}{\sqrt{3}}\right)^2$.

Noter que la plupart des machines ayant leur stator couplé en étoile, la valeur mesurée entre phase représente la résistance de deux enroulements en série. Nous devons donc diviser cette dernière pour obtenir la valeur d'un seul enroulement.

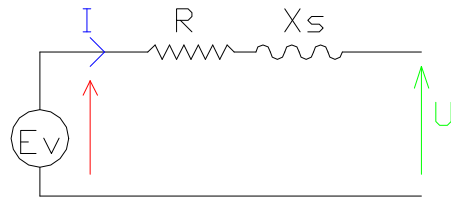
6.4. Les pertes supplémentaires

Les pertes supplémentaires sont essentiellement constituées par les pertes par courant de FOUCAULT dans les parties métalliques de la machine. Les pertes supplémentaires ne sont pas calculables mais peuvent être mesurées au cours d'un essai en court-circuit.

6.5. Le rendement

Son expression est $\eta=\frac{P_{ut}}{P_{ut}+pertes}$

7. Le schéma équivalent de l'alternateur



8. L'équation de fonctionnement de l'alternateur

$$\bar{U} = \bar{E} - R\bar{I} - X_s\bar{I}$$

9. Détermination de la réactance synchrone

Pour trouver cette valeur « X_s », nous devons réaliser deux essais, un essai à vide et un essai en court-circuit. Comme nous prenons comme hypothèse que le circuit magnétique est non saturé, je peux dire que la caractéristique à vide est une droite. La caractéristique elle étant également une droite. Noter que cette méthode de calcul est approximative et est une méthode par excès.

Je sais que en court-circuit, la tension d'exploitation est nulle donc $\bar{E}_v = Z\bar{I}_{cc}$. Connaissant la valeur de I_{cc} qui dans notre cas sera égale à I_n je peux trouver sur la caractéristique en court circuit la valeur du courant d'excitation correspondant. Ensuite il me suffit de reporter cette dernière valeur de courant sur la courbe à vide et dans déduire ainsi la valeur de E_v .

Je peux donc écrire que $Z = \frac{\bar{E}_v}{I_{cc}} = R + jX_s$ et si on néglige R la réactance synchrone devient

$$X_s = \frac{\bar{E}_v}{I_{cc}}$$

Noter que si l'expression obtenue est illusoire, cela peut être dû au fait que l'approximation en une droite de la courbe à vide est à proscrire. Ne perdons pas de vue que la plupart des machines réelles ont leur point de fonctionnement dans le coude de saturation. L'approximation est donc très forte. Vous pouvez pallier à cette erreur en utilisant la formule de FROLICH qui permettra de déduire une équation qui nous donnera une courbe à vide beaucoup plus proche que l'approximation d'une droite. La méthode restera la même pour la recherche de E_v .

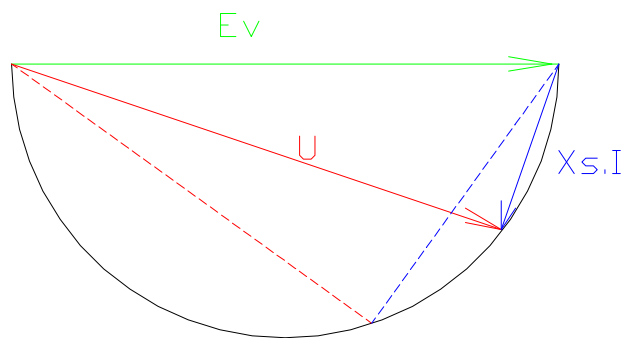
10. L'alternateur dans l'hypothèse de FRESNEL

10.1. Hypothèse

Dans le cas de cette théorie, les chutes de tension ohmiques sont négligées. L'équation se ramène à $\bar{U} = \bar{E} - \bar{E}_i$ avec $\bar{E}_i = X_s \bar{I} = j \cdot \omega \cdot L \bar{I}$. Le vecteur E_i étant la FCEM d'auto induction.

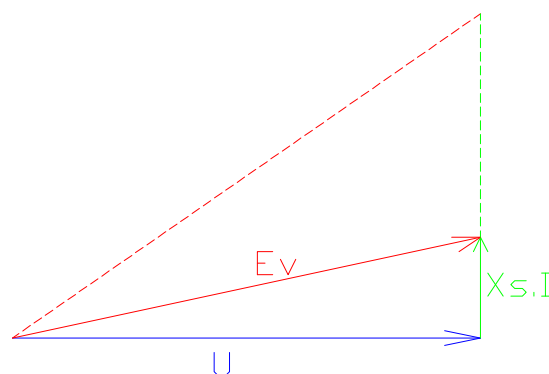
Dans cette théorie, le circuit magnétique sera considéré non saturé.

10.2. Comment évolue U si I augmente et i = constant ?



Le graphique ci-dessus nous montre comment évolue la tension d'exploitation lorsque la charge augmente. La tension d'exploitation diminue car nous constatons que si $I_1 < I_2$, $U_2 < U_1$. Comme l'excitation est restée inchangée, la FEM est restée la même. Le lieu géométrique de l'extrémité du vecteur U est une circonférence de diamètre Ev. Je signale encore que ce diagramme correspond à un fonctionnement sur charge résistive. (Cette hypothèse se vérifie de part le fait que le vecteur $X_s \cdot I$ est déphasé de 90° en arrière sur U) Le graphe nous montre clairement sur ce diagramme que plus la charge augmente et plus la chute de tension inductive augmente. Noter également que le déphasage entre la FEM et cette chute de tension évolue également ce qui correspond bien à une déformation de plus en plus forte du flux inducteur.

10.3. Comment évolue Ev si I augmente et U = constant ?

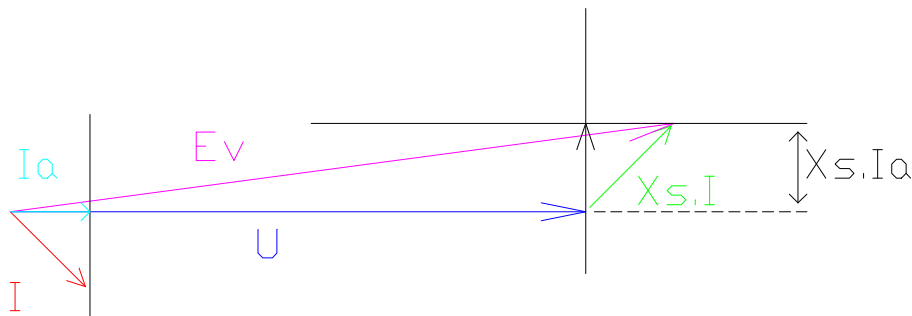


Ayant le graphe ci-dessus qui me permet pour toute nouvelle valeur de I de déterminer la valeur de E_v nécessaire pour me garantir une tension d'exploitation constante, je peux reporter la valeur de E_v trouvée sur la caractéristique interne et en déduire la valeur de l'excitation. Certains systèmes automatisés peuvent travailler de la sorte. Notez que l'on retrouve à nouveau une évolution de la phase entre E_v et $X_s \cdot I$.

10.4. Comment fournir une tension à puissance active constante ?

Vous savez que le particulier possède chez lui un compteur d'énergie qui comptabilise les KWH. Nous avons donc à faire à une mesure de puissance active. Il est donc intéressant d'exploiter notre machine à puissance active constante tout en garantissant une tension d'exploitation fixe.

Analysons comment nous pouvons garantir ce fonctionnement sur charge partiellement selfique.



Nous voyons sur le graphe ci-dessus que $X_s \cdot I_a$ représente la puissance active débitée par la machine. Rappelons que la puissance active est égale au produit de la tension par le courant actif. Dans notre construction, nous avons tracé le vecteur I_a correspondant à la partie active de I et nous avons projeté ce dernier afin d'obtenir le vecteur $X_s \cdot I_a$. Il est clair que la valeur mesurée sur le graphe est proportionnelle à la puissance, un facteur d'échelle devra être appliqué pour obtenir des W. Si je souhaite garder la puissance active constante, il me suffit de garantir la constance du vecteur $X_s \cdot I_a$. Ce graphe nous montre donc bien que si nous voulons augmenter la charge tout en maintenant la puissance active constante, nous devons augmenter la valeur de la FEM E_v . Cela sera réalisé en augmentant le courant d'excitation. Notez que dans ce cas, nous modifions également le déphasage du courant de charge ce qui nécessite que la charge devienne plus selfique.

Que se passerait-il sur charge partiellement capacitive ?

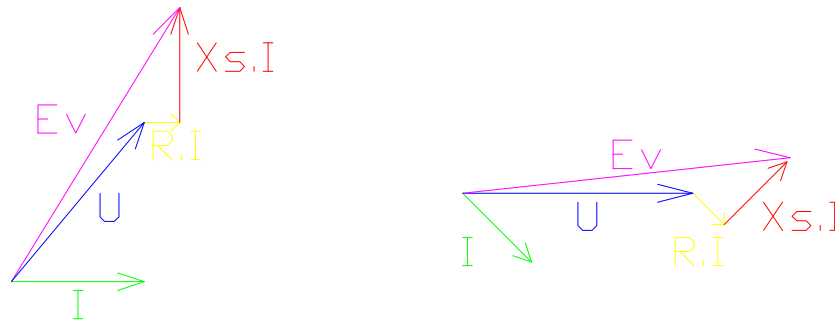
11. L'alternateur dans l'hypothèse de BEHN-ESCHENBURG

11.1. Hypothèse

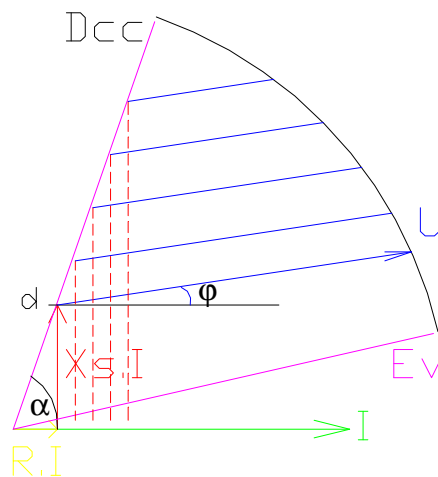
Dans le cas de cette théorie, aucune des chutes de tension ne sont négligées.

L'équation est donc $\bar{U} = \bar{E} - R\bar{I} - j.\omega.L\bar{I}$. Je signale que la valeur de $R.I$ a été exagérée pour la visibilité du diagramme.

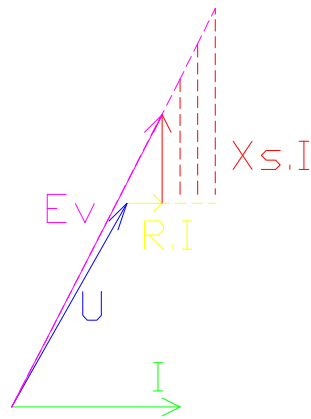
Le circuit magnétique sera toujours considéré comme non saturé.



11.2. Comment évolue U pour i et α constants ?



Comme i est constant, cela sous entend que E_v doit aussi rester constant et que dès lors le vecteur E_v va définir un arc de cercle. Nous voyons que la tension d'exploitation diminue pour se ramener au point D_{cc} à une valeur nulle qui correspond au court circuit. Noter encore que les caractéristiques du triangle former par $R.I$, $X_s.I$ et $Z.I$ reste constante et que l'angle α ne varie donc pas. Ayant admis cette constatation, on peut conclure que le lieu géométrique de l'extrémité de $X_s.I$ sera une droite. Pour toute charge, nous trouverons donc un point d qui sera l'origine du vecteur U . Une nouvelle fois, nous pouvons constater que à excitation nulle, la tension d'exploitation s'effondre sous la charge pour tendre vers le point de court circuit.



12. La taille des alternateurs

En règle générale, on peut classer les alternateurs en deux grandes familles. Les turbo alternateurs qui possèdent une grande vitesse de rotation et les alternateurs qui possèdent une vitesse de rotation faible.

Les turbo alternateurs ont des vitesses de l'ordre de 3000t/min, voir parfois 1500t/min. Vous comprendrez dès lors que les masses mises en mouvement doivent être les plus compact possible pour éviter les problèmes du au forces centrifuges. Le rotor est dans ce cas lisse, de façon à limiter la résistance dans l'air et comporte les encoches dans lesquelles seront placées les conducteurs d'excitation. Dans le même ordre d'idée, on comprendra également que le volume de la machine sera plutôt réalisé dans le sens de la longueur plutôt que dans le sens de la hauteur.

Les alternateurs ont des vitesses inférieures à 1500t/min, de se fait on peut envisager de mettre en œuvre des machines ayant des diamètre plus important. Le rotor est le plus souvent à pôle saillant mais peut être à pôle lisse également.

Nous pouvons expliquer la taille d'un alternateur en regard à un turbo alternateur de part le fait que la FEM est produite par les enroulements statoriques. Pour les machines bipolaires, le nombre de ses enroulements est de trois alors que pour une machine à 12 pôles, le nombre d'enroulement statorique sera de 18. Ces dernières sont décalée de 20° ce qui permet de justifier la place nécessaire pour mettre en œuvre une telle combinaison. Dans le cas d'une machine multipôle, le couplage des bobines statoriques est réalisé en interne par couplage en série des bobines. Nous n'aurons donc pas 36 bornes.

13. Mise en parallèle d'alternateur

13.1. Généralités

Coupler un alternateur sur un réseau signifie simplement que l'on couple deux alternateurs en parallèle. En effet, comme le réseau est lui même alimenté par un alternateur, dans une centrale, et que nous, nous envisageons également d'alimenter le réseau nous réalisons bien une mise en parallèle. Il va de soit que nous devons respecter les grandeurs existantes du réseau comme la fréquence et la valeur de la tension. Il est illusoire de penser que vous parviendrez à modifier ces dernières. Pour ajuster la fréquence il nous suffira de jouer sur la vitesse du moteur d'entraînement et pour la tension il nous faudra jouer sur la valeur du courant d'excitation.

13.2. Conditions de couplage

Pour coupler un alternateur sur un réseau ou même sur un autre alternateur, il faut vérifier les points suivants :

13.2.1. La même fréquence

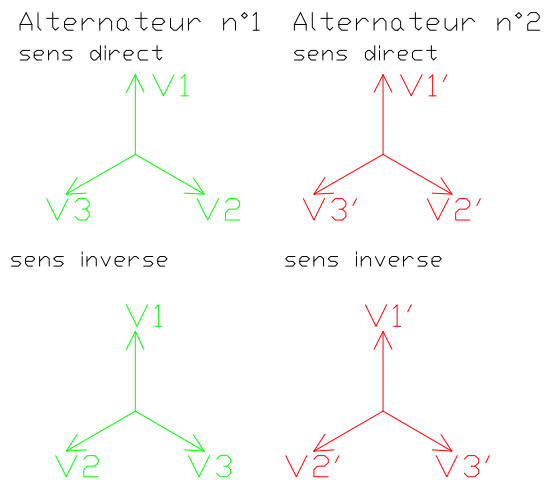
Nous avons vu dans la théorie de l'alternateur synchrone que la fréquence de la tension fournie par un alternateur synchrone dépendait du nombre de variation de flux en fonction du temps. Cette dernière est fonction de la vitesse du rotor donc de la vitesse du moteur d'entraînement. Nous devons donc régler la vitesse de rotation.

13.2.2. La même tension

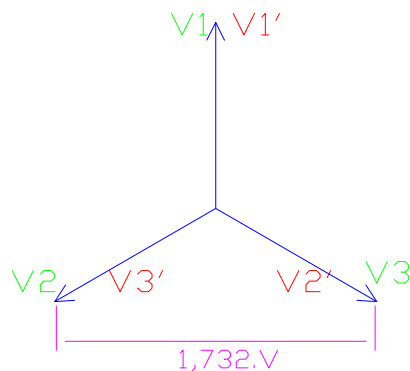
Nous savons que pour qu'un alternateur synchrone délivre une tension, nous devons impérativement vérifier deux choses, la présence d'un flux d'une part et une variation de ce flux d'autre part. Pour ce dernier point nous en avons parlé ci-dessus. Pour ce qui est de la valeur du flux, nous savons qu'il est fonction du courant d'excitation. Le flux lui va induire les bobinages statoriques qui seront le siège de la FEM. Comme la tension est aux chutes de tension près égale à la FEM, je peux dire que la tension sera réglée par ce même courant d'excitation.

13.2.3. La même succession des phases

Soit les deux alternateurs représentés ci-dessous,



Il est simple de comprendre que si deux alternateurs possèdent la même fréquence et la même tension, que les vecteurs V_1 et V_1' sont identiques et qu'ils tournent à la même vitesse. Le potentiel entre V_1 et V_1' est donc nul. Par contre, en fonction de l'ordre de succession des phases nous pourrions avoir des potentiels différents sur les autres phases. Voyons l'exemple suivant :



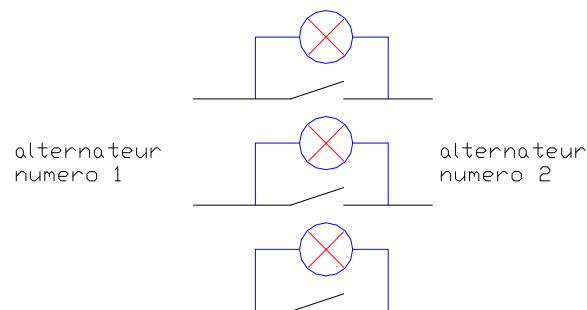
Dans cette configuration, on remarque que le potentiel entre V_2 et V_2' est maximum ce qui montre bien que dans de telle condition nous ne pourrions en aucun cas réaliser la mise en parallèle car nous aurons un flash au commutateur. Nous devons donc réaliser la succession des phases de telle sorte que en tout moment, V_1 soit sur V_1' , V_2 soit sur V_2' et V_3 soit sur V_3' . Cette mise en phase peut être réalisée soit en inversant le sens de rotation du moteur d'entraînement d'un des alternateur soit en inversant deux phases sur l'un des alternateurs.

13.3. En pratique

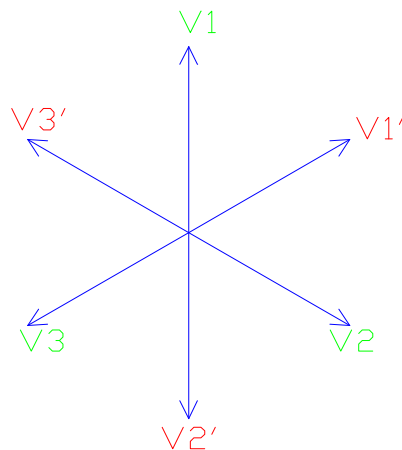
En pratique, la fréquence est vérifiée à l'aide d'un fréquencemètre et la tension à l'aide d'un voltmètre. La succession des phases elle est vérifiée à l'aide de feux lumineux.

Précisons encore que dans la pratique nous considérerons que le réseau de vecteurs de l'alternateur principal sera fixe et que c'est le réseau de vecteurs de l'alternateur à accouplé qui tourne. Vous pourriez réagir et dire que si les fréquences sont identiques, les réseaux ne devraient pas se mettre en rotation l'un par rapport à l'autre. Il ne faut pas oublier que en pratique il vous sera impossible de garantir une fréquence identique, rien que par le fait que la fréquence du réseau peut avoir une légère oscillation et que de plus les appareils de mesure que vous allez utiliser on eux aussi leur précision.

13.3.1. Les feux clignotants



Dans ce type de fonctionnement, je dois obtenir un effet de battement des trois lampes. Cela sous-entend que chaque lampe évolue de la même façon. Pour parvenir à cela, nous devons avoir la même évolution des tensions entre phases. Voyons sur graphes vectoriels ce que nous avons.

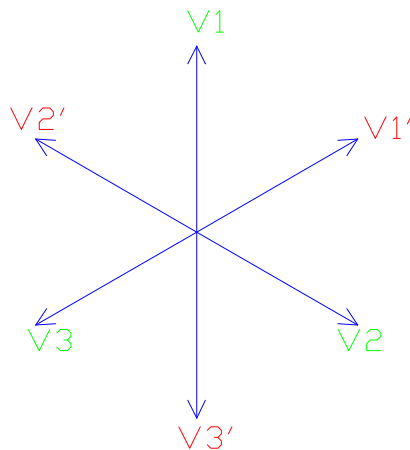


Si le réseau « ' » tourne dans le sens horlogique par rapport au premier qui lui reste fixe, nous remarquerons que les potentiels $V1-V1'$, $V2-V2'$ et $V3-V3'$ vont évoluer de la même façon, pour passer par un potentiel maximum en opposition et un potentiel nul en phase. Nous obtiendrons donc bien des feux clignotants.

Si nous avons une inversion dans la succession des phases, nous obtiendrions le schéma suivant. Il nous montre que les potentiels $V1-V1'$, $V2 - V2'$ et $V3 - V3'$ n'évolue pas de la même façon.

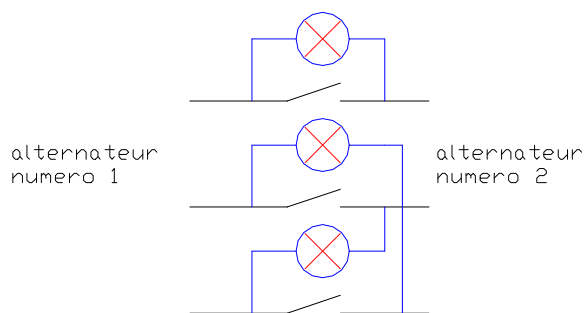
En effet, il sera impossible d'obtenir deux potentiels identiques ce qui sous-entend que les lampes n'éclaireront pas de façon identique. Comme les potentiels évoluent tous de façon différentes nous visualiserons cela par des feux tournants.

Dans cette situation, le couplage ne pourra être réalisé.

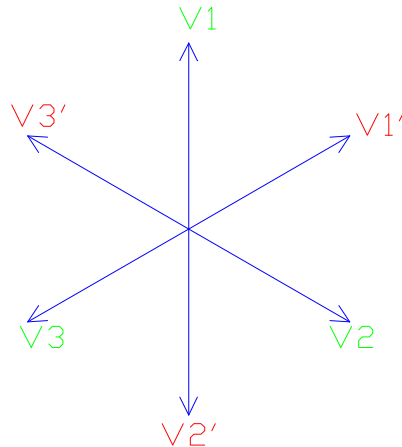


Lorsque la succession est correcte, le couplage sera réalisé lorsque le potentiel sera le plus faible au droit des contacts de l'interrupteur de commutation. J'attire encore l'attention sur le fait qu'une lampe éteinte ne veut pas dire que le potentiel est nul. Vous confirmerez cette valeur en plaçant un voltmètre en parallèle sur l'une des lampes.

13.3.2. Les feux tournants

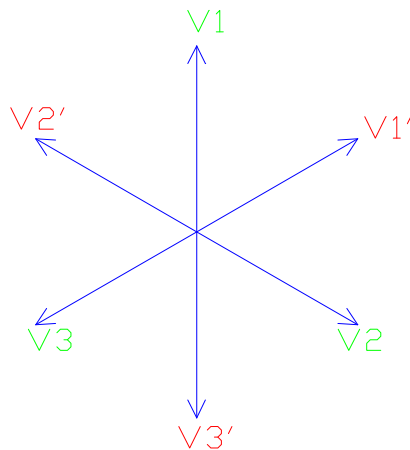


Nous pouvons observer que nous appliquons aux bornes des lampes les potentiels $V1 - V1'$, $V2 - V3'$ et $V3 - V2'$. Voyons ce que cela nous donne sur le graphe vectoriel.



On voit sur ce graphe que les potentiels aux bornes de mes lampes ne seront jamais identiques et qu'ils vont évoluer d'une valeur maximum à une valeur minimum les uns après les autres. Nous avons donc bien des feux tournant. Dans cette disposition, le couplage pourra avoir lieu et nous prendrons pour réaliser le couplage la tension aux bornes des phases 1 et 1' comme référence potentiel zéro.

Voyons ce que nous aurions si la succession des phases n'est pas correcte.



Dans ce cas, les potentiels évoluent de la même façon nous avons donc des feux clignotants. Nous ne pourrons réaliser le couplage dans ces conditions.

1.1. Mise en charge

1.1.1. Mise en charge active

Rappelez-vous que la puissance active d'un alternateur est fournie par le moteur d'entraînement. Nous devons donc pour charger notre alternateur afin qu'il débite de la puissance active augmenter la puissance mécanique de notre alternateur et diminuer la puissance mécanique de l'alternateur principal.

Lorsque l'on a deux alternateurs à coupler sur un même site, nous vérifierons les puissances actives débitées par chaque alternateur afin de vérifier lors du réglage que chaque alternateur débite la même puissance active.

Noter que cette dernière condition sera possible si la puissance des alternateurs le permet.

Au laboratoire, il vous sera impossible de fournir la moitié de la puissance active fournie par la centrale de tihange. Dans le cas de deux alternateurs identiques, il va de soit que cet égalité de puissance exige l'égalité des courants et des facteurs de puissance. Cette mise en œuvre à pour but de limiter ainsi dans chaque alternateur les pertes joules.

1.1.2. Mise en charge réactive

Rappelez-vous que la puissance réactive d'un alternateur est fournie par l'excitation. Nous devons donc pour charger notre alternateur afin qu'il débite de la puissance réactive augmenter l'excitation de notre alternateur et diminuer l'excitation de l'alternateur principal. Lorsque l'on a deux alternateurs à coupler sur un même site, nous vérifierons les puissances réactives débitées par chaque alternateur afin de vérifier lors du réglage que chaque alternateur débite la même puissance réactive.

1.2. Conclusion

Pour répartir la charge d'un réseau entre deux alternateurs, on agit sur les moteurs d'entraînement pour la répartition de la puissance active et sur l'excitation pour la répartition de la puissance réactive.

Je signale également que si une variation brusque de charge apparaît et qu'un des alternateurs voit sa tension s'effondrée parce qu'il est incapable de reprendre cette charge, il se peut que ce dernier se mette à fonctionner en moteur synchrone. Le risque ici est bien entendu de casser l'accouplement entre l'alternateur et le moteur d'entraînement mais aussi de surcharger le second alternateur.

14. Exercices

1° Un alternateur tétrapolaire tourne à 1500t/min. Quelle est la fréquence du courant produit ? Quel devrait être la vitesse du moteur d'entraînement pour obtenir une fréquence de 60Hz.

$$\text{Calcul de } f : f = p \cdot n = 2 \cdot \frac{1500}{60} = 50 \text{ Hz}$$

$$\text{Calcul de } n : n = \frac{f}{p} = \frac{60}{2} = 30 \text{ t/sec} \rightarrow 1800 \text{ t/min}$$

2° Un alternateur tétrapolaire tournant à 1500t/min a sous chaque pôle un flux de 0,036 Wb et comporte 72 conducteurs actifs. Quelle force électromotrice produit-il ? (K= 1,9).

$$\text{Calcul de } E : E = K \cdot N \cdot f \cdot \phi = 1,9 \cdot \frac{72}{2} \cdot 0,036 \cdot 50 = 123 \text{ V}$$

3° Un alternateur triphasé fournit une tension à une fréquence de 50Hz. Le flux sous un pôle est de 0,016Wb et l'induit comporte 420 conducteurs. Calculer la FEM produite dans les enroulements si K=2,15 et les tensions entre phase et neutre et entre phase.

$$\text{Calcul de } E : E = K \cdot N \cdot f \cdot \phi = 2,15 \cdot \frac{420}{2} \cdot 50 \cdot 0,016 = 361 \text{ V}$$

$$\text{Calcul de } V : V = E = 361 \text{ V}$$

$$\text{Calcul de } U : U = \sqrt{3} \cdot V = \sqrt{3} \cdot 361 = 623 \text{ V}$$

4° Un alternateur triphasé de 24 pôles porte 576 conducteurs. Le flux utile par pôle est de 0,2 Wb et la fréquence de la FEM produite 50Hz. Sachant que le coefficient de Kapp de la machine est de 2,2. Calculer la vitesse de rotation du rotor, la FEM produite, les tensions disponible entre phases et neutre et entres phases. La puissance apparente de l'alternateur s'il peut débiter un courant de 300A dans un fil de phase.

$$\text{Calcul de } n : n = \frac{f}{p} = \frac{50}{12} = 4,166 \text{ t/sec} \rightarrow 250 \text{ t/min}$$

$$\text{Calcul de } E : E = K \cdot N \cdot f \cdot \phi = 2,2 \cdot \frac{576}{2} \cdot 50 \cdot 0,2 = 6336 \text{ V}$$

$$\text{Calcul de } V : V = E = 6336 \text{ V}$$

$$\text{Calcul de } U : U = \sqrt{3} \cdot V = \sqrt{3} \cdot 6336 = 10974 \text{ V}$$

$$\text{Calcul de } S : S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 10974 \cdot 300 = 5702400 \text{ W}$$

1° Un alternateur triphasé débite 650A sous 1,1KV.

L'ensemble des pertes constantes et par effet joule au rotor sera supposé invariable et égal à 25Kw.

La résistance mesurée entre les phases au stator est $R' = 0,08\text{ohm}$.

Calculer, pour un facteur de puissance de 0,8 et ensuite 0,6, charge inductive dans les deux cas :

- les puissances active et réactive fournies par l'alternateur.
- Le rendement.

2° On donne les relevés de la caractéristique en charge d'un alternateur monophasé dont le $\cos \phi$ est de 0,85.

La résistance d'une phase du stator est $R = 0,1 \text{ ohm}$ et l'ensemble des autres pertes, supposées invariables vaut 550w.

Déterminer le rendement pour les valeurs de 10,20 et 30A du courant.

Les valeurs de la caractéristique externe sont :

I(A) :	0	10	20	30	40	50
U(V) :	550	522	480	415	330	220

3° Un alternateur monophasé fournit un courant de 50A sous 240V et un $\cos \phi$ de 0,8 (charge inductive).

Le rotor consomme 8A sous 35V, les pertes constantes sont de 450w et la résistance du stator est de $R = 0,2\text{ohm}$.

Calculer la puissance utile et le rendement de l'alternateur.

Sachant que pour la même excitation, on a relevé : $E_v = 280\text{V}$ et $I_{cc} = 40\text{A}$, calculer la réactance et l'impédance interne de l'alternateur.

4° Un alternateur triphasé fournit 400A avec un $\cos \phi$ de 0,9 (charge inductive).

La résistance mesurée entre deux phases du stator est $R' = 0,03 \text{ ohm}$ et l'ensemble des pertes constantes et par effet joule au rotor est de 6Kw.

Calculer la puissance utile de l'alternateur et son rendement.

Sachant que, pour la même excitation, on a relevé $E_v = 510\text{V}$ et $I_{cc} = 300\text{A}$, calculer la réactance synchrone et déterminer la FEM E_v qui correspond à un débit de 400A sous 420V (tracer le diagramme vectoriel).

5° Un alternateur triphasé étoile délivre une tension composée de 660V 50Hz avec un $I = 500\text{A}$ sous un $\cos \phi$ de 0,8.

Calculer les puissances apparente, active et réactive.

Sachant que le stator comporte 372 conducteurs et que le flux sous un pôle est de 0,027 Wb, calculer la FEM composée.

6° Un alternateur triphasé 12 pôles comporte 600 conducteurs au stator ; le flux sous un pôle est de 0,015 Wb.

Le débit étant de 80A sous un $\cos \phi$ de 0,85 pour 50Hz, calculer :

- la vitesse de rotation n ,
- la FEM
- les différentes puissances si on considère que $U = E$.

- 1° Calculer en tours par minute la vitesse de rotation d'un alternateur produisant une FEM de fréquence 50Hz s'il a 2,8,24 ou 48 pôles.
- 2° Un moteur thermique fonctionne d'une façon satisfaisante entre 1200 et 1600 t/min. Quel doit être le nombre de pôles de l'alternateur à lui accoupler pour que ce groupe fournisse une FEM de fréquence égale à 50Hz et donner la vitesse qu'il faudra maintenir.
- 3° Un moteur thermique fonctionne d'une façon satisfaisante entre 600 et 800 t/min. Quel doit être le nombre de pôles de l'alternateur à lui accoupler pour que ce groupe fournisse une FEM de fréquence égale à 50Hz et donner la vitesse qu'il faudra maintenir.
- 4° Un alternateur triphasé a 12 pôles et 2 encoches par pôle et par phase. Chaque encoche contient 4 conducteurs actifs. Le flux par pôle est 0,018Wb et le coefficient de Kapp de 2,12. La fréquence de la FEM produite est de 60Hz. Calculer la vitesse de rotation du groupe. Si l'ensemble des conducteurs actifs d'une phase sont montés en série quelle est la FEM par phase si les trois enroulements sont couplés en étoile, quelle est la tension entre fils de phase à vide et la fréquence de cette dernière ?
- 5° Un groupe dont la puissance maximale est de 1000Kw est muni d'un régulateur non compensé dont le statisme est de 0,05. Le groupe étant en fonctionnement stable à la fréquence de 50Hz, la puissance demandée augmente et la fréquence devient 49,9Hz. Quelle est la puissance régulante et que faut-il faire pour rétablir la fréquence de consigne ?
- 6° Un alternateur (excitatrice en bout d'arbre) est couplé sur un réseau triphasé 220V-50Hz. Le moteur d'entraînement du type diesel est réglé à puissance mécanique nulle ; on agit sur l'excitation de façon à obtenir le courant d'induit minimal. Ce courant est de 9A, l'excitatrice fournissant alors un courant de 40A sous une tension de 12V. La résistance entre deux bornes de l'induit est de 0,04 ohm. Pour que l'alternateur fournisse au réseau une puissance active de 40Kw et une puissance réactive de 30Kvar , il faut porter l'excitation à 100A. Que faut-il faire du côté du moteur pour obtenir ce régime ? Le moteur diesel consomme alors à l'heure 15,5Kg de fuel dont la combustion donne 11000 Kilocalories par kilo-gramme. Calculer les rendements du groupe, de l'alternateur, du moteur diesel.
- 7° La turbine hydraulique d'un groupe consomme 50 m³ à la seconde, la hauteur de chute est de 95m. L'alternateur fournit au réseau une puissance apparente de 48MVA avec un facteur de puissance de 0,8. Calculer le rendement total du groupe. Le rendement de l'alternateur est de 0,97, calculer celui de la turbine. ($P_{ab} = \rho \cdot g \cdot h \cdot Q$)
- 8° Une courbe de réglage réduite est la représentation graphique de j/j_0 en fonction de I/I_n (j_0 est le courant d'excitation qui donne à vide la tension normale U_n). Tracer la courbe de réglage réduite ($U_n, \cos = 0,8$ arrière) dans les deux cas suivant : pour un alternateur dont le I_{cc} pour $j_0 = I_n$ et pour un alternateur dont le I_{cc} pour l'excitation $j_0 = I_n/2$.

9° Un alternateur 50Kva 220V – 50Hz, 6 pôles a un coefficient d'équivalence $m=1,45$. Le courant d'excitation fournissant à vide la tension normale est $j_0=30A$. Déterminer le courant d'excitation pour qu'il fournisse 35Kw et 25Kvar en négligeant les chutes de tension statoriques. Déterminer le courant d'excitation dans les mêmes conditions mais avec une chute de tension inductive dans le stator égale à 7% de la tension fournie.

10° Un alternateur bipolaire couplé sur le réseau à 50Hz fournit en marche normale une puissance de 120Mw. Le décalage alpha du rotor sur le champ tournant est alors de 30° . Le moment d'inertie du groupe est $K=12000Kg.m^3$. Calculer pour un rendement de 1 le couple en marche normale.

11° Le couplage d'un alternateur bipolaire sur le réseau de fréquence 50Hz a lieu exactement au moment où l'aiguille du synchronoscope passe devant le repère, mais la vitesse du groupe est alors inférieur à la vitesse du synchronisme. La période des oscillations au couplage est de 2s. calculer la valeur maximale de la vitesse de glissement et du glissement pour que l'angle alpha de décalage du rotor sur le champ tournant n'excède pas 0,5 radian au cours des oscillations d'accrochage. A quelle vitesse tournait le synchronoscope au moment du couplage ?