

Chapitre 13

Machines électromagnétiques

INTRODUCTION	3
1. LES TRANSFORMATEURS	5
1.1. Le transformateur monophasé	5
1.1.1. Constitution	5
1.1.2. Principe	5
1.1.3. Définitions et symboles	6
1.1.4. Grandeurs caractéristiques	7
1.1.5. Bilan des puissances	8
1.2. Le transformateur triphasé	9
1.2.1. Constitution et principe	9
1.2.2. Couplage des enroulements	9
1.2.3. Déphasage et indice horaire	10
1.2.4. Couplage des transformateurs	13
1.2.5. Grandeurs caractéristiques	14
1.2.6. Bilan des puissances	15
1.3. Transformateurs particuliers	16
1.3.1. L'autotransformateur	16
1.3.2. Le transformateur de mesures	16
1.3.3. Le transformateur d'isolement	16
1.4. Exemples d'exercice	17
1.5. Exercices à résoudre	20
2. LES MACHINES A COURANT ALTERNATIF	21
2.1. Les moteurs à courant alternatif	22
2.1.1. Champ tournant	22
2.1.2. Moteur triphasé synchrone	23
2.1.3. Moteur triphasé asynchrone	24
2.1.4. Moteur monophasé	25
2.1.5. Repérages et symboles	25
2.1.6. Caractéristiques de fonctionnement	26
2.1.7. Bilan des puissances des moteurs triphasés	27
2.1.8. Démarrage des moteurs triphasés asynchrones	29
2.1.9. Principe de la variation de vitesse	30

2.2. Les génératrices synchrones	31
2.2.1. Principe de l'alternateur triphasé	31
2.2.2. Définitions et grandeurs fondamentales	31
2.2.3. Symboles et couplages	32
2.2.4. Caractéristiques de fonctionnement	32
2.2.5. Bilan des puissances des alternateurs	33
2.3. Exemples d'exercices	34
2.4. Exercices à résoudre	36
3. LES MACHINES A COURANT CONTINU	37
3.1. Les moteurs à courant continu	37
3.1.1. Force électromagnétique	37
3.1.2. Constitution et principe	38
3.1.3. Moteur à excitation séparée	39
3.1.4. Moteur à excitation série	39
3.1.5. Moteur universel	40
3.1.6. Caractéristiques de fonctionnement	40
3.1.7. Bilan des puissances	41
3.1.8. Démarrage des moteurs à courant continu	42
3.1.9. Principe de la variation de vitesse	42
3.2. Les génératrices à courant continu	43
3.2.1. Force électromagnétique	44
3.2.2. Constitution et principe	44
3.2.3. Applications de la génératrice continue	45
3.2.4. Caractéristiques de fonctionnement	45
3.2.5. Bilan des puissances des génératrices	46
3.3. Exemples d'exercices	47
3.4. Exercices à résoudre	49
4. CORRECTION DES EXERCICES	50
4.1. Correction des exercices paragraphe 1.5 page 20	50
4.2. Correction des exercices paragraphe 2.4 page 36	52
4.3. Correction des exercices paragraphe 3.4 page 49	54

Travail personnel



INTRODUCTION

Nous avons vu dans le chapitre 10 l'utilisation des machines électromagnétiques.

Dans ce chapitre nous allons étudier les grandeurs caractéristiques, les principes de fonctionnement et les lois fondamentales applicables sur les machines électromagnétiques.

Les machines électromagnétiques résultent de l'utilisation des phénomènes électromagnétiques.

Les machines électromagnétiques sont des convertisseurs d'énergie :

- **Les machines à courant continu** convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique dans le cas d'un fonctionnement en **moteur** ou bien l'énergie mécanique en énergie électrique dans le cas d'un fonctionnement en **générateur** (dynamo).
- **Les machines à courant alternatif** convertissent l'énergie électrique en énergie mécanique dans le cas d'un fonctionnement en **moteur** ou bien l'énergie mécanique en énergie électrique dans le cas d'un fonctionnement en **générateur** (alternateur).
- **Les transformateurs** convertissent l'énergie électrique en une énergie électrique de même nature mais d'amplitude différente.

Le magnétisme est l'ensemble des phénomènes que présentent les matériaux aimantés. Le magnétisme peut être créé à partir d'aimant existant à l'état naturel ou bien à partir de l'interaction des courants électriques et des champs magnétiques : on parle alors d'électromagnétisme.

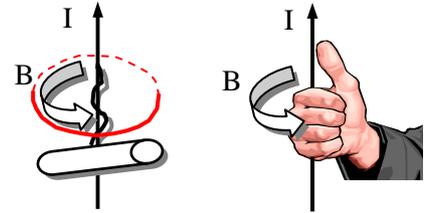
Rappel sur le magnétisme

- **L'aimant** est un corps naturel qui possède ou a acquis la propriété d'attirer les substances ferromagnétiques comme le fer ou le cobalt. Un aimant possède 2 pôles l'un appelé pôle Nord et l'autre pôle Sud. Deux pôles de même nom se repoussent, deux pôles de nom contraire s'attirent.
- **Le champ magnétique** est la région de l'espace autour de l'aimant ou de l'électroaimant dans laquelle il exerce une influence ; l'effet produit par un aimant sur de la limaille de fer montre qu'il existe autour de l'aimant des lignes de champ orientées du pôle Nord vers le pôle Sud de l'aimant.
- **L'induction magnétique** est l'intensité du champ magnétique en un point donné de la zone d'influence en tenant compte de la nature du milieu dans lequel l'aimant est placé. L'induction magnétique est notée B et s'exprime en Tesla (T). Le vecteur induction magnétique est tangent aux lignes de champ et orienté du pôle Nord vers le pôle Sud.
- **Le flux magnétique** est la quantité de champs magnétique B traversant perpendiculairement la section S d'un circuit magnétique. Le flux magnétique est noté Φ et s'exprime en Weber (Wb). Le flux magnétique est donné par la relation : $\Phi = B.S. \cos \alpha$ dans laquelle α est l'angle entre la direction du champ et la surface du circuit ; Si le champ est perpendiculaire à la surface, $\Phi = B.S$
- **Le circuit magnétique** est un ensemble comprenant des substances ferromagnétiques constituant un circuit fermé transportant le flux magnétique. Les machines électromagnétiques contiennent toutes un circuit magnétique de forme adaptée à celle de la machine.

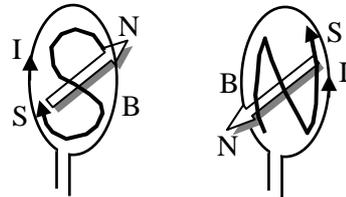
Rappel sur l'électromagnétisme

- **L'électroaimant** est un aimant temporaire produisant un champ magnétique lorsqu'il est parcouru par un courant électrique : Tout courant électrique crée un champ magnétique.
- **Le champ électromagnétique** est la région autour du conducteur électrique dans laquelle s'exerce une influence :

→ Pour un conducteur rectiligne parcouru par un courant électrique d'intensité I , le champ magnétique d'intensité B s'exerce de façon circulaire autour du conducteur suivant la règle de la main droite, le pouce indiquant le sens du courant et les autres doigts le sens des lignes de champ ou bien suivant la règle du tire bouchon de Maxwell qui avance dans le sens de I lorsqu'il tourne dans le sens de B .

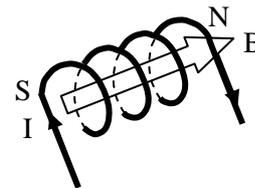


→ Pour un conducteur de forme cylindrique parcouru par un courant électrique d'intensité I , le champ magnétique d'intensité B s'exerce à travers la spire du pôle SUD vers le pôle NORD suivant la règle du tire bouchon de Maxwell qui tourne dans le sens de I lorsqu'il avance dans le sens de B ou bien selon le principe que sur la face Nord le courant tourne comme le N et sur la face Sud il tourne comme le S.



Le flux qui traverse la spire est positif s'il sort par le Nord. Lorsque l'on a plusieurs spires on parle alors de bobine.

Si une bobine est parcourue par un courant d'intensité I , elle crée un champ magnétique dont l'induction est équivalente à celle d'un aimant : on a un électroaimant ou aimant temporaire.



Le champ magnétique est considérablement augmenté si l'on insère un barreau magnétique à l'intérieur de la bobine.

- **L'induction électromagnétique** est le phénomène inverse au précédent : lorsque l'on déplace une bobine au voisinage d'un aimant, il y a création d'une tension induite à ses bornes ou, création d'un courant induit dans la bobine si le circuit est fermé. Il faut pour cela qu'il y ait une variation dans le temps : soit un déplacement de la bobine par rapport à l'aimant, soit une variation du champ magnétique. Ce phénomène a été mis en évidence par Faraday :

Loi de Faraday : Toute variation de flux magnétique crée un courant induit dans un circuit électrique fermé ou une tension induite aux bornes d'un circuit électrique ouvert

Le sens du courant induit est différent selon que l'on approche ou que l'on éloigne l'aimant ; Il est tel qu'il s'oppose à la cause qui lui a donné naissance : Si l'on approche la face Nord d'un aimant, le sens du courant induit dans la bobine sera tel qu'il va opposer une face Nord :

Loi de Lenz : Le sens du courant induit dans un circuit fermé est tel que les effets qu'il produit s'opposent à la cause qui lui ont donné naissance.

La tension induite est appelée force électromotrice induite. Elle est notée E et s'exprime en Volts.

- **La force électromotrice** est la tension électrique E générée aux bornes d'une bobine soumise à une variation de flux pendant un temps donné : $E = - \Delta\Phi / \Delta t$
- **La force électromagnétique** est la force mécanique F à laquelle est soumis un conducteur électrique parcouru par un courant d'intensité I placé dans un champ magnétique d'intensité B .

Le phénomène d'induction électromagnétique découvert par Faraday est à la base du fonctionnement de la plupart des machines électromagnétiques.

1. LES TRANSFORMATEURS

Un transformateur est un appareil servant à modifier la forme de l'énergie électrique. Il s'agit d'un convertisseur d'énergie électrique particulier : on désigne par convertisseur un appareil transformant un courant continu en un courant alternatif ou un courant alternatif en un autre courant alternatif de fréquence différente. Le nom de transformateur est réservé à un appareil transformant un courant ou une tension alternative en un autre courant ou tension alternative de même fréquence mais d'amplitude différente.

Le transformateur joue un rôle important dans le transport de l'énergie électrique qui ne peut se faire qu'en haute tension afin de réduire les pertes en lignes et dans la distribution de l'énergie électrique qui se fait en basse tension. On l'utilise aussi comme organe de sécurité dans les circuits de commande. Le transformateur est un convertisseur statique car il ne comporte pas de pièces en mouvement.

Nous allons étudier les transformateurs fonctionnant à partir d'une tension alternative monophasée et les transformateurs fonctionnant à partir d'un réseau de tensions alternatives triphasées.

1.1. Le transformateur monophasé

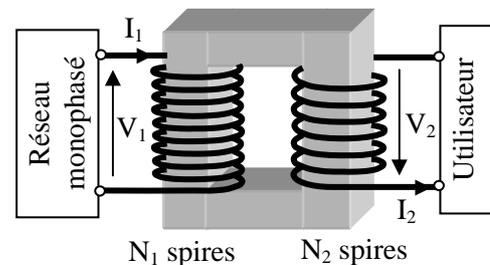
1.1.1. Constitution

Un transformateur monophasé est constitué de deux enroulements bobinés sur un circuit magnétique. Le circuit magnétique, fermé sur lui-même, a une section constante. Il est réalisé en matériau ferromagnétique, feuilleté dans le sens du champ magnétique afin de réduire les pertes dans le fer dues à l'échauffement du circuit magnétique lors du transport du flux magnétique.

Les deux enroulements ou bobinages réalisés en fil de cuivre ont un nombre de spires différent. Le bobinage comportant le plus de spires est le bobinage qui supporte la tension la plus élevée ; il est réalisé avec le fil de section la plus faible. Dans les gros transformateurs, les bobinages sont refroidis dans un bain d'huile afin de réduire les pertes dans le cuivre du à l'échauffement par effet Joule.

Nous distinguerons le bobinage primaire qui est alimenté par la tension monophasée du réseau et le bobinage secondaire sur lequel vient se raccorder l'utilisateur.

Par convention nous affecterons de l'indice 1 les grandeurs relatives au bobinage primaire et de l'indice 2 les grandeurs relatives au bobinage secondaire.



1.1.2. Principe

Le bobinage primaire possédant N_1 spires est alimenté par une tension alternative V_1 de fréquence f . Il y a création d'un champ magnétique B alternatif dont le flux magnétique Φ traversant les N_1 spires est : $\Phi = N_1 B S$.

Le flux magnétique alternatif traversant chacune des N_1 spires est transporté par le circuit magnétique. Le bobinage secondaire qui possède N_2 spires est alors soumis à une variation sinusoïdale du flux qui d'après la loi de **Faraday** crée une tension alternative induite ou force électromotrice $E = - N_2 \cdot \Delta\Phi/\Delta t$ aux bornes du bobinage secondaire ou un courant induit suivant la loi de **Lenz** si le circuit est fermé.

La tension induite aux bornes du bobinage secondaire a la même fréquence f que la tension primaire.

La tension et le flux sont proportionnels selon la relation de **Boucherot** : $V = 4,44 \times B_{\max} \cdot N \cdot f \cdot S$

L'amplitude de la tension induite au secondaire dépend de la tension appliquée au primaire et du rapport entre le nombre de spires au secondaire et le nombre de spires au primaire :

le rapport $m = N_2 / N_1$ est appelé rapport de transformation.

1.1.3. Définitions et symboles

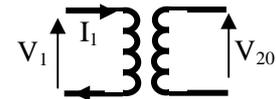
On dit que le transformateur fonctionne en abaisseur de tension si la tension secondaire est inférieure à la tension primaire ($V_2 < V_1$). Inversement, il fonctionne en élévateur de tension si la tension secondaire est supérieure à la tension primaire ($V_2 > V_1$).

Le transformateur à deux enroulements est représentés par l'un ou l'autre des symboles ci contre :



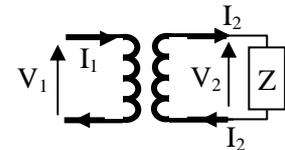
Si le bobinage secondaire est ouvert, on dit que le transformateur **fonctionne à vide** ou en circuit ouvert.

Dans ce cas $I_2 = 0$ et la tension secondaire est la tension à vide V_{20}



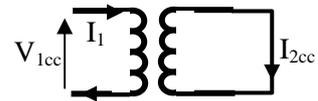
Si le bobinage secondaire est fermé sur un circuit extérieur d'impédance Z , on dit que le transformateur **fonctionne en charge**.

Dans ce cas le courant de charge est I_2 et la tension secondaire V_2



Si les bornes du bobinage secondaire sont mises en court circuit, on dit que le transformateur **fonctionne en court circuit**.

Dans ce cas le courant I_2 est le courant de court circuit I_{2cc} , la tension secondaire $V_2 = 0$ et la tension primaire réduite à V_{1cc}

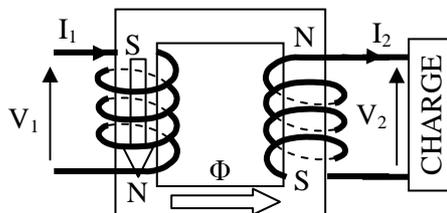


L'orientation de la tension et du courant dans le circuit secondaire dépend du sens dans lequel les enroulements ont été bobinés. Deux cas peuvent se produire :

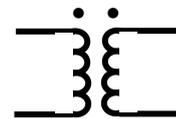
➤ Soit les 2 enroulements sont bobinés dans le même sens :

A un instant donné, le courant primaire I_1 fixe le sens positif du champ magnétique et donc du flux.

Le flux magnétique sort par la face Nord et donc rentre par la face Sud ce qui détermine le sens de I_2 et donc celui de la force électromotrice induite



Symbole :

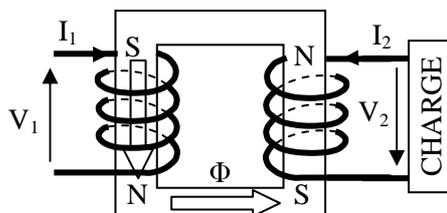


- Indique la polarité des tensions à un instant donné

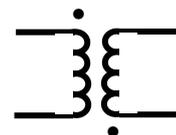
➤ Soit les 2 enroulements sont bobinés dans le sens contraire :

De même, à un instant donné, le courant primaire I_1 fixe le sens positif du flux magnétique.

Le flux magnétique sort par la face Nord et donc rentre par la face Sud ce qui détermine le sens de I_2 et donc celui de la force électromotrice induite



Symbole :



- Indique la polarité des tensions à un instant donné

Attention : quand on met 2 transformateurs en parallèle il faut s'assurer qu'ils ont les mêmes tensions secondaires en valeur efficace et en polarité afin d'éviter les oppositions de phase.

1.1.4. Grandeurs caractéristiques

Le primaire du transformateur est branché sur le réseau : il joue le rôle d'un récepteur qui absorbe l'énergie électrique fournie par le secteur.

Le secondaire du transformateur est branché à la charge : il joue le rôle d'un générateur qui fournit l'énergie électrique absorbée par la charge.

Comme tout récepteur, le transformateur consomme de l'énergie interne propre à son fonctionnement lors de la transformation de l'énergie électrique.

De même comme tout générateur, le transformateur dissipe par effet Joule de l'énergie interne propre à son fonctionnement lorsqu'il fournit l'énergie électrique à la charge.

Le transformateur est caractérisé par les tensions alternatives de service au primaire et au secondaire, par son rapport de transformation et par les puissances électriques mises en jeu dans la transformation.

- Les tensions de service : Pour tout transformateur, il convient de préciser la tension et la fréquence de service nécessaire sur le bobinage primaire. Cette tension est appelée **tension nominale** ; c'est celle qui correspond à un fonctionnement optimal du transformateur. $V_1 = V_{1N}$
De même, il convient de connaître la **tension nominale** V_{2N} disponible sur le bobinage secondaire. Ces deux tensions sont généralement précisées sur la plaque signalétique du transformateur.
Par exemple : 230 V / 24 V 50 Hz , 230 V étant la valeur efficace de la tension nominale au primaire et 24 V la tension efficace nominale disponible au secondaire.

- Le rapport de transformation : C'est le rapport m entre le nombre N_2 de spires au secondaire et le nombre N_1 de spires au primaire :

$$m = \frac{N_2}{N_1}$$

Généralement, les nombres de spires ne sont pas donnés par le constructeur.

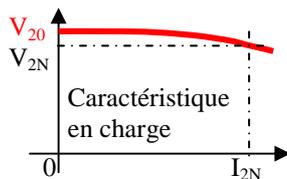
Le rapport de transformation est déterminé lors d'un fonctionnement à vide du transformateur par les mesures de la tension nominale au primaire et à vide au secondaire :

$$m = \frac{V_{20}}{V_{1N}}$$

Si le transformateur fonctionne en charge, la tension V_2 diminue.

Le rapport de transformation est alors déterminé par la mesure de l'intensité des courants en charge dans le circuit primaire et dans le circuit secondaire :

$$m = \frac{I_1}{I_2}$$



Souvent par simplification de calcul, le rapport de transformation est le quotient des valeurs efficaces de la tension secondaire V_2 sur la tension primaire V_1 données par la plaque signalétique.

- Les puissances mises en jeu : Nous avons vu que le rôle du transformateur est de transformer un courant ou une tension alternative en un autre courant ou tension alternative de même fréquence mais d'amplitude différente mais en évitant au maximum les pertes ; c'est à dire en conservant la puissance. Au secondaire la puissance fournie par le transformateur dépend de la nature de la charge utilisée : Pour une charge purement résistive, la puissance fournie est $P_2 = V_2 \cdot I_2 = S_2$ puissance apparente car $\cos\phi_2 = 1$. Pour un charge inductive, $\cos\phi_2 < 1$ donc la puissance fournie est $P_2 = V_2 \cdot I_2 \cdot \cos\phi_2 < S_2$ et la puissance réactive $Q_2 = V_2 \cdot I_2 \cdot \sin\phi_2 \neq 0$
Le fabricant ne connaissant pas l'utilisation qui sera faite, définit la puissance du transformateur par la **puissance apparente nominale** disponible au bobinage secondaire : $S = S_2 = S_N$.
Si l'on considère que les pertes de puissance dans le transformateur sont négligeables, $S_1 = S_N$.

Cette relation permet de calculer les intensités nominales au primaire et au secondaire du transformateur.

$$S_N = V_{2N} \cdot I_{2N} \approx V_{1N} \cdot I_{1N}$$

1.1.5. Bilan des puissances

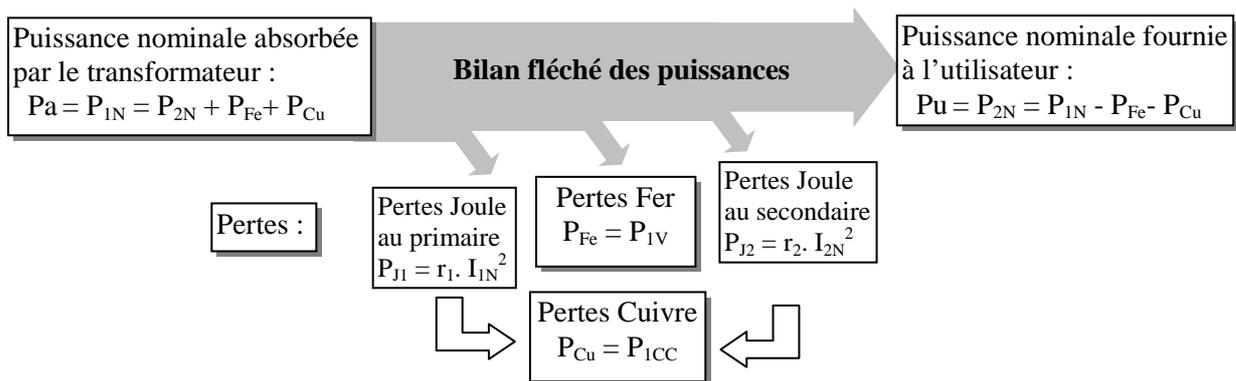
Comme toutes les machines, qu'elles soient électriques ou non, le transformateur consomme une partie de l'énergie absorbée pour son fonctionnement interne. L'énergie qu'il va alors fournir sera plus petite que celle qu'il absorbe. Le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie absorbée est le rendement. Le rendement se note η ; c'est un rapport d'énergie ou de puissance sans unité :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Le rendement peut être déterminé soit par la mesure directe de P_1 et P_2 , soit par la mesure des pertes. L'énergie ou la puissance perdue dans le transformateur est de deux types :

- Pertes dans le circuit magnétique appelées **pertes fer** dues au transport du flux. Ces pertes sont maximales lors que le flux transporté est maximal c'est à dire lorsque les tensions sont nominales. Les pertes fer sont mises en évidence lorsque le transformateur fonctionne à vide : Dans ce cas les tensions sont nominales donc le flux est maximal et les courants ont une intensité réduite : I_2 est nulle au secondaire et I_{1V} très faible au primaire. La puissance absorbée à vide correspond sensiblement aux pertes fer : $P_{Fe} = P_{1V}$. C'est pour diminuer ces pertes que le circuit magnétique est feuilleté.
- Pertes dans les circuits électriques appelées **pertes cuivre** ou **pertes Joule** dues à la résistance électrique des bobinages primaire et secondaire. Ces pertes sont maximales lors que les intensités des courants transportés sont maximales c'est à dire lorsque les intensités sont nominales. Les pertes cuivre sont mises en évidence lorsque le transformateur fonctionne en court circuit : Dans ce cas la tension V_{1CC} appelée **tension de court circuit** est la tension appliquée au bobinage primaire pour obtenir l'intensité I_{2N} nominale dans le bobinage secondaire en court circuit. La tension de court circuit V_{1CC} est souvent indiquée en pourcentage de la tension nominale V_{1N} . Les intensités sont nominales au primaire et au secondaire donc l'effet Joule est maximal et les tensions sont réduites : V_2 est nulle au secondaire, V_{1CC} très faible au primaire. La puissance absorbée par le transformateur lorsque le bobinage secondaire est en court circuit correspond sensiblement aux pertes cuivre : $P_{Cu} = P_{1CC}$.

On a alors le bilan des puissances mises en jeu dans un transformateur en fonctionnement nominal que l'on représente par une flèche qui rétrécit au fur et à mesure que l'énergie diminue.



Détermination du rendement par la méthode indirecte dite méthode des pertes séparées :

Soit on mesure P_1 absorbée par le transformateur lors d'un fonctionnement en charge nominale et on calcule le rendement en tenant compte des pertes :

$$\eta = \frac{P_{1N} - P_{Fe} - P_{Cu}}{P_{1N}}$$

Soit on détermine P_{2N} fournie par le transformateur à une charge nominale connue et on calcule le rendement en tenant compte des pertes :

$$\eta = \frac{P_{2N}}{P_{2N} + P_{Fe} + P_{Cu}}$$

1.2. Le transformateur triphasé

1.2.1. Constitution et principe

Un transformateur triphasé est constitué de trois transformateurs monophasés disposés sur chacune des trois colonnes qui composent le circuit magnétique réalisé en matériau ferromagnétique feuilleté.

Les 3 bobinages primaires comportant chacun N_1 spires sont alimentés par un réseau de tensions triphasées $3 \times U_1$ et sont parcourus par des courants alternatifs :

Tout courant électrique crée un champ magnétique. On a donc création d'un flux alternatif

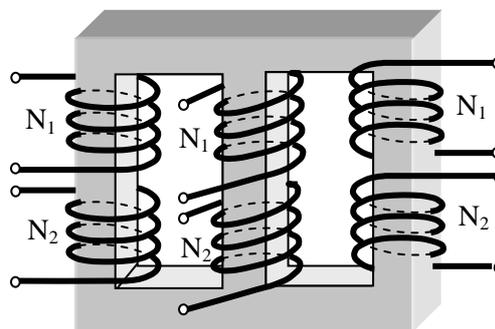
Le circuit magnétique ferreux transporte le flux magnétique.

Les 3 bobinages secondaires comportant N_2 spires sont soumis à une variation sinusoïdale du flux :

Il y a création de tensions induites aux bornes des 3 bobinages secondaires. (Faraday)

Un transformateur triphasé convertit un réseau triphasé alternatif de tensions composées $3 \times U_1$ appliquées sur les bobinages primaires en un réseau triphasé de tensions composées $3 \times U_2$ disponibles sur les bobinages secondaires.

La section du circuit magnétique étant constante, les tensions d'alimentation au primaire sont proportionnelles au nombre de spires des bobinages primaires et les tensions induites au secondaire sont proportionnelles au nombre de spires des bobinages secondaires. (Boucherot)



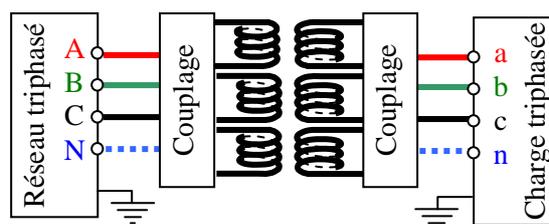
Lorsque les tensions sont plus élevées au primaire, le transformateur est dit abaisseur de tensions et, lorsque les tensions sont plus élevées au secondaire le transformateur est dit éleveur de tensions.

Le rapport de transformation d'un transformateur triphasé est le rapport noté M entre les tensions du réseau triphasé du secondaire à vide et les tensions nominales du réseau triphasé d'alimentation au primaire:

$$M = \frac{U_{20}}{U_{1N}}$$

1.2.2. Couplage des enroulements

Comme pour tous les récepteurs triphasés, il est nécessaire de connecter les 3 bobinages primaires entre eux pour pouvoir les raccorder au réseau triphasé et de même, il est nécessaire de connecter les 3 bobinages secondaires entre eux pour permettre le raccordement d'une charge triphasée.

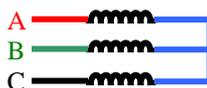


Les bobinages primaires peuvent être connectés en étoile ou en triangle suivant la tension du réseau :

Rappel :

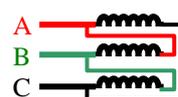
Couplage étoile noté Y :

Intéressant en Haute Tension



Couplage triangle noté D :

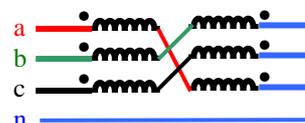
Intéressant en Basse Tension



Les bobinages secondaires peuvent être couplés en étoile ou en triangle selon la tension nécessaire à la charge ou bien dans certains cas en zig zig lorsque chaque enroulement comprend deux demi bobines enroulées sur des noyaux différents, ce qui permet une meilleure répartition des tensions dans le transformateur lorsque la charge est déséquilibrée.

Couplage étoile noté Z :

Les fém des les 2 demi bobines sont déphasées de 120°



Le **couplage d'un transformateur** est l'association des connexions au primaire et au secondaire.

Un transformateur triphasé a plusieurs possibilités de couplage désigné par 2 lettres et un chiffre.

La première lettre indique la connexion des enroulements au primaire.

La seconde lettre indique la connexion des enroulements secondaires.

La lettre écrite en majuscule indique le coté où se situe la tension la plus élevée.

La lettre écrite en minuscule indique le coté où se situe la tension la moins élevée.

Le chiffre indique l'indice horaire c'est à dire le déphasage entre les tensions primaires et secondaires.

Exemple de désignation d'un couplage : Yy0 ou Yyn0

Il s'agit là d'un transformateur triphasé abaisseur de tension dont les enroulements sont couplés en étoile au primaire et au secondaire et dont les tensions primaires et secondaires sont en phase.

Nota : On peut rajouter n pour préciser « **neutre sorti** » au secondaire dans le cas d'un couplage étoile.

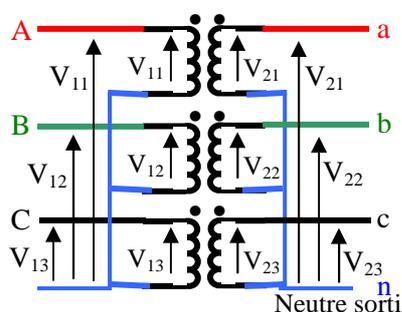
1.2.3. Déphasage et indice horaire

Selon les couplages choisis au primaire et au secondaire et selon le sens d'enroulement des bobinages, il existe un déphasage des tensions du réseau secondaire par rapport aux tensions du réseau primaire.

Ce déphasage est un angle multiple de 30° ou $\pi/6$ rad. A ce déphasage, on associe un nombre de 0 à 11 qui est l'**indice horaire**. Pour un déphasage nul, l'indice horaire est 0.

Pour un déphasage de 30° ou $\pi/6$ rad, c'est à dire lorsque les tensions secondaires sont en retard sur les tensions primaires de 30° ou $\pi/6$ rad, l'indice horaire est 1. (1 heure sur le cadran horaire d'une montre)

- Prenons le cas où les bobinages primaires et secondaires sont enroulés dans le même sens : Les tensions simples aux bornes des bobinages primaire et secondaire sont en phase.

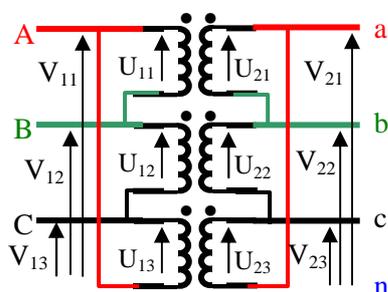


➤ Indice horaire pour couplage Yy

Les enroulements primaires sont alimentés par un réseau triphasé hautes tensions A,B,C égales aux tensions simples aux bornes des enroulements.

De même les enroulements secondaires fournissent un réseau triphasé basse tension a,b,c égales aux tensions simples aux bornes des enroulements. Sachant que V_{11} et V_{21} sont en phase on a donc les tensions primaires et secondaires en phase : L'indice horaire est 0. On note ce couplage Y yn 0

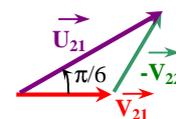
Par permutation circulaire des phases A,B,C ou des phases a,b,c on obtient l'indice horaire 4 ou 8



➤ Indice horaire pour couplage Dd

Les enroulements primaires sont alimentés par un réseau triphasé hautes tensions A,B,C. Aux bornes des enroulements on a des tensions composées : $U_{11} = V_{11} - V_{12} = A - B$

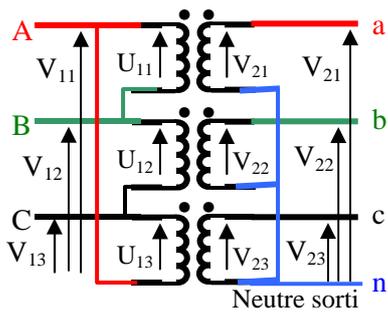
Les enroulements secondaires fournissent un réseau triphasé basses tensions a,b,c. Aux bornes des enroulements on a des tensions composées : $U_{21} = V_{21} - V_{22} = a - b$



On sait que les tensions composées sont en avance de $\pi/6$ sur les tensions simples.

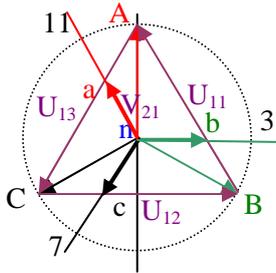
Sachant que U_{11} et U_{21} sont en phase, l'indice horaire est 0. On note ce couplage D d 0

Par permutation circulaire des phases A,B,C ou des phases a,b,c on obtient l'indice horaire 4 ou 8

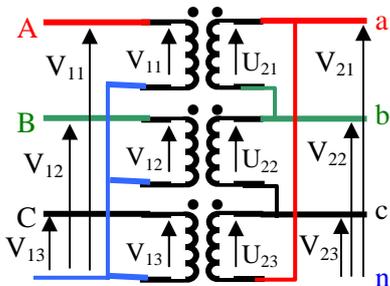


➤ Indice horaire pour couplage Dy

Les enroulements primaires sont alimentés par un réseau triphasé hautes tensions A,B,C. Aux bornes des enroulements on a des tensions composées : $U_{11} = V_{11} - V_{12} = A - B$
 Les enroulements secondaires fournissent un réseau triphasé basse tension a,b,c égales aux tensions simples aux bornes des enroulements.

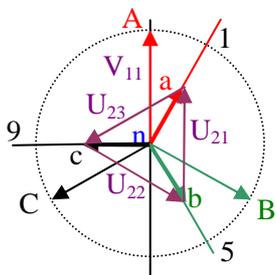


La construction de Fresnel permet de déterminer le déphasage entre du réseau secondaire a,b,c sur le réseau primaire A,B,C, sachant que U_{11} et V_{21} sont en phase : on positionne les tensions composées du primaire et on oriente les tensions simples du secondaire : le déphasage de a par rapport à A donne l'indice horaire 11 (330°). On note ce couplage Dyn 11
 Par permutation circulaire des phases A,B,C ou des phases a,b,c on obtient l'indice horaire 7 ou 3.

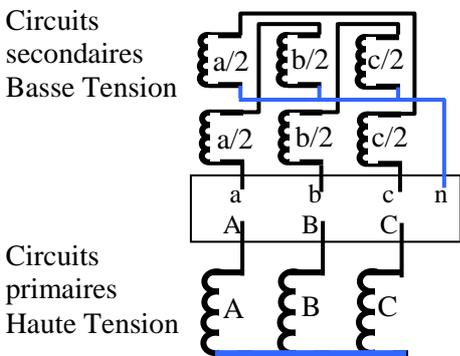


➤ Indice horaire pour couplage Yd

Les enroulements primaires sont alimentés par un réseau triphasé hautes tensions A,B,C égales aux tensions simples aux bornes des enroulements.
 Les enroulements secondaires fournissent un réseau triphasé basses tensions a,b,c. Aux bornes des enroulements on a des tensions composées : $U_{21} = V_{21} - V_{22} = a - b$

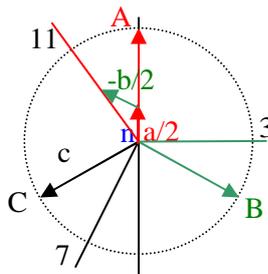


La construction de Fresnel permet de déterminer le déphasage entre du réseau secondaire a,b,c sur le réseau primaire A,B,C, sachant que V_{11} et U_{21} sont en phase : on positionne les tensions simples du primaire et on oriente les tensions composées du secondaire : le déphasage de a par rapport à A donne l'indice horaire 1 (30°). On note ce couplage Yd 1
 Par permutation circulaire des phases A,B,C ou des phases a,b,c on obtient l'indice horaire 5 ou 9



➤ Indice horaire pour couplage Yz

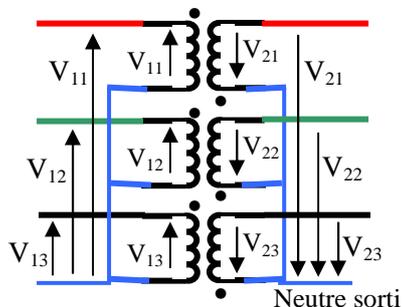
Le couplage zigzag est possible lorsque les 3 enroulements secondaires sont constitués chacun de 2 demi bobines. Le couplage zigzag consiste à mettre en opposition deux demi bobines enroulées sur des noyaux magnétiques différents



On obtient l'indice horaire 11.
 On note ce couplage Yz 11
 Par permutation circulaire des phases A,B,C ou des phases a,b,c on obtient également l'indice horaire 7 ou 3.

- Prenons le cas où les bobinages primaires et secondaires sont enroulés en sens contraire : Les tensions simples aux bornes des bobinages primaire et secondaire sont en opposition de phase.

➤ Indice horaire pour couplage Yy



Les enroulements primaires sont alimentés par un réseau triphasé hautes tensions A,B,C égales aux tensions simples aux bornes des enroulements.

De même les enroulements secondaires fournissent un réseau triphasé basse tension a,b,c égales aux tensions simples aux bornes des enroulements. Sachant que V_{11} et V_{21} sont en opposition de phase, on a donc les tensions primaires et secondaires en opposition de phase :

L'indice horaire est . On note ce couplage Y yn 6

Par permutation circulaire des phases A,B,C ou des phases a,b,c on obtient l'indice horaire 10 ou 2

Il en est possible de faire la même démonstration pour tous les couplages.

Toutefois les couplages les plus utilisés sont les couplages d'indice horaire 0, 5, 6 ou 11

- Tableau résumant les couplages usuels

Les enroulements primaires sont repérés en majuscule et les enroulements secondaire en minuscule
Tous les couplages représentés sont des couplages de transformateurs abaisseurs de tension.

<p>Dd 0 0°</p>	<p>Yy 0 0°</p>	<p>Dy 5 150°</p>
<p>Yd 5 150°</p>	<p>Yy 5 150°</p>	<p>Dd 6 180°</p>
<p>Yy 6 180°</p>	<p>Dz 6 180°</p>	<p>Dz 10 300°</p>
<p>Dy 11 330°</p>	<p>Yd 11 330°</p>	<p>Yz 11 330°</p>

1.2.4. Couplage des transformateurs

On peut classer les couplages en 4 groupes selon leur indice horaire :

Groupe I : indice horaire 0 – 4 – 8 pour lesquels seuls l'ordre des phases change,

Groupe II : indice horaire 6 – 10 – 2 pour lesquels seuls l'ordre des phases change,

Groupe III : indice horaire 1 – 5 – 9 pour lesquels seuls l'ordre des phases change,

Groupe IV : indice horaire 11 – 7 – 3 pour lesquels seuls l'ordre des phases change.

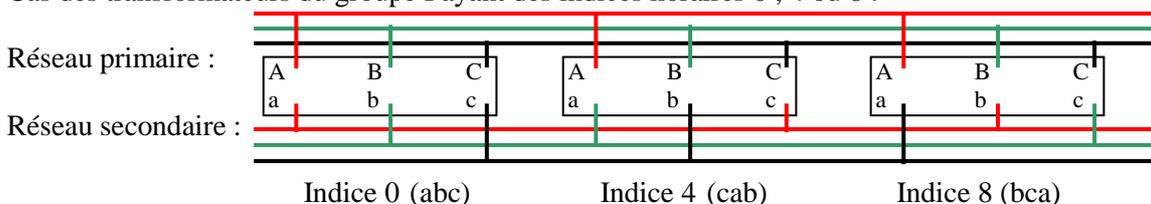
Toutefois les couplages les plus utilisés sont les couplages d'indice 0, 6, 5 et 11

Afin d'augmenter la puissance fournie par le transformateur il est souvent nécessaire de mettre en parallèle plusieurs transformateurs. Pour cela il faut respecter plusieurs conditions ; il faut qu'ils aient :

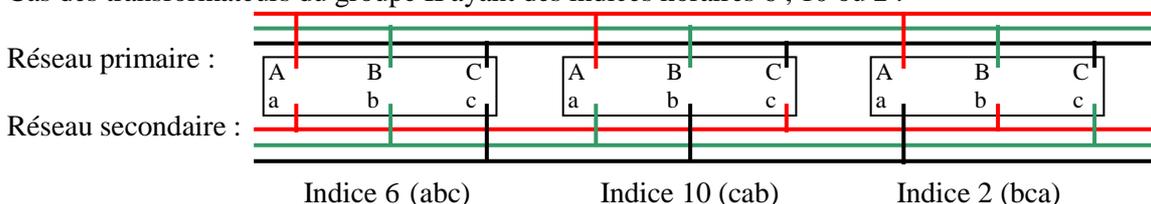
- la même tension primaire
- la même tension secondaire
- le même indice horaire c'est à dire des tensions en phase.

Il est tout de même possible de coupler des transformateurs ayant des indices horaires différents à condition qu'ils appartiennent au même groupe de couplage. Ainsi le déphasage créé par le couplage des enroulements peut être corrigé par une permutation circulaire des phases dans le sens direct.

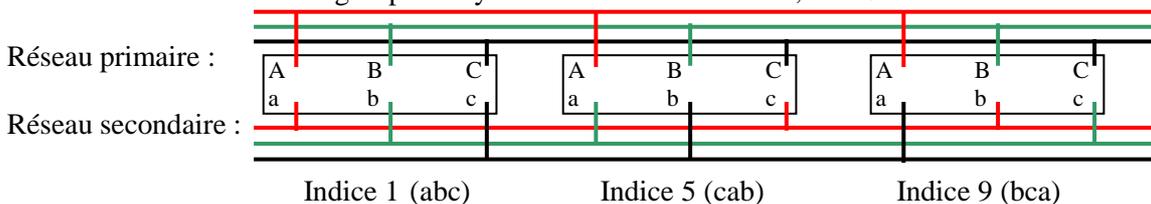
Cas des transformateurs du groupe I ayant des indices horaires 0 , 4 ou 8 :



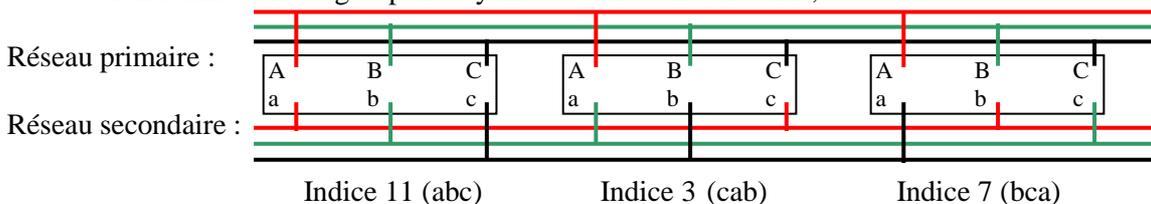
Cas des transformateurs du groupe II ayant des indices horaires 6 , 10 ou 2 :



Cas des transformateurs du groupe III ayant des indices horaires 1 , 5 ou 9 :



Cas des transformateurs du groupe IV ayant des indices horaires 11 , 7 ou 3 :



Il existe d'autres possibilités en couplant des transformateurs appartenant à des groupes différents.

1.2.5. Grandeurs caractéristiques

Comme pour le transformateur monophasé, le transformateur triphasé est caractérisé par les tensions alternatives de service au primaire et au secondaire, par son rapport de transformation et par les puissances électriques mises en jeu dans la transformation.

- Les tensions de service : Pour tout récepteur triphasé, il convient de préciser les tensions et la fréquence du réseau nécessaires sur les bobinages primaires du transformateur. Ces tensions sont appelées **tensions nominales** ; ce sont en générale les tensions composées du réseau $U_1 = U_{1N}$. De même, il convient de connaître les **tensions nominales** U_{2N} disponibles au secondaire. En générale ce sont les tensions composées entre deux fils de phase. Ces deux tensions sont précisées sur la plaque signalétique du transformateur.

- Le rapport de transformation : C'est le rapport M entre les tensions composées du réseau triphasé du secondaire à vide et les tensions composées nominales du réseau triphasé d'alimentation au primaire:

$$M = \frac{U_{20}}{U_{1N}}$$

Si l'on appelle N_1 et N_2 les nombres de spires des bobinages primaires et secondaires, le rapport $m = N_2 / N_1$ est le rapport de transformation sur une colonne du circuit magnétique, c'est à dire le rapport des tensions aux bornes des bobinages.

$$m = \frac{N_2}{N_1}$$

Le rapport m entre les nombres de spires peut être différent du rapport de transformation M et dépend du couplage des enroulements primaires et secondaires.

- Dans le cas d'un couplage Dd , on retrouve aux bornes des bobinages primaires et secondaires les tensions composées donc $M = m$
 - Dans le cas d'un couplage Yy , on a aux bornes des bobinages au primaire comme au secondaire des tensions simples $\sqrt{3}$ fois moins élevées donc $M = m$
 - Dans le cas d'un couplage Dy , on retrouve aux bornes des bobinages primaires les tensions composées et au secondaire les tensions simples $\sqrt{3}$ fois moins élevées donc $M = m \cdot \sqrt{3}$
 - Dans le cas d'un couplage Yd , on retrouve aux bornes des bobinages primaires les tensions simples $\sqrt{3}$ fois moins élevées et au secondaire les tensions composées donc $M = m / \sqrt{3}$
- Les puissances mises en jeu : Nous avons vu que le rôle du transformateur est de transformer un courant ou une tension alternative en un autre courant ou tension alternative de même fréquence mais d'amplitude différente mais en évitant au maximum les pertes ; c'est à dire en conservant la puissance. Au secondaire la puissance fournie par le transformateur dépend de la nature de la charge triphasée utilisée :

Pour une charge triphasée purement résistive, la puissance fournie est $P_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 = S_2$ puissance apparente car $\cos\varphi_2 = 1$. Pour un charge inductive, $\cos\varphi_2 < 1$ donc la puissance fournie est $P_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2 < S_2$ et la puissance réactive $Q_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \sin\varphi_2 \neq 0$

Le fabricant ne connaissant pas l'utilisation qui sera faite, définit la puissance du transformateur par la **puissance apparente nominale** disponible au bobinage secondaire : $S = S_2 = S_N$. Si l'on considère que les pertes de puissance dans le transformateur sont négligeables, $S_1 = S_N$.

Cette relation permet de calculer les intensités nominales au primaire et au secondaire du transformateur.

$$S_N = \sqrt{3} \cdot U_{2N} \cdot I_{2N} \approx \sqrt{3} \cdot U_{1N} \cdot I_{1N}$$

1.2.6. Bilans des puissances

Le transformateur triphasé consomme une partie de l'énergie absorbée pour son fonctionnement interne. L'énergie qu'il va alors fournir sera plus petite que celle qu'il absorbe. Le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie absorbée est le rendement.

Le rendement se note η ; c'est un rapport d'énergie ou de puissance sans unité :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Le rendement peut être déterminé soit par la mesure directe de P_1 et P_2 , soit par la mesure des pertes. L'énergie ou la puissance perdue dans le transformateur est de deux types :

- Pertes dans le circuit magnétique appelées **pertes fer** dues au transport du flux. Ces pertes sont maximales lors que le flux transporté est maximal c'est à dire lorsque les tensions sont nominales.

Les pertes fer sont mises en évidence lorsque le transformateur fonctionne à vide :

Dans ce cas les tensions sont nominales donc le flux est maximal et les courants ont une intensité réduite : I_2 est nulle au secondaire et I_{1V} très faible au primaire.

La puissance absorbée à vide correspond sensiblement aux pertes fer :

$$P_{Fe} = P_{1V}$$

C'est pour diminuer ces pertes que le circuit magnétique est feuilleté.

- Pertes dans les circuits électriques appelées **pertes cuivre** ou **pertes Joule** dues à la résistance électrique des bobinages primaire et secondaire. Ces pertes sont maximales lors que les intensités des courants transportés sont maximales c'est à dire lorsque les intensités sont nominales.

Les pertes cuivre sont mises en évidence lorsque le transformateur fonctionne en court circuit :

Dans ce cas la tension U_{1CC} appelée **tension de court circuit** est la tension appliquée au bobinage primaire pour obtenir l'intensité I_{2N} nominale dans le bobinage secondaire en court circuit.

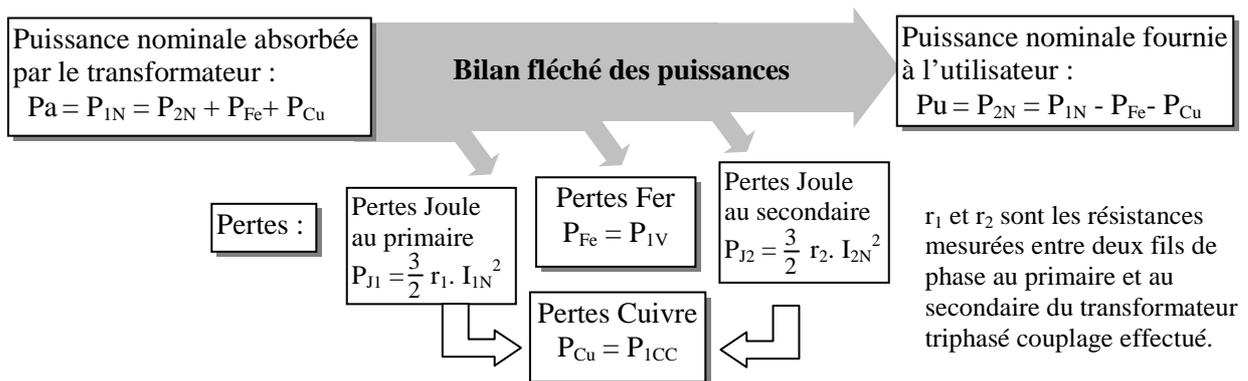
La tension de court circuit U_{1CC} est souvent indiquée en pourcentage de la tension nominale U_{1N} .

Les intensités sont nominales au primaire et au secondaire donc l'effet Joule est maximal et les tensions sont réduites : U_2 est nulle au secondaire, U_{1CC} très faible au primaire.

La puissance absorbée par le transformateur lorsque le bobinage secondaire est en court circuit correspond sensiblement aux pertes cuivre :

$$P_{Cu} = P_{1CC}$$

On a alors le bilan des puissances mises en jeu dans un transformateur en fonctionnement nominal que l'on représente par une flèche qui rétrécit au fur et à mesure que l'énergie diminue.



Détermination du rendement par la méthode indirecte dite méthode des pertes séparées :

Soit on mesure P_1 absorbée par le transformateur lors d'un fonctionnement en charge nominale et on calcule le rendement en tenant compte des pertes :

$$\eta = \frac{P_{1N} - P_{Fe} - P_{Cu}}{P_{1N}}$$

Soit on détermine P_{2N} fournie par le transformateur à une charge nominale connue et on calcule le rendement en tenant compte des pertes :

$$\eta = \frac{P_{2N}}{P_{2N} + P_{Fe} + P_{Cu}}$$

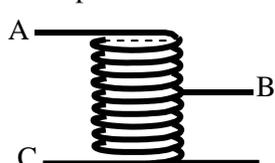
Par exemple pour une charge nominale résistive : $P_{2N} = \sqrt{3} \cdot U_{2N} \cdot I_{2N}$

1.3. Transformateurs particuliers

1.3.1. L'autotransformateur

L'autotransformateur monophasé est constitué d'une seule bobine commune au circuit primaire et au circuit secondaire. L'autotransformateur triphasé est constitué de 3 bobines communes au primaire et au secondaire.

Exemple d'un autotransformateur monophasé :



La borne C est commune au primaire et au secondaire

La borne B est connectée entre les bornes A et C

Entre B et C il y a donc moins de spires qu'entre A et C

Les relations entre les tensions et les intensités étudiées précédemment s'appliquent sur l'autotransformateur

Si la tension réseau est branchée entre A et C, l'autotransformateur est abaisseur de tension entre B et C

Si la tension réseau est branchée entre B et C, l'autotransformateur est éleveur de tension entre A et C.

Avantages : Un seul bobinage, donc transformateur plus petit, plus léger et surtout moins cher.

Inconvénients : Un seul bobinage, donc transformateur non isolé entre le primaire et le secondaire, risque de court circuit, impossibilité formelle de faire une mesure en court circuit.

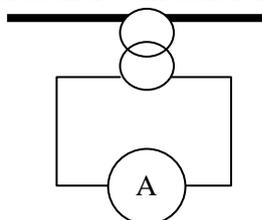
Lorsque le point B est réglable on parle alors d'**alternostat** : autotransformateur variable.

1.3.2. Le transformateur de mesures

Lorsque les tensions ou les intensités à mesurer sont trop élevées, on peut avoir recours à un transformateur qui permet l'utilisation d'appareil de mesures de calibres suffisants.

Exemple d'un transformateur de mesures : la pince ampèremétrique.

C'est le cas particulier d'un transformateur à une seule spire



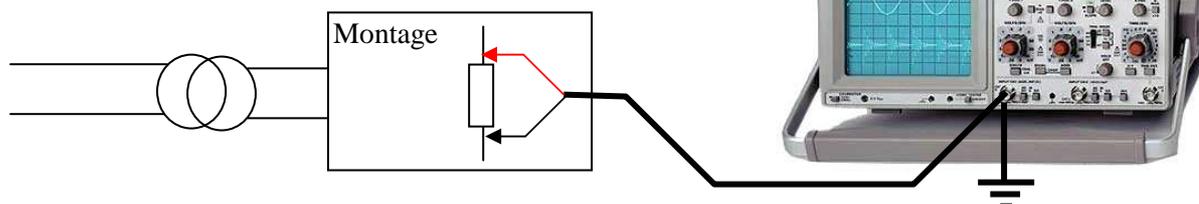
1.3.3. Le transformateur d'isolement

Lorsqu'un transformateur a un rapport de transformation égale à 1, il n'est utilisé que pour séparer électriquement le circuit primaire du circuit secondaire et donc isoler la charge branchée au secondaire du réseau branché au primaire. Ce type de transformateur est utile lorsque le réseau utilisé est très perturbé : Le flux transmis au secondaire filtre les perturbations et la tension induite est 'propre'.

Le transformateur d'isolement peut également être utilisé pour des mesures de différence de potentiel afin d'isoler la masse de l'oscilloscope et les points de mesure.

Toutefois il est préférable d'utiliser des sondes de mesures.

Exemple :



1.4. Exemples d'exercice

Exemple N°1 : Exercice sur le transformateur monophasé

Un transformateur monophasé est alimenté en courant alternatif 400 V 50 Hz.

Il est constitué de 2 enroulements : l'enroulement primaire comporte 720 spires
l'enroulement secondaire comporte 87 spires.

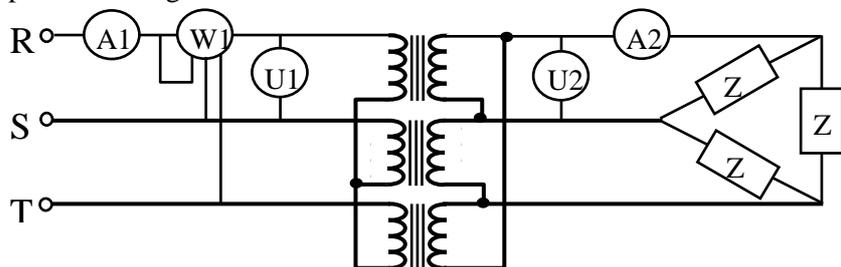
On effectue un essai à charge nominale résistive. L'intensité mesurée au secondaire est alors de 13 A. On effectue ensuite une mesure voltampèremétrique en continu pour mesurer la résistance des enroulements primaire et secondaire :

Au secondaire on obtient : $U_2 = 1,55 \text{ V}$ $I_2 = 13 \text{ A}$
Au primaire on obtient : $U_1 = 12 \text{ V}$ $I_1 = 1,7 \text{ A}$

- 1° Déterminer la tension nominale secondaire ?
- 2° Déterminer la puissance nominale du transformateur ?
- 3° Déterminer l'intensité nominale primaire ?
- 4° Quelle intensité et quelle puissance peut-il fournir au maximum à un moteur dont le facteur de puissance est 0,75 ?
- 5° Déterminer les résistances des enroulements primaire et secondaire ?
- 6° Déterminer la puissance perdue par effet Joule dans les enroulements ?
- 7° Proposer une plaque signalétique :

Exemple N°2 : Exercice sur le transformateur triphasé

Un transformateur triphasé 400V / 48V 630 VA alimente une charge triphasée constituée de 3 impédances Z identiques couplées en triangle :



On effectue deux essais :

Essais	U1 (V)	A1 (A)	W1 (W)	U2 (V)	A2 (A)
A vide	402	0,16	25	49,5	0
En charge	402	0,72	385	49,1	4,9

Une mesure de résistances entre deux fils de phases donne : $r_1 = 11,4 \Omega$ et $r_2 = 0,55 \Omega$

- 1° Quel est le couplage du transformateur ?
- 2° Calculer l'intensité nominale secondaire
- 3° Déterminer la tension aux bornes d'un enroulement primaire, et d'un enroulement secondaire
- 4° Quel est le facteur de puissance à vide
- 5° Quel est le rapport de transformation à vide
- 6° Déterminer les pertes cuivres en charges
- 7° Déterminer les pertes fer
- 8° Calculer le rendement en charge
- 9° Quelle est l'intensité dans une impédance
- 10° En déduire la valeur de l'impédance Z

Exemple N°1 : Réponses et explications

- 1° On utilise les relations donnant le rapport de transformation : $m = V_2 / V_1 = N_2 / N_1$
On connaît V_1 , N_2 , et N_1 donc $V_2 = V_1 \times N_2 / N_1 \rightarrow V_2 = 400 \times 87 / 720 \rightarrow \boxed{V_2 = 48,3 \text{ V}}$
- 2° La puissance nominale du transformateur est celle pour laquelle le transformateur a été réalisé.
Puissance apparente : $S_N = V_{2N} \times I_{2N} \rightarrow S_N = 48,3 \times 13 \rightarrow \boxed{S_N = 630 \text{ VA}}$ valeur normalisée
- 3° On utilise la relation donnant la puissance apparente (en négligeant les pertes dans le transfo)
 $S_N = V_{1N} \times I_{1N} \rightarrow I_{1N} = S_N / V_{1N} \rightarrow I_{1N} = 630 / 400 \rightarrow \boxed{I_{1N} = 1,57 \text{ A}}$
- 4° L'intensité maximale fournie est l'intensité nominale: $I_{2N} = 630 / 48,3 \rightarrow \boxed{I_{2N} = 13 \text{ A}}$
La puissance maximale pour $\cos\phi_2 = 0,75$ est $P_2 = V_{2N} \cdot I_{2N} \cdot \cos\phi_2 \rightarrow \boxed{P_2 = 471 \text{ W}}$
- 5° La résistance des enroulements est donnée par la mesure voltampèremétrique en continu
 $R_1 = V_1 / I_1 = 12 / 1,7 \rightarrow \boxed{R_1 = 7 \Omega}$ $R_2 = V_2 / I_2 = 1,55 / 13 \rightarrow \boxed{R_2 = 0,119 \Omega}$
- 6° La puissance perdue par effet Joule est la puissance dissipée au primaire et au secondaire
 $P_{\text{Joule}} = P_{J1} + P_{J2} = R_1 \cdot I_{1N}^2 + R_2 \cdot I_{2N}^2 \rightarrow \boxed{P_{\text{Joule}} = 40,3 \text{ W}}$
- 7° La plaque signalétique donne les valeurs normalisées :

Transformateur monophasé
N° série : Réf :
Fréquence : 50 Hertz
Tension : 400 V / 48 V
Puissance : 630 VA

Exemple N°2 : Réponses et explications

- 1° Le transformateur est abaisseur de tension avec le primaire couplé en étoile et le secondaire en triangle. Le couplage est donc $\boxed{\text{Yd}}$
- 2° L'intensité nominale au secondaire est donnée par la relation de la puissance apparente :
 $\boxed{} \quad S_N = \sqrt{3} \times U_{2N} \times I_{2N} \rightarrow I_{2N} = S_N / (\sqrt{3} \times U_{2N}) \rightarrow I_{2N} = 630 / (\sqrt{3} \times 48) \rightarrow \boxed{I_{2N} = 7,6 \text{ A}}$
- 3° Couplage étoile au primaire donc tension simple aux bornes d'un enroulement : $\boxed{230 \text{ V}}$
 $\boxed{}$ Couplage triangle au secondaire donc tension composée aux bornes d'un enroulement : $\boxed{48 \text{ V}}$
- 4° Le facteur de puissance est donné par la relation de la puissance :
à vide on a $P_{1V} = \sqrt{3} \times U_{1V} \times I_{1V} \cos\phi_{1V} \rightarrow \cos\phi_{1V} = P_{1V} / (\sqrt{3} \times U_{1V} \times I_{1V}) \rightarrow \boxed{\cos\phi_{1V} = 0,22}$
- 5° Le rapport de transformation à vide est le rapport des tension à vide :
 $M_V = U_{2V} / U_{1V} = 49,5 / 402 \rightarrow \boxed{M_V = 0,123}$
- 6° Les pertes cuivre en charges sont les pertes par effet Joule au primaire et au secondaire :
 $\boxed{} \quad P_{\text{Cu}} = P_{J1} + P_{J2} = \frac{3}{2} r_1 \cdot I_1^2 + \frac{3}{2} r_2 \cdot I_2^2 = \frac{3}{2} \times 11,4 \cdot 0,72^2 + \frac{3}{2} \times 0,55 \cdot 4,9^2 \rightarrow \boxed{P_{\text{Cu}} = 28,7 \text{ W}}$
- 7° Les pertes fer sont données par la mesure de la puissance absorbée à vide :
 $\boxed{} \quad P_{\text{Fe}} = P_{1V} \rightarrow \boxed{P_{\text{Fe}} = 25 \text{ W}}$
- 8° Le rendement en charge est $\eta = P_2 / P_1$. On connaît P_1 et $P_2 = P_1 - \text{pertes} \rightarrow P_2 = P_1 - P_{\text{Cu}} - P_{\text{Fe}}$
 $\boxed{} \quad \text{D'ou le rendement } \eta = P_2 / P_1 = (P_1 - P_{\text{Cu}} - P_{\text{Fe}}) / P_1 = 331,3 / 385 \rightarrow \boxed{\eta = 0,86}$
sans unité
- 9° L'intensité dans une impédance au secondaire est égale $\sqrt{3}$ fois plus petite que l'intensité en ligne (couplage triangle des impédances) : $I_Z = I_2 / \sqrt{3} \rightarrow \boxed{I_Z = 2,83 \text{ A}}$
- 10° La valeur de l'impédance est donnée par la loi d'Ohm :
aux bornes d'une impédance on a : $Z = U_2 / I_Z = 49,1 / 2,83 \rightarrow \boxed{Z = 17,35 \Omega}$

Autocorrection

1.5. Exercices à résoudre

Exercice N°1 : Transformateur monophasé

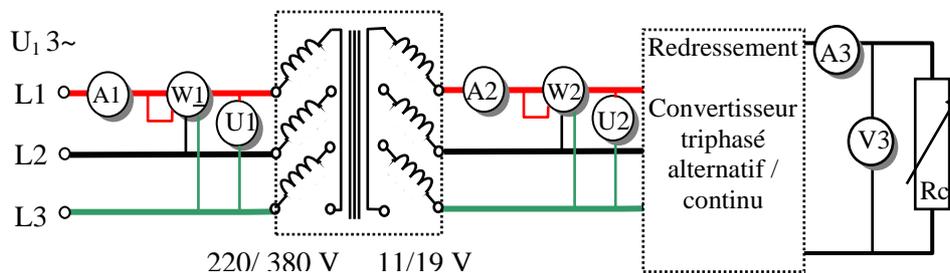
Un transformateur dont la plaque signalétique est reproduite ci-dessous a été soumis à deux essais :

400 VA 50 Hz
230 V / 24 V

Essai	U_1 (V)	I_1 (A)	P_1 (W)	I_2 (A)
A vide	230	0,3	21	0
En court-circuit	15	1,8	35	16,7

- 1° Déterminer I_{1N} ?
- 2° Déterminer I_{2N} ?
- 3° Déterminer m ?
- 4° Déterminer $\cos\phi_1$ à vide ?
- 5° Déterminer U_{cc} ?
- 6° Déterminer P_{Cu} ?
- 7° Déterminer P_{Fe} ?
- 8° Déterminer P_2 fournie par le transfo à une charge nominale résistive ?
- 9° En déduire P_1 absorbée dans ces conditions par le transformateur ?
- 10° Calculer le rapport P_2 / P_1 appelé rendement du transformateur.

Exercice N°2 : Montage redressement triphasé :



Essai	U_1	A_1	W_1	U_2	A_2	W_2	V_3	A_3
A vide	230V	0,06A	12W	21,4V	0A	0W	29V	0A
En charge	221V	0,11 A	39W	20,5V	0,77A	25,5W	27,7V	0,831A

- 1° En fonction des mesures effectuées dessiner le couplage des enroulements du transformateur
- 2° Quelle est la valeur des pertes fer du transformateur ?
- 3° Calculer au primaire du transformateur à vide : puissance apparente et facteur de puissance
- 4° Calculer au primaire du transformateur en charge : puissance apparente et facteur de puissance
- 5° Calculer le rendement du transformateur :
- 6° Calculer la puissance dissipée par la charge :
- 7° Calculer la puissance dissipée par l'ensemble transformateur – redresseur
- 8° Calculer le rendement de l'ensemble transformateur – redresseur
- 9° Calculer le rapport de transformation du transformateur à vide :
- 10° Calculer le nombre de spires au secondaire, sachant que le primaire en compte 1500.

Travail personnel



2. LES MACHINES A COURANT ALTERNATIF

Les **machines à courant alternatif** sont des convertisseurs d'énergie :

Soit ils convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique lorsqu'ils sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour démarrer puis entraîner une charge en mouvement.

On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en **moteur**.

Soit ils convertissent l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'ils subissent l'action d'une charge entraînée. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en **générateur**.

Nous avons vu dans le chapitre 10 les différents modes de fonctionnement d'une machine électrique: Ces modes de fonctionnements peuvent être résumés en 4 quadrants suivant le schéma ci-dessous selon que la puissance mécanique est fournie par la machine (cas du fonctionnement en moteur) ou bien que la puissance mécanique est absorbée par la machine (cas du fonctionnement en générateur).

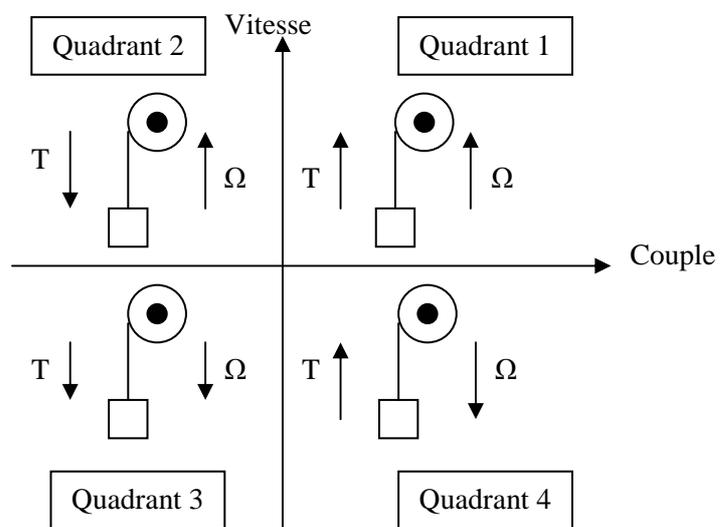
La puissance mécanique étant le produit du couple mécanique par la vitesse angulaire de rotation, les quadrants 1 et 3 correspondent à un fonctionnement en moteur et les quadrants 2 et 4 correspondent à un fonctionnement en générateur.

T représente le couple mécanique,
 Ω représente la vitesse angulaire de rotation,

La puissance mécanique $P = T \cdot \Omega$

Si T et Ω sont positifs ou négatifs la puissance mécanique est positive donc fournie (moteur).

Si T ou Ω sont positifs ou négatifs la puissance mécanique est négative donc absorbée (générateur).



Dans ce chapitre nous allons étudier plus particulièrement le principe des moteurs électriques fonctionnant à partir de courants alternatifs triphasés et monophasés et le principe des générateurs électriques fournissant des courants électriques alternatifs appelés aussi alternateurs.

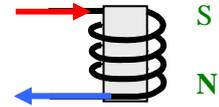
Nous rappelons également que les machines à courants alternatifs sont des **machines réversibles** : lorsqu'elles absorbent de l'énergie électrique elles fournissent de l'énergie mécanique entraînée et inversement,

lorsqu'elles sont entraînée par une énergie mécanique, elles fournissent de l'énergie électrique.

2.1. Les moteurs à courant alternatif

2.1.1. Champ tournant

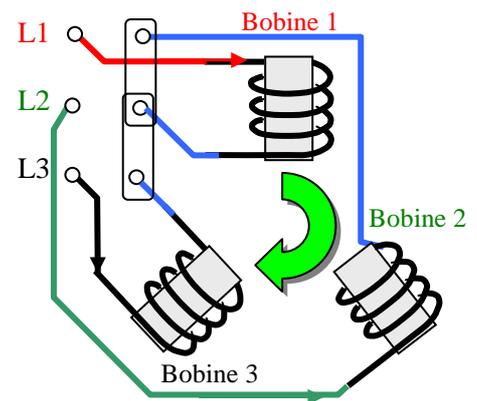
- Rappel : Une bobine parcourue par un courant électrique est un électro-aimant avec 2 pôles : Nord - Sud.
Un courant électrique alternatif crée un champ magnétique alternatif



TOUT COURANT ELECTRIQUE CREE UN CHAMP MAGNETIQUE

- Alimentation avec un système de courants triphasés :
Si l'on dispose à 120° l'une de l'autre 3 bobines identiques couplées en étoile et alimentées avec un réseau de courants triphasés de fréquence 50Hz, la phase 2 étant en retard sur la phase 1 de 120° et la phase 3 en retard sur la phase 2 de 120° .

Successivement les bobines 1 puis 2 puis 3 sont parcourues par un courant électrique alternatif
Au milieu des 3 bobines, on a successivement un pôle Nord sur la bobine 1 puis 2 puis 3, puis Sud puis etc...



TOUT COURANT ELECTRIQUE ALTERNATIF TRIPHASE CREE UN CHAMP MAGNETIQUE TOURNANT

Si l'on place au milieu des 3 bobines ainsi alimentées une aiguille aimantée, elle se met à tourner dans le sens horaire à la fréquence de rotation de 50 tours par seconde. Cette fréquence de rotation est la même que celle des courants dans les bobines : c'est la fréquence de rotation du champ tournant : on l'appelle **fréquence de synchronisme** notée n_s

Si l'on inverse l'ordre de deux phases alimentant les bobines, on inverse le sens de rotation du champ tournant et l'aiguille aimantée tourne en sens inverse mais toujours à la même fréquence.

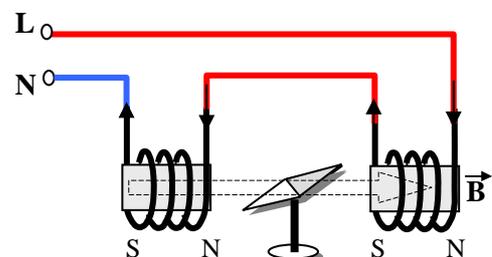
Si l'on supprime deux des phases par exemple en coupant l'alimentation des bobines 2 et 3, seule la bobine 1 reste alimentée par un courant monophasé, l'aiguille aimantée continue de tourner dans le sens où elle a été lancée et à la même fréquence de synchronisme.

- Alimentation avec un système de courant monophasé :

Si on alimente deux bobines branchées en série en respectant bien le sens des enroulements, avec un courant alternatif monophasé de fréquence 50 Hz, on crée entre les bobines un champ alternatif de même fréquence.

Une aiguille placée dans ce champ vibre mais ne tourne pas. Si elle est lancée dans un sens ou dans l'autre, elle se met à tourner à la fréquence de synchronisme. En fait tout ce passe comme si il existait deux champs tournants en sens inverse et dont la somme des amplitudes serait égale à l'amplitude du champ monophasé alternatif.

Théorème de Leblanc : un champ magnétique rectiligne alternatif créé par une bobine alimentée en courant alternatif est équivalent à deux champs de valeur égale tournants en sens contraires.



2.1.2. Moteur triphasé synchrone

Constitution :

Le moteur triphasé synchrone est constitué de :

- Un stator, circuit électrique alimenté par un réseau de courant triphasé créant un champ tournant qui entraîne
- Un rotor, circuit magnétique ou électro-magnétique en rotation.
- Un ensemble mécanique pour la fixation et le guidage.

Principe :

- Le stator partie fixe ou statique du moteur est constitué d'un circuit magnétique portant les enroulements de 3 bobines identiques disposées à 120° l'une de l'autre qui, alimentées par un réseau triphasé créent un champ magnétique tournant à la fréquence n égale à la fréquence f du réseau.

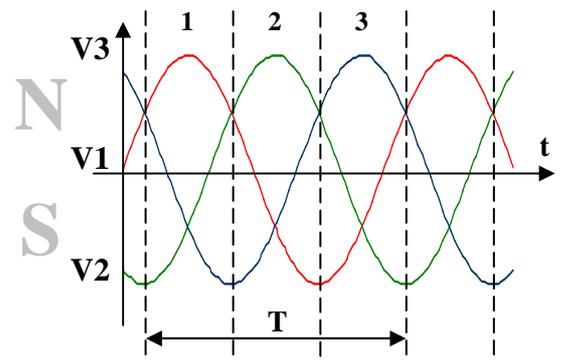
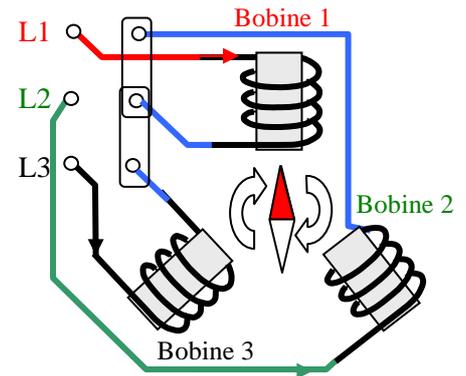
C'est le circuit exciteur ou inducteur.

Le champ tournant entraîne en rotation le rotor

- Le rotor partie mobile ou en rotation du moteur est constitué d'un aimant ou d'un électroaimant alimenté en courant continu par l'intermédiaire de balais.

C'est le circuit induit de la machine.

Cet électro-aimant équivalent à un aimant avec 1 pôle Nord et 1 pôle Sud fait 1 tour par période.



Dans le cas d'EDF, $f=50\text{Hz}$ et la période $T=20\text{ms}$
Toutes les 6,67 ms le pôle Sud de l'aiguille est attiré par le Nord des bobines 1, puis 2, puis 3, etc
L'aiguille fait donc un tour par période, soit 50 tours par seconde ou 3000 tours par minute

Le moteur synchrone tourne à la fréquence du champ tournant ou fréquence de synchronisme.

Selon le type de bobinage des enroulements, le stator peut comporter une ou plusieurs paires de pôle :

Si on appelle p le nombre de paires de pôles par phase,

Un moteur bipolaire comporte 2 pôles (1 nord et 1 sud) donc une paire de pôles : $p = 1$;

Un moteur tétrapolaire comporte 4 pôles (2 nord et 2 sud) donc 2 paires de pôles : $p = 2$;

Un moteur hexasolaire comporte 6 pôles (3 nord et 3 sud) donc 3 paires de pôles : $p = 3$; etc...

La fréquence de synchronisme du champ tournant est d'autant plus faible que le nombre p de paire de pôles est important. Pour un moteur tétrapolaire, $p = 2$ et la fréquence de synchronisme est $n = f / 2$, soit $n = 25\text{tr/s}$ ou $n^* = 1500\text{tr/s}$ et la vitesse angulaire de synchronisme est $\Omega = 2 \pi n = 157\text{rad/s}$.

Ainsi le rotor, appelé aussi roue polaire

va tourner à la fréquence :

$n = f / p$ appelée fréquence de synchronisme en tours/seconde

ou à la vitesse angulaire :

$\Omega = 2 \pi n$ appelée vitesse de synchronisme en radians/seconde

Définitions et conventions d'écriture :

On appelle : n les fréquences de rotation : nombre de tours effectués par seconde

On appelle : Ω les vitesses angulaires de rotation : angle en radian balayé en une seconde

On appelle : p le nombre de paires de pôles de la machine tournante

Et pour simplifier les écritures, nous conviendrons de noter :

Avec une étoile, les fréquences de rotation exprimées en tours par minute ($n^* = 60 \cdot n$)

Avec une prime, les fréquences de rotation réelles du rotor ($n = n'$ pour un moteur synchrone)

2.1.3. Moteur triphasé asynchrone

Le moteur asynchrone triphasé est utilisé dans de très nombreux équipements industriels.

Constitution :

Le moteur asynchrone triphasé est constitué de :

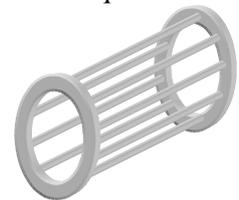
- Un stator, circuit électrique alimenté par un réseau de courant triphasé créant un champ tournant qui démarre et entraîne
- Un rotor, court-circuit refermé sur lui-même en rotation
- Un ensemble mécanique pour la fixation et le guidage.

Principe :

- Le stator partie fixe ou statique du moteur est constitué d'un circuit magnétique portant les enroulements de 3 bobines identiques disposées à 120° l'une de l'autre qui, alimentées par un réseau triphasé créent un champ magnétique tournant à la fréquence n égale à la fréquence f du réseau. C'est le circuit exciteur ou inducteur.

Le champ tournant entraîne en rotation le rotor.

Loi de Faraday : Toutes variations de flux dues à la rotation du champ tournant dans le stator créent des courants induits dans un circuit fermé : le rotor



- Le rotor partie mobile ou en rotation du moteur est constitué d'un ensemble de barres métalliques en aluminium reliées entre elles aux extrémités par deux couronnes formant ainsi une cage appelée cage d'écureuil. C'est le **rotor à cage** (le plus répandu)

Loi de Lenz : Les courants induits dans le rotor s'opposent à la cause qui leur donne naissance en créant des pôles rotor qui se lancent à la poursuite du champ tournant à une fréquence de rotation n' toujours légèrement inférieure à celle du champ tournant : on dit qu'il y a glissement.

Le moteur asynchrone tourne à une fréquence légèrement inférieure à celle du champ tournant.

La variation de flux crée des courants induits au rotor qui s'opposent à cette variation. S'il n'y a plus de variation de flux, il n'y a plus de courants induits.

Donc les variations de flux ne peuvent jamais totalement disparaître.

Le rotor est parfois réalisé avec 3 bobines couplées en étoile : c'est le **rotor bobiné** ou **rotor à bagues** C'est le cas en particulier des moteurs de très forte puissance.

Le glissement :

La grandeur qui caractérise la différence de vitesse entre le champ tournant au stator et la vitesse de rotation du rotor légèrement inférieure est appelée **glissement** noté g en %

$$g = \frac{n - n'}{n} = \frac{n^* - n^{*'}}{n^*} = \frac{\Omega - \Omega'}{\Omega}$$

en tr/s
en tr/mn
en rad/s

- avec: n fréquence de rotation du champ tournant ou fréquence de synchronisme
 n' fréquence de rotation réelle du rotor
 Ω vitesse angulaire de synchronisme : $\Omega = 2 \pi n$
 Ω' vitesse angulaire de rotation réelle du rotor : $\Omega' = 2 \pi n'$

2.1.4. Moteur monophasé

Le moteur asynchrone monophasé est utilisé dans de très nombreux appareils domestiques.

Le moteur monophasé est constitué d'un stator partie fixe comprenant les enroulement et d'un rotor en court circuit mis en rotation.

Le stator est constitué d'une ou deux bobines en série constituant l'enroulement principal et d'un enroulement secondaire ou pôle auxiliaire.

Le rotor est constitué d'une bobine ou d'une cage d'écurieul dans le cas des moteurs asynchrones.

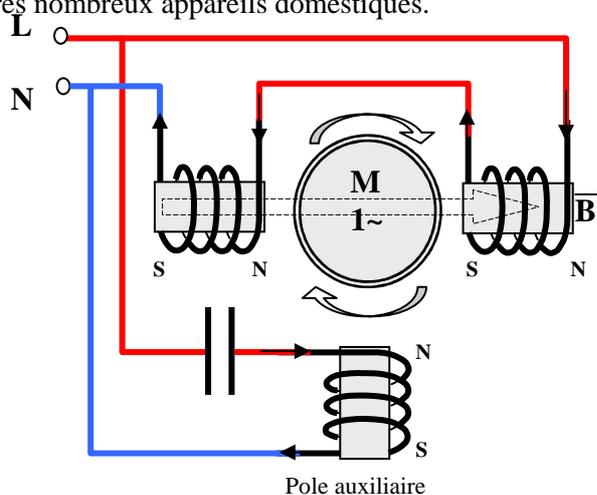
D'après le théorème de Leblanc, on sait qu'un champ magnétique rectiligne alternatif créé par une bobine alimentée en courant alternatif est équivalent à deux champs de valeur égale tournants en sens contraires.

En l'absence de pôle auxiliaire, le rotor est placé dans un champ alternatif: il vibre et ne tourne pas.

Si on lance le rotor dans un sens ou dans l'autre, il se met à tourner.

Dans la pratique, on effectue le démarrage du moteur en alimentant le pôle auxiliaire par l'intermédiaire d'un condensateur qui déphase l'alimentation de l'enroulement principal et lance le moteur dans un sens à la mise sous tension. Lorsque le moteur a atteint sa vitesse nominale, le condensateur est mis hors circuit.

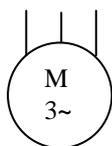
Nous venons de voir qu'il faut alimenter 3 bobines pour faire fonctionner un moteur monophasé. Il est donc possible de faire fonctionner un moteur triphasé 230V/400V 50 Hz de faible puissance sous une alimentation monophasée 230V 50 Hz, mais avec un rendement de mauvaise qualité.



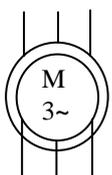
En l'absence de pôle auxiliaire, le moteur monophasé vibre mais ne démarre pas.

2.1.5. Repérages et symboles

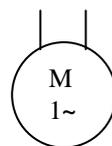
- Moteur asynchrone triphasé: à rotor à cage



- Moteur asynchrone triphasé: à rotor à bagues

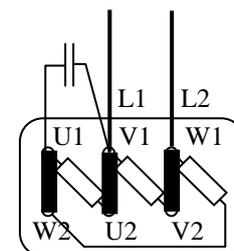
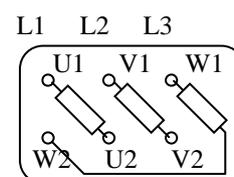


- Moteur asynchrone monophasé: à rotor à cage



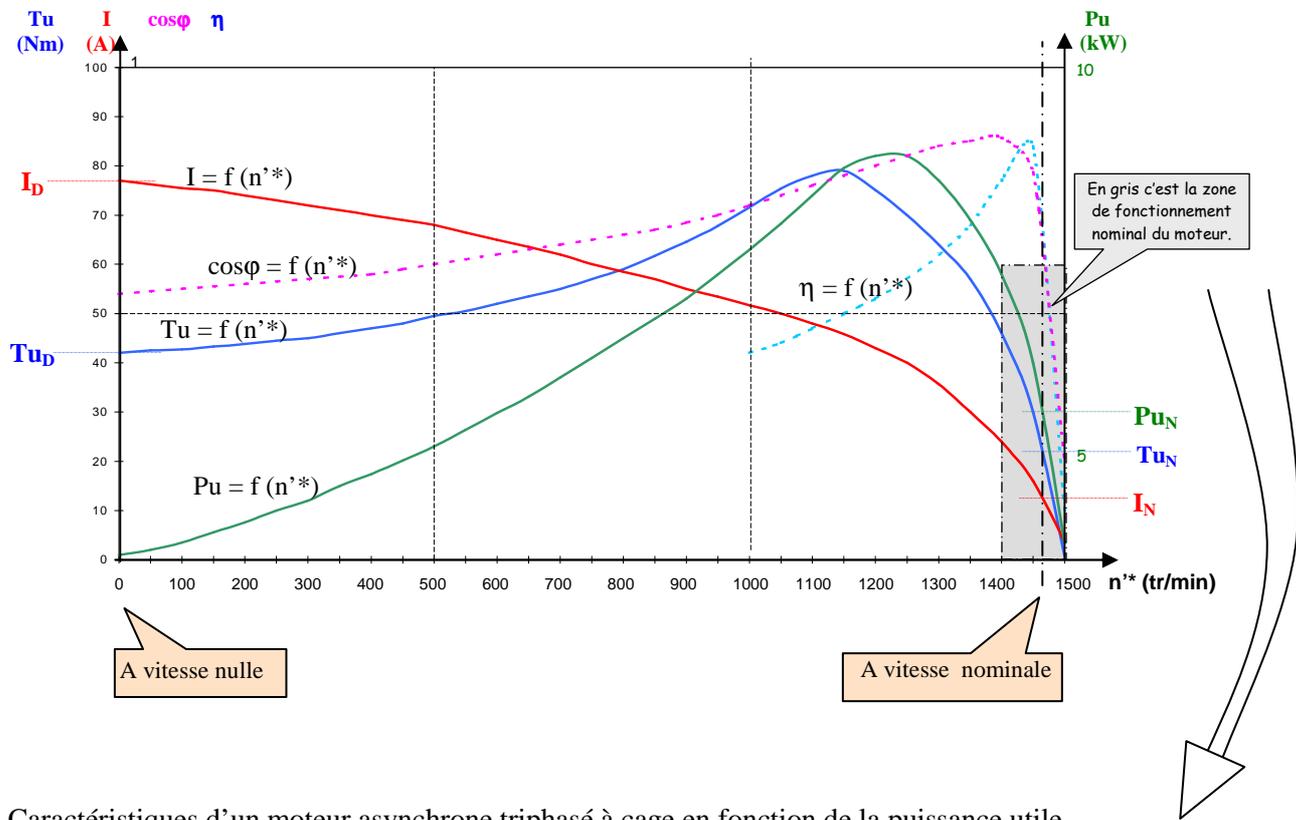
- Raccordement d'un moteur triphasé 230V/400V à un réseau monophasé 230V

Plaque à bornes: permettant le couplage étoile ou triangle sur un réseau triphasé

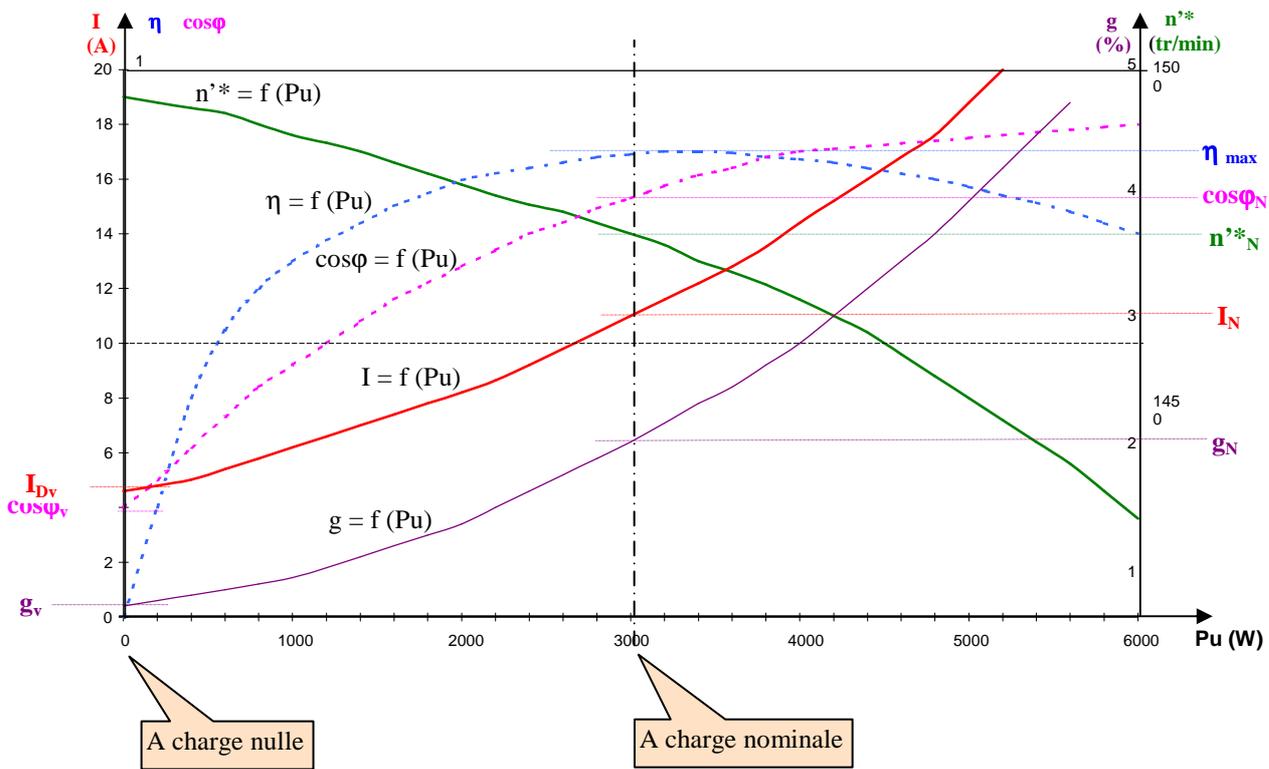


2.1.6. Caractéristiques de fonctionnement

Caractéristiques d'un moteur asynchrone triphasé à cage en fonction de sa vitesse de rotation



Caractéristiques d'un moteur asynchrone triphasé à cage en fonction de la puissance utile



- L'analyse des caractéristiques d'un moteur asynchrone triphasé à cage en fonction de sa vitesse de rotation permet de mettre en évidence que :
 - le couple T_{uD} de démarrage est important et toujours supérieur au couple nominal T_{uN} .
 - le courant I_D de démarrage est très important 3 à 7 fois le courant nominal I_N ce qui, pour les moteurs assez gros, nécessite de prévoir un procédé de démarrage pour limiter le courant.
 - Le facteur de puissance est assez faible
 - Le rendement n'existe pas car la puissance utile est nulle ($n^* = 0$)
 - La fréquence de rotation du moteur est proche de la fréquence de synchronisme
- L'analyse des caractéristiques d'un moteur asynchrone triphasé à cage en fonction de la puissance utile qu'il fournit permet de mettre en évidence que :
 - à vide ou à charge nulle,
 - le facteur de puissance et le glissement sont très faibles
 - L'intensité est importante environ $I_N / 2$
 - Le rendement n'existe pas car la puissance utile est nulle.
 - avec la charge,
 - le facteur de puissance, le glissement augmentent
 - le couple et l'intensité augmentent
 - le rendement augmente jusqu'au maximum pour la charge nominale

2.1.7. Bilan des puissances des moteurs triphasés

Les moteurs triphasés consomment une partie de l'énergie absorbée pour leur fonctionnement interne. L'énergie mécanique fournie sera toujours plus petite que l'énergie électrique absorbée. Le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie absorbée est le rendement.

Le rendement se note η ; c'est un rapport d'énergie ou de puissance sans unité :

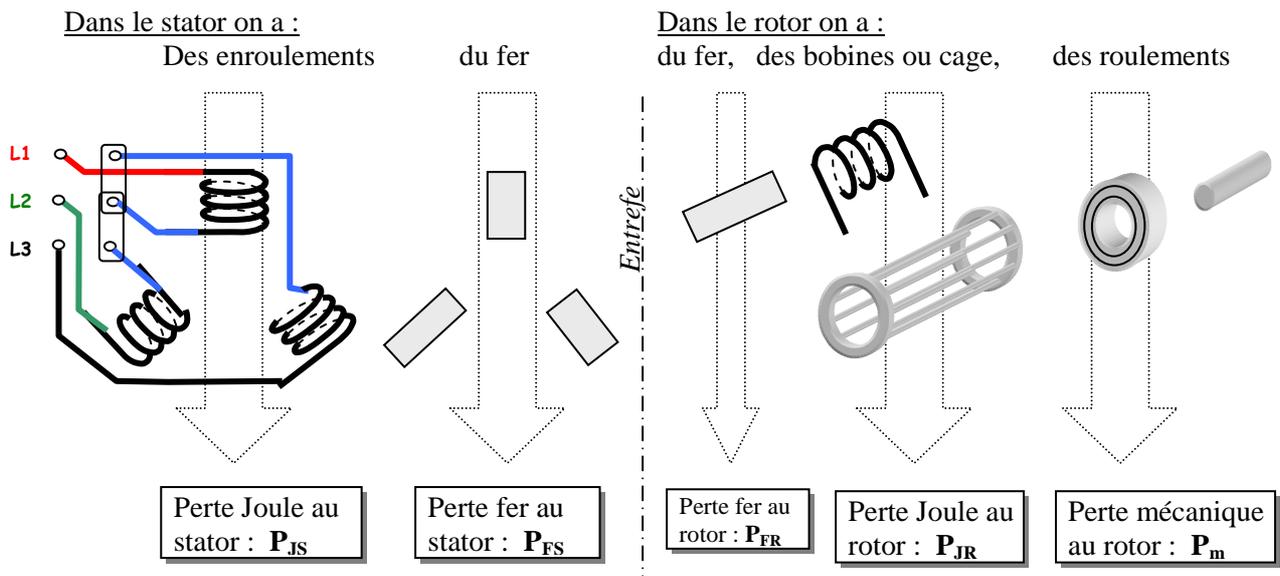
$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

Le rendement peut être déterminé soit par le calcul ou la mesure directe de P_a et P_u , soit par la mesure ou la détermination des pertes.

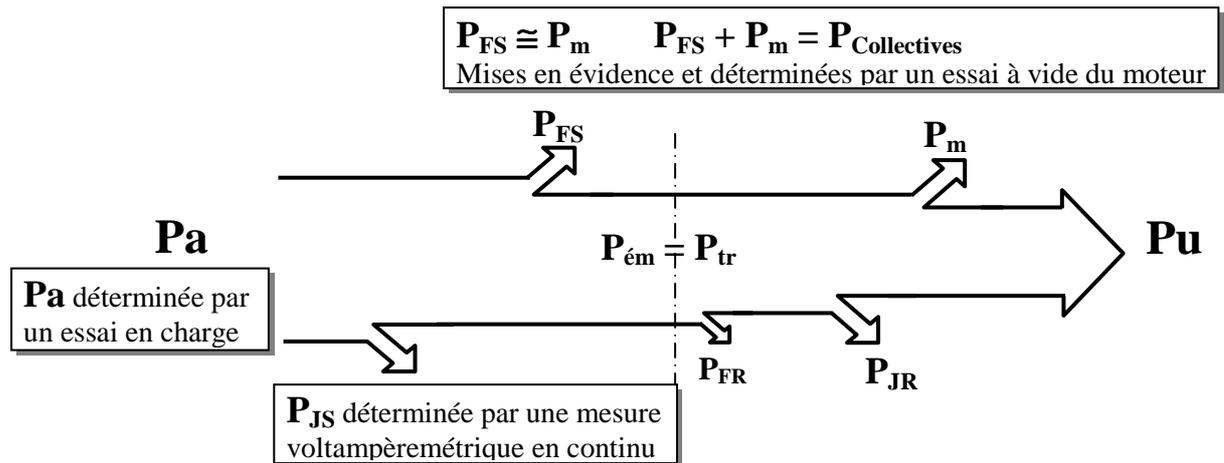
- La puissance électrique absorbée est mesurée directement avec un wattmètre triphasé (chapitre 9) ou bien calculée selon la relation donnant la puissance en triphasée : $P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi$ avec U tension composée du réseau, I intensité en ligne, $\cos\phi$ facteur de puissance du moteur
- La puissance mécanique fournie est déterminée selon la relation : $P_u = T_u \cdot \Omega'$ Avec T_u couple utile fourni en Nm (newton mètre) et Ω' vitesse angulaire de rotation en rad/s

L'énergie ou la puissance perdue dans les moteurs est dissipée dans le stator et dans le rotor.

- **Dans le stator** elle est de deux types :
 - Pertes fer** dans le circuit magnétique dues au champ tournant notée P_{FS} (fer stator)
 - Pertes cuivre** dans le circuit électrique dues à l'effet Joule notée P_{JS} (Joule stator)
- Dès lors l'énergie ou la puissance transmise au rotor est égale à : $P_{tr} = P_a - P_{FS} - P_{JS}$
 Cette puissance transmise du stator vers le rotor par l'action du champ tournant est due au couple électromagnétique présent dans l'entrefer du moteur : $P_{tr} = P_{em} = T_{em} \cdot \Omega$
- **Dans le rotor** elle est de trois types :
 - Pertes fer** dans le circuit magnétique dues à la fréquence des courants notée P_{FR} (fer rotor)
 - Pertes cuivre** dans le circuit électrique dues à l'effet Joule dans le rotor notée P_{JR} (Joule rotor)
 - Pertes mécanique** dans les éléments en rotation dues aux frottements notée P_M (mécanique)
- La puissance mécanique utile est égale à : $P_u = P_a - P_{FS} - P_{JS} - P_{FR} - P_{JR} - P_M = T_u \cdot \Omega'$



On a alors le bilan des puissances mises en jeu dans un moteur triphasé en fonctionnement nominal que l'on représente par une flèche qui rétrécit au fur et à mesure que l'énergie ou la puissance diminue.



Puissance électrique absorbée : $P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi$ mesurée avec un wattmètre triphasé

- Au stator : Pertes Joules : $P_{JS} = \frac{3}{2} r \cdot I^2$ r résistance entre 2 fils de phase moteur couplé
- Pertes fer : $P_{FS} = P_C / 2$ pertes collectives obtenues par un essai à vide
- Entrefer : Puissance électromagnétique transmise : $P_{tr} = P_{em} = T_{em} \cdot \Omega$
- Au rotor : Pertes fer : $P_{FR} \approx 0$ car fréquence des courants très faible au rotor
- Pertes Joule : $P_{JR} = g \cdot P_{tr}$ g glissement: $g = (n - n') / n$
- Pertes mécanique : $P_M = P_C / 2$ pertes collectives obtenues par un essai à vide

Puissance mécanique utile : $P_u = P_a - \text{pertes}$

D'où le rendement d'un moteur triphasé :

$$\eta = \frac{P_a - \text{Pertes}}{P_a}$$

2.1.8. Démarrage des moteurs triphasés asynchrones

Au démarrage un moteur doit fournir un couple entraînant suffisamment important pour vaincre le couple résistance de la charge; De même au freinage il doit pouvoir retenir la charge entraînée. Il est donc nécessaire de dimensionner correctement un moteur en fonction du couple résistant de la charge. Si cela est le cas, l'étude des caractéristiques d'un moteur triphasé asynchrone montre que dans des conditions fonctionnement correct le couple de démarrage est bien supérieur au couple nominal.

A la mise sous tension du moteur, le démarrage est donc brutal et nécessite un courant de démarrage important sur le réseau. Ceci ne présente pas trop d'inconvénient pour des moteurs de faible puissance pour lesquels le démarrage est direct mais oblige l'utilisateur à mettre en œuvre des procédés de démarrage pour les moteurs de puissances plus élevées de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts.

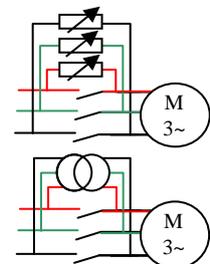
Ces procédés de démarrage sont de trois types:

- réduction de la tension d'alimentation du stator
- réduction de l'intensité des courants du rotor
- réduction de la fréquence de rotation

- Réduction de la tension d'alimentation du stator

Plusieurs procédés existent :

- Démarrage par élimination de résistances statoriques branchées en série avec le moteur présentant l'avantage de réduire l'intensité de démarrage mais aussi l'inconvénient de réduire considérablement le couple de démarrage.
- Démarrage par auto transformateur branché en série avec le moteur présentant l'avantage de réduire dans le même rapport l'intensité de démarrage et le couple de démarrage.
- Démarrage par couplage étoile triangle



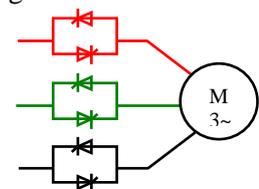
Ce procédé est le plus communément utilisé car le plus simple à mettre en œuvre et le moins onéreux. Il consiste à démarrer avec un couplage étoile (tension simple) un moteur prévu pour fonctionner avec un couplage triangle (tension composée);

Le démarrage se fait en deux temps :

couplage étoile donc tension réduite de $\sqrt{3}$ puis couplage triangle et tension nominale. Ce procédé permet de réduire d'un tiers l'intensité de démarrage et le couple de démarrage.

- Démarrage par gradateur électronique permettant le réglage de la tension appliquée sur le moteur.

Cet appareil réalisé avec deux thyristors montés tête bêche par phase d'alimentation permet de convertir une tension alternative fixe en une tension alternative de même fréquence mais de valeur efficace variable

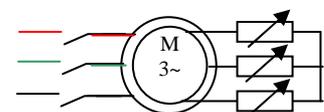


- Réduction de l'intensité des courants du rotor

Ce procédé est possible uniquement avec les moteurs à rotor bobiné avec accès aux 3 enroulements rotoriques par bagues. Il consiste à mettre en série avec les enroulements rotoriques des résistances variables.

Au démarrage, le moteur se comporte comme un transformateur dont le secondaire est le rotor.

En réduisant l'intensité du secondaire (rotor) au démarrage, on réduit l'intensité du primaire (stator) sans réduire le couple de démarrage. Ce procédé est donc très intéressant pour les moteurs de fortes puissances nécessitant un fort couple de démarrage.



- Réduction de la fréquence de rotation

Ce procédé consiste à utiliser un variateur de vitesse ou onduleur. Il permet de contrôler parfaitement le démarrage des moteurs triphasés asynchrones en jouant sur la fréquence de rotation du moteur et la tension d'alimentation.

2.1.9. Principe de la variation de vitesse

Le moteur asynchrone est de très loin le moteur le plus répandu car sa conception simple le rend très robuste et très fiable par rapport aux moteurs synchrones nécessitant des balais ou par rapport au moteur à courant continu nécessitant des charbons.

Une grande partie des applications dans lesquelles il est utilisé nécessite de pouvoir faire varier la vitesse de rotation tout en maintenant le couple moteur constant quelque soit le couple résistant.

Pour tous les moteurs électriques le couple moteur est proportionnel au flux et à l'intensité : $T_m = k \Phi I$

Les variateurs utilisés fonctionnent selon deux principes :

- Le contrôle en tension en maintenant le rapport U/f constant
- Le contrôle en courant par contrôle vectoriel du flux

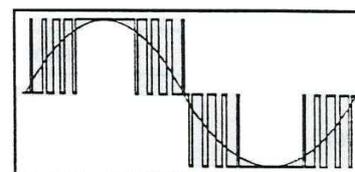
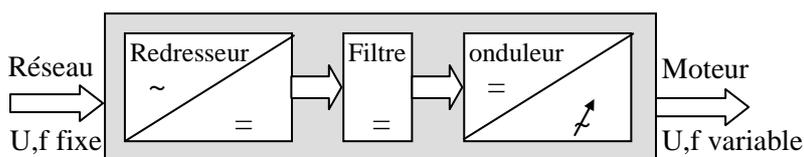
- Le contrôle en tension en maintenant le rapport U/f constant

Pour maintenir le couple T_m constant il faut maintenir le flux Φ dans le moteur constant

Le flux est créé par les enroulements du stator, on montre que le flux Φ est proportionnel à U/f ,

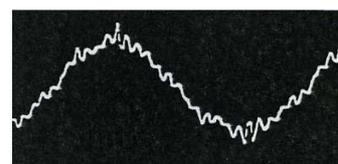
U et f étant la tension et la fréquence d'alimentation. Il faut donc maintenir le rapport U/f constant.

Le principe utilisé est celui d'un convertisseur qui effectue la conversion du secteur de tension et fréquence fixe en signaux de tension et fréquence variable appliqués au moteur.



Forme d'onde de la tension

Forme d'onde du courant



L'onduleur est constitué de 6 interrupteurs (transistors) dont la commande fonctionne suivant le principe de la Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI ou PWM en anglais) qui découpe la tension continue fixe et l'oriente dans un sens ou dans l'autre.

La valeur efficace vraie RMS de la tension est proportionnelle à la fréquence et le courant obtenu a une forme sinusoïdale.

Un tel variateur fonctionne en boucle ouverte ; Cela signifie qu'il n'y a pas d'information en retour : On affiche une consigne de vitesse mais il n'y a pas de contrôle. Si le couple résistant varie, la vitesse varie également.

Ce principe ne convient plus pour des fréquences et des tensions faibles car il est impossible de maintenir le rapport U/f constant.

- Le contrôle en courant par contrôle vectoriel du flux

Le contrôle vectoriel du flux permet d'obtenir des couples importants à très faible vitesse.

Pour maintenir le couple T_m constant il faut maintenir le flux Φ dans le moteur constant.

Le principe utilisé est aussi celui d'un convertisseur qui effectue la conversion du secteur de tension et fréquence fixe en signaux de tension et fréquence variable appliqués au moteur.

Par contre pour maintenir le flux constant, le variateur fonctionne en boucle fermée :

Une première boucle de régulation contrôle le courant d'alimentation et agit sur la tension.

Une deuxième boucle de régulation permet le contrôle de la vitesse de rotation. Pour cela on associe au moteur une dynamo tachymétrique qui renvoie au variateur une information de vitesse réelle du moteur et permet éventuellement la correction de la consigne de vitesse.

2.2. Les génératrices synchrones

La quasi totalité de l'électricité produite en France est issue d'alternateur de type synchrone. Une machine synchrone est une machine dont la fréquence de rotation du rotor est égale à la fréquence de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation.

2.2.1. Principe de l'alternateur triphasé

Le principe de fonctionnement de l'alternateur triphasé est le principe inverse du moteur synchrone triphasé : On dit que ces deux machines sont réversibles.

Un moteur absorbe de l'énergie électrique et la transforme en énergie mécanique de rotation.

Un alternateur absorbe de l'énergie mécanique de rotation et la transforme en énergie électrique.

Très souvent les alternateurs utilisent l'énergie mécanique de l'eau (barrages) ou du vent (éoliennes)

Le rotor, partie mobile de l'alternateur

est constitué d'un aimant ou d'un électroaimant alimenté en courant continu.

Appelé roue polaire ou **inducteur**, il est entraîné mécaniquement en rotation à la fréquence **n**

On a donc création d'un champ tournant

Le stator, partie fixe de l'alternateur

est constitué d'un circuit magnétique et de bobinages triphasés soumis à une variation de flux.

Appelé **induit**, en circuit ouvert il est le siège de tensions induites triphasées de fréquence **f** appelées **f.é.m** (force électromotrice) notée **E**

telle que à vide on a :

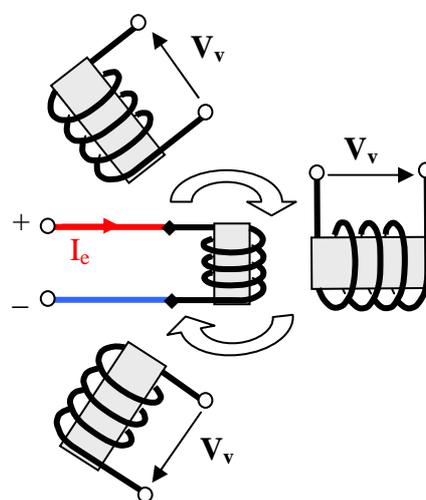
$$\mathbf{V}_v = \mathbf{E}$$

$$\mathbf{E} = 2,22 \cdot \mathbf{N} \cdot \mathbf{f} \cdot \mathbf{\Phi}$$

Avec N nombre de spires des enroulements
f fréquence des fém induites en Hertz
Φ flux traversant les spires en Weber

fréquence f telle que :

$$\mathbf{f} = \mathbf{p} \cdot \mathbf{n}$$



La f.é.m. est proportionnelle au flux Φ donc au courant d'excitation I_e dans l'inducteur (rotor).

La fréquence des courants induits au stator est proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor et au nombre de paires de pôles de l'alternateur.

2.2.2. Définitions et grandeurs fondamentales

Au ROTOR, le champ tournant est produit :

Soit par un aimant permanent (cas exceptionnel des petits alternateurs)

Soit par un électroaimant parcouru par un courant d'excitation I_e

Entraîné en rotation à une fréquence $n = f / p$ p = nombre de paire de pôles

Au STATOR, les bobines fournissent :

Un courant induit **I** en ligne sous une tension induite **U** entre phases

avec un facteur de puissance **cosφ** dépendant de la charge

à une fréquence **f** qui dépend de la fréquence de rotation **n** du rotor

2.2.3. Synboles et couplages

• Symboles

Génératrice synchrone triphasé: à électroaimant (inducteur) (gros alternateurs)



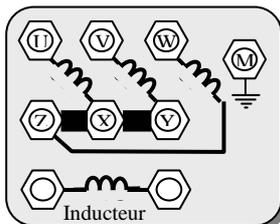
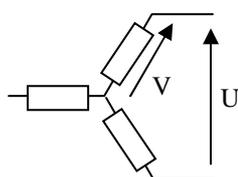
Génératrice synchrone triphasé: à aimant permanent (petits alternateurs)



• Couplages

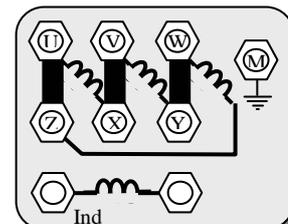
Couplage Etoile :

L'alternateur fournit une tension composée entre phases $U = \sqrt{3}.V$



Couplage Triangle :

L'alternateur fournit la tension simple V d'un enroulement

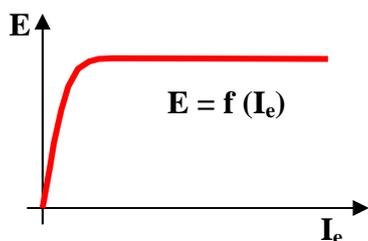


2.2.4. Caractéristiques de fonctionnement

Afin qu'un alternateur fournisse de l'énergie électrique, il convient d'abord d'entraîner en rotation le rotor à la fréquence n telle que la fréquence f des courants électriques soit $f = n/p$ (p nombre de paires de pôles); Par exemple pour une machine tétrapolaire $n = 25$ tr/s ou $n^* = 1500$ tr/min.

Ensuite il faut "exciter" la machine c'est à dire alimenter en courant continu l'électroaimant pour qu'il y ait création d'un champ et donc d'un flux. La tension induite au stator augmente lorsque l'on augmente le courant d'excitation. La courbe obtenue est la caractéristique à vide de l'alternateur.

Caractéristique à vide



$$E = 2,22 \cdot N \cdot f \cdot \Phi$$

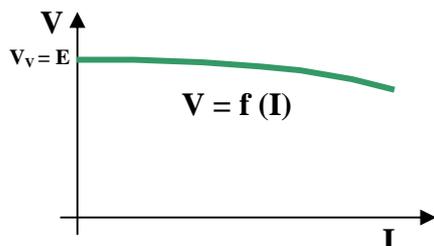
On voit que pour f constant donc n constant

Dans le cas d'un alternateur synchrone à électroaimant, on a la fém induite E qui est proportionnelle au flux Φ donc au champ magnétique donc au courant d'excitation de la bobine du rotor I_e

Lorsque la tension est produite, on peut alors alimenter une charge. Le courant fourni dépend de cette charge. Comme tout générateur, si la charge augmente, l'intensité du courant augmente et la tension chute légèrement. Cette chute de tension est due à la résistance interne de l'alternateur.

La courbe obtenue est la caractéristique en charge de l'alternateur.

Caractéristique en charge



La tension obtenue aux bornes d'un enroulement du stator à vide ($I=0$) est la fém induite.

Lorsque la charge augmente l'intensité en ligne augmente et la tension composée U entre phases diminue ;

Le coefficient directeur de la caractéristique entre deux points (pente) permet de déterminer la résistance interne de la génératrice synchrone.

2.2.5. Bilan des puissances des alternateurs

Les génératrices synchrones consomment une partie de l'énergie absorbée pour leur fonctionnement. L'énergie électrique fournie sera toujours plus petite que l'énergie absorbée.

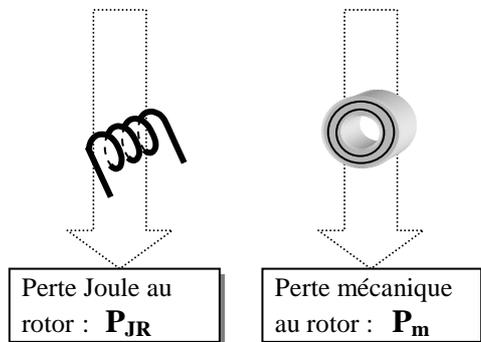
Le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie absorbée est le rendement noté η .

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

- La puissance électrique fournie est mesurée directement avec un wattmètre triphasé (chapitre 9) ou bien calculée selon la relation donnant la puissance en triphasée : $P_u = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi$ avec U tension composée du réseau, I intensité en ligne, $\cos\phi$ facteur de puissance du moteur
- La puissance absorbée par l'alternateur est de deux types:
 - une puissance mécanique d'entraînement en rotation déterminée selon la relation : $P_M = T \cdot \Omega$,
 - une puissance électrique d'excitation de l'électroaimant déterminée selon la relation : $P_e = V_e \cdot I_e$

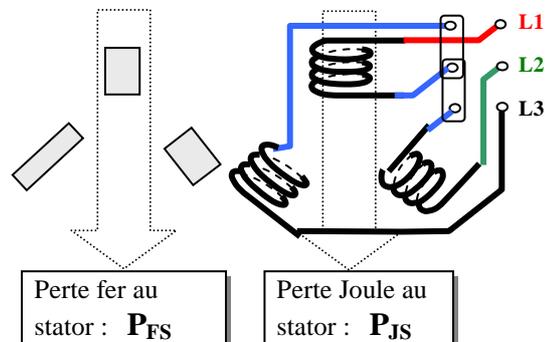
Dans le rotor on :

Un enroulement, de la mécanique en rotation

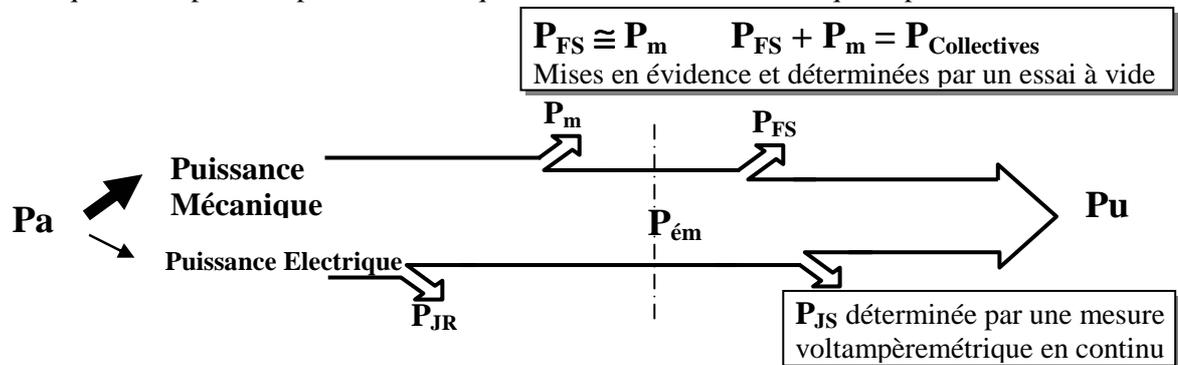


Dans le rotor on :

du fer, des enroulements en cuivre



On a alors le bilan des puissances mises en jeu dans une génératrice synchrone en fonctionnement nominal que l'on représente par une flèche qui rétrécit au fur et à mesure que la puissance diminue.



Puissance électrique absorbée : $P_a = P_M + P_e$ avec $P_M = T \cdot \Omega$ et $P_e = V_e \cdot I_e$

↓	<u>Au rotor :</u>	Pertes Joule : $P_{JR} = V_e \cdot I_e$	Toute la puissance d'excitation est dissipée
		Pertes mécaniques : $P_M = P_C / 2$	perdes collectives obtenues par un essai à vide
	<u>Entrefer :</u>	Puissance électromagnétique $P_{em} = T_{em} \cdot \Omega$	
	<u>Au stator :</u>	Pertes Joules : $P_{JS} = \frac{3}{2} r \cdot I^2$	r résistance entre 2 fils de phase moteur couplé
		Pertes fer : $P_{FS} = P_C / 2$	perdes collectives obtenues par un essai à vide
	<u>Puissance électrique fournie :</u>	$P_u = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi$ mesurée avec un wattmètre triphasé	

D'où le rendement d'une génératrice synchrone:

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + \text{Pertes}}$$

2.3. Exemples d'exercice

Exemple N°1 : Exercice sur le moteur synchrone triphasé

Pour un moteur triphasé tétrapolaire alimenté avec un réseau de fréquence 50 Hz, indiquer :
 Le nombre de bobines par phase au stator
 Le nombre total de bobines,
 L'angle ou le déphasage entre les bobines,
 La fréquence de rotation du champ tournant,
 La vitesse angulaire du champ tournant.

Exemple N°2 : Exercice sur le moteur asynchrone triphasé

On donne la plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé :
 Le réseau d'alimentation est un réseau triphasé 400 V
 On vous demande de :
 Préciser le couplage du moteur,
 Calculer le nombre de paire de pôle du moteur,
 Calculer le glissement du moteur,
 Calculer le couple utile,
 Calculer la puissance nominale absorbée
 Calculer le rendement du moteur

Tensions 230V / 400V 50 Hz
 Puissance 15 kW I = 37,5 A
 Facteur de puissance 0,75
 Fréquence de rotation 720 tr/min

Exemple N°3 : Exercice sur le moteur asynchrone triphasé

Un moteur asynchrone triphasé est alimenté en 400 V. Il absorbe 15 A avec un facteur de puissance de 0,8. Il tourne à 1455 tours par minute. On a mesuré une résistance de 0,75 Ω entre deux fils de phase et des pertes collectives de 700 W.
 On demande de déterminer :
 Sa puissance totale absorbée ?
 Son glissement ?
 Les pertes joule stator ?
 Les pertes fer stator ?
 La puissance transmise au rotor ?
 Les pertes joule rotor ?
 Les pertes mécaniques ?
 La puissance utile de ce moteur ?
 Le rendement de ce moteur ?

Exemple N°4 : Exercice sur la génératrice synchrone

Un alternateur triphasé couplé en étoile alimente un moteur asynchrone triphasé en 400V 50Hz.
 La puissance utile du moteur est 11 KW et son rendement de 0,82 et son facteur de puissance 0,85.
 On demande de calculer :
 La puissance fournie par l'alternateur,
 L'intensité en ligne fournie par l'alternateur,
 La puissance absorbée par l'alternateur étant de 15 KW
 On demande de calculer :
 Le rendement de l'alternateur,
 Le rendement de l'ensemble alternateur et moteur.
 Préciser quelle est la tension aux bornes d'un enroulement de l'alternateur.

Exemple N°1 : Réponses et explications

Pour un moteur triphasé tétrapolaire alimenté avec un réseau de fréquence 50 Hz, indiquer :

Le moteur étant tétrapolaire, le nombre de bobines par phase au stator est 2 : $p = 2$ paires de pôles

Il a 3 phases donc le nombre total de bobines est $N = 6$ bobines

Les bobines étant également réparties, l'angle ou le déphasage entre les bobines est $\phi = 60^\circ$ ou $\pi/3$ rad

La fréquence de rotation du champ tournant est $n = f / p$ donc $n = 25$ tr/s ou 1500 tr/min

La vitesse angulaire du champ tournant est $\Omega = 2 \pi n$ donc $\Omega = 157$ rad/s

Exemple N°2 : Réponses et explications

Le couplage du moteur est un couplage étoile car 400 V est la tension supportée par 2 enroulements

Le nombre de paire de pôle du moteur est $p = 4$ car la fréquence de rotation du moteur $n^* = 720$ tr/min est légèrement inférieure à la fréquence de rotation du champ tournant ou fréquence de synchronisme :

Pour un fréquence du réseau $f = 50$ Hz on a une fréquence de synchronisme $n / f / p$

Nombre de paire de pôles	1	2	3	4	5	6
Fréquence de synchronisme	3000 tr/min	1500 tr/min	1000 tr/min	750 tr/min	600 tr/min	500 tr/min

La fréquence de synchronisme est donc $n^* = 750$ tr/min ou $n = 12,5$ tr/s donc $p = 4$ paires de pôles

Le glissement du moteur est donné par la relation $g = (n^* - n) / n^* = (750 - 720) / 750$ $g = 4 \%$

Le couple utile est calculé à partir de la puissance utile : $T_u = P_u / \Omega' = P_u / (2\pi n')$ = 15000 / (2π x 12)

$$T_u = 199 \text{ Nm}$$

La puissance nominale absorbée $P_a = \sqrt{3} U I \cos \phi = \sqrt{3} \times 400 \times 37,5 \times 0,75 \rightarrow P_a = 19,5 \text{ kW}$

Le rendement du moteur est le rapport $\eta = P_u / P_a = 15000 / 19500 = 0,77 \rightarrow \eta = 77 \%$

Exemple N°3 : Réponses et explications

La puissance totale absorbée est $P_a = \sqrt{3} U I \cos \phi = \sqrt{3} \times 400 \times 15 \times 0,8 \rightarrow P_a = 8313 \text{ W}$

Le glissement est donné par la relation $g = (n^* - n) / n^* = (1500 - 1455) / 1500$ $g = 3 \%$

Les pertes joule stator sont égales à $P_{JS} = \frac{3}{2} r \cdot I^2 = \frac{3}{2} \times 0,75 \times 15^2 \rightarrow P_{JS} = 253 \text{ W}$

Les pertes fer stator sont égales à $P_{FS} = P_C / 2 = 700 / 2 \rightarrow P_{FS} = 350 \text{ W}$

La puissance transmise au rotor est $P_{tr} = P_{em} = P_a - \text{pertes stator} = P_a - P_{JS} - P_{FS} \rightarrow P_{tr} = 7710 \text{ W}$

Les pertes joule rotor sont égales à $P_{JR} = g \cdot P_{tr} = 0,03 \times 7710 \rightarrow P_{JR} = 231 \text{ W}$

Les pertes mécaniques sont égales à $P_M = P_C / 2 = 700 / 2 \rightarrow P_{FS} = 350 \text{ W}$

La puissance utile de ce moteur est $P_u = P_a - \text{pertes} = P_a - P_{JS} - P_{FS} - P_{JR} - P_M \rightarrow P_u = 7129 \text{ W}$

Le rendement de ce moteur est $\eta = P_u / P_a = 7129 / 8313 = 0,856 \rightarrow \eta = 86 \%$

Exemple N°4 : Réponses et explications

La puissance électrique fournie par l'alternateur est la puissance absorbée par le moteur

Elle est obtenue à partir du rendement : $\eta_m = P_u / P_e \rightarrow P_e = P_u / \eta_m = 11000 / 0,82 \rightarrow P_e = 13,4 \text{ KW}$

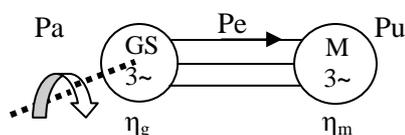
L'intensité en ligne fournie par l'alternateur est l'intensité absorbée par le moteur :

$P_e = \sqrt{3} U I \cos \phi \rightarrow I = P_e / (\sqrt{3} U \cos \phi) = 13400 / (\sqrt{3} \times 400 \times 0,85) \rightarrow I = 22,8 \text{ A}$

La puissance absorbée par l'alternateur est $P_a = 15 \text{ KW}$

Le rendement de l'alternateur est $\eta_g = P_e / P_a = 13400 / 15000 = 0,893 \rightarrow \eta = 89 \%$

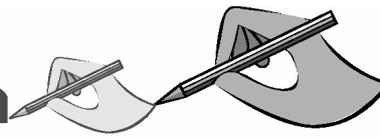
Le rendement de l'ensemble alternateur et moteur est $\eta_T = P_u / P_a = 11000 / 15000 \rightarrow \eta_T = 73 \%$



Dans une installation les rendements se multiplient :

$$\eta_T = \eta_g \times \eta_m = 0,89 \times 0,82 = 0,73 = 73 \%$$

Autocorrection



2.4. Exercices à résoudre

Exercice N°1 : Génératrice synchrone

Un alternateur triphasé est entraîné à une fréquence de 600 tr/min.

Ses enroulements sont couplés en étoile. Il débite un courant alternatif de 450 A à 50Hz.

La tension entre phase est de 5,2 kV et le facteur de puissance est de 0,8.

L'alternateur a un rendement de 0,87. Chaque enroulement de l'induit a une résistance de 0,25 Ω .

Calculer :

Le nombre de pôles de l'alternateur :

Les puissances actives, réactive et apparente :

La puissance mécanique fournie à l'alternateur :

Le couple nécessaire pour l'entraînement en rotation du rotor :

La tension aux bornes d'un enroulement de l'alternateur :

Les pertes par effet joule dans l'induit :

Suite à une augmentation de la charge, la tension chute :

Sur quelle grandeur doit-on agir pour ramener la tension à sa valeur nominale ?

Comment appelle-t-on la tension à vide d'un alternateur ?

Exercice N°2 : Moteur asynchrone triphasé

Un moteur asynchrone triphasé alimenté par un réseau triphasé 50 Hz a subi un essai en charge dont voici les mesures :

U	I	P	n [*]	F	d
(V)	(A)	(W)	(tr/mn)	(N)	(m)
382	6,6	3590	1474	20	0,98

Préciser :

Le nombre de pôle du moteur ?

Son couple utile nominal ?

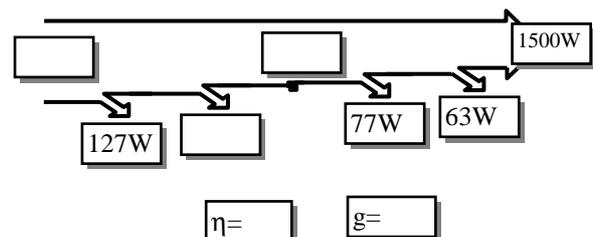
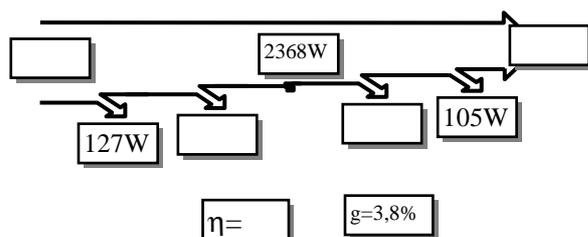
Sa puissance utile ?

Son facteur de puissance ?

Son rendement ?

Exercice N°3 : Bilan des puissances

Compléter les bilans fléchés des moteurs asynchrones triphasés ci dessous :



Travail personnel



3. LES MACHINES A COURANT CONTINU

Les **machines à courant continu** sont des convertisseurs électromécaniques d'énergie :

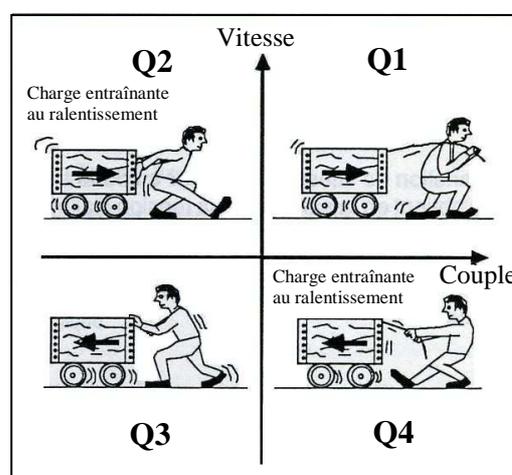
Soit ils convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique lorsqu'ils sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour démarrer puis entraîner une charge en mouvement. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en **moteur**.

Soit ils convertissent l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'ils subissent l'action d'une charge entraînée. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en **générateur**.

Dans ce chapitre nous allons étudier le fonctionnement des machines à courant continu dans les 4 quadrants :

Les quadrants Q1 et Q3 traduisent un fonctionnement de la machine en moteur dans les deux sens de rotation, alors que les quadrants Q2 et Q4 traduisent un fonctionnement de la machine en génératrice dans les deux sens de rotation.

Le nombre de quadrants de fonctionnement est exclusivement limité par le système de commande pilotant la machine.



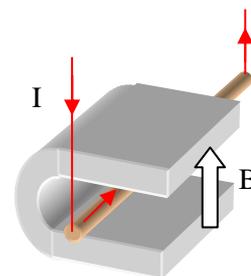
3.1. Les moteurs à courant continu

3.1.1. Force électromagnétique

La **force électromagnétique** est la force mécanique F à laquelle est soumis un conducteur parcouru par un courant **électrique** d'intensité I placé dans un champ **magnétique** d'intensité B .

Loi de Laplace :

Un fil électrique conducteur de longueur L parcouru par un courant électrique d'intensité I placé dans un champ magnétique d'intensité B est soumis à une force électromagnétique F telle que : $F = B \cdot I \cdot L \cdot \sin\alpha$
Avec α l'angle entre la direction du champ et le fil



Cette force mécanique constitue dans le principe de base des moteurs à courant continu :

Une spire constituée de 2 conducteurs parcourus par un courant électrique placés dans un champ magnétique est soumis à un couple de force permettant le démarrage des moteurs à courant continu.

La force électromagnétique a une direction perpendiculaire au plan que font le courant électrique et le champ magnétique. Son sens dépend du sens du courant électrique et du sens du champ magnétique :

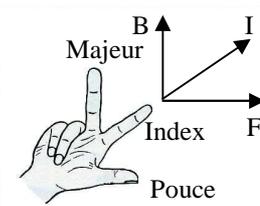
Il est donné par la règle des 3 doigts de la main **droite** (démarrreur)

le **pouce** indiquant le sens dans lequel la force **pousse**,

l'**index** indiquant le sens de l'**intensité** électrique

le **majeur** indiquant le sens du champ **magnétique**.

Si on inverse le sens de B ou de I , on inverse le sens de F .



3.1.2. Constitution et Principe

Le stator, partie fixe du moteur est l'**inducteur**. Il est constitué d'un aimant permanent ou d'un électroaimant alimenté par le courant continu d'excitation I_e .

Ce courant crée le champ magnétique B et donc le flux Φ .

Le rotor est constitué d'encoches dans lesquelles est enroulé un bobinage de N conducteurs alimentés en courant continu I via le collecteur. C'est l'**induit**.

Le bobinage d'induit est relié au **collecteur**, dont le rôle est double : Il transmet le courant d'alimentation I au rotor par frottement via des contacts appelés charbons et, il assure l'inversion de sens du courant induit dans les conducteurs au passage de la ligne neutre (ligne imaginaire entre les pôles nord et sud où le champ est nul)

Des **pôles auxiliaires** compensent la réaction d'induit. Lors de la commutation, inversion du sens du courant d'induit sur la ligne neutre, il y a création d'arcs ; Pour atténuer cela on ajoute des pôles magnétiques en série avec l'induit.

L'induit et l'inducteur sont alimentés en courant continu.

Le champ créé par l'inducteur agit sur les conducteurs de l'induit :

Chacun des N conducteurs de longueurs L placé dans le champ B et parcouru par un courant I est le siège d'une force électromagnétique $F = B \cdot I \cdot L$ perpendiculaire au conducteur. Ces forces de Laplace exercent un couple proportionnel à l'intensité I et au flux Φ sur le rotor. Le moteur se met à tourner à une vitesse proportionnelle à la tension d'alimentation V et, inversement proportionnelle au flux Φ .

Au passage de tout conducteur de l'induit sur la ligne neutre, le courant qui le traverse change de sens grâce au collecteur. Le moteur conserve le même sens de rotation.

Pour inverser le sens de rotation du moteur, il convient d'inverser le sens du champ produit par l'inducteur par rapport au sens du courant circulant dans l'induit :

- Soit on inverse la polarité de la tension d'alimentation de l'induit,
- Soit on inverse la polarité d'alimentation du circuit d'excitation.

Définition et grandeurs fondamentales :

Au STATOR, le flux Φ est produit :

Soit par un aimant permanent (pas de réglage de flux)

Soit par un électroaimant parcouru par un courant d'excitation I_e permettant ainsi un réglage du flux.

Au ROTOR, en rotation à la fréquence n , apparaît une tension induite E' appelée f.c.é.m.

E' force contre électromotrice en volt

n fréquence de rotation du moteur

N nombre de conducteurs de l'induit

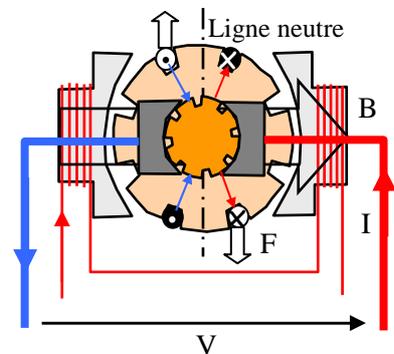
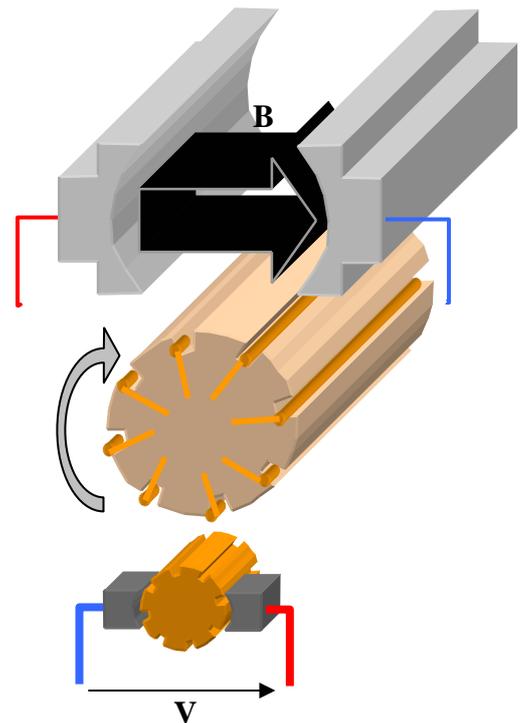
Φ flux sous un pôle à travers une spire

p nombre de paire de pôles

a nombre de paires de voies d'enroulement

Au collecteur, la loi d'Ohm généralisée s'applique au moteur et la tension V d'alimentation est telle que

R Résistance de l'induit



$$E' = \frac{p}{a} n \cdot N \cdot \Phi$$

p/a est une constante souvent égale à 1

$$V = E' + R \cdot I$$

3.1.3. Moteur à excitation séparée

Dans un moteur à excitation séparée ou indépendante, le circuit d'excitation est séparé du circuit d'induit.

Si l'inducteur est un aimant permanent, le flux Φ est constant.

Si l'inducteur est un électroaimant alimenté par une source de tension continue réglable, le flux Φ ne dépend que du courant dans l'inducteur appelé courant d'excitation I_e .

Le courant crée un champ et une quantité de champ à travers une spire donne un flux. Si la tension V_e est constante, le courant d'excitation I_e est constant et le flux Φ est constant.

Dans ces conditions, la force contre électromotrice E' ne dépend que de la fréquence n de rotation.

Donc la fréquence de rotation n est proportionnelle à la tension V d'alimentation du moteur.

Compte tenu de la conservation de la puissance d'une machine (en négligeant les pertes), la puissance électrique absorbée est $P_a = V \cdot I$ et la puissance mécanique fournie est $P_u = T_u \cdot \Omega = T_u \cdot 2\pi \cdot n$.

Si V est proportionnelle à n cela signifie que T_u est proportionnel à I .

Donc le couple utile T_u est proportionnel à l'intensité du courant d'alimentation du moteur.

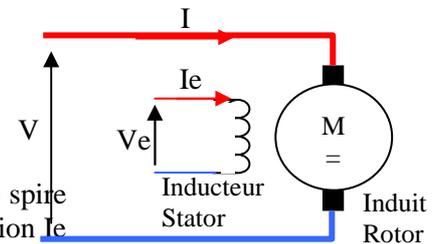
Pour un moteur à excitation séparée, le flux Φ est constant donc la fréquence de rotation n est proportionnelle à la tension d'alimentation V ,

$$n = \frac{E'}{k \Phi} = \frac{V - R \cdot I}{k \Phi} = K \cdot V$$

Et le couple T est proportionnel à l'intensité du courant d'alimentation I ($\Omega = 2\pi \cdot n$)

$$T = \frac{E' \cdot I}{\Omega} = k' \Phi \cdot I = K' \cdot I$$

Ce moteur est particulièrement adapté aux entraînements de machines nécessitant des vitesses réglables (action sur la tension) et présentant un couple important en basse vitesse (machines outils)



3.1.4. Moteur à excitation série

Dans un moteur à excitation série ou moteur série, le circuit d'excitation est en série avec le circuit d'induit.

Le flux n'est plus constant mais proportionnelle à I

Dans ces conditions, la force contre électromotrice E' dépend de la fréquence n de rotation et de l'intensité du courant I .

Donc la fréquence de rotation n est proportionnelle à la tension V et au courant I d'alimentation du moteur.

Compte tenu de la conservation de la puissance d'une machine (en négligeant les pertes), la puissance électrique absorbée est $P_a = V \cdot I$ et la puissance mécanique fournie est $P_u = T_u \cdot \Omega = T_u \cdot 2\pi \cdot n$.

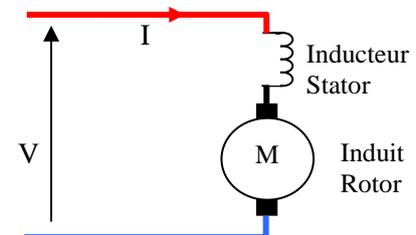
Si n est proportionnelle à V et à I cela signifie que T_u est proportionnel au carré de l'intensité I^2 .

Donc le couple T est proportionnel au carré de l'intensité du courant d'alimentation du moteur.

**Pour un moteur à excitation série, le flux Φ n'est pas constant mais proportionnel à I donc la tension d'alimentation V est proportionnelle à la fréquence de rotation n et à l'intensité I ,
Et le couple T est proportionnel au carré de l'intensité du courant d'alimentation I**

$$E' = k n N \Phi = K \cdot \Omega \cdot I$$

$$T = \frac{E' \cdot I}{\Omega} = k' \Phi \cdot I = K' \cdot I^2$$



3.1.5. Moteur universel

Le moteur universel est une application du moteur à excitation série. Nous venons de voir que pour un moteur à excitation série le couple est proportionnel au carré de l'intensité du courant qui le traverse. Cela signifie que le couple ne dépend pas du sens du courant :

Le moteur universel peut donc fonctionner également en courant alternatif !

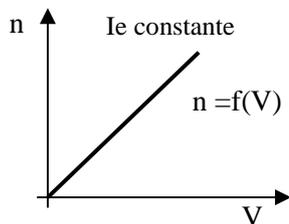
En effet à chaque alternance de la tension monophasée, le courant électrique et le flux magnétique changent de sens mais la force électromagnétique est inchangée (règle des 3 doigts de la main droite). Toutefois pour éviter les échauffements excessifs dus aux courants alternatifs dans le fer, il est impératif que le circuit magnétique soit feuilleté (empilage de tôles).

Ces moteurs sont très utilisés dans les appareils électroménagers et l'outillage (perceuse électrique) .

3.1.6. Caractéristiques de fonctionnement

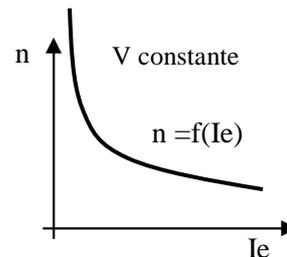
Caractéristiques à vide d'un moteur à excitation séparée : A vide, $E' = n \cdot N \cdot \Phi = V$ ($I=0$)

$$n = V / N\Phi = k \cdot V$$



A flux constant, la fréquence de rotation est proportionnelle à la tension d'alimentation

$$n = V / N\Phi = k / I_e$$

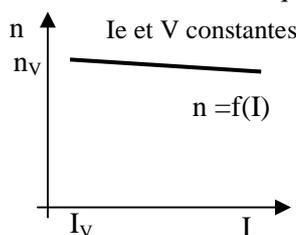


A tension constante, la fréquence de rotation augmente exagérément si I_e diminue

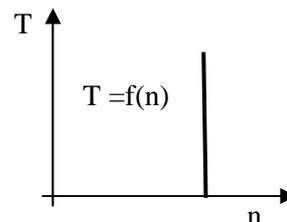
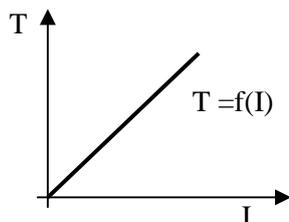
ATTENTION : Toute interruption du circuit d'excitation provoque l'emballement du moteur avec risque d'explosion sous l'effet de la force centrifuge. Si I_e tend vers 0, n tend vers l'infini !

Caractéristiques en charge d'un moteur à excitation séparée : En charge, $E' = n \cdot N \cdot \Phi = V - R \cdot I$

$n = a - b \cdot I$ est l'équation d'une droite



A flux et à tension constants, la fréquence de rotation diminue légèrement avec la charge



Quelque soit la fréquence de rotation, le couple moteur est proportionnel à la charge

3.1.7. Bilan des puissances

Les moteurs à courant continu consomment une partie de l'énergie absorbée pour leur fonctionnement. L'énergie mécanique fournie sera toujours plus petite que l'énergie électrique absorbée. Le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie absorbée est le rendement.

Le rendement se note η ; c'est un rapport d'énergie ou de puissance sans unité :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

Le rendement peut être déterminé soit par le calcul ou la mesure directe de P_a et P_u , soit par la mesure ou la détermination des pertes.

- La puissance électrique absorbée par l'induit et par l'inducteur est mesurée directement avec un wattmètre (chapitre 1) ou bien calculée selon la relation donnant la puissance en continu :

$$P_a = V \cdot I + V_e \cdot I_e$$

- La puissance mécanique fournie est déterminée selon la relation : $P_u = T_u \cdot \Omega'$

Avec T_u couple utile fourni en Nm (newton mètre) et Ω' vitesse angulaire de rotation en rad/s

L'énergie ou la puissance perdue dans les moteurs est dissipée dans le stator et dans le rotor.

- **Par effet Joule : perte cuivre**

Dans le stator, circuit parcouru par le courant d'excitation dues à l'effet Joule notée P_{JS}

Dans le rotor, circuit parcouru par le courant d'alimentation dues à l'effet Joule notée P_{JR}

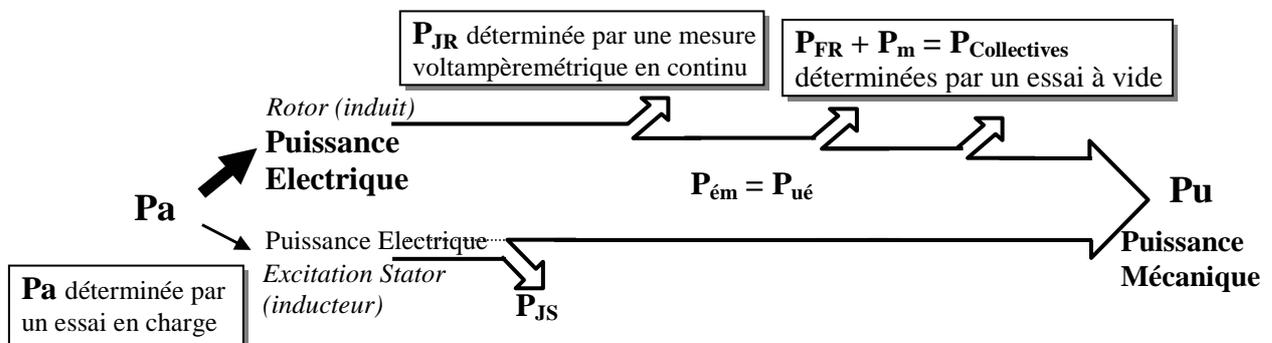
- La puissance électromagnétique due au couple électromagnétique présent dans l'entrefer du moteur est aussi la puissance utile électrique : $P_{em} = P_{ué} = E' \cdot I = T_{em} \cdot \Omega$

- **Pertes fer** dans le circuit magnétique du rotor dues aux courants de Foucault notée P_{FR}

Pertes mécanique dans les éléments en rotation dues aux frottements notée P_M (mécanique)

- La puissance mécanique utile est égale à : $P_u = P_a - P_{JS} - P_{FR} - P_{JR} - P_M = T_u \cdot \Omega$

On peut représenter le bilan des puissances mises en jeu dans un moteur à courant continu en fonctionnement nominal par une flèche qui rétrécit au fur et à mesure que la puissance diminue.



Puissance absorbée : $P_a = P_{aR} + P_{aS}$ avec : $P_{aR} = V \cdot I$ = puissance électrique dans l'induit

Et : $P_{aS} = P_e = V_e \cdot I_e$ = puissance électrique d'excitation

STATOR

Pertes joule au stator : $P_{JS} = P_e = V_e \cdot I_e = r_e \cdot I_e^2$

Pertes joule au rotor : $P_{JR} = R \cdot I^2$ R résistance de l'induit

ROTOR

Pertes collectives au rotor : $P_C = P_m + P_{FR}$

Puissance électromagnétique : $P_{ém} = P_{ué} = E' \cdot I = V \cdot I - R \cdot I^2$

Puissance utile électrique : $= T_{ém} \cdot \Omega$

Puissance mécanique utile : $P_u = T_u \cdot \Omega$

D'où le rendement d'un moteur à courant continu :

$$\eta = \frac{P_a - \text{Pertes}}{P_a}$$

3.1.8. Démarrage de moteurs à courant continu

Au démarrage un moteur doit fournir un couple utile T_u suffisamment important pour vaincre le couple résistance T_r de la charge.

Dans le cas des moteurs des moteurs à courant continu, nous avons vu que le couple utile est proportionnel au flux dans l'inducteur et à l'intensité dans l'induit : $T_u = k \Phi I$

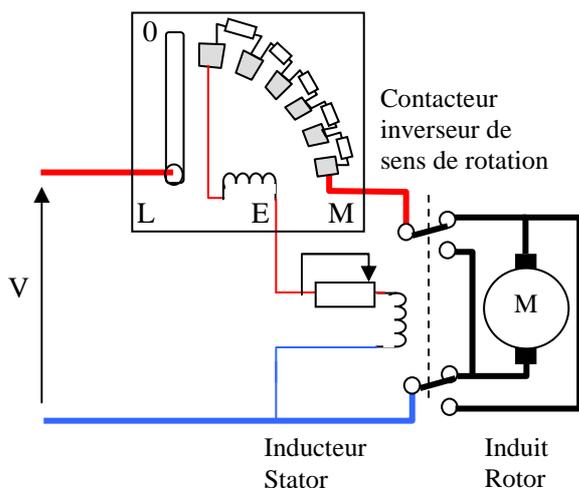
Pour que le moteur démarre il faut donc : $k \Phi I > T_r$

L'intensité nécessaire au démarrage I_d doit être supérieure à un seuil $I_s = T_r / k \Phi$

Toutefois on sait que l'intensité de démarrage est toujours beaucoup trop importante : il convient donc de la limiter. Pour cela il y a deux conditions :

- Il faut que le flux Φ soit maximal au démarrage, donc il est nécessaire d'appliquer la pleine tension sur le circuit inducteur pour avoir le courant d'excitation maximal avant de démarrer.
 - Il faut démarrer à tension d'induit réduite et augmenter progressivement la tension. Si l'on ne dispose pas de tension réglable il faut insérer un rhéostat de démarrage en série avec l'induit.
- Ces deux conditions sont facilement réalisables avec un moteur à excitation séparée.

Dans la pratique le démarrage des moteurs à courant continu se fait à l'aide d'un rhéostat de démarrage auquel on associe un dispositif contre les interruptions du circuit d'excitation : le LEM



La tension d'alimentation est raccordée sur la borne L comme ligne.

Le circuit d'excitation est raccordé à la borne E.

Le moteur est raccordé à la borne M.

Le LEM est muni d'une manette que l'on déplace sur des plots successifs reliés entre eux par des résistances. Lorsque la manette se trouve sur le premier plot la résistance en série avec l'induit est maximale dont courant minimum et le circuit d'excitation est alimenté à travers la bobine d'un électroaimant qui retient la manette en position M.

Si le circuit d'excitation est coupé, l'électroaimant n'est plus alimenté et un ressort de rappel ramène la manette en position 0 coupant l'alimentation moteur.

De nos jours les moteurs à courant continu sont pilotés par des variateurs électroniques de vitesse qui fournissent une tension continue à l'inducteur et une tension variable à l'induit.

3.1.9. Principe de la variation de vitesse

Compte tenu des précautions particulière à prendre pour piloter un moteur à courant continu, le variateur de vitesse électronique présente toutes les consignes de sécurité nécessaire pour permettre le fonctionnement d'un moteur dans les 4 quadrants, en particulier dans les opérations de levage dans lesquelles la charge peut être entraînant.

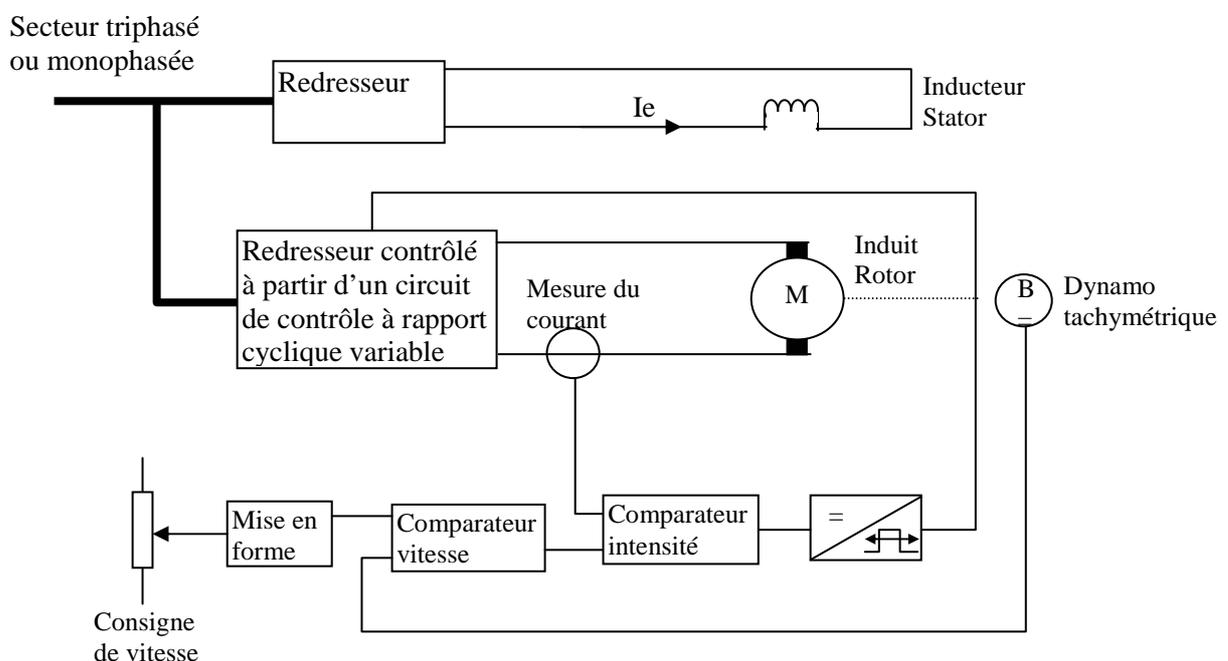
Le principe utilisé est celui d'un convertisseur qui effectue la conversion de la tension monophasée ou triphasée du secteur en tensions continues, fixe pour l'inducteur et variable pour l'induit.

La variation de vitesse du moteur à courant continu est obtenue en faisant varier la tension d'alimentation de l'induit et en maintenant le courant d'excitation fixe. On peut ainsi faire varier la vitesse de zéro jusqu'à la vitesse nominale. Des vitesses supérieures peuvent être obtenues en diminuant légèrement le courant d'excitation.

Le variateur fournit au moteur une tension continue variable proportionnelle à la consigne de vitesse affichée. En réalité, on a vu que la vitesse du moteur dépend également de sa charge. Il est donc nécessaire de travailler en boucle fermée c'est à dire de renvoyer au variateur une indication de la vitesse réelle du moteur.

Le moteur est protégé par un circuit limiteur de courant qui limite l'intensité dans l'induit.

La variation de tension est obtenue à partir d'un circuit de type redresseur contrôlé. Ce circuit réalisé avec des interrupteurs commandés (thyristors) à partir d'un circuit de commande dont on fait varier le rapport cyclique.



3.2. Les génératrices à courant continu

Nous rappelons également que les machines à courants continu sont des **machines réversibles** : lorsqu'elles absorbent de l'énergie électrique elles fournissent de l'énergie mécanique entraînée ; C'est le cas du moteur à courant continu et inversement,

lorsqu'elles sont entraînées par une énergie mécanique, elles fournissent de l'énergie électrique c'est le cas de la génératrice à courant continu aussi appelée dynamo.

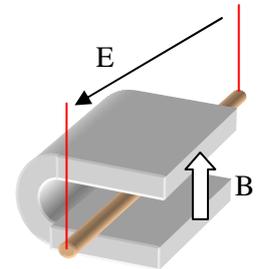
Actuellement le courant continu est réalisé à partir du courant alternatif que l'on redresse (utilisation de redresseur électronique monophasé ou triphasé). Les génératrices sont donc très peu utilisées. Toutefois il arrive souvent qu'en phase de freinage, un moteur soit entraîné par la charge et fonctionne en génératrice. De même il est fréquent de voir un moteur associé à une dynamo tachymétrique élément servant alors comme indicateur de fréquence de rotation.

3.2.1. Force électromotrice

La force électromotrice est la tension électrique E générée aux bornes d'une bobine soumise à une variation de flux pendant un temps donné : $E = - \Delta\Phi / \Delta t$
Si le circuit est fermé, la variation de flux donne naissance à un courant induit

Loi de Faraday :

Un fil électrique conducteur rectiligne que l'on déplace à l'aide d'une force F dans un champ magnétique d'intensité B est parcouru par un courant électrique I .



Cette tension électrique constitue dans le principe de base des générateurs à courant continu :
Une spire constituée de 2 conducteurs que l'on déplace dans un champ magnétique est le siège d'une force électromotrice induit ou d'un courant électrique induit dans un circuit fermé.

Loi de Lenz : Le sens du courant induit est tel que les effets qu'il produit s'opposent à la cause qui leur donne naissance.

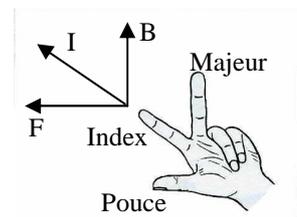
Il est donné par la règle des 3 doigts de la main gauche (générateur)

le **pouce** indiquant le sens du déplacement : la force F **pousse**,

l'**index** indiquant le sens de l'**intensité** électrique I induite

le **majeur** indiquant le sens du champ **magnétique** B .

Si on inverse le sens de B ou de F , on inverse le sens de I .



3.2.2. Constitution et principe

Le stator, partie fixe de la génératrice est l'**inducteur**. Il est constitué d'un aimant permanent ou d'un électroaimant alimenté par le courant continu d'excitation I_e .

Ce courant crée le champ magnétique B et donc le flux Φ .

Le rotor, partie entraînée en rotation à une fréquence n . Il est constitué d'un bobinage de N conducteurs qui tournent dans un champ fixe et qui subissent une variation de flux.

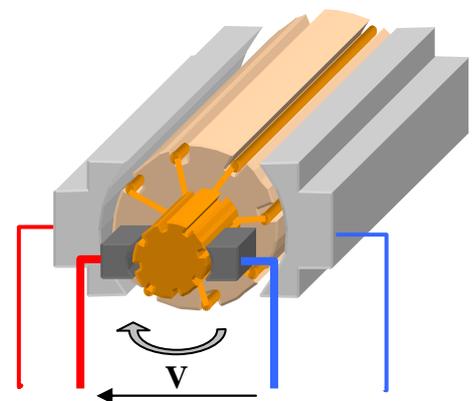
Il est le siège d'une force électromotrice induite E , et de courant induit I dans un circuit fermé. C'est l'**induit**.

Le bobinage d'induit est relié au **collecteur**, dont le rôle est double : Il assure l'inversion de sens du courant induit dans les conducteurs au passage de la ligne neutre (ligne imaginaire entre les pôles nord et sud où le champ est nul) et il permet de transmettre le courant d'induit entre les parties fixes et les parties mobiles de la machine via des contacts appelés charbons.

Des **pôles auxiliaires** compensent la réaction d'induit. Lors de la commutation, inversion du sens du courant d'induit sur la ligne neutre, il y a création d'arcs ; Pour atténuer cela on ajoute des pôles magnétiques en série avec l'induit.

L'inducteur est alimenté en courant continu. Il produit un champ magnétique fixe.

L'induit est entraîné en rotation par un moteur ; Les variations de flux qui en résultent dans l'induit provoquent l'apparition d'une fém induite alternative qui est redressée par le collecteur au passage de la ligne neutre. Le tension fournie par l'induit est une tension continue proportionnelle à la fréquence de rotation de l'induit.



Au STATOR, le flux Φ est produit :

Soit par un aimant permanent (pas de réglage de flux)

Soit par un électroaimant parcouru par un courant d'excitation I_e permettant ainsi un réglage du flux.

Au ROTOR, en rotation à la fréquence n , apparaît une tension induite E appelée f.é.m.

E	force électromotrice en volt
n	fréquence de rotation du moteur
N	nombre de conducteurs de l'induit
Φ	flux sous un pôle à travers une spire
p	nombre de paire de pôles
a	nombre de paires de voies d'enroulement

$$E' = \frac{p}{a} n \cdot N \cdot \Phi$$

p/a est une constante souvent égale à 1

Au collecteur, la loi d'Ohm généralisée s'applique au générateur et la tension V fournie dépend de la charge selon la relation :

R	Résistance de l'induit
---	------------------------

$$V = E - R \cdot I$$

3.2.3. Applications de la génératrice continue

• Générateur de tension continue

Cette application est de moins en moins utilisée. De nos jours la tension continue est réalisée à partir d'une génératrice synchrone de conception beaucoup plus robuste et fiable associé à un équipement électronique : le redresseur de tension monophasé ou triphasé

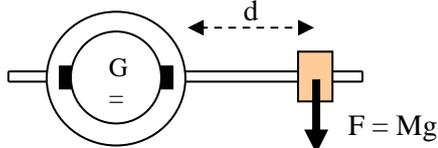
• Dynamo tachymétrique

La dynamo tachymétrique est une génératrice à aimant permanent qui entraînée en rotation à la fréquence n donne une tension continue proportionnelle: $V = k n$. Le coefficient k indiqué sur la plaque signalétique permet de calculer la fréquence de rotation ; Par exemple $k = 0,06$ V par tr/min

• Dynamo balance

La dynamo balance est une génératrice dont le stator est supporté par deux paliers à roulement à billes lui permettant un mouvement circulaire limité par deux butées. Le stator porte une tige métallique servant de bras de levier sur lequel on peut déplacer une masse mobile.

Lorsque le rotor est entraîné en rotation, le stator tend à être entraîné ; l'équilibre de la balance est établi par le déplacement de la masse mobile sur le bras de levier. La distance d à laquelle se situe la masse et le poids de la masse permettent de déterminer le couple utile du moteur :



$$T_u = F \cdot d \text{ avec } F = M \cdot g \quad (g = 9,81 \text{ m/s}^2)$$

T_u en Newton mètre, d en mètre et F en Newton

On peut alors déterminer la puissance utile du moteur :

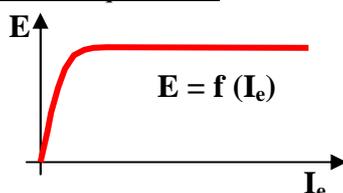
$$P_u = T_u \cdot \Omega \text{ avec } \Omega = 2 \pi n, \quad n \text{ fréquence de rotation en tr/s}$$

P_u en Watt, T_u en Newton mètre et Ω en radian par seconde

3.2.4. Caractéristiques de fonctionnement

Afin qu'une génératrice à courant continu fournisse de l'énergie électrique, il convient d'abord d'entraîner en rotation le rotor à la fréquence de rotation n constante.

Ensuite il faut "exciter" la machine c'est à dire alimenter en courant continu l'électroaimant pour qu'il y ait création d'un champ et donc d'un flux. La tension induite au stator augmente lorsque l'on augmente le courant d'excitation. La courbe obtenue est la caractéristique à vide de la génératrice.

Caractéristique à vide

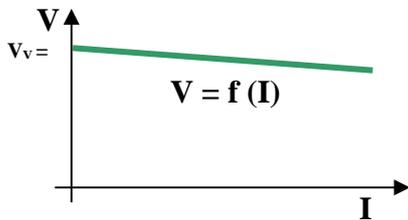
$$E = k \cdot N \cdot n \cdot \Phi$$

Comme la fréquence de rotation n est maintenue constante, dans le cas d'une génératrice continue la fém induite E est proportionnelle au flux Φ donc au courant d'excitation I_e .

Lorsque la tension est produite, on peut alors alimenter une charge. Le courant fourni dépend de cette charge. Comme tout générateur, si la charge augmente, l'intensité du courant augmente et la tension chute légèrement. Cette chute de tension est due à la résistance interne de la génératrice.

La courbe obtenue est la caractéristique en charge de la génératrice.

Caractéristique en charge



La tension obtenue aux bornes d'un enroulement du stator à vide ($I=0$) est la fém induite.

Lorsque la charge augmente l'intensité en ligne augmente et la tension continue V diminue ;

Le coefficient directeur de la caractéristique entre deux points (pente) permet de déterminer la résistance interne de la génératrice continue.

3.2.5. Bilan des puissances des génératrices

Les génératrices continues consomment une partie de l'énergie absorbée pour leur fonctionnement. L'énergie électrique fournie sera toujours plus petite que l'énergie absorbée.

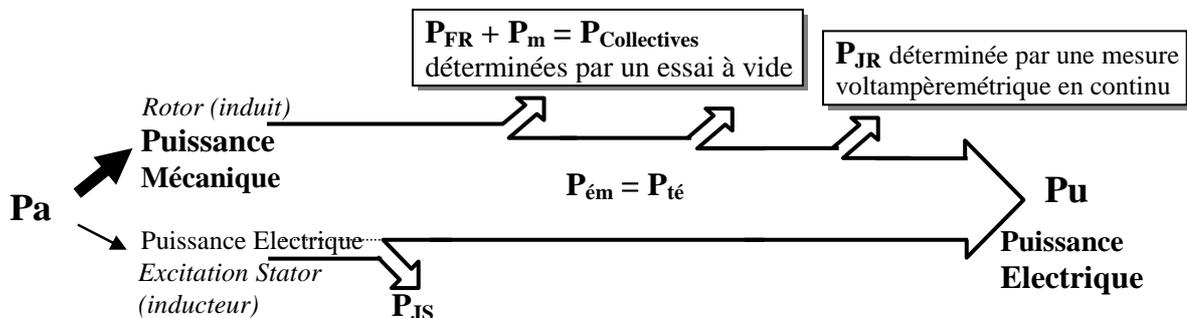
Le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie absorbée est le rendement noté η .

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

- La puissance électrique fournie est mesurée directement avec un wattmètre (chapitre 1) ou bien calculée selon la relation donnant la puissance en continu : $P_u = V \cdot I$
- La puissance absorbée par la génératrice est de deux types :
une puissance mécanique d'entraînement en rotation déterminée selon la relation : $P_M = T \cdot \Omega$,
une puissance électrique d'excitation de l'électroaimant déterminée selon la relation : $P_e = V_e \cdot I_e$

L'énergie ou la puissance perdue dans les génératrices est dissipée dans le stator et dans le rotor.

On peut représenter le bilan des puissances mises en jeu dans une génératrice à courant continu en fonctionnement nominal par une flèche qui rétrécit au fur et à mesure que la puissance diminue.



Puissance absorbée : $P_a = P_M + P_e$ avec : $P_M = T \cdot \Omega$ = puissance mécanique d'entraînement

Et : $P_e = V_e \cdot I_e$ = puissance électrique d'excitation

STATOR

Pertes joule au stator : $P_{JS} = P_e = V_e \cdot I_e = r_e \cdot I_e^2$

ROTOR

Pertes collectives au rotor : $P_C = P_m + P_{FR}$

Pertes joule au rotor : $P_{JR} = R \cdot I^2$ R résistance de l'induit

Puissance électromagnétique : $P_{ém} = P_{té} = E \cdot I = (V + R \cdot I) \cdot I$

Puissance totale électrique : $= V \cdot I + R \cdot I^2$

Puissance électrique fournie : $P_u = V \cdot I$

D'où le rendement d'une génératrice à courant continu :

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + \text{Pertes}}$$

3.3. Exemples d'exercice

Exemple N°1 : Exercice sur le moteur à courant continu

Un moteur à courant continu à excitation indépendante a une résistance d'induit $R = 0,8 \Omega$. Il fonctionne sous une tension d'induit égale à $V = 130 \text{ V}$. A vide l'intensité dans l'induit est $I_0 = 1,2 \text{ A}$. En charge, l'intensité dans l'induit est $I = 25 \text{ A}$ et la fréquence de rotation $n = 1200 \text{ tr/min}$.

Calculer la fém en charge :

Calculer le couple électromagnétique :

Calculer la fréquence de rotation à vide :

Exemple N°2 : Exercice sur le moteur à courant continu

Un moteur à excitation indépendante fonctionne sous une tension d'induit $V = 230 \text{ V}$.

En fonctionnement nominal l'induit absorbe un courant de 40 A .

On a mesuré les résistances : pour l'induit $R = 0,3 \Omega$, pour l'inducteur $r = 120 \Omega$

Un essai à vide à la fréquence nominale a permis de mesurer sur l'induit $V_0 = 225 \text{ V}$ et $I_0 = 1,2 \text{ A}$

L'inducteur est alimenté sous une tension égale à 140 V .

Déterminer le rendement du moteur

Exemple N°3 : Exercice sur la génératrice à courant continu

La force électromotrice d'une génératrice à excitation indépendante est $E = 240 \text{ V}$ lorsque le courant d'excitation est $I_e = 4 \text{ A}$.

Les résistances des enroulements sont : Pour l'induit $R = 0,1 \Omega$ et pour l'inducteur $r = 30 \Omega$

Les pertes collectives ou pertes constantes sont $P_c = 450 \text{ W}$

Lorsque la génératrice fournit un courant de 80 A , calculer :

La tension aux bornes de l'induit :

La puissance utile :

Les pertes par effet Joule dans l'induit :

Les pertes par effet Joule dans l'inducteur :

La puissance absorbée :

Le rendement :

Exemple N°1 : Réponses et explications

Un moteur à courant continu à excitation indépendante a une résistance d'induit $R = 0,8 \Omega$. Il fonctionne sous une tension d'induit égale à $V = 130 \text{ V}$. A vide l'intensité dans l'induit est $I_0 = 1,2 \text{ A}$. En charge, l'intensité dans l'induit est $I = 25 \text{ A}$ et la fréquence de rotation $n = 1200 \text{ tr/min}$.

Calculer la fém en charge :

La loi d'Ohm généralisée au moteur $V = E' + R.I$ donne $E' = V - R.I = 130 - 0,8 \times 25 \rightarrow \boxed{E' = 110 \text{ V}}$

Calculer le couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique est donné par la relation $T_{em} = E'.I / \Omega$ avec $\Omega = 2\pi n = 2\pi \times 1200/60$
 $T_{em} = 110 \times 25 / 40\pi \rightarrow \boxed{T_{em} = 21,9 \text{ Nm}}$

Calculer la fréquence de rotation à vide :

La fréquence de rotation est proportionnelle à la fém : $110 \text{ V} \rightarrow 1200 \text{ tr/min}$

A vide $E' = V - R.I_0 = 130 - 0,8 \times 1,2 = 129 \text{ V}$; $129 \text{ V} \rightarrow 129 \times 1200 / 110 \rightarrow \boxed{n = 1407 \text{ tr/min}}$

Exemple N°2 : Réponses et explications

Un moteur à excitation indépendante fonctionne sous une tension d'induit $V = 230 \text{ V}$.

En fonctionnement nominal l'induit absorbe un courant de 40 A .

On a mesuré les résistances : pour l'induit $R = 0,3 \Omega$, pour l'inducteur $r = 120 \Omega$

Un essai à vide à la fréquence nominale a permis de mesurer sur l'induit $V_0 = 225 \text{ V}$ et $I_0 = 1,2 \text{ A}$

L'inducteur est alimenté sous une tension égale à 140 V .

Déterminer le rendement du moteur : $\eta = P_u / P_a$ avec $P_u = P_a - \text{pertes}$

P_a est la puissance absorbée par l'induit et par l'inducteur : $P_a = V.I + V_e.I_e$ (avec $I_e = V_e / r$)

$$P_a = 230 \times 40 + 140 \times 140 / 120 \rightarrow \boxed{P_a = 9363 \text{ W}}$$

$P_u = P_a - \text{pertes} = P_a - P_{js} - P_{jr} - P_{fr} - P_m$ avec $P_{fr} + P_m = P_c$ pertes collectives mesurées à vide

A vide $V_0 . I_0 = R.I_0^2 + P_c \rightarrow P_c = V_0 . I_0 - R . I_0^2 = 225 \times 1,2 - 0,3 \times 1,2^2 \rightarrow \boxed{P_c = 270 \text{ W}}$

Et $P_{js} = V_e \times I_e = 140^2 / 120 \rightarrow P_{js} = 163 \text{ W}$

Et $P_{jr} = R . I^2 = 0,3 \times 40^2 \rightarrow P_{jr} = 480 \text{ W}$

$$P_u = 9363 - 163 - 480 - 270 \rightarrow \boxed{P_u = 8450 \text{ W}}$$

$$\eta = P_u / P_a = 8450 / 9363 \rightarrow \boxed{\eta = 90 \%}$$

Exemple N°3 : Réponses et explications

La force électromotrice d'une génératrice à excitation indépendante est $E = 240 \text{ V}$ lorsque le courant d'excitation est $I_e = 4 \text{ A}$.

Les résistances des enroulements sont : Pour l'induit $R = 0,1 \Omega$ et pour l'inducteur $r = 30 \Omega$

Les pertes collectives ou pertes constantes sont $P_c = 450 \text{ W}$

Lorsque la génératrice fournit un courant de 80 A , calculer :

La tension aux bornes de l'induit :

Elle est donnée par la loi d'Ohm généralisée : $V = E - R.I = 240 - 0,1 \times 80 \rightarrow \boxed{V = 232 \text{ V}}$

La puissance utile :

La puissance utile est une puissance électrique continue : $P_u = V.I = 232 \times 80 \rightarrow \boxed{P_u = 18560 \text{ W}}$

Les pertes par effet Joule dans l'induit :

Elle sont donnée par la loi de Joule dans le rotor: $P_{jr} = R . I^2 = 0,1 \times 80^2 \rightarrow \boxed{P_{jr} = 640 \text{ W}}$

Les pertes par effet Joule dans l'inducteur :

Elle sont donnée par la loi de Joule dans le stator: $P_{js} = r . I_e^2 = 30 \times 4^2 \rightarrow \boxed{P_{js} = 480 \text{ W}}$

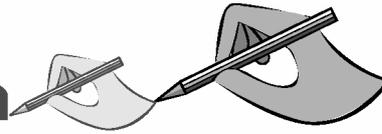
La puissance absorbée :

$P_a = P_u + \text{pertes} = P_u + P_{js} + P_{jr} + P_c = 18560 + 640 + 480 + 450 \rightarrow \boxed{P_a = 20130 \text{ W}}$

Le rendement :

$$\eta = P_u / P_a = 18560 / 20130 \rightarrow \boxed{\eta = 92,2 \%}$$

Autocorrection



3.4. Exercices à résoudre

Exercice N°1 : Moteur à courant continu

Un moteur à excitation indépendante tourne à la fréquence de rotation de 1400 tr/min quand il absorbe un courant de 30 A sous une tension de 115 V.

La résistance de l'induit est de $0,3 \Omega$.

Les pertes par effet joule dans l'inducteur sont égales à 150 W.

Les pertes à vide sont égales à 220 W.

Déterminer pour des courants induits de 20 A et de 30 A :

La force contre électromotrice du moteur :

La fréquence de rotation :

La puissance absorbée :

La puissance utile :

Le rendement :

Le couple électromagnétique :

Exercice N°2 : Génératrice à courant continu

Une génératrice à courant continu fonctionne à flux constant du à un aimant permanent.

Entraînée à la fréquence de rotation $n = 1600$ tr/min, elle fournit une tension de 240 V

Elle alimente une charge sous une tension de 220 V. Le courant fourni est de 24 A

La résistance de l'induit est $R = 0,5 \Omega$.

Le moment du couple d'entraînement de la génératrice est $T_m = 35,6$ Nm.

Calculer la fém de la machine :

Quelle est sa fréquence de rotation en charge :

Quel est le moment du couple électromagnétique T_{em} :

Quelle est la puissance absorbée par la génératrice :

Autocorrection

4. CORRECTION DES EXERCICES

4.1. Correction des exercices paragraphe 1.5 page 19

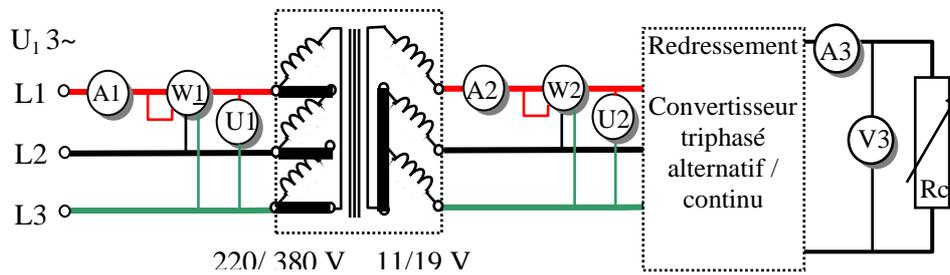
Exercice N°1 : Transformateur monophasé

Un transformateur dont la plaque signalétique est reproduite ci-dessous a été soumis à deux essais :

400 VA 50 Hz 230 V / 24 V	Essai	U_1 (V)	I_1 (A)	P_1 (W)	I_2 (A)
	A vide	230	0,3	21	0
	En court-circuit	15	1,8	35	16,7

- 1° Déterminer I_{1N} ?
Les intensités nominales sont obtenues lors d'un essai en court circuit : $I_{1N} = 1,8$ A
Le calcul donne : $I_{1N} = S / V_1 = 400 / 230 \rightarrow I_{1N} = 1,74$ A
- 2° Déterminer I_{2N} ?
De même la mesure en court circuit donne directement $I_{2N} = 16,7$ A
Le calcul donne : $I_{2N} = S / V_2 = 400 / 24 \rightarrow I_{2N} = 16,66$ A
- 3° Déterminer m ?
D'après la relation $m = V_{2V} / V_1 = 24 / 230 \rightarrow m = 0,104$ sans unité
- 4° Déterminer $\cos\phi_1$ à vide ?
Donné par la relation de la puissance pour l'essai à vide :
 $\cos\phi_1 = P_{1V} / (V_{1V} \cdot I_{1V}) = 21 / (230 \times 0,3) \rightarrow \cos\phi_1 = 0,3$ sans unité
- 5° Déterminer U_{cc} ?
 U_{cc} est la tension à appliquer au primaire pour obtenir l'intensité nominale au secondaire
 $U_{cc} = 15$ V. U_{cc} s'exprime en pourcentage de la tension primaire nominale : $U_{cc} = 6,5$ %
- 6° Déterminer P_{Cu} ?
Elles sont obtenues par l'essai en court circuit (intensités nominales) : $P_{Cu} = 35$ W
- 7° Déterminer P_{Fe} ?
Elles sont obtenues par l'essai à vide (tensions nominales) : $P_{Fe} = 21$ W
- 8° Déterminer P_2 fournie par le transfo à une charge nominale résistive ?
La puissance fournie à une charge résistive nominale est : $P_2 = V_{2N} \cdot I_{2N} = S$ ($\cos\phi = 1$)
 $P_2 = 24 \times 16,7 \rightarrow P_2 = 400,8$ W c'est la valeur de la puissance apparente (400 VA)
- 9° En déduire P_1 absorbée dans ces conditions par le transformateur ?
La puissance absorbée au primaire est égale à la puissance fournie à laquelle on rajoute les pertes : $P_1 = P_2 + P_{Cu} + P_{Fe} = 400 + 35 + 21 \rightarrow P_1 = 456$ W
- 10° Calculer le rapport P_2 / P_1 appelé rendement du transformateur.
Le rendement est le rapport de la puissance fournie sur la puissance absorbée :
Le rendement est : $\eta = P_2 / P_1 = 400 / 456 \rightarrow \eta = 87,7$ % sans unité et toujours < 1

Exercice N°2 : Montage redressement triphasé :



Essai	U1	A1	W1	U2	A2	W2	V3	A3
A vide	230V	0,06A	12W	21,4V	0A	0W	29V	0A
En charge	221V	0,11 A	39W	20,5V	0,77A	25,5W	27,7V	0,831A

- 1° En fonction des mesures effectuées dessiner le couplage des enroulements du transformateur
Au primaire la mesure en charge donne la tension nominale égale à 221 V : c'est la tension que peut supporter un enroulement donc le couplage est **en triangle** 221 V aux bornes.
Au secondaire la mesure en charge donne la tension nominale égale à 20,5 V : c'est la tension que peut supporter deux enroulements couplés **en étoile**.
- 2° Quelle est la valeur des pertes fer du transformateur ?
 Elles sont obtenues par l'essai à vide (tensions nominales) : $P_{Fe} = 12 \text{ W}$
- 3° Calculer au primaire du transformateur à vide :
 puissance apparente : $S_{1V} = \sqrt{3} \cdot U_{1V} \cdot I_{1V} = \sqrt{3} \times 230 \times 0,06 \rightarrow S_{1V} = 23,9 \text{ VA}$
 facteur de puissance : $\cos\phi_{1V} = P_{1V} / S_{1V} = 12 / 23,9 \rightarrow \cos\phi_{1V} = 0,5$ très faible
- 4° Calculer au primaire du transformateur en charge :
 puissance apparente : $S_{1C} = \sqrt{3} \cdot U_{1C} \cdot I_{1C} = \sqrt{3} \times 221 \times 0,11 \rightarrow S_{1C} = 42,1 \text{ VA}$
 facteur de puissance : $\cos\phi_{1C} = P_{1C} / S_{1C} = 39 / 42,1 \rightarrow \cos\phi_{1C} = 0,926$ voisin de 1
- 5° Calculer le rendement du transformateur :
 Le rendement est obtenu par la méthode directe : $\eta = P_2 / P_1 = 25,5 / 39 \rightarrow \eta = 0,654$
- 6° Calculer la puissance dissipée par la charge :
 La charge fonctionne en courant continu donc la puissance est : $P_C = V_3 \cdot I_3 \rightarrow P_C = 23 \text{ W}$
- 7° Calculer la puissance dissipée par l'ensemble transformateur – redresseur
 La puissance dissipée par l'ensemble transformateur – redresseur sont les pertes :
 Avant le transfo on a $P_1 = 39 \text{ W}$, après le transfo on a $P_C = 23 \text{ W} \rightarrow P_d = 16 \text{ W}$
- 8° Calculer le rendement de l'ensemble transformateur – redresseur
 le rendement est le rapport entre la puissance à la sortie et la puissance à l'entrée
 Le rendement de l'ensemble transformateur – redresseur est : $\eta = P_C / P_1 = 0,59$
- 9° Calculer le rapport de transformation du transformateur à vide :
 Le rapport de transformation du transfo est le rapport entre la tension composée au secondaire et la tension composée au primaire : $M = U_{2V} / U_{1V} = 21,4 / 230 \rightarrow M = 0,093$
- 10° Calculer le nombre de spires au secondaire, sachant que le primaire en compte 1500.
 Le rapport du nombre de spires au secondaire sur le nombre de spires au primaire est égale au rapport entre la tension au bornes du bobinage secondaire sur la tension aux bornes du bobinage primaire : $m = N_2 / N_1 = V_{2V} / U_{1V}$ avec $V_{2V} = U_{2V} / \sqrt{3} = 21,4 / \sqrt{3} = 12,4 \text{ V}$
 Donc $N_2 = N_1 \times V_{2V} / U_{1V} = 1500 \times 12,4 / 230 \rightarrow N_2 = 80 \text{ spires}$

4.2. Correction des exercices paragraphe 2.4 page 35

Exercice N°1 : Génératrice synchrone

Un alternateur triphasé est entraîné à une fréquence de 600 tr/min.

Ses enroulements sont couplés en étoile. Il débite un courant alternatif de 450 A à 50Hz.

La tension entre phase est de 5,2 kV et le facteur de puissance est de 0,8.

L'alternateur a un rendement de 0,87. Chaque enroulement de l'induit a une résistance de 0,25 Ω.

Calculer :

Le nombre de pôles de l'alternateur : $p = f / n = 50 / 10 \rightarrow p = 5$ paires de pôles

La fréquence de rotation ou fréquence de synchronisme étant $n^* = 600$ tr/min $\rightarrow n = 10$ tr/s

Nombre de paire de pôles	1	2	3	4	5	6
Fréquence de synchronisme	3000 tr/min	1500 tr/min	1000 tr/min	750 tr/min	600 tr/min	500 tr/min

Les puissances actives, réactive et apparente :

La puissance active est $P = \sqrt{3} U I \cos \varphi = \sqrt{3} \times 5200 \times 450 \times 0,8 \rightarrow P = 3,24$ MW

La puissance réactive est $Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi = \sqrt{3} \times 5200 \times 450 \times 0,6 \rightarrow Q = 2,43$ MVA_r

La puissance apparente est $S = \sqrt{3} U I = \sqrt{3} \times 5200 \times 450 \rightarrow S = 4$ MVA

La puissance mécanique fournie à l'alternateur est obtenue à partir du rendement de l'alternateur :

Le rendement est donné par la relation $\eta = P_u / P_a$

avec P_u puissance électrique en sortie et P_a puissance mécanique à l'entrée :

$P_a = P_u / \eta \rightarrow P_a = 3,24 \cdot 10^6 / 0,87 \rightarrow P_a = 3,72$ MW

Le couple nécessaire pour l'entraînement en rotation du rotor est donné par la relation :

$P_a = T \cdot \Omega$ avec $\Omega = 2\pi n$

donc le couple $T = P_a / \Omega = 3,72 \cdot 10^6 / (2\pi \times 10) \rightarrow T = 59,2$ KNm

Il est à noter que pour de telle puissance mises en jeu, la puissance d'excitation est négligée.

La tension aux bornes d'un enroulement de l'alternateur est $V = U / \sqrt{3} \rightarrow V = 3$ KV

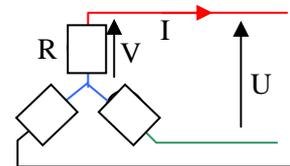
Car les enroulements de l'alternateur sont couplés en étoile

Les pertes par effet joule dans l'induit sont : $P_{JS} = \frac{3}{2} r \cdot I^2$

avec r résistance entre deux fils de phase :

pour un couplage étoile $r = 2 R = 0,5 \Omega$

$P_{JS} = \frac{3}{2} r \cdot I^2 = \frac{3}{2} \times 0,5 \times 450^2 \rightarrow P_{JS} = 152$ KW



Suite à une augmentation de la charge, la tension chute :

Pour ramener la tension à sa valeur nominale on doit agir sur le courant d'excitation I_e du rotor :

En augmentant I_e on augmente le flux et donc la fém aux bornes des enroulements

La tension à vide d'un alternateur est la force électromotrice de l'alternateur.

Exercice N°2 : Moteur asynchrone triphasé

Un moteur asynchrone triphasé alimenté par un réseau triphasé 50 Hz a subi un essai en charge dont voici les mesures :

U	I	P	n ^{'*}	F	d
(V)	(A)	(W)	(tr/mn)	(N)	(m)
382	6,6	3590	1474	20	0,98

Préciser :

Le nombre de pôle du moteur ?

La fréquence de rotation étant de 1474 tr/min, la fréquence de synchronisme est de 1500 tr/min

Le nombre de paires de pôles est $p = f / n = 50 / 25 \rightarrow \boxed{p = 2 \text{ paires de pôles}}$

Son couple utile nominal ?

Le couple utile est le produit de la force en Newton par la distance d'application de la force en mètre

$T_u = F \cdot d = 20 \times 0,98 \rightarrow \boxed{T_u = 19,6 \text{ Nm}}$

Sa puissance utile ?

La puissance utile d'un moteur est une puissance mécanique : $P_u = T_u \cdot \Omega'$

avec $\Omega' = 2\pi n'$ et $n' = n^* / 60$ $n' = 1474 / 60 = 24,57 \text{ tr/s} \rightarrow \Omega' = 154 \text{ rad/s}$

on a donc $P_u = 154 \times 19,6 \rightarrow \boxed{P_u = 3018 \text{ W}}$

Son facteur de puissance ?

Le facteur de puissance est obtenu à partir de la puissance électrique absorbée : $P_a = \sqrt{3} U I \cos\phi$

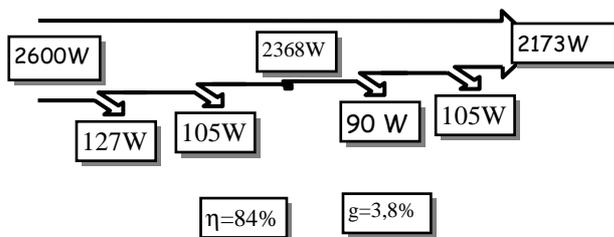
On a $\cos\phi = P_a / (\sqrt{3} U I) = 3590 / (\sqrt{3} \times 382 \times 6,6) \rightarrow \boxed{\cos\phi = 0,82}$

Son rendement ?

Le rendement est donné par la relation : $\eta = P_u / P_a = 3018 / 3590 \rightarrow \boxed{\eta = 0,84}$

Exercice N°3 : Bilan des puissances

Compléter les bilans fléchés des moteurs asynchrones triphasés ci dessous :



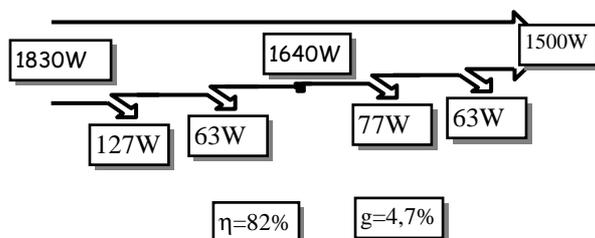
Les pertes mécaniques sont égales aux pertes fer dans le stator : $P_m = P_{fs} = 105 \text{ W}$

Les pertes joule dans le rotor sont $P_{jr} = g \cdot P_{tr}$
 $P_{jr} = 0,038 \times 2368 = 90 \text{ W}$

La puissance absorbée est $P_{tr} + \text{pertes stator}$

La puissance utile est $P_{tr} - \text{pertes rotor}$

Le rendement est $\eta = P_u / P_a$



Les pertes mécaniques sont égales aux pertes fer dans le stator : $P_m = P_{fs} = 63 \text{ W}$

La puissance transmise $P_{tr} = P_u + \text{perte rotor}$

La puissance absorbée est $P_{tr} + \text{pertes stator}$

Les pertes joule dans le rotor sont $P_{jr} = g \cdot P_{tr}$

$g = P_{jr} / P_{tr} = 77 / 1640 = 4,7 \%$

Le rendement est $\eta = P_u / P_a$

4.3. Correction des exercices paragraphe 3.4 page 48

Exercice N°1 : Moteur à courant continu

Un moteur à excitation indépendante tourne à la fréquence de rotation de 1400 tr/min quand il absorbe un courant de 30 A sous une tension de 115 V.

La résistance de l'induit est de 0,3 Ω.

Les pertes par effet joule dans l'inducteur sont égales à 150 W.

Les pertes à vide sont égales à 220 W.

Déterminer pour des courants induits de 20 A et de 30 A :

La force contre électromotrice du moteur : On a $V = E' - R.I \rightarrow E' = V + R.I$

$$\text{Pour } I = 30 \text{ A : } E' = 115 - 0,3 \times 30 \rightarrow \boxed{E'_{30} = 106 \text{ V}}$$

$$\text{Pour } I = 20 \text{ A : } E' = 115 - 0,3 \times 20 \rightarrow \boxed{E'_{20} = 109 \text{ V}}$$

La fréquence de rotation :

$$\text{Pour } I = 30 \text{ A : on a } \boxed{E'_{30} = 106 \text{ V}} \rightarrow \boxed{n_{30} = 1400 \text{ tr/min}}$$

$$\text{Pour } I = 20 \text{ A : on a } \boxed{E'_{20} = 109 \text{ V}} \rightarrow n_{20} = 1400 \times 109/106 \rightarrow \boxed{n_{20} = 1440 \text{ tr/min}}$$

La puissance absorbée : La puissance absorbée $P_a = P_{a_{\text{rotor}}} + P_{a_{\text{stator}}} = V \cdot I + P_{js}$

$$\text{Pour } I = 30 \text{ A : } P_a = 115 \times 30 + 150 \rightarrow \boxed{P_{a30} = 3600 \text{ W}}$$

$$\text{Pour } I = 20 \text{ A : } P_a = 115 \times 20 + 150 \rightarrow \boxed{P_{a20} = 2450 \text{ W}}$$

La puissance utile : $P_u = P_a - \text{pertes} = P_a - P_{js} - P_{jr} - P_c = P_a - P_{js} - R.I^2 - P_c$

$$\text{Pour } I = 30 \text{ A : } P_u = 3600 - 150 - 0,3 \times 30^2 - 220 \rightarrow \boxed{P_{u30} = 2960 \text{ W}}$$

$$\text{Pour } I = 20 \text{ A : } P_u = 2450 - 150 - 0,3 \times 20^2 - 220 \rightarrow \boxed{P_{u20} = 1960 \text{ W}}$$

Le rendement : $\eta = P_u / P_a$

$$\text{Pour } I = 30 \text{ A : } \eta = P_{u30} / P_{a30} = 2960 / 3600 \rightarrow \boxed{\eta_{30} = 82 \%}$$

$$\text{Pour } I = 20 \text{ A : } \eta = P_{u20} / P_{a20} = 1960 / 2450 \rightarrow \boxed{\eta_{20} = 80 \%}$$

Le couple électromagnétique : $T_{em} = P_{em} / \Omega = E' . I / 2\pi n$

$$\text{Pour } I = 30 \text{ A : } T_{em} = 106 \times 30 / (2\pi \times 1400 / 60) \rightarrow \boxed{T_{em30} = 14,46 \text{ Nm}}$$

$$\text{Pour } I = 20 \text{ A : } T_{em} = 109 \times 20 / (2\pi \times 1440 / 60) \rightarrow \boxed{T_{em20} = 21,69 \text{ Nm}}$$

Exercice N°2 : Génératrice à courant continu

Une génératrice à courant continu fonctionne à flux constant du à un aimant permanent.

Entraînée à la fréquence de rotation $n = 1600$ tr/min, elle fournit une tension de 240 V

Elle alimente une charge sous une tension de 220 V. Le courant fourni est de 24 A

La résistance de l'induit est $R = 0,5 \Omega$.

Le moment du couple d'entraînement de la génératrice est $T_m = 35,6$ Nm.

Calculer la fém de la machine :

La loi d'Ohm généralisée donne : $V = E - R.I \rightarrow E = V + R.I$

$$E = 220 + 0,5 \times 24 \rightarrow \boxed{E = 232 \text{ V}}$$

Quelle est sa fréquence de rotation en charge :

$$\text{Pour } E = 240 \text{ V on a } n = 1600 \text{ tr/min}$$

$$\text{Pour } E = 232 \text{ V on a } n = 1600 \times 232 / 240 \rightarrow \boxed{n = 1547 \text{ tr/min}}$$

Quel est le moment du couple électromagnétique T_{em} :

$$T_{em} = P_{em} / \Omega = E . I / 2\pi n$$

$$T_{em} = 232 \times 24 / (2\pi \times 1547 / 60) \rightarrow \boxed{T_{em} = 34,37 \text{ Nm}}$$

Quelle est la puissance absorbée par la génératrice :

$$P_a = P_m + P_e = T_m \cdot \Omega = T_m \cdot 2\pi n \quad (\text{aimant permanent } P_e = 0)$$

$$P_a = 35,6 \times 2\pi \times 1547 / 60 \rightarrow \boxed{P_a = 5770 \text{ W}}$$