

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie

N° d'ordre : M/GE/2018

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE DE
MASTER ACADÉMIQUE**

Filière : Électrotechnique
Spécialité : Électrotechnique industrielle

Thème

**ÉTUDE ET RÉALISATION D'UN SYSTEME AUTONOME D'ÉNERGIE
PAR VOLANT D'INERTIE**

Présenté par :

1. Mr. Bensaid Ghaouti
2. Mr. Bensafi Houari

Soutenu le 27/09 /2018 devant le jury composé de :

Président : Mr. BEKKKOUCHE Benaïssa

Examineur : Mr. BARDADIBENDAHA Mourad

Examineur : Mr. GHOMRI Leïla

Encadreur : Mr. LARBI Beklaouz Hadj

Co-Encadreur : Mr. CHAOUCH Abdellah

Année Universitaire : 2017 / 2018

Dédicace

ALLAH qui m'aide dans ce travail.

Aux êtres qui me sont les plus chers MES PARENTS pour leurs sacrifices et leur éducation.

A tous les enseignants qui étaient estimé derrière l'arrivé à cette étape.

A Mes amis Brahim, Mohamed, Walid et Mon frère Mostapha.

A tous les familles qui m'aide dans ce projet.

A tous Mes Camarade de ma Classe et Mes amis d'université.

Bensaid Ghaouti

Bensafi Houari

Remerciement

Nous remercions vivement Monsieur BEKKKOUCHE BENAÏSSA, professeur à la Faculté des Sciences et Technologie Abd El Hamid Ibn Badis, pour avoir accepté de présider le jury, Je remercie également Madame GHOMRI et Monsieur BENDAHA pour avoir accepté de siéger en qualité d'examineur.

Nous tiens à remercier vivement les professeur LARBI BEKLAOUZ HADJ et CHAOUCH ABDELLAH d'avoir accepté du notre encadrement, Prodigé de précieux conseils et pour nous nous avoir laissé une guider. Nous avoir énormément appris grâce à leurs compétence technique et à leurs avis toujours sincères. Et je remerciement à tous le personnel du laboratoire pédagogique n° 8 d'électrotechnique. Merci pour son professionnalisme, son engagement, son sens de la gratitude et sa gentillesse.

Table des matières

Liste des tableaux	8
Liste des figures	9
Introduction générale.....	10
Chapitre I : Généralité sur les volants d'inertie	13
I. Introduction	14
1.1. Moment d'inertie et l'énergie cinétique	14
1.1.1. Énergie cinétique en rotation	14
1.1.2. Moment d'inertie	15
1.1.3. Vitesse du volant d'inertie	16
1.3.1. Plans et géométrie du volant d'inertie.....	18
1.4. Conclusion.....	19
Chapitre II : Principe de fonctionnement des machines.....	20
II. Introduction	21
2.1. Principe de fonctionnement.....	21
2.1.1. Constitution des machines asynchrone.....	21
a) Le stator.....	21
b) Le rotor.....	22
2.1.2. Paramètre électrique des machines asynchrone	22
a) Puissance	22
b) Vitesse de synchronisme	22
c) Glissement.....	23
d) Couple de démarrage	23
e) Couples résistants.....	23
2.2. Les machines synchrones	24
2.2.1. Constitution des machines synchrones	24
a) Stator	24
b) Rotor	24
2.2.2. Principe de fonctionnement	24
2.2.3. Modelé électrique	25
II.3. Conclusion.....	26
Chapitre III : Réalisations de la maquette.....	27
III. Introduction	28
III.3. La partie théorie	28
3.1. Réalisation de la maquette.....	28

3.1.1. Eléments principaux dans la maquette.....	28
3.1.2. Système de transmission de puissance.....	28
3.1.3. Dimensionnement des éléments des maquettes.....	29
3.2.1. Moteur à courant continue	30
a) Calcule la vitesse angulaire du moteur.....	30
b) Calcule le couple nominale du moteur.....	30
c) Calcule le moment d'inertie de la poulie du moteur	30
d) Calcule le couple accélération sur la poulie du moteur.....	31
e) Calcule l'énergie cinétique sur la poulie du moteur.....	31
3.2.2. Génératrice triphasé.....	32
a) Calcule la vitesse angulaire de la génératrice.....	33
b) Calcule le couple nominale de la génératrice.....	33
3.2.3. Calcule le moment d'inertie de la poulie de la génératrice.....	33
a) Calcule le couple d'accélération de la poulie de la génératrice.....	33
b) Calcule l'énergie cinétique sur la poulie de la génératrice.....	33
3.3. Volant d'inertie.....	34
3.3.1. Calcule des tous les moments d'inertie du volant.....	34
3.3.2. Calcule des paramètres physiques du moteur avec volant	36
a) Calcule de la puissance mécanique du volant	36
b) Calcule de la puissance électrique du moteur	36
c) calcule du couple nominale du volant	37
d) Calcule du couple accélération du volant.....	37
e) Calcule d'énergie cinétique du volant.....	37
3.3.3. Calcule les paramètres physiques du volant avec génératrice	38
a) Calcule du couple résistant du système (volant plus génératrice).....	38
III.4. Partie pratique	39
4.1. Boucle ouvert	39
4.1.1. Essai et mesure.....	39
a) essai n° 1	39
b) essai n° 2.....	39
4.2.1. Calcule de puissance consommée par le moteur	40
4.2.2. Calcule de puissance mécanique du volant	41
4.2.3. Calcule du couple du volant	41
a) essai n° 3	41
4.3. La puissance du moteur.....	43

a) Calcule du couple du moteur.....	43
b) Calcule la puissance mécanique du volant.....	43
c) Couple du volant	43
d) Calcule du couple des génératrices	43
4.3.1. Calcule du couple résistant du système (volant plus génératrice).....	44
b) essai n° 4	44
III.5.Conclusion général.....	46

Liste des tableaux

Tableau 1 : Des différentes géométries de moment d'inertie.....	16
Tableau 2: Coefficients de forme.....	17
Tableau 3 : Les caractéristiques des éléments du moteur à courant continue	30
Tableau 4 : Caractéristique des éléments des génératrices triphasée.....	33
Tableau 5 : Le dimensionnement des paramétrés du volant.....	35
Tableau 6 : Caractéristique du moteur seul.	39
Tableau 7 : Les caractéristiques du moteur avec le volant.....	40
Tableau 8 : La variation des 'éléments de moteur et le volant.....	41
Tableau 9 : La valeur de la tension et du courant d'excitation.....	42
Tableau 10 : Les tensions sorties par la génératrice.....	42
Tableau 11 : Les caractéristiques des systèmes à vide.....	43
Tableau 12 : La valeur de la tension et du courant d'excitation de système en charge.....	44
Tableau 13 : Les valeurs de la tension et courant du système en charge.....	45
Tableau 14: Les caractéristiques du système en charge	45

Liste des figures

Figure 1 : Cylindre creux.....	18
Figure 2 : Schéma de la transmission des systèmes.....	29
Figure 3 : La variation le couple (C_n) en fonction la vitesse (N).....	31
Figure 4 : La variation dès l'énergie cinétique (E) en fonction du moment d'inertie (J).....	32
Figure 5 : La variation du moment d'inertie (J) en fonction du moment d'inertie total.....	36
Figure 6 : Shéma des modele du réalisation.....	38
Figure 7 : Schème de la boucle ouverte du système.....	39
Figure 8 : Schème synoptique du moteur seul.....	39
Figure 9 : Schéma synoptique du moteur avec le volant.....	40
Figure 10 : Schéma synoptique du système.....	42
Photo A : Photo du moteur avec le volant.....	40
Photo B : Photo du système en charge.....	45

Introduction générale

Afin de maîtriser la demande à la production d'énergie électrique devant les différents aléas techniques, environnementaux et climatiques qui perturbent la consommation d'énergie. Les industrielles pensent et pousse les chercheurs de trouver des solutions complémentaire et indispensable à long terme pour permettre de répondre au besoin en énergie qui ne cesse d'augmenter.

Dans cette introduction générale de notre mémoire de fin d'études, nous avons analysé les différentes techniques et méthode existante depuis longtemps pour stocker l'énergie. Il existe plusieurs techniques et procéder pour le stockage d'énergie électrique sous forme mécanique, électrochimique, magnétique ou thermique.

Les stations de pompage, sont des techniques de stockage d'énergie électrique par gravitation. Elles sont composées de deux retenues d'eau à des hauteurs différentes reliées par un système de canalisations. Elles sont équipées d'un système de pompage permettant de transférer l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur en heures creuses. En heures pleines, la station fonctionne comme une centrale hydroélectrique classique [1].

Les installations de stockage d'énergie par air comprimé de grande puissance consistent, en utilisant l'électricité disponible à bas coût en période de faible consommation, à stocker de l'air dans des cavités souterraines grâce à un compresseur. Au moment de la pointe de consommation, cet air comprimé est libéré pour faire tourner des turbines qui produisent ainsi de l'électricité.

Ces dernières années, une grande part des développements mis en œuvres pour le stockage de l'énergie électrique ont été concentrés sur les batteries électrochimiques. Les technologies utilisées dans ces accumulateurs sont toutes aussi variées que les capacités d'accumulation envisageables. De la minuscule pile au lithium stockant quelques milliwatts aux réseaux de batteries au plomb de plusieurs mégawatts.

À l'inverse des batteries, les inductances supraconductrices ont la faculté de pouvoir décharger la totalité de leurs énergies emmagasinées. Ils sont très utiles dans les applications qui nécessitent de fonctionner continuellement avec une charge et décharge totale et un très grand nombre de cycles. Ils sont aujourd'hui commercialisés dans des gammes de puissances de 1 à 100 MW [2].

Les super capacités, possèdent des caractéristiques à la fois des condensateurs et des batteries électrochimiques. Ils sont constitués de deux électrodes chargées de signes opposés, d'un électrolyte pour séparer les électrodes ainsi que d'un collecteur de courant. La conséquence

directe est que la tension maximale d'utilisation se limite à quelques volts par unité, une mise en série de nombreux éléments est nécessaire pour atteindre les tensions habituelles dans les applications de puissance. La charge est en partie stockée par des ions tout comme une batterie.

Stockage sous forme d'hydrogène, l'idée consistait à profiter des heures creuses de la consommation d'énergie pour fabriquer par les centrales nucléaires de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Ce dernier peut être considéré comme un stockage indirect de l'électricité.

La pile à combustible est l'inverse d'une électrolyse. La réaction chimique produite par l'oxydation et la rencontre de gaz produit de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. Une pile à combustible produit une tension électrique d'environ 0,7 à 0,8 volt, selon la charge (densité de courant) et produit de la chaleur [3].

Le stockage inertiel, longtemps utilisé pour la régulation des machines à vapeur, le principe du volant d'inertie permet aujourd'hui de stocker temporairement l'énergie sous forme de rotation mécanique.

Après cet état d'art de différents types de stockage d'énergie en très bref, nous nous intéressons par le stockage inertiel. Notre présent travail de mémoire tenant sur l'étude et réalisation du stockage inertiel est organisé comme suite :

En premier chapitre, nous introduisons des généralités sur les volants d'inertie et la transformation d'énergie électrique en énergie cinétique, ainsi tous les paramètres qui caractérisent ce système de transformation énergétique.

Dans le deuxième chapitre, nous rappelons très brièvement le principe de fonctionnement de quelques machines électriques et la réalisation des différentes parties du système de stockage inertiel.

Le troisième chapitre est consacré aux différents tests et mesure réalisés sur ce système de stockage d'énergie en boucle ouverte et en boucle fermée. Afin de montrer l'autonomie du système par rapport au réseau électrique.

Enfin, nous concluons ce travail de mémoire en synthétisant les contributions et les idées les plus pertinentes issues de cette réalisation du stockage inertiel.

Chapitre I : Généralité sur les volants d'inertie

I. Introduction

Un volant d'inertie comprend une masse rotative qui stocke l'énergie cinétique. Lors de la charge, un couple appliqué dans le sens de rotation accélère le rotor qui a augmenté la vitesse de rotation ainsi l'énergie stockée. Les configurations de rotor prédominantes comprennent des disques, des cylindres pleins et des parois épais cylindres en carbone et en verre composite ou en acier à haute résistance.

Depuis l'invention du tour de potier, les volants d'inertie ont été utilisés comme composant dans les machines pour lisser le flux d'énergie. Dans les moteurs, l'équipement du volant est d'amortir les changements de vitesse. Le couple peut varier de manière significative entre les impulsions tandis que la vitesse du volant varie peu. De nombreuses formes du volant ont été utilisées allant de la configuration roue de chariot trouvé dans les machines à vapeur stationnaires aux disques multifonctions produits en masse trouvées dans les moteurs automobiles modernes [4].

Dès la fin du 20ème siècle, une nouvelle classe de systèmes de volant d'inertie autonome a émergé. Le volant d'inertie moderne, développé expressément pour le stockage d'énergie, est logé dans une enceinte évacuée pour réduire la traînée aérodynamique. Le volant d'inertie est chargé et déchargé électriquement, en utilisant un Moteur/Générateur à double fonction connecté au rotor. La vie de cycle de volant est supérieure en comparons avec d'autres type de stockage d'énergie [5].

1.1. Moment d'inertie et l'énergie cinétique

Un est un système rotatif permettant le stockage et la restitution d'énergie cinétique. Une masse fixée sur un axe est mise en rotation par l'application d'un couple, augmentant sa vitesse de rotation afin d'emmagasinée l'énergie.

1.1.1. Énergie cinétique en rotation

L'énergie cinétique est par définition l'énergie associée au mouvement d'un corps. Lorsque celui-ci effectue une translation, l'énergie cinétique k dépend de l'inertie de translation qui est la masse m et le module au carré de la vitesse v [6] :

$$k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{I.1})$$

Sachant que,

k : L'énergie cinétique de translation, en, J. ($kg \times m^2/s^2$).

m : La masse de l'objet, en, kg .

v : Vitesse de l'objet, en, m/s .

1.1.2. Moment d'inertie

Lorsqu'un corps effectue une rotation à une vitesse ω autour d'un axe, le corps est en mouvement et possède une énergie cinétique. Puisque l'ensemble du corps se déplace avec une vitesse angulaire ω commune, on peut définir une autre forme d'énergie cinétique en fonction du moment d'inertie comme suite :

$$K = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (I.2)$$

Avec :

K : L'énergie cinétique de l'objet en rotation, en, J.

I : L'inertie de l'objet en rotation autour d'un axe, en, $kg.m^2$.

ω : Vitesse angulaire, en, rad/s.

L'inertie de rotation I pour cette expression d'énergie n'est pas uniquement la masse m

car l'énergie possède comme unité, le joule est défini, en $(N \times m)$. de nombreuses formes de rotor aient été explorées, presque tous les volants utilisés construits comme des cylindres pleins ou des cylindres creux. Pour un disque ou un cylindre plein de rayon r , le moment d'inertie est donnée par [7]:

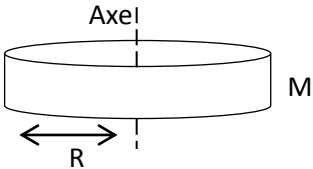
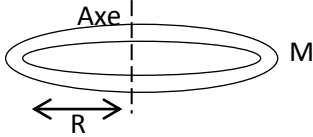
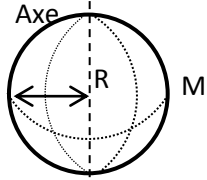
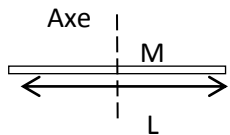
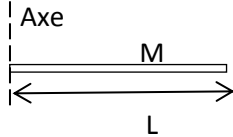
$$I = \frac{1}{2} m r^2 \quad (I.3)$$

Pour un cylindre creux à paroi mince, la masse est concentrée à la périphérie et le moment d'inertie est donné par comme suite :

$$I = m r^2 \quad (I.4)$$

Le tableau 1, représente les différentes géométries où le moment d'inertie a été calculé en fonction de la masse de l'objet, de sa forme et de sa position par rapport à l'axe de rotation [6].

Tableau 1 : Les moments d'inertie de différentes géométries [6].

Géométrie	Schéma	Moment d'inertie
Cylindre creux		$I = MR^2$
Cylindre plein		$I = \frac{1}{2} M R^2$
Sphère vide		$I = \frac{2}{3} MR^2$
Tige		$I = \frac{1}{12} ML^2$
		$I = \frac{1}{3} ML^2$

1.1.3. Vitesse du volant d'inertie

La vitesse maximale à laquelle un volant d'inertie peut fonctionner est limitée par la force du matériau du rotor. Le stress subi par le rotor doit rester inférieur à la résistance du matériau du rotor avec une marge de sécurité appropriée. Pour un disque uniforme ou cylindre solide, la contrainte maximale définie par comme suite [8] :

$$\sigma_{max} = \frac{1}{8} \rho r^2 \omega^2 (3 + \alpha) \quad (I.5)$$

D'où

σ_{max} : La contrainte maximale.

ρ : La densité du matériau du rotor.

α : Le coefficient de Poisson du matériau du rotor.

ω : Vitesse angulaire, en, rad/s.

r : Rayon du cylindre, en, m .

Dans la contrainte dans la direction circonférentielle d'un cylindre rotatif à paroi mince σ_θ est donnée par l'équation suivante :

$$\sigma_{\theta} = \rho r^2 \omega^2 \quad (\text{I.6})$$

La vitesse de surface d'un volant d'inertie est donnée par [8] :

$$v = r \omega \quad (\text{I.7})$$

À partir des équations (6) et (7), l'énergie par unité de masse d'un rotor peut être exprimée simplement par :

$$\frac{E}{m} = k v^2 \quad (\text{I.8})$$

Où K est un facteur de forme avec une valeur de 0,5 pour un cylindre à paroi mince et 0,25 pour un disque. Ainsi, selon, l'énergie spécifique peut également être exprimée en termes de propriétés du matériau du rotor. L'équation (8) devient :

$$\frac{E}{m} = k_s \frac{\sigma}{\rho} \quad (\text{I.9})$$

Où k_s est un deuxième facteur de forme avec une valeur de 0,5 pour un cylindre à paroi mince et 0,606 pour un disque avec un coefficient de Poisson de 0,3. Comme un composite de carbone, stocke considérablement plus d'énergie par unité de masse à un matériau lourd et résistant, tel que l'acier à haute résistance et un disque stocke plus d'énergie par unité de masse qu'un cylindre creux avec le même force. Le tableau 2, répertoriés les différents formes de volants d'inertie avec leurs facteur de forme k_s [9].

Tableau 2 : Coefficients de forme [9]

Formes du rotor	k_s
Disque plat percé	0,305
Barre mince	0,333
Jante avec rayons	0,4
Anneau mince	0,5
Barre profilée	0,5
Disque plein	0,606
Disque iso contrainte	1
Disque iso contrainte modifié	0.931

A ce coefficient de forme, il faut rajouter une marge de sécurité qui dépendre de l'application visée. De plus la constitution du volant va elle aussi entrer en compte dans le calcul de la marge. Les matériaux métalliques seront plus sensibles au vieillissement que les matériaux composites.

1.3.1. Plants et géométrie du volant d'inertie

Dans ce paragraphe, nous présentons la géométrie d'un cylindre creux, car ce dernier donne un meilleur moment d'inertie comme montrer dans le tableau 1. Un cylindre creux consiste en une imbrication de deux cylindres, un grand cylindre et un plus petit cylindre à l'intérieur de ce dernier, comme représenté par la figure suivante.

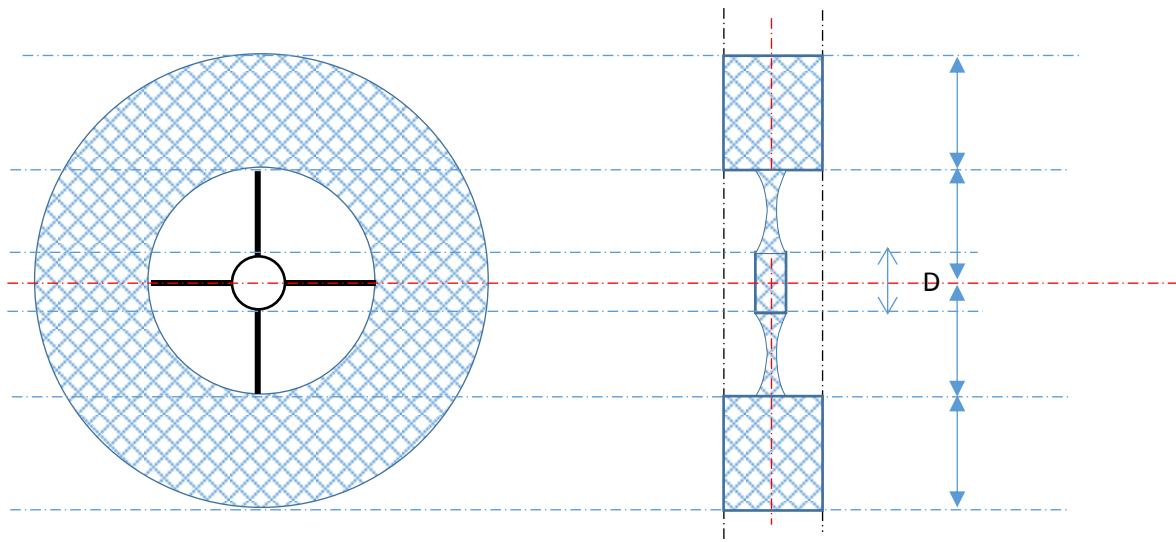


Figure 1 : plant du cylindre creux.

1.4. Conclusion

Pour l'augmentation de l'énergie cinétique stockée nécessite un moment d'inertie plus élevé et d'une vitesse de rotation ω importante. Cependant, en se limitant au volant, ce n'est pas la vitesse de rotation qui présente une limite mais la vitesse périphérique $V = \omega r$ est le rayon r du volant [10].

Si la variation de l'énergie accumulée provient très généralement de la modification de la vitesse de rotation, il existe quelques propositions basées sur des volants à inertie variable. Une autre solution, proposée dès la fin des années 70 et reprise par Moosavi-Rad et Ullman en 1990 [11], comprend un axe et un carter externe reliés par une bande métallique. En fonction de la vitesse relative de l'axe par rapport au carter, cette bande a tendance à s'enrouler sur l'axe ou, au contraire, à se dévider de l'axe pour se positionner en appui sur le carter. Ces modifications sont associées à une variation de l'inertie de l'ensemble. Le contrôle de l'enroulement est réalisé par un train épicycloïdal débrayable placé entre l'entrée du volant, son axe et le carter tournant. Si les caractéristiques énergétiques sont faibles, l'intérêt du système est d'éviter l'utilisation d'un variateur de vitesse mécanique et continu comme cela était envisagé courant 70. Actuellement, les variations peuvent être obtenues par des procédés électrotechniques (moteur-générateur et convertisseur électronique) mais la batterie ne doit pas être reliée mécaniquement à la transmission.

Le stockage inertiel peut représenter une bonne alternative aux autres types de stockage d'énergie électrique malgré des performances massiques et volumiques intrinsèques modestes. Sa grande tenue en cyclage lui confère en effet un avantage important dans les applications à fortes sollicitations dynamiques, il se trouve ainsi en compétition direct avec les super condensateurs. En outre, les problèmes de sûreté de fonctionnement et l'effet gyroscopique privilégient son utilisation en mode stationnaire, mais il existe quelques applications embarquées (satellites, transports terrestres sur rail). Sachant qu'une solution idéale unique de stockage n'existe pas, la combinaison de plusieurs moyens de stockage représente souvent la meilleure garantie d'un dimensionnement optimal d'une installation électrique et parmi des applications du volant d'inertie est utilisé dans le domaine de transport afin d'augmenter l'efficacité énergétique des véhicules dont le mode de propulsion est basé sur la traction électrique.

Chapitre II : Principe de fonctionnement des machines

II. Introduction

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués d'empilement de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles sont placées les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source, l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdale possible dans l'entrefer. Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieur ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence.

A fonction convertir l'énergie électrique en énergie mécanique est réalisée par un moteur. L'énergie électrique se présente sous deux formes : source alternative ou source continue. Nous trouverons deux types de moteurs : à courant alternatif ou à courant continu. Le choix d'un moteur asynchrone triphasé dépend de nombreux critères tels que : le couple résistant, l'inertie, le réseau etc..., et ce choix dépend mécaniquement de la machine à entraîner [12].

2.1. Principe de fonctionnement

Le stator supporter trois enroulement, décalés de 120° , alimentés par une tension alternative triphasée.

Ces trois bobines produisent un champ magnétique variable qui a la particularité de tourner autour de l'axe du stator suivant la fréquence de la tension alimentation, Ce champ magnétique est appelé champ tournant.

Le champ tournant (statorique) vient induire des courants dans le rotor.

Leur interaction entraîne la rotation du rotor à une fréquence légèrement inférieure à celle du champ tournant [13].

2.1.1. Constitution des machines asynchrone

Un moteur asynchrone triphasé à cage comporte deux parties principales : un inducteur ou stator et un induit ou rotor.

a) Le stator

C'est la partie fixe du moteur. Une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0,5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. Les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Le « feuilletage » du circuit magnétique réduit les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Les tôles sont munies d'encoches dans lesquelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (trois enroulements dans le cas d'un moteur triphasé). Chaque enroulement est constitué

de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation [13].

b) Le rotor

C'est l'élément mobile du moteur. Comme le circuit magnétique du stator, il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Cet élément, de par sa technologie, permet de distinguer deux familles de moteurs asynchrones : ceux dont le rotor est dit « à cage », et ceux dont le rotor bobiné est dit « à bagues »

2.1.2. Paramètre électrique des machines asynchrone

a) Puissance

Le moteur asynchrone qui convient le mieux à une application est toujours celui qui fonctionne près de la puissance nominale, car c'est à ce moment que son facteur de puissance ($\cos \phi$) et son rendement sont les meilleurs.

$$P_a = U I \sqrt{3} \cos \Phi \quad (\text{II.1})$$

P_a : Puissance absorbée en Watt (W).

U : tension composée en volt (V).

I : courant en ligne en ampère (A).

$\cos \phi$: facteur de puissance (sans unité)

Le moteur peut alors fournir au système une puissance utile mécanique de :

$$P_U = T_U \cdot \Omega \quad (\text{II.2})$$

P_U : Puissance utile en Watt (W)

T_U : couple utile en newton mètre (N.m)

Ω : vitesse angulaire en radian/seconde (rad.s^{-1})

b) Vitesse de synchronisme

La vitesse de synchronisme des moteurs asynchrones triphasés est proportionnelle à la fréquence du courant d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles constituant le stator [13].

$$N_s = 60 \frac{f}{p} \quad (\text{II.3})$$

N_s : vitesse de synchronisme en tr/min.

f : fréquence en Hz.

p : nombre de paires de pôle.

c) Glissement

Le couple moteur ne peut exister que si un courant induit circule dans la spire. Ce couple est déterminé par le courant qui circule dans la spire et qui ne peut exister que s'il existe une variation de flux dans cette spire. Il faut donc qu'il y ait une différence de vitesse entre la spiré le champ tournant. C'est la raison pour laquelle un moteur électrique fonctionnant suivant le principe que nous venons de décrire est appelé « moteur asynchrone ». La différence entre la vitesse de synchronisme (N_s) et celle de la spire (N) est appelée « glissement » (g) et s'exprime en % de la vitesse de synchronisme [13].

$$g = \frac{(N_s - N)}{N_s} \times 100 \quad (\text{II.4})$$

g : la glissement

N_s : la vitesse de synchronisme en tr/min.

d) Couple de démarrage

Pour que le moteur entraine une machine, il lui faut un couple de démarrage. Celui-ci doit d'une part décoller la masse (de moment d'inertie J) de la machine et d'autre part vaincre le couple résistant relatif à la machine [14].

On désigne par C_a le couple d'accélération (qui n'existe que pendant la mise en vitesse de la masse d'inertie J) et C_r le couple résistant de la machine (qui se maintien durant tout le fonctionnement du moteur)

Ainsi le Couple de démarrage C_d peut se calculer

$$C_d = C_a + C_r \quad (\text{II.5})$$

C_d : le couple démarrage de la machines en (N.m).

C_r : le couple résistant en (N.m).

C_a : le couple d'accélération en (N.m).

Au moment du démarrage, le couple moteur est en moyenne de 1,5 à 2 fois le couple nominal.

e) Couples résistants

Le démarrage d'une machine par un moteur ne peut avoir lieu que si le couple moteur est à chaque instant supérieur au couple résistant de la machine entraînée, et ce à toutes les vitesses (sinon le moteur s'arrête : on dit qu'il cale) [14] :

$$\text{Couple démarage} = C_{\text{Moteur}} - C_{\text{résistant}}$$

2.2. Les machines synchrones

2.2.1. Constitution des machines synchrones

Comme tout moteur, la machine synchrone est constituée d'une partie mobile : le rotor et d'une partie fixe le stator.

a) Stator

Le stator est habituellement l'induit (siège de la transformation de puissance). Le stator est constitué d'un bobinage triphasé généralement couplé en étoile, découpé en p paires de pôles. Les bobinages sont insérés dans des encoches au sein de culasse en ferrite [15].

b) Rotor

De la même manière, l'inducteur est généralement le rotor. Suivant la technologie utilisée, le champ magnétique est créé par des bobinages ou des aimants permanents. (cf. diaporama durant le cours).

Lorsque que l'inducteur est bobiné, il est nécessaire de conserver des balais afin de l'alimenter (mais cette fois sans commutation).

2.2.2. Principe de fonctionnement

Le stator alimenté par un système de tensions triphasé crée un champ tournant dans l'entrefer. Ce champ magnétique tourne à la vitesse de $\frac{f}{p}$ tours par secondes avec f fréquence d'alimentation des bobinages statoriques, et p le nombre de paires de pôles

Le synchronisme des champs magnétiques induit et inducteur impose une procédure spécifique de démarrage (de couplage au réseau en mode alternateur).

En mode moteur : un moteur synchrone

ne peut démarrer directement à pleine tension depuis le réseau de fréquence 50Hz (Car le rotor a une vitesse nulle au démarrage $\Omega \neq \frac{\omega}{p}$). Pour une alimentation directe en 50 Hz, il faudrait donc au préalable amener la charge à la vitesse nominale par un moteur auxiliaire puis connecter l'alimentation [15].

Pour les moteurs brushless, la solution consiste à utiliser un onduleur (système électronique recréant un système de tension triphasé de fréquence et d'amplitude voulu) . Autrefois, le rotor devait être lancé à la vitesse de synchronisme par un dispositif tierce et la variation de vitesse était impossible à réaliser.

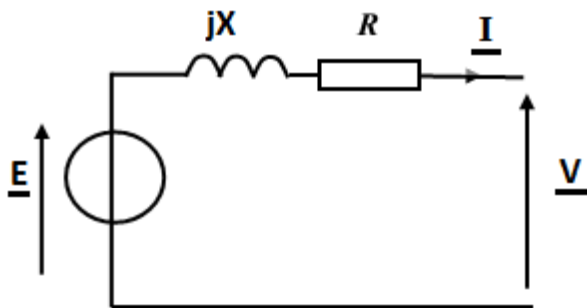
En mode alternateur (pour les machines à rotor bobiné essentiellement) : avant de connecter la machine synchrone au réseau, il faut lancer le rotor à la vitesse de synchronisme par

un moteur annexe, puis en modulant le courant d'induction, amener la fem créée par l'alternateur à la même valeur que la tension du réseau.

Le problème de ce mode de fonctionnement de la machine synchrone est son instabilité. Les constantes de temps électrique étant beaucoup plus faibles que les constantes de temps mécaniques, le moindre changement rapide de courant statorique entraîne le décrochage du champ magnétique créé par le rotor. Pour cette raison, le moteur synchrone, en pratique, ne peut fonctionner correctement qu'en étant asservi afin de maintenir en permanence les champs statoriques et rotoriques "en phase".

2.2.3. Modelé électrique

La machine synchrone triphasée à aimants permanents peut être représentée par le schéma électrique suivant :



$i(t)$: est le courant de phase circulant dans les enroulements statoriques.

$v(t)$: est la tension simple aux bornes d'un enroulement.

$e(t)$: est la force électro motrice à vide de la machine.

X : est la réactance synchrone, R la résistance d'un enroulement.

Remarque: Selon la forme du bobinage statorique, la fem est trapézoïdale ou sinusoïdale.

Le module de la fem dépend du champ magnétique créé par l'inducteur.

On peut l'écrire sous la forme :

$$E = K \times N \times f \times \Phi \quad (\text{II.6})$$

Avec :

K , constante de Kapp dépendant de la machine.

N : nombre de conducteurs dans un enroulement.

f : fréquence d'alimentation.

Φ : Flux max passant par une spire.

Dans le cas de machine synchrone à rotor bobiné, en mode génératrice, en jouant sur le courant d'excitation, on peut faire varier E . On modifie ainsi le comportement de l'alternateur, qui peut être réglé de manière à fournir de l'énergie réactive (on parle alors de compensateur synchrone) [15].

II.3. Conclusion

Il existe de très nombreuses motorisations installées dans les applications de stockage électromécanique. Toutes ont des caractéristiques bien adaptées aux diverses configurations. La machine peut être de forme discoïde ou cylindrique. Avoir un couplage de type asynchrone, synchrone à aimants permanents ou synchrone à réluctance variable (pure ou excitée). Un circuit magnétique feuilleté ou non. Ainsi de très nombreux paramètres entrent dans la conception de ces machines [16].

Chapitre III : Réalisations de la maquette

III. Introduction

On fait le démarrage de moteur à courante continue par l'alimentation des réseaux 220V, Ce démarrage va tourner le volant d'inertie, qui tourne à la même vitesse du moteur, et on même temps la volant va tourner avec lui la génératrice triphasée du 380 V (Alternateur) qui produit une tension triphasée 380V,ensuit on fait rapidement la séparation de l'alimentation du moteur, et à certain temps on prend une l'alimentation de 220V à partir la génératrice pour alimenter le moteur, à l'aide des moment d'inertie du volant, plus on garde certain tension pour alimenter quelle charge (l'éclairage...).

III.3. La partie théorie

3.1. Réalisation de la maquette

On fixe le moteur et génératrice sur l'extrémité du support par des vis et aussi fixer la volant d'inertie entre le moteur et génératrice, et on fait la transmission entre les poulies du moteur et La poulie du volant et la même chose entre la poulie du génératrice et la poulie du volant par transmission de la courroie.

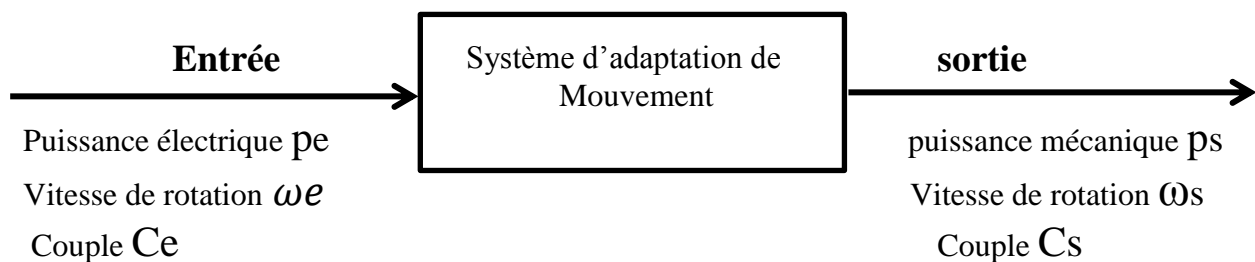
3.1.1. Eléments principaux dans la maquette

1. Moteur à courant continue 220 V.
2. Génératrice triphasé 380 V.
3. Volant d'inertie.
4. Système de transmission de puissance.

3.1.2. Système de transmission de puissance

a)définitions

Les systèmes de transmission de puissance mécanique sont situés, sur la chaîne d'énergie, Entre l'actionneur.



b) Les types des transmissions

1-transmissions par chaine et pignons

2-transmissions par poulie courroie.

3-transmission par Roue-vis sans fin.

c) Type de transmissions dans la maquette

On utilise dans la maquette la transmission par poulie - courroie.

Le type de courroie utilisé dans la maquette est : la courroie trapézoïdale en V avec une poulie crantée.

d) Les courroies trapézoïdales

1. Définitions :

Les courroies à section circulaire, trapézoïdale, rectangulaire assurent une transmission de mouvement avec glissement. Cela peut être utilisé comme une sécurité sur certains systèmes

2. Les poulies crantées

Les poulies crantées et la courroie associée assurent une transformation de mouvement sans glissement. Comme les engrenages, cette transformation de mouvement est par obstacle, donc avec conservation des positions relatives des poulies à tout instant.

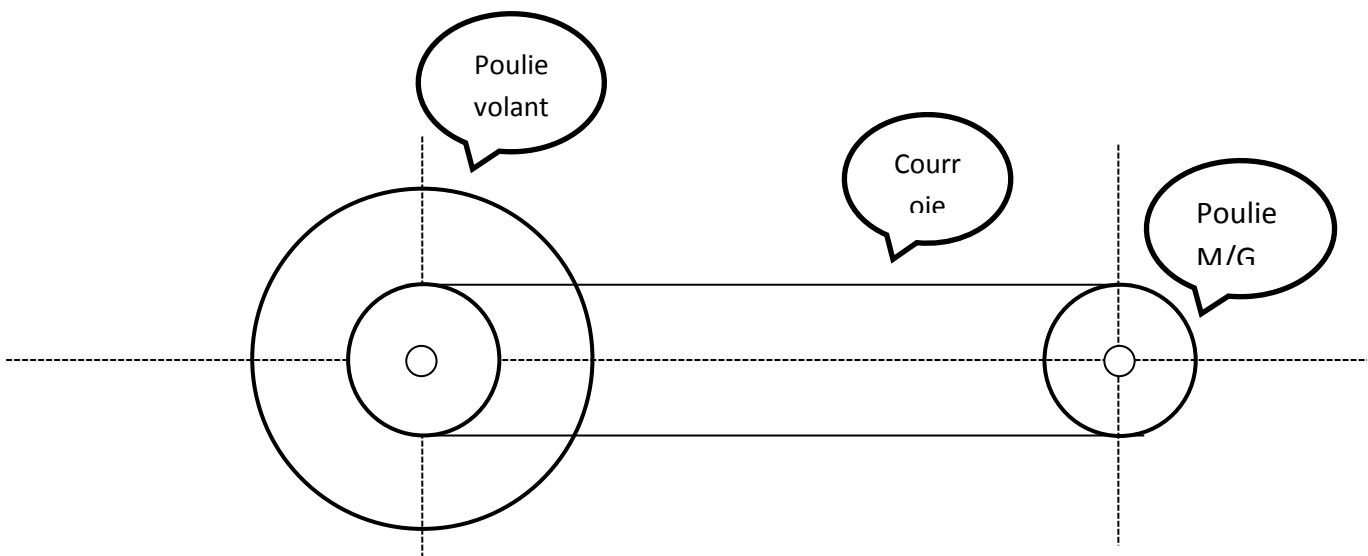


Figure 2 : schéma de la transmission des systèmes

3.1.3. Dimensionnement des éléments des maquettes

Le dimensionnement des éléments principaux des maquettes, Elles sont basées sur la vitesse du moteur, parce qu'on veut tourner la vitesse du volant à la même vitesse du moteur ou plus pour obtenir un moment d'inertie très important à partir l'équation suivant :

$$\omega_m = \omega_v \quad (\text{III.1})$$

ω_m : représenté la vitesse angulaire du moteur.

ω_v : représenté la vitesse angulaire du volant.

3.2.1. Moteur à courant continue

On utilise un moteur à courante continue de type 14479 VDE 0530, pour entraîner le volant d'inertie, et il caractérisé suivant le tableau 3 :

- La tension 220 V.
- le courant 0.7A.
- la puissance nécessaire de 0.1 KW.
- la vitesse de rotation 2000 tr/min.

Les caractéristiques de Moteur

Les éléments principaux	Les valeurs
La puissance (P)	100 W
La vitesse (N)	2000 Tr/min
La vitesse angulaire (ω)	209.33 rad.s ⁻¹
Le couple nominal (C_n)	0.477 N.m
Rayon de poulie du moteur (R)	4.5 Cm
Le moment d'inertie de poulie(J)	2.5.10 ⁻⁵ Kg.m ²
Le couple accélération (Ca)	0.052 N.m

Tableau 3 : les caractéristiques des éléments du moteur à courant continue

Les méthodes des calculs

a) Calcule la vitesse angulaire du moteur

$$\omega_m = 2\pi N / 60 = 2 \times 3.14 \times 2000 / 60 = 209.33 \text{ rad.s}^{-1} \quad (\text{III.2})$$

b) Calcule le couple nominale du moteur

$$P_m = C_n \times \omega_m \text{ Avec } C_n = P_m / \omega_m$$

$$C_n = 100 / 209.33 = 0.477 \text{ N.m} \quad (\text{III.3})$$

C'est une couple ramené sur l'axe du moteur 1

c) Calcule le moment d'inertie de la poulie du moteur

$$J_p = \frac{1}{2} M \cdot R^2 \quad (\text{III.4})$$

La masse de la poulie du moteur :

$$M = 0.25 \text{ Kg}$$

$$J_p = \frac{1}{2} \times 0.25 \times (0.045)^2 = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ Kg.m}^2$$

d) Calcule le couple accélération sur la poulie du moteur

$$Ca = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{avec} \quad \frac{d\Omega}{dt} = \omega_m \quad (\text{III.5})$$

$$Ca = 0.00025 \times 209.33 = 0.052 \text{ N.m}$$

Etude graphique

On veut tasser la fonction graphique entre la vitesse de rotation du moteur (N) et sa couple nominale (C_n) pour connaitre la variation et quelle l'élément très important :

Alors On a :

$$P_m = C_n \times \omega_m \quad \text{Avec} \quad C_n = \frac{1}{\omega_m} \times P_M \quad (\text{III.6})$$

Puisque $P_m = \text{cst}$ et ω_m en fonction (N) , donc :

La variation du couple est inversement de la vitesse ,c-à-d

$$F(C_n) = \frac{1}{x(\omega_m)} : \quad \text{avec} \quad \omega_m = 2 \cdot \pi \cdot N / 60 \quad (\text{III.7})$$

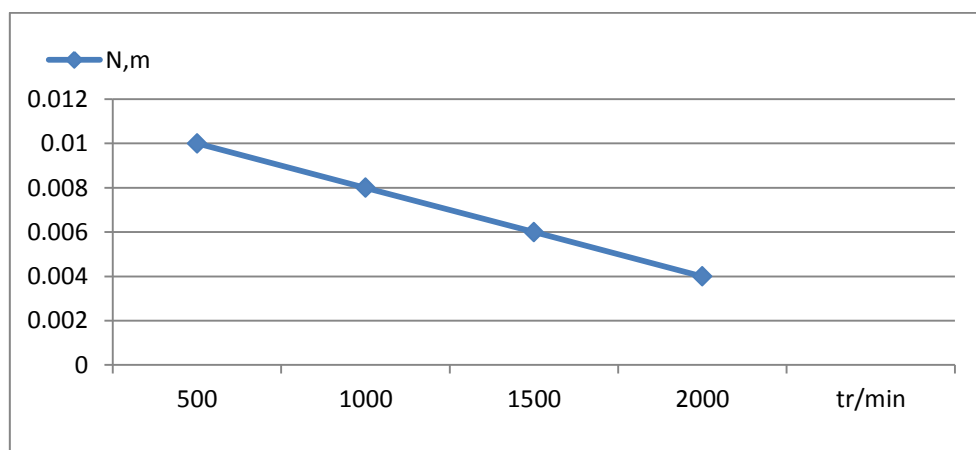


Figure 3 : la variation le couple (C_n) en fonction la vitesse (N).

Commentaire sur le graphique

Dans le graphe On remarque que le couple va diminuer en fonction de la vitesse c-à-d on a trois cas dépende le couple a partir la relation président (7) :

- 1- Si on augmente la vitesse (N) le couple diminue.
- 2- Si on diminue la vitesse le couple augmente.
- 3- Si on fixe la vitesse et augmente la puissance, le couple augmente.

e) Calcule l'énergie cinétique sur la poulie du moteur

$$Ec = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (\text{III.8})$$

$$Ec = \frac{1}{2} 0.00025 \cdot (209.33)^2 = 5.47 \text{ J}$$

Donc on appelle cette énergie par l'énergie associée au mouvement d'une poulie du moteur qui tourne avec lui la volant d'inertie. Lorsque celui-ci effectue une translation autour d'un axe de la poulie.

Etude graphique

Puisque la vitesse du moteur (N) est constante donc la vitesse angulaire est fixe aussi alors on a la variation des énergies cinétique en fonction de moment d'inertie à partir la formule suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (\text{III.9})$$

Puisque : $\omega^2 = \text{cst}$ donc $E(x) = \frac{1}{2} J(x)$

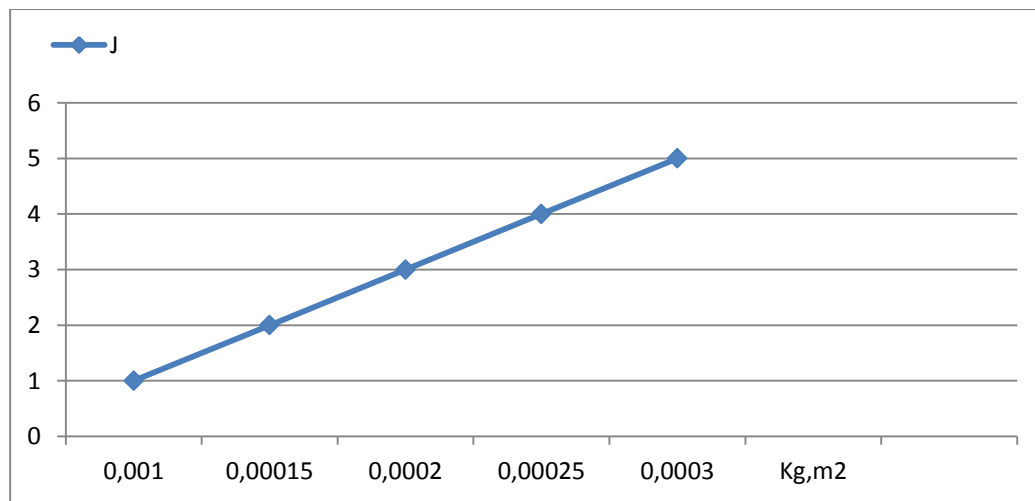


Figure 4 : la variation de l'énergie cinétique (E) en fonction du moment d'inertie (J).

Commentaire sur le graphe

On remarque que la variation de l'énergie cinétique (E) elle dépend de la variation dans le moment d'inertie (J) donc c'est une variation proportionnelle.

3.2.2. Génératrice triphasé

On utilise une génératrice triphasée de type SE2662-3M VDE0530 qui produit une tension triphasée 380V à l'aide de la rotation du volant, et elle est caractérisée suivant le tableau 4.

- Une tension triphasée 380V.
- Une courant de 0.45 jusqu'à 0.7A.
- Une puissance de 0.3 KW.
- Une vitesse de rotation de 1500 tr/min.
- Une fréquence de 50 Hz et $\cos \Phi = 0.8$.

Caractéristique de la génératrice

<i>Les éléments principaux</i>	<i>Les valeurs</i>
La puissance (P)	300 W
La vitesse (N)	1500 Tr/min
La vitesse angulaire (ω)	157 rad.s ⁻¹
Le couple nominal (C_n)	1.91 N.m
Rayon de poulie du moteur (R)	3.5 Cm
Le moment d'inertie de poulie(J)	9.8.10 ⁻⁵ Kg.m ²

Tableau 4 : caractéristique des éléments des génératrices triphasée.

Méthode des calculs

a) Calcule la vitesse angulaire de la génératrice

$$\omega_G = 2\pi N / 60 = 2 \times 3.14 \times 1500 / 60 = 157 \text{ rad. s}^{-1}.$$

b) Calcule le couple nominale de la génératrice

$$P_G = C_n \times \omega_G \quad \text{avec } C_n = P_G / \omega_G \quad (\text{III.10})$$

$$C_n = 300 / 157 = 1.91 \text{ N. m}$$

P_G : C'est la puissance de la génératrice.

C_n : C'est le couple nominal de la génératrice.

ω_G : C'est la vitesse angulaire de la génératrice.

3.2.3. Calcule le moment d'inertie de la poulie de la génératrice

$$J_G = \frac{1}{2} M R^2 \quad (\text{III.11})$$

La masse de la poulie de la génératrice :

$$M = 0.16 \text{ K}$$

$$J_G = \frac{1}{2} \times 0,25 \times (0.035)^2 = 1.5. 10^{-4} \text{ Kg. m}^2$$

a) Calcule le couple d'accélération de la poulie de la génératrice

$$C_{ag} = J_G \frac{d\omega}{dt} = 0,00015 \times 157 = 0,02 \text{ N. m} \quad (\text{III.12})$$

b) Calcule l'énergie cinétique sur la poulie de la génératrice

L'énergie cinétique de la génératrice c'est énergie nécessaire qui utiliser pour tourner la génératrice à l'aide des énergies des volant et la transmission du cette énergie est fait par la courroie

$$E_c = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (\text{III.13})$$

$$E_c = \frac{1}{2} 0,00015 \times (157)^2 = 3,69 \text{ J}$$

3.3. Volant d'inertie

On utilise un volant d'inertie de type cylindre plein qui est construit par deux poulies crantées pour faire la transmission entre la poulie de moteur et volant et entre le volant et génératrice et troisième poulie pour augmenter le moment d'inertie pour la continuité de l'énergie cinétique du volant.

Alors, ce volant qui dans notre maquette est caractérisé par les dimensions suivantes :

a) Poulie 1 : pour faire la transmission entre le moteur et volant de matière aluminium est caractérisé par :

Le rayon : $R = 4.5 \text{ Cm}$.

La masse : $M = 250 \text{ g}$.

b) Poulie 2 : pour faire la transmission entre la génératrice et volant matière aluminium est caractérisé par :

Le rayon : $R = 3.5 \text{ Cm}$.

La masse : $M = 160 \text{ g}$.

c) Poulie 3 : elle utilise pour augmenter le moment d'inertie matière fer est caractérisé par :

Le rayon : $R = 15 \text{ cm}$.

La masse : $M = 18 \text{ Kg}$.

d) L'arbre : Il utilise pour fixer ou bloquer les trois poulies matière fer est caractérisé par :

Le rayon : $R = 1.75 \text{ Cm}$.

La masse : $M = 1.2 \text{ Kg}$.

e) Les Roulements : On utilise les roulements pour faciliter la transmission des volants et fixer le modèle sur le support.

f) Le Support : On utilise le support de matière bois.

3.3.1. Calcul des moments d'inertie du volant

On veut calculer le moment d'inertie de chaque paramètre du volant alors :

1. Poulie 1 :

On a :

$$J_{p1} = \frac{1}{2} M \cdot R^2 \quad (\text{III.14})$$

$$J_{p1} = \frac{1}{2} \cdot 0.25 \cdot (0.045)^2 = 0.00025 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

2. Poulie 2 :

On a :

$$J_{p2} = \frac{1}{2} M. R^2 \quad (\text{III.15})$$

$$J_{p2} = \frac{1}{2} 18. (0.015)^2 = 0.20 \text{ Kg.m}^2$$

3. Poulie 3 :

On a :

$$J_{p3} = \frac{1}{2} M. R^2 \quad (\text{III.16})$$

$$J_{p3} = \frac{1}{2} 0.16. (0.035)^2 = 0.000089 \text{ Kg.m}^2$$

4. L'arbre :

On a :

$$J_l = \frac{1}{2} M. R^2 \quad (\text{III.17})$$

$$J_l = \frac{1}{2} 1.2. (0.0175)^2 = 0.00018 \text{ Kg.m}^2$$

Alors :

A partir les calculs, on site tous les résultats sur le tableau 5 suivant :

Volant	Rayon ®	Masse	Moment d'inertie
Poulie 1	4.5 cm	0.25 Kg	0.00025 Kg.m^2
Poulie 2	15 cm	18 Kg	0.20 Kg.m^2
Poulie 3	3.5 cm	0.16 Kg	0.000089 Kg.m^2
L'arbre	1.75 cm	1.2 Kg	0.00018 Kg.m^2

Tableau 5 : le dimensionnement des paramétré du volant.

Moment d'inertie total

C'est un moment des tous moments des poulies plus l'arbre qui représenté le moment total des valons :

$$J_T = J_{p1} + J_{p2} + J_{p3} + J_l = 0.20 \text{ Kg.m}^2 \quad (\text{III.18})$$

Remarque

On remarque que le moment d'inertie total est le même moment de la poulie 2 c-à-d le moment dans la poulie 2 est représenté le moment total du volant avec l'autre moment est négligeable par rapporte le moment de la poulie 2.

Etude graphique

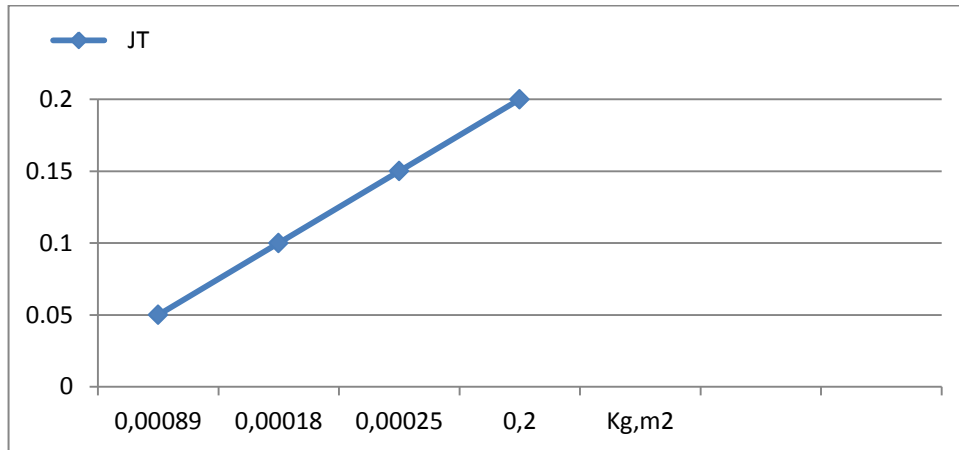


Figure 5 : la variation du moment d'inertie (J) en fonction du moment d'inertie total.

Commentaire sur le graphe

On remarque que les moments d'inertie des tous les poulies va augmenter jusque le moment total des volants.

3.3.2. Calcule des paramètres physiques du moteur avec volant

a) Calcule de la puissance mécanique du volant

On a la vitesse angulaire du moteur suivant :

$$\omega_m = 209.33 \text{ rad. s}^{-1}$$

b) Calcule de la puissance électrique du moteur

$$P = 100 \text{ W.}$$

Puisque on a la même poulie entre le moteur et le volant et tourner avec la même vitesse

On a :

$$\omega_m = \omega_v \quad (\text{III.19})$$

ω_m : représenté la vitesse angulaire du moteur.

ω_v : représenté la vitesse angulaire du volant.

Puisque on fait la transmission de la puissance par la courroie, il faut calculer le rapporte de la réduction pour la transmise de la puissance :

Donc on a :

$$r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{N_e}{N_s} \quad (\text{III.20})$$

$$r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{209.33}{209.33} = 1$$

r : représente le rapporte du réduction.

ω_s : représente la vitesse angulaire du moteur.

ω_e : représente la vitesse angulaire du volant.

Donc la puissance mécanique du volant :

$$P_m = \frac{p}{r} = \frac{100}{1} = 100 \text{ W}$$

Sachant qu'on a les pignons de la courroie.

c) calcul du couple nominale du volant

C_v : C'est un couple nominal qui dépende le volant.

$$C_v = \frac{P_m}{\omega_v} = \frac{100}{209.33} = 0.47 \text{ N.m} \quad (\text{III.21})$$

Puisque le couple moteur et couple du volant est égale.

$$\text{Donc } C_m = C_v$$

Donc on remarque que le moteur peut entrainer le volant.

d) Calcul du couple accélération du volant

C_a : C'est le couple accélération du volant lorsque le volant tourne une vitesse angulaire.

$$C_a = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{avec} \quad \frac{d\Omega}{dt} = \omega_v \quad (\text{III.22})$$

$$C_a = 0,2 \times 2009.33 = 41,8 \text{ N.m}$$

1. Calcul du temps de démarrage du moteur avec le volant

dt : C'est un temps importants pour démarrer le moteur avec le volant.

$$C_a \text{ total} = Jt \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{avec} \quad C_a \text{ total} = C_{am} + C_{av} \quad (\text{III.23})$$

$$C_a \text{ total} = 0,052 + 41,8 = 41,91 \text{ N.m}$$

Puisque on a la même vitesse angulaire

Donc :

$$dt = \frac{(0,2 + 0.00025) \times 209.33}{41,91} = 1 \text{ s}$$

e) Calcul d'énergie cinétique du volant

E_{cv} : C'est l'énergie de rotation qui assure le mouvement du volant.

$$E_{cv} = \frac{1}{2} J T \omega^2 = \frac{1}{2} 0,2 (209.33)^2 = 4381 \text{ J} \quad (\text{III.24})$$

Puisque la vitesse angulaire est constante, Alors l'énergie cinétique du volant est très supérieure que l'énergie cinétique du moteur

$$E_{cv} \gg \gg E_{cm}$$

Donc on déduit l'énergie stocké dans le volant, Elle dépende de la valeur du moment d'inertie du volant.

Remarque

Pour augmenter l'énergie stockée, il faut augmenter le moment d'inertie.

3.3.3. Calcule les paramètres physiques du volant avec génératrice

a) Calcule du couple résistant du système (volant plus génératrice)

C_T : C'est un couple résistant total qui lie entre le couple volant et le couple de la génératrice.

Alors :

$$C_T = C_v + C_g = C_r = 0,47 + 1,91 = 2.38 \text{ N.m} \quad (\text{III.25})$$

A partir les calculs des paramétré du système, on remarque que le couple résistante est supérieur que le couple moteur.

$$c - \text{à} - d \quad C_r \gg C_m$$

1. Calcule le temps du démarrage du système

C_{aT} : C'est un temps total pour démarrer le système.

$$C_{aT} = C_{am} + C_{av} + C_g = J T \frac{d\Omega}{\omega m} \quad (\text{III.26})$$

Puisque le moteur est entrainé le système, on prend la vitesse angulaire du moteur

$$C_{aT} = 0.052 + 0,02 + 41,8 = 41.87 \text{ N.m}$$

$$dt = \frac{(0.00025+0.2+0.00015) \times 209,33}{C_{aT}} = 1s$$

2) Shéma des modele du réalisation

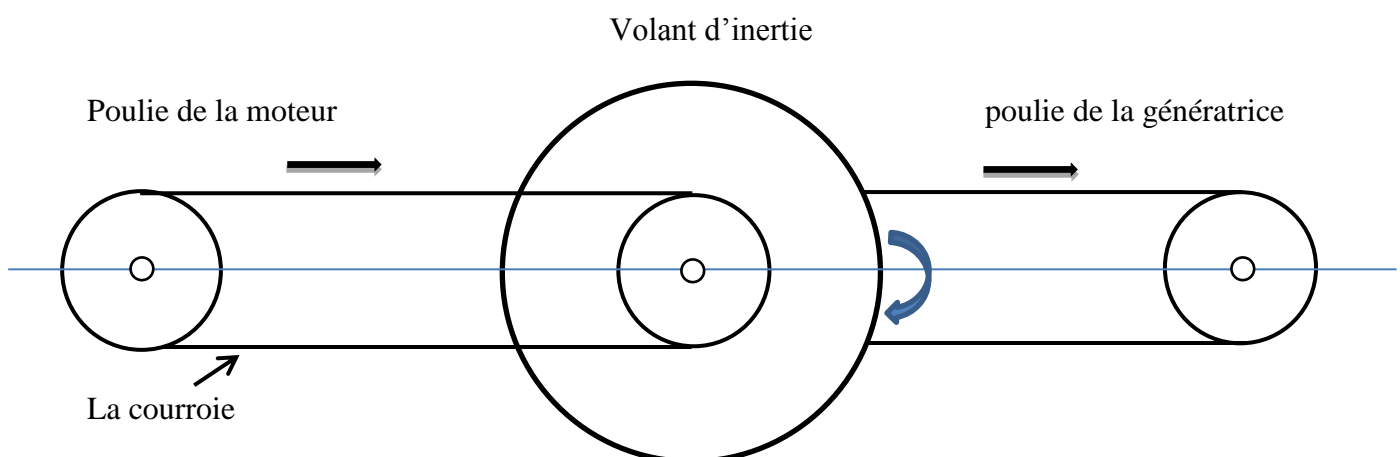


Figure 6 : Shéma du modele du réalisation

III.4. Partie pratique

L'inutilité de notre projet, c'est exploitation l'énergie stocké dans le volant d'inertie et choix des volant à partir son rotation pour obtenue un système autonome.

4.1. Boucle ouvert

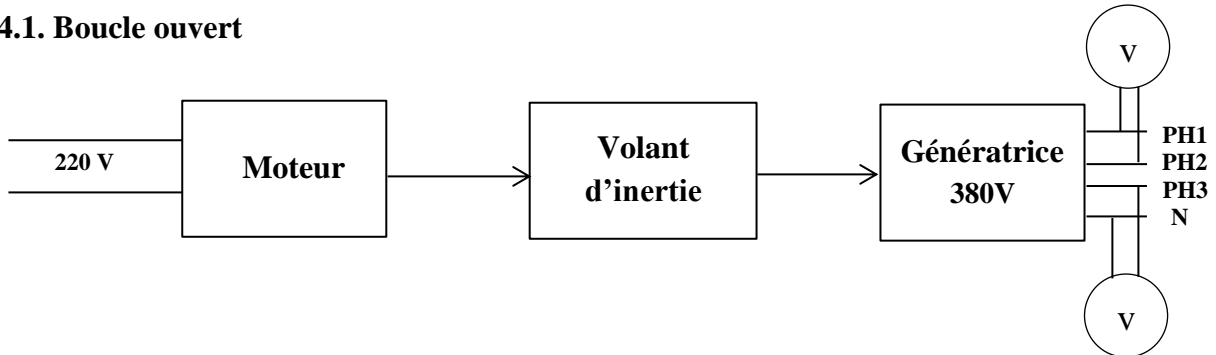


Figure 7 : Schéma de la boucle ouverte du système

4.1.1. Essai et mesure

a) essai n° 1

1. Test à vide du moteur :

Schéma Synoptique :

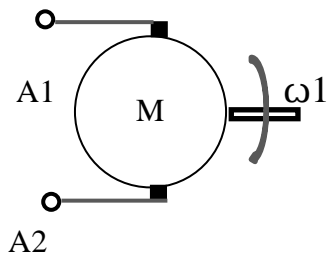


Figure 8 : schème synoptique du moteur seul

Lorsqu'on démarre le moteur par son éléments qui donner dans le tableau 6 ci-dessus :

Donc le moteur à seule sa marche.

Les éléments principaux	Les valeurs	Les unités
Tension du moteur	220	V
Courant du moteur	0.45	A

Tableau 6 : caractéristique du moteur seul

b) essai n° 2

1. Teste moteur avec le volant d'inertie

Schéma synoptique :

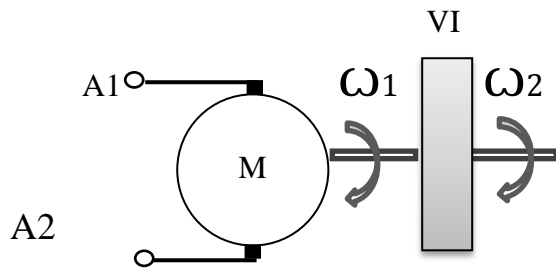


Figure 9 : Schéma synoptique du moteur avec le volant.



Photo A : photo du moteur avec le volant

Lorsqu'on démarre le moteur avec le volant on fait les mesures dès son éléments qui donner dans Le tableau 7 ci-dessus :

Donc le moteur avec le volant sa marche.

Les éléments principaux	Les valeurs
Tension du moteur	220 V
Courant du moteur	0.6 A
Vitesse du moteur	2006 Tr/min
Vitesse du volant	2180 Tr/min

Tableau 7: les caractéristiques du moteur avec le volant

A partir les éléments principaux dans le tableau président, on déterminer les 'autre paramètre suivants :

4.2.1. Calcul de puissance consommée par le moteur

P_c : C'est la puissance consommée par le moteur pour assure le fonctionnement du système.

$$P_c = 220 \times 0,6 = 132 \text{ W}$$

La vitesse angulaire du moteur

$$\omega_m = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2 \times 3,14 \times 2006}{60} \approx 210 \text{ rad. s}^{-1} \quad (\text{III.27})$$

Calcul le couple du moteur

$$C_m = \frac{P_c}{\omega_m} = \frac{132}{210} = 0,6 \text{ N. m} \quad (\text{III.28})$$

4.2.2. Calcule de puissance mécanique du volant

On calcule la vitesse angulaire du volant

$$\omega_v = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2 \times 3,14 \times 2180}{60} \approx 228 \text{ rad. s}^{-1}$$

Calcule le rapporte de la réduction

Puisque on fait la transmission par la courroie, on a :

$$r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{N_e}{N_s} \quad (\text{III.29})$$

$$r = \frac{210}{228} = 0.92$$

r : représente le rapporte de réduction.

ω_s : représente la vitesse angulaire du moteur.

ω_e : représente la vitesse angulaire du volant.

$$P_m = \frac{p}{r} = \frac{132}{0.92} = 143 \text{ W}$$

4.2.3. Calcule du couple du volant

$$C_v = \frac{p_m}{\omega_v} = \frac{143}{228} = 0.6 \text{ N. m} \quad (\text{III.30})$$

C_v : C'est le couple du volant.

p_m : C'est la puissance mécanique du volant.

ω_v : C'est la vitesse angulaire du volant.

Donc on remarque que le couple moteur est la même le couple du volant

$$\text{Donc} \quad C_m = C_v \quad (\text{III.31})$$

1. Etude la variation des 'éléments de moteur et le volant

Tension (V)	Ampère (A)	V _m (Tr/min)	V _g (Tr/min)	Puissance (W)
140	0.5	1596	1610	70
160	0.55	1731	1760	88
180	0.55	1860	1878	99
200	0.6	1950	2040	120
220	0.6	2006	2180	132

Tableau 8 : la variation des 'éléments de moteur et le volant

Commentaire sur le tableau

On remarque que l'augmentation de la tension dans un intervalle [140 V : 220 V] qui donner une l'augmentation sur l'autre paramètre (vitesse du moteur et vitesse du volant et la puissance et le courant consommée par le moteur)

a) essai n° 3

1. Teste du système à vide

Schéma synoptique :

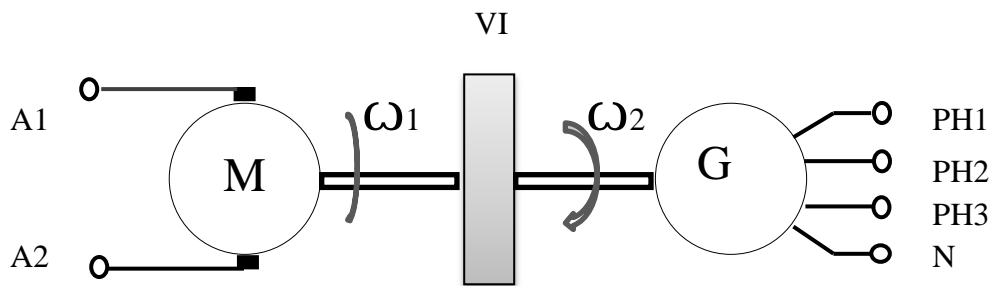


Figure 10 : Schéma synoptique du système

Le moteur raccordé avec le volant et génératrice sa marche, Alors tous les systèmes sont fonctionnés.

Avant la mesure les tensions qui sortir à la bobine des génératrice, on fait les 'excitations du génératrice par alimentation continue suivant le tableau 9 :

Alimentation continue	Les valeurs	Les unités
La tension d'excitation	140	V
Le courant d'excitation	1,1	A

Tableau 9 : La valeur de la tension et du courant d'excitation

Après l'excitation du génératrice on fait la mesurer les tensions qui sortit à la génératrice, on mesure les tensions qui suite le tableau 10 suivant :

Les tensions	Les valeurs	Les unités
La tension entre deux phases	468	V
La tension entre la phase et neutre	260	V

Tableau 10 : Les tensions sorties par la génératrice

Après l'essai système à vide, on fait la mesure Les éléments principaux du système suivant le tableau 11 ci- dessus :

Les éléments principaux	Les valeurs	Les unités
Tension du moteur	220	V
Courant du moteur	1.05	A
La vitesse du moteur	2049	Tr/min
La vitesse du volant	2068	Tr/min
La vitesse de la génératrice	1685	Tr/min

Tableau 11 : Les caractéristiques des systèmes à vide

Après les résultats du tableau précédent. On détermine les caractéristiques des systèmes :

4.3. La puissance du moteur

$$P = 220 \times 1.05 = 231 \text{ W}$$

2. La vitesse angulaire du moteur

$$\omega_m = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2 \times 3.14 \times 2049}{60} \approx 214 \text{ rad. s}^{-1} \quad (\text{III.32})$$

a) Calcul du couple du moteur

$$C_m = \frac{P_c}{\omega_m} = \frac{231}{214} = 1,07 \text{ N. m} \quad (33)$$

b) Calcul de la puissance mécanique du volant

On calcule la vitesse angulaire du volant ;

$$\omega_v = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2 \times 3.14 \times 2068}{60} \approx 216 \text{ rad. s}^{-1} \quad (\text{III.34})$$

1. Calcul du rapport de la réduction

Puisque on fait la transmission par la courroie, on a :

$$r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{N_e}{N_s} \quad (\text{III.35})$$

$$r = \frac{214}{216} = 0.99$$

$$P_m = \frac{P}{r} = \frac{231}{0.99} = 233 \text{ W}$$

c) Calcul du couple du volant

$$C_v = \frac{P_m}{\omega_v} = \frac{233}{216} = 1.07 \text{ N. m} \quad (\text{III.36})$$

C_v : C'est le couple du volant.

P_m : C'est la puissance mécanique du volant.

ω_v : C'est la vitesse angulaire du volant.

d) Calcul du couple des génératrices

On a la puissance de génératrice

$$P_G = 300 \text{ W}$$

On calcule la vitesse angulaire de la génératrice :

$$\omega_G = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2 \times 3,14 \times 1685}{60} \approx 176 \text{ rad. s}^{-1} \quad (\text{III.37})$$

1. Calcul du couple nominale de la génératrice :

$$C_g = \frac{P}{\omega_g} = \frac{300}{176} = 1,7 \text{ N.m} \quad (\text{III.38})$$

4.3.1. Calcul du couple résistant du système (volant plus génératrice)

C_T : C'est le couple résistant totale du système qui lier entre le volant est génératrice

$$C_T = C_v + C_g = C_r = 1,07 + 1,7 = 2,77 \text{ N.m} \quad (\text{III.39})$$

A partir les calculs des paramétrés du système, on remarque que le couple résistante est supérieur que le couple moteur.

$$c - \text{à} - d \quad C_r \gg C_m \quad (\text{III.40})$$

Pratiquement si on fait le démarrage du système en charge on remarque que la température du moteur augmente.

Remarque

On remarque que la déférence entre les résultats de calcule théorique et le calcul pratique, il dépende la courroie et il faut faire les pertes de la courroie en considération.

b) essai n° 4

1. Teste avec la charge

On utilise dans cette partie les trois lampes comme des charges :

- 1- une lampe de puissance de 75 W
- 2- deux lampes identiques de la puissance de 100 W

On utilise le voltmètre et ampèremètre pour mesurer la valeur du courant et tension du système qui consommé par la charge.

Donc la valeur de la tension d'excitation et le courant d'excitation lorsque le système est en charge suivant le tableau 12 :

Alimentation continue	Les valeurs	Les unités
La tension d'excitation (V_{\max})	130	V
Le courant d'excitation (I_{\max})	0.3	A

Tableau 12 : La valeur de la tension et du courant d'excitation de système en charge

Après le démarrage du système on trouve les valeurs du tension et courant suivant le tableau 13:

Les caractéristiques	Les valeurs	Les unités
La tension sur une lampe (PH /N)	223	V
La courant sur une lampe (PH /N)	0,3	A

Tableau 13 : Les valeurs du tension et courant du système en charge



Photo B : Photo du système en charge.

Après le démarrage du système en charge, on fait la mesure des ‘éléments du système suivant le tableau 14 ci-dessus :

Les ‘éléments principaux	Les valeurs	Les unités
Tension du moteur	220	V
Courant du moteur	0,9	A
La vitesse du moteur	1045	Tr/min
La vitesse du volant	1325	Tr/min
La vitesse de la génératrice	1120	Tr/min

Tableau 14 : Les caractéristiques du système en charge

Le temps de rotation du volant lorsque on coupe l’alimentation des réseaux jusqu’ à le volant s’arrête :

$$T = 28s$$

Cette temps est très importants, Lorsque on fait la boucle fermer pour l’autonome du système

III.5.Conclusion général

A la fin du projet, On conclût que la possibilité de la production du l'énergie électrique par le volant d'inertie, Il peut réussir, Si on base sur le poids du volant, Cette poids il donne un moment d'inertie très important, Lorsque le volant tourner une vitesse maximale, avec le type choix du volant.

Dans la réalisation du projet, On conclut aussi la boucle ouvert du système sa marche avec la charge.

Finalement, l'exploitation de la production du l'énergie électrique qui stocker par le volant d'inertie, Il dépend l'augmentation du moment d'inertie de quelle type du volant.