

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Master 1

- Réseaux électriques,
 - Protection et Contrôle des Réseaux Electriques
 - Commande des Machines Electriques
-

Travaux Pratiques

Commande des machines électriques

Par

Dr. MENDACI Sofiane

Maître de conférences

2015

Sommaire

Introduction	1
Consignes et conseils	2
Généralités sur la machine à courant continu	3
TP1 : Association machine à courant continu et redresseur triphasé : commande en boucle ouverte	8
TP2 : Commande en boucle fermée d'une machine à courant continu alimentée par un redresseur triphasé	17
TP3 : Association machine à courant continu et hacheur réversible en courant : commande en boucle ouverte	23
TP4 : Commande en boucle fermée d'une machine à courant continu alimentée par un Hacheur réversible en courant	30
Bibliographie	35

Introduction

Ce manuel est constitué de textes de travaux pratiques (TP) élaborés pour étudier pratiquement la commande de la machine à courant continu à excitation séparée aussi bien en boucle ouverte qu'en boucle fermée. Ces TP sont destinés aux étudiants de première année master (M1) réseaux électriques pour approfondir leurs connaissances et certaines notions théoriques présentées dans le cours « commande électrique ».

Les textes de travaux pratiques présentés dans ce polycopié sont constitués d'une partie théorique suivie d'expérimentations avec des résultats et des commentaires explicatifs.

Globalement, ce polycopié est structuré de la manière suivante :

Après des consignes et recommandations relatives à la sécurité et le bon déroulement des séances de TP, nous présentons des généralités sur la machine à courant continu à excitation séparée en mettant l'accent sur son modèle et sa commande.

Cette généralité est suivie de quatre TP de même structure. Les deux premiers traitent la commande en boucle ouverte et en boucle fermée de la machine à courant continu alimentée par deux redresseurs triphasés commandés (fonctionnement quatre quadrants).

Dans les deux derniers, nous traitons la commande en boucle ouverte et en boucle fermée de la machine à courant continu alimentée par un Hacheur réversible en courant.

Consignes et conseils

Pour réaliser les travaux pratiques proposés en toute sécurité et avec une grande efficacité, nous recommandant les consignes suivantes :

Avant la séance du TP :

1. La révision des aspects théoriques vus dans le cours.
2. La préparation de quelques feuilles blanches et des feuilles millimétrées pour rédiger un petit rapport (par binôme) durant la séance du TP.

Durant la séance du TP :

1. La nourriture et les boissons sont strictement interdites dans la salle de TP.
2. Il faut connaître les limites physiques et le fonctionnement de chaque appareil avant de l'utiliser.
3. soyez précis et minutieux durant la réalisation du montage et les mesures pratiques.
4. Signaler tout appareil défectueux à votre enseignant.
5. Ne démarrer la manipulation qu'après la vérification de l'enseignant.
6. La participation active durant la séance de TP, sera prise en compte dans la note du TP.

A la fin de la séance du TP :

1. Rédiger un petit rapport qui doit présenter les différentes étapes du TP ainsi qu'une analyse des résultats trouvés (ne recopier pas largement le texte de l'énoncé du TP).
2. Veuillez remettre les chaises, les instruments de mesure et les composants utilisés dans le TP à leurs places initiales.
3. Veuillez laisser la salle propre à la fin du TP (ne jeter rien par terre).

Généralités sur la machine à courant continu

1. Introduction

Dans cette partie, nous donnons une brève description du fonctionnement de la machine à courant continu (MCC) et en particulier la MCC à excitation séparée. Cette généralité sera très utile pour la réalisation des travaux pratiques proposés dans le reste de ce manuel.

2. Description

La machine à courant continu est un convertisseur rotatif d'énergie qui peut fonctionner en deux modes, accompagnés avec quelques pertes :

- *Fonctionnement moteur* : conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique.
- *Fonctionnement générateur* : conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

La MCC est composée de trois parties, figure 1 :

- une partie fixe (appelée stator ou inducteur) : destinée à créer le flux magnétique inducteur. Généralement, elle contient un enroulement alimenté en courant continu dit enroulement d'excitation. Pour les petites machines cet enroulement est remplacé par des aimants permanents.
- Une partie mobile (appelée rotor ou induit) : constituée de tôles magnétiques et de conducteurs, logés dans des encoches, alimentés par une tension continue. L'ensemble est monté sur un arbre qui tourne entre les pôles de l'inducteur.
- Un système balais-collecteur : dont le rôle est d'assurer la liaison entre les conducteurs tournants (l'induit) et l'alimentation extérieur. En même temps, il assure l'inversion du sens du courant de ces conducteurs tournants au moment de leur passage d'un pôle Sud à un pôle Nord ou l'inverse.

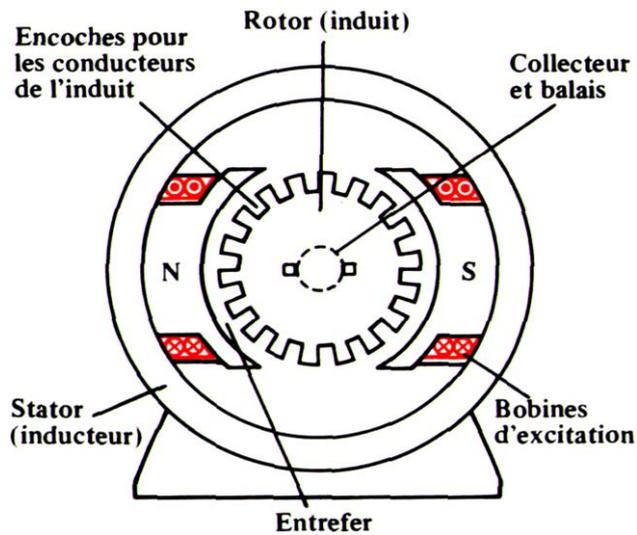


Figure 1. Structure d'une MCC à rotor bobiné

3. Modèle mathématique de la MCC

a. équation électrique de l'induit :

L'équation électrique relative à l'enroulement de l'induit est donnée par :

$$U = R \cdot I + L \frac{dI}{dt} + E \quad (1)$$

Avec :

R et L sont respectivement la résistance et l'inductance de l'induit.

U et I sont respectivement la tension et le courant d'alimentation de l'induit.

E est une force électromotrice induite aux bornes de l'induit à cause de la rotation du rotor, elle est donnée par l'équation suivante :

$$E = K' \Phi \Omega \quad (2)$$

Avec :

Φ et Ω sont respectivement le flux moyen sous un pôle et la vitesse de rotation en $rad.s^{-1}$.

K' est le coefficient de couplage électromagnétique qui dépend de la géométrie de la machine.

b. équation électrique de l'inducteur :

L'équation électrique relative à l'enroulement de l'inducteur bobiné est donnée par :

$$U_f = R_f \cdot I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad (3)$$

Avec :

R_f et L_f sont respectivement la résistance et l'inductance de l'inducteur.

U_f et I_f sont respectivement la tension et le courant d'alimentation de l'inducteur.

Selon la disposition de l'enroulement d'excitation, on définit différents modes d'excitation, à savoir :

- **L'excitation série** : l'enroulement d'excitation est connecté en série avec l'enroulement de l'induit.
- **L'excitation parallèle ou dite shunt** : l'enroulement d'excitation est connecté en parallèle avec l'enroulement de l'induit.
- **L'excitation composée** : l'enroulement d'excitation est connecté en parallèle et en série en même temps avec l'enroulement de l'induit.
- **L'excitation séparée** : c'est le mode d'excitation le plus utilisé dans les entraînements réglés à cause de son modèle linéaire et de sa commande simple. L'inducteur et l'induit sont alimentés par deux sources indépendantes.

c. équation mécanique :

Pour trouver le modèle mathématique de la partie mécanique (la partie tournante), on applique le principe fondamental de la dynamique. Ce qui donne :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f\Omega \quad (4)$$

Avec :

J et f sont respectivement le moment d'inertie de l'axe du rotor et le coefficient de frottements visqueux.

C_r - Couple de charge mécanique dans lequel on tient compte du couple de frottement sec.

C_e est le couple électromagnétique donné par l'équation suivante :

$$C_e = K'\Phi I \quad (5)$$

4. Commande de la MCC à excitation séparée

Par rapport aux autres machines à courant continu, la MCC à excitation séparée, notamment celle à aimants permanents, est de loin la plus utilisée dans les problèmes de réglage et de la robotique. Son principal avantage, est la possibilité d'avoir une relation linéaire entre le courant de l'induit et le couple électromagnétique par la fixation de la valeur du flux d'excitation Φ .

Dans le régime permanent, courant constant, la relation entre la vitesse de rotation, la tension de l'induit et le flux d'excitation est donnée par l'équation suivante :

$$\Omega = \frac{U - R \cdot I}{K'\Phi} \quad (6)$$

A partir de l'équation (6), on peut déduire deux modes de commande de la vitesse Ω :

- **Cas du flux d'excitation constant et tension d'induit variable** : en négligeant le terme résistif, la vitesse de rotation et la tension d'alimentation d'induit sont proportionnelles. L'équation (6) devient alors :

$$\Omega = \frac{U}{K'\Phi} = \frac{U}{K} \quad (7)$$

- **Cas de la tension d'induit constante et flux variable** : en négligeant le terme résistif, la vitesse de rotation et le flux d'excitation sont inversement proportionnels. L'équation (6) devient alors :

$$\Omega = \frac{\left(\frac{U}{K'}\right)}{\Phi} \quad (8)$$

Pratiquement, pour régler la vitesse de la MCC à excitation séparée sur une grande plage de vitesses, on applique les étapes suivantes :

- **Pour une vitesse comprise entre 0 et la vitesse nominale Ω_n** : on fixe la valeur du flux d'excitation à sa valeur nominale, pour que la MCC aura la capacité pour développer son couple maximal, puis on règle la vitesse par la variation de la tension de l'induit jusqu'à la tension maximale admissible. C'est la commande à couple maximal.
- **Pour une vitesse comprise entre Ω_n et la vitesse maximale Ω_{max}** : on fixe la tension d'induit à sa valeur maximale et on règle la vitesse par la variation du flux d'excitation (appelé aussi défluxage). C'est la commande à puissance maximale. Notons que ce mode existe uniquement pour le cas de l'excitation bobinée.

La figure suivante illustre ces deux modes de commande de la vitesse :

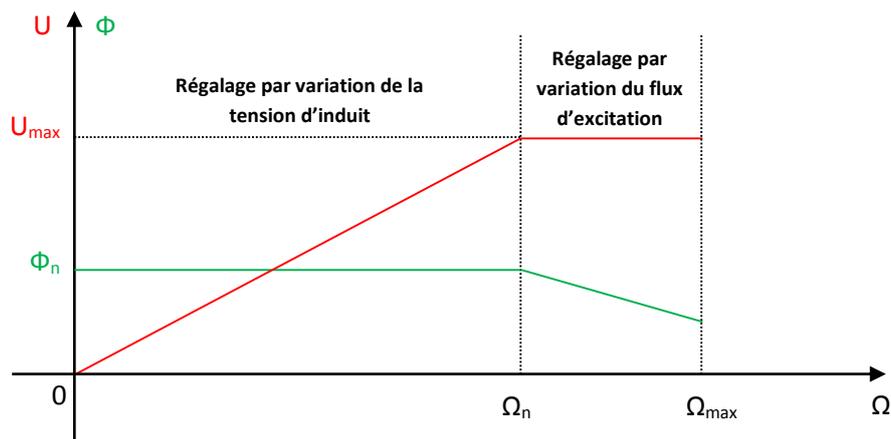


Figure 2. Modes de réglage de la vitesse d'une MCC à excitation séparée.

Pour les travaux pratiques présentés dans ce manuel, on s'intéresse uniquement à la commande de la vitesse d'une MCC à excitation séparée par la variation de la tension de l'induit.

Cependant, pour avoir une tension variable continue, nous allons utiliser un redresseur triphasé commandé pour les deux premiers TP (TP1 et TP2) et un hacheur à deux quadrants pour les deux derniers TP (TP3 et TP4).

TP 1 : Association machine à courant continu et redresseur triphasé : commande en boucle ouverte

Durée : 1h30min

1. Objectif du TP :

- Familiariser l'étudiant avec le matériel qui sera utilisé dans ce TP (TP1) et le deuxième TP (TP2).
- Apprendre à l'étudiant la structure d'alimentation d'une MCC par un redresseur triphasé en pont complet commandé.
- Etudier l'influence de la tension d'induit, du flux d'excitation et de la charge sur la vitesse d'une MCC à excitation séparée.

2. Matériels utilisés :

- Alimentation triphasée variable.
- Alimentation en tension continue variable. 250 VDC, 2.5 – 8 A
- Bloc de redressement, de référence : LN SO3536-7S.
- Alimentation (15 V, 0 V et -15 V) de la commande du redresseur, de référence : LN SO3538-8D.
- Moteur à courant continu à excitation séparée, 1 kW, de référence : LN SE2662-5A.
- Frein à poudre magnétique, de référence : LN SE2662-5R.
- Commande du frein à poudre magnétique, 1 kW, de référence : LN SE2662-5S.
- Deux voltmètres calibres 500V.
- Manchon d'accouplement.
- Fusibles de réserve de 6.3 A.
- Couvercle de protection.
- Couvercle du bout d'arbre.
- Fils de connexion et cavaliers.
- 1 cadre pour expériences, profil H.

La figure suivante montre le montage complet utilisé dans le TP1 et le TP2.

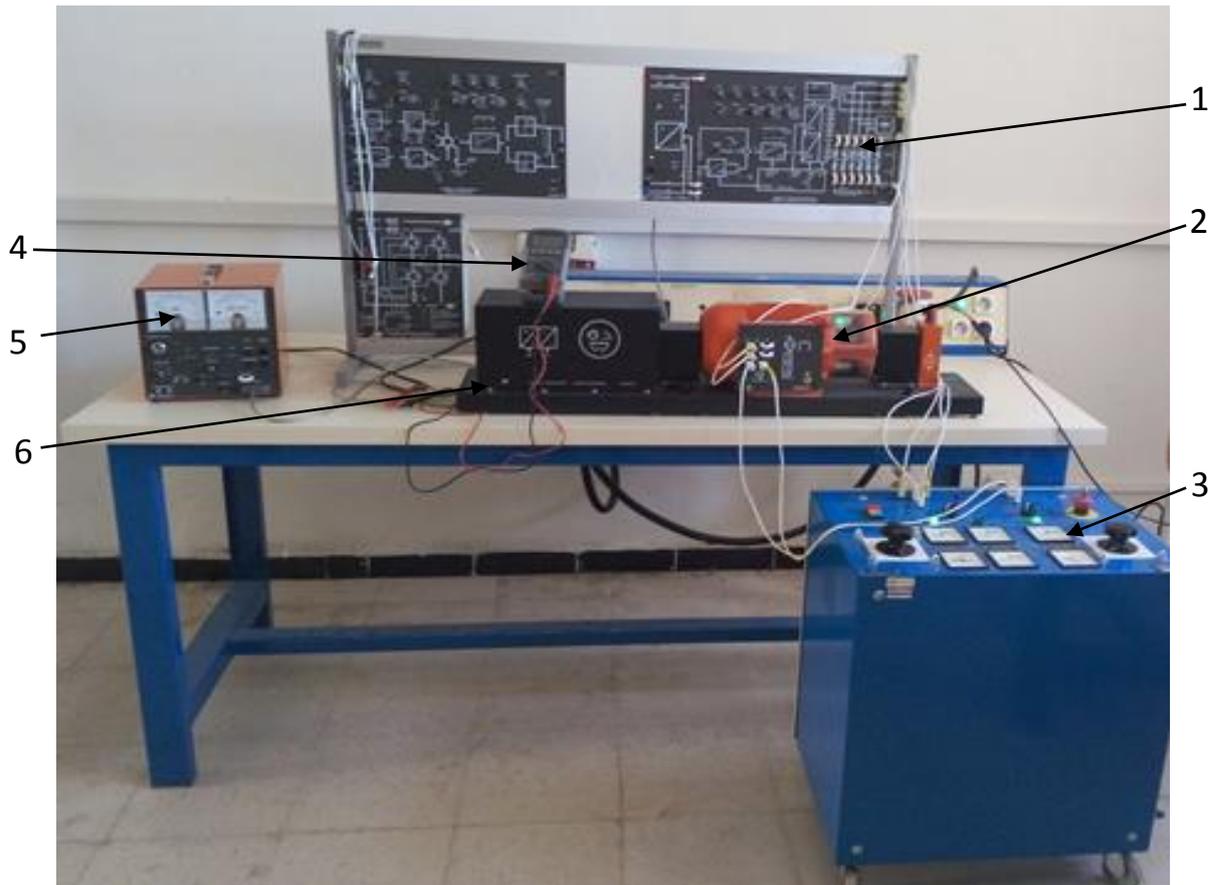


Figure 3. Vue globale du montage utilisé dans le TP1 et le TP2, réalisé dans le laboratoire n° 6.

- 1- Redresseur triphasé avec sa commande.
- 2- Moteur à courant continu.
- 3- Alimentation variable en triphasé alternatif et en continu
- 4- Voltmètre.
- 5- Commande du frein à poudre.
- 6- Frein à poudre magnétique.

3. Réalisation pratique :

Réaliser le montage de l'association **Redresseur-MCC** en procédant de la manière suivante :

- Relier les 3 phases et le neutre de l'alimentation triphasée variable aux entrées du redresseur indiquées par L1, L2, L3 et N.
- Réaliser le montage du redresseur en branchant les 12 cavaliers dans les bornes réservées à cet effet, figure 4. Notons que ce montage

comporte deux redresseurs inversés (tête-bêche). Si on veut utiliser un seul redresseur, on choisit soit celui dirigé vers le haut (V1, V2, V3, V4, V5, V6) ou bien celui dirigé vers le bas (V7, V8, V9, V10, V11, V12).

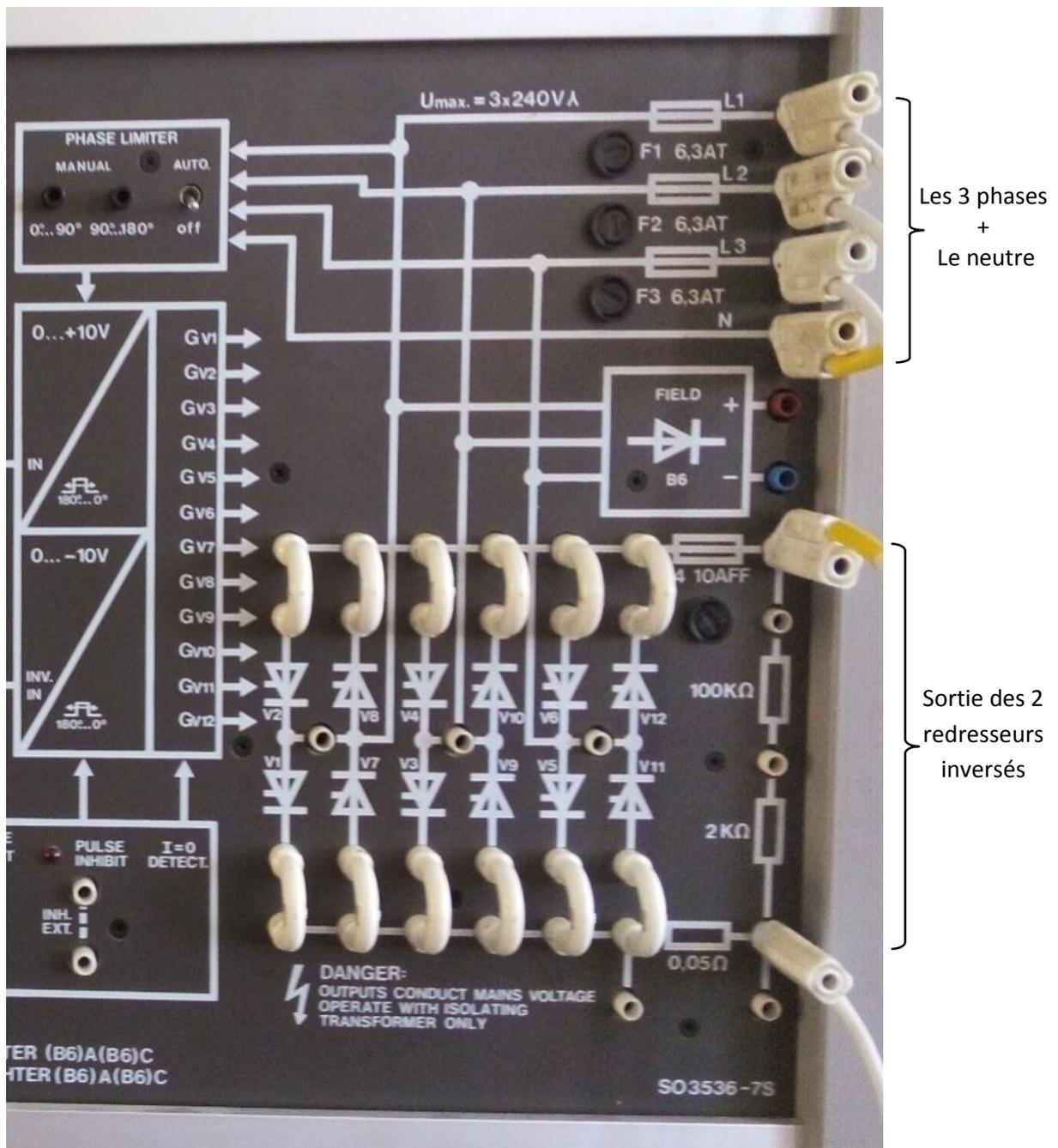


Figure 4. Branchement des 3 phases, du neutre et des deux redresseurs inversés.

- Relier les deux sorties du redresseur aux entrées A1 et C2 de la MCC (fig.5).
- Sur la boîte à bornes de la MCC, relier la borne A2 avec B1 et B2 avec C1 par des cavaliers (fig. 5).
- Relier les fils de la tension d'alimentation continue aux bornes E1 et E2 qui correspondent au circuit d'excitation de la MCC (fig. 5).

- Relier la MCC au frein à poudre magnétique par un manchon d'accouplement.
- Brancher le frein à poudre magnétique à sa commande.
- Relier l'alimentation (15 V, 0V et -15 V) au bloc de redressement.

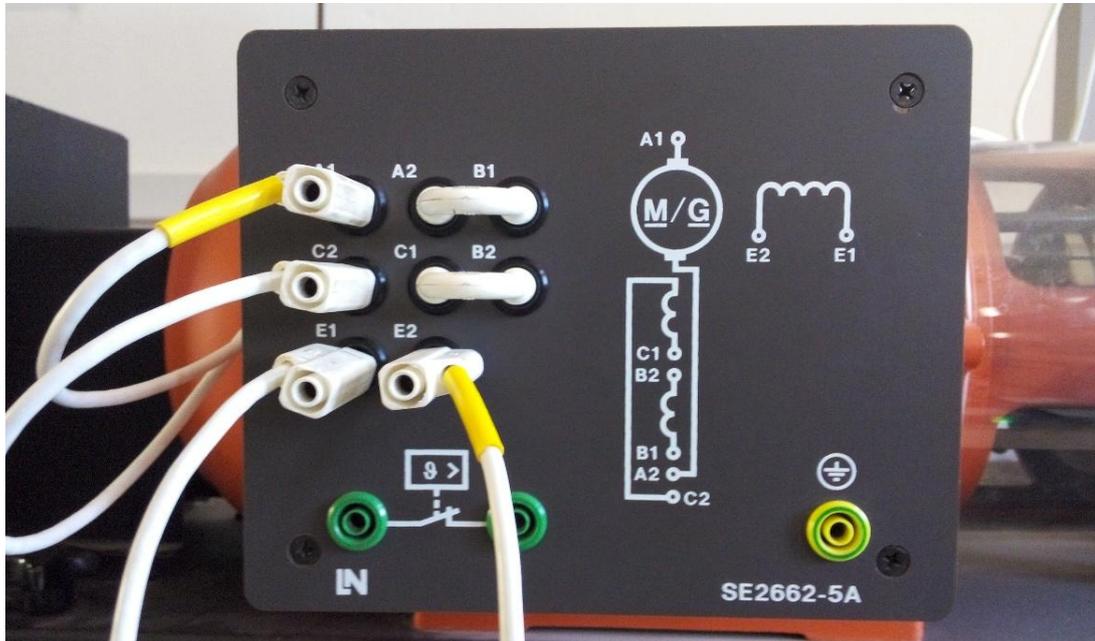


Figure 5. Boite à bornes de la MCC.

a. Etude de l'effet de la tension d'induit sur la vitesse de la MCC

- Régler la tension d'excitation de la MCC à 160 V et la tension triphasée efficace composée à 220 V.
- compléter le tableau suivant :

U (V)	180	160	140	120	100	80	60	40
U _{ref} (V)								
n (tr/min)								

Avec :

U - tension de l'induit (la sortie du redresseur).

U_{ref} - tension de référence pour commander le redresseur. Notons que pour commander le premier redresseur (orienté vers le haut), cette tension doit varier entre 0 et 10. Par contre, elle varie de -10 à 0 pour le deuxième redresseur.

n (tr/min) est la vitesse de rotation du moteur en tours par minutes affichée sur le bloc de commande du frein à poudre.

- Tracer, sur une feuille millimétrée, la caractéristique $n=f(U)$ et interpréter les résultats en précisant l'effet de la tension d'induit sur la variation de la vitesse.

b. Etude de l'effet du flux d'excitation sur la vitesse de la MCC

- Régler la tension de l'induit à 100 V.
- Faire varier la tension d'excitation (avec un couple de charge nul) et compléter le tableau suivant :

U_{exc} (V)	180	160	140	120	100	80	60
n (tr/min)							

- Tracer, sur une feuille millimétrée, la caractéristique $n=f(U_{exc})$ et interpréter les résultats en précisant l'effet de la tension d'excitation sur la variation de la vitesse de rotation.

c. Etude de l'effet du couple de charge sur la vitesse de la MCC

- Régler la tension d'excitation à 100 V.
- Régler la tension de l'induit à 150 V.
- Faire varier le couple de charge et compléter le tableau suivant :

C_{frein}(N/m)	0	0.5	1	1.5	2	2.5
n (tr/min)						

- Régler la tension de l'induit à 100 V.
- Faire varier le couple de charge et compléter le tableau suivant :

C_{frein}(N/m)	0	0.5	1	1.5	2	2.5
N (tr/min)						

- Tracer sur la même feuille millimétrée, la caractéristique $n=f(C_{frein})$ pour les deux cas et interpréter les résultats en précisant l'effet du couple de charge (développé par le frein magnétique) sur la variation de la vitesse de rotation.

Remarques :

- Les caractéristiques nominales de la MCC sont :

$$U_n = 220 \text{ V}, I_n = 6.3 \text{ A}, P = 1 \text{ kW}, n_n = 2100 \text{ tr/min}, U_{exc} = 200 \text{ V}, I_{exc} = 0.24 \text{ A}.$$

Donc le couple de charge nominal est donné par :

$$C_r = C_{frein} = 9.55 P/n_n = 4.5 \text{ N.m}$$

- La tension délivrée par le redresseur triphasé (pour une conduction continue) est :

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{eff} \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cos \alpha$$

Donc :

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{U_d \cdot \pi}{3 \cdot \sqrt{6} \cdot U_{eff}} \right)$$

Avec :

α angle d'amorçage des thyristors.

U_{eff} tension efficace simple de l'alimentation triphasée.

- Le couple résistant exercé sur l'arbre de la MCC est développé par le frein à poudre magnétique.

4. Résultats de la manipulation :

Cette section est dédiée pour la présentation des résultats du premier TP.

a. Résultats de l'étude de l'effet de la tension d'induit sur la vitesse

U_d (V)	180	160	140	120	100	80	60	40
U_{ref} (V)	5.05	4.7	4.39	4.11	3.86	3.62	3.39	3.12
n (tr/min)	2050	1780	1500	1260	1000	800	580	350

La figure 6, montre la variation de la vitesse de rotation en fonction de la tension de l'induit. On voit bien que l'augmentation de la tension augmente linéairement la vitesse, ce qui est en concordance avec les notions théoriques vues dans la première partie, consacrée à la MCC.

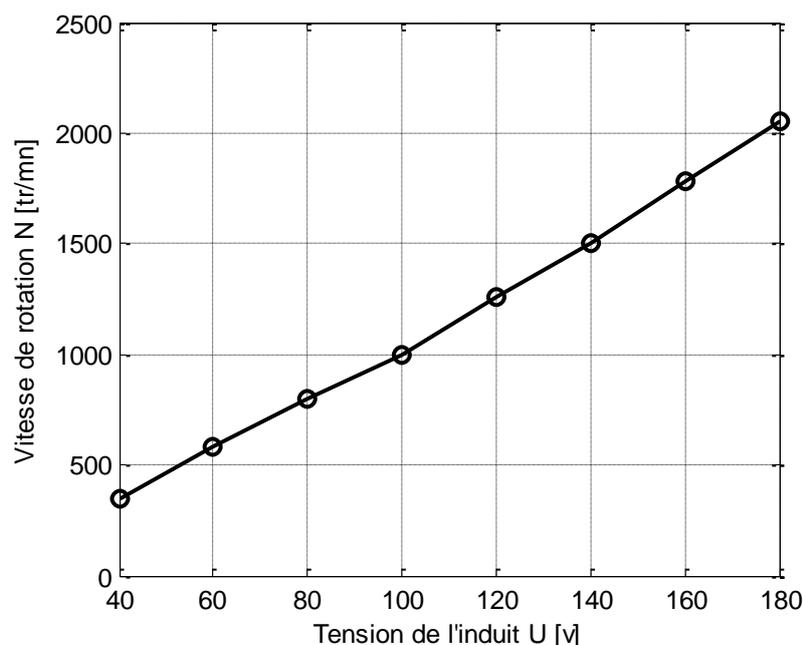


Figure 6. Variation de la vitesse en fonction de la tension d'induit.

b. Résultats de l'étude de l'effet du flux d'excitation sur la vitesse

U_{exc} (V)	180	160	140	120	100	80	60
n (tr/min)	990	1030	1070	1120	1200	1290	1400

La figure 7, montre la variation de la vitesse de rotation en fonction de la tension de l'excitation de la MCC. On voit bien que l'augmentation de la tension

d'excitation fait diminuer la vitesse. En effet, cette tension entraine la variation proportionnelle du flux d'excitation qui, lui-même, est inversement proportionnel à la vitesse (voir les notions théoriques dans la première partie).

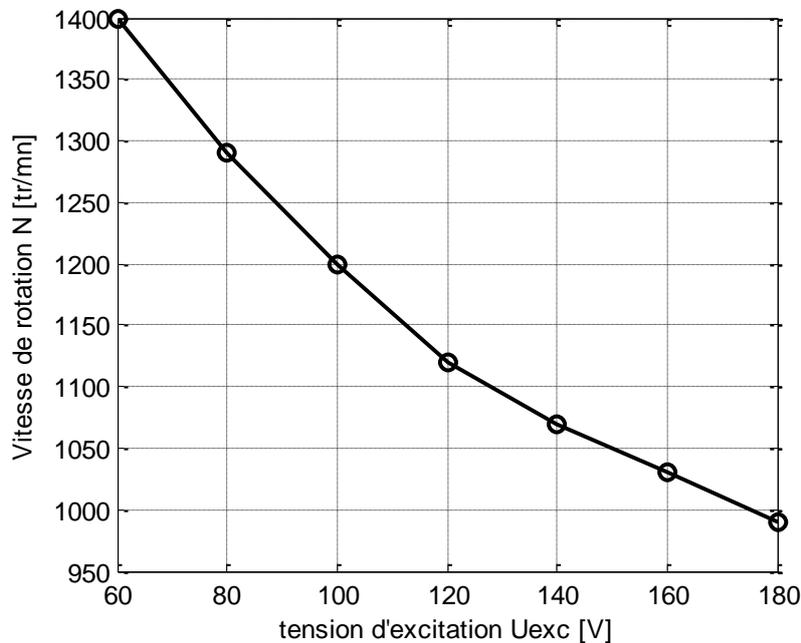


Figure 7. Variation de la vitesse en fonction de la tension d'excitation.

c. Résultats de l'étude de l'effet du couple de charge sur la vitesse

Tension d'induit réglée à 150 V :

$C_{frein}(N/m)$	0	0.5	1	1.5	2	2.5
n (tr/min)	1650	1550	1450	1400	1350	1300

Tension d'induit réglée à 100 V :

$C_{frein}(N/m)$	0	0.5	1	1.5	2	2.5
n (tr/min)	1050	900	780	700	650	600

La figure 8, montre la variation de la vitesse de rotation en fonction du couple de charge (couple de freinage) de la MCC. On voit bien que l'augmentation de ce couple de freinage fait diminuer la vitesse de rotation pour les deux cas de tension de l'induit. Mais, le taux de diminution diffère légèrement (figure 8) si le couple de

charge augmente à des valeurs élevées. Cela est dû à l'effet du terme résistif qui n'est pas le même pour les deux cas.

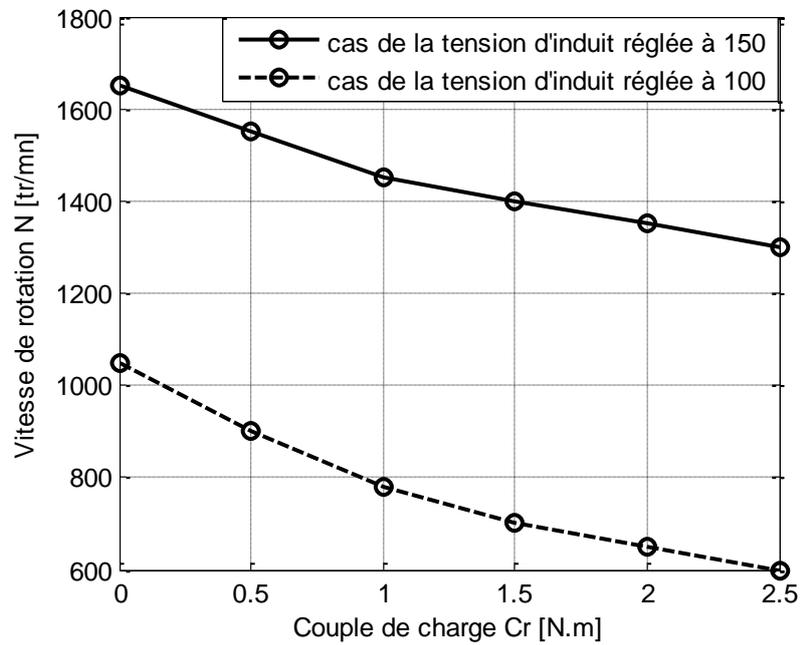


Figure 8. Variation de la vitesse en fonction du couple de charge.

TP 2 : Commande en boucle fermée d'une machine à courant continu alimentée par un redresseur triphasé

Durée : 1h30min

1. Objectif du TP :

- Apprendre à l'étudiant la structure et le fonctionnement d'un système de commande à quatre quadrants d'une MCC alimentée par deux redresseurs triphasés têtes bêtes.
- Apprendre comment optimiser le correcteur PI de la boucle de vitesse.
- Examiner le comportement du système de commande par rapport aux perturbations et aux variations de la consigne de commande.

2. Matériels utilisés :

Dans ce TP, on utilisera le même matériel du TP1 (se référer à la p.8), plus :

- Un oscilloscope à mémoire.
- Une génératrice tachymétrique pour mesurer la vitesse de rotation.

3. Réalisation pratique :

a. Commande en boucle ouverte de la vitesse

- Réaliser le montage de l'association Redresseur-MCC, vue dans le premier TP en suivant les mêmes étapes détaillées. Notons que dans ce TP, on utilisera les deux redresseurs tête-bêche.
- Relier (mécaniquement) la MCC à la génératrice tachymétrique.
- Relier un voltmètre aux bornes de la génératrice tachymétrique.
- Régler la tension d'excitation de la MCC à 160 V et la tension triphasée efficace composée à 220 V.

➤ Compléter le tableau suivant :

U (V)	80	130	170
U_{tachy} (V)			
n (tr/min)			

Avec : **U** est la tension de l'induit (la sortie du redresseur).
 U_{tachy} est la tension de sortie de la génératrice tachymétrique.
 n (tr/min) est la vitesse de rotation du moteur.

- Déterminant le rapport entre la tension U_{tachy} , délivrée par la génératrice tachymétrique, et la vitesse en $n(tr/min)$ pour les trois cas.
- Visualiser sur l'oscilloscope à mémoire la courbe de la vitesse pour un démarrage directe de 0 à 500 tr/min, avec une application d'un couple de charge de 1 Nm dans le régime permanent.

b. Commande en boucle fermée de la vitesse

- Relier la tension de sortie du capteur (génératrice tachymétrique) à l'entrée du filtre de la chaîne de retour (intégrée dans le bloc du redressement), figure 9.
- Pour des raisons de sécurité, on fait correspondre la tension de référence maximale à la vitesse nominale 2100 tr/min. Pour cela, on règle, avec retour désactivé, le gain **Ks** du filtre de la chaîne de retour pour avoir à sa sortie une tension 5 fois plus grande que celle donnée par la génératrice, figure 9.
- Régler le gain proportionnel du correcteur PI à la valeur 1 et désactiver en même temps l'intégrateur, figure 9.

- Fixer la valeur de la tension de référence à 2.5 V (c'est la valeur que donnera la chaîne de retour si le moteur tourne à 500 tr/min).
- Activer la chaîne de retour, figure 9.
- Démarrer le moteur et optimisez le correcteur PI pour éliminer complètement l'erreur statique (l'erreur dans le régime permanent) pour une consigne de vitesse de 500 tr/min.
- Examinez le comportement de la vitesse pour un démarrage directe (de 0 à 500 tr/min) et une variation de la charge de 0 à 1 Nm dans le régime permanent.
- Comparez les résultats trouvés avec ceux de la boucle ouverte.
- Examinez le comportement du régulateur de vitesse pour une variation de 500 tr/min à gauche à 500tr/min à droite.
- Donnez une conclusion générale.

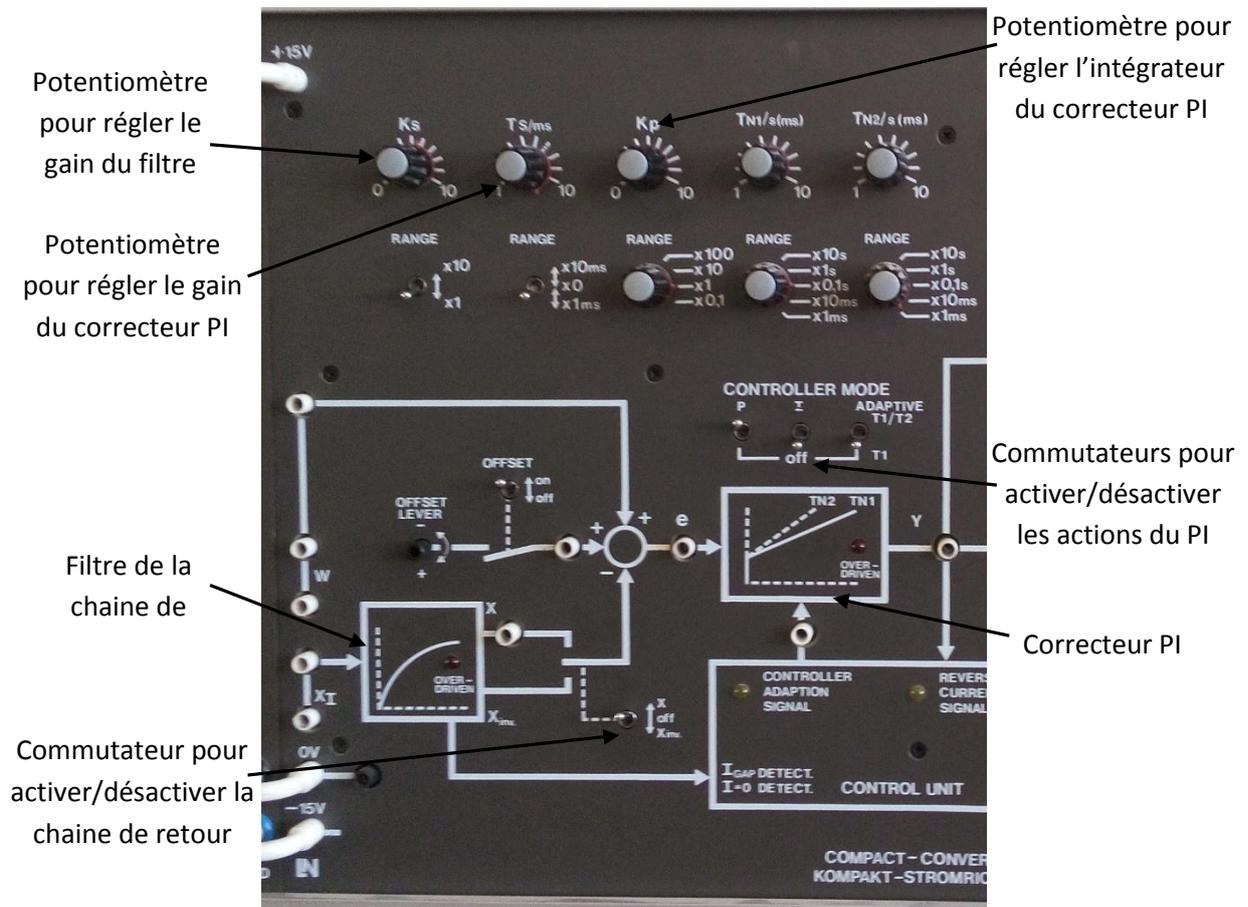


Figure 9. Structure de système de réglage.

4. Résultats de la manipulation :

Cette section est dédiée pour la présentation des résultats du deuxième TP.

a. Résultats de la commande en boucle ouverte de la vitesse

Ud (V)	80	130	170
U_{tachy} (V)	0.727	1.26	1.74
n (tr/min)	800	1400	1930

Les rapports entre la tension U_{tachy} , délivrée par la génératrice tachymétrique, et la vitesse en n (tr/min) pour les trois cas, sont calculés en divisant la vitesse par la tension U_{tachy} . Ce qui donne la valeur de la vitesse qui correspond à $U_{tachy} = 1$ pour les trois cas.

n (tr/min)	800	1400	1930
Rapport= n/U_{tach}	1100	1111	1109

On voit que ce rapport varie légèrement en fonction de la plage de vitesse.

La figure 10, montre l'évolution de la vitesse, tracée sur l'oscilloscope, pour un démarrage direct de 0 à 500 tr/min et l'application d'une charge de 1 N.m.

On voit bien que la vitesse nécessite 1 seconde pour se stabiliser au régime permanent qui correspond à 4.5 cm. Mais elle chute beaucoup (environ 1.5 cm) quand on applique une charge.

Donc, on peut dire que la vitesse de la MCC est très sensible aux perturbations (couples de charges).

Pour régler efficacement la vitesse de la MCC, il faut faire une commande en boucle fermée en utilisant un correcteur adéquat.

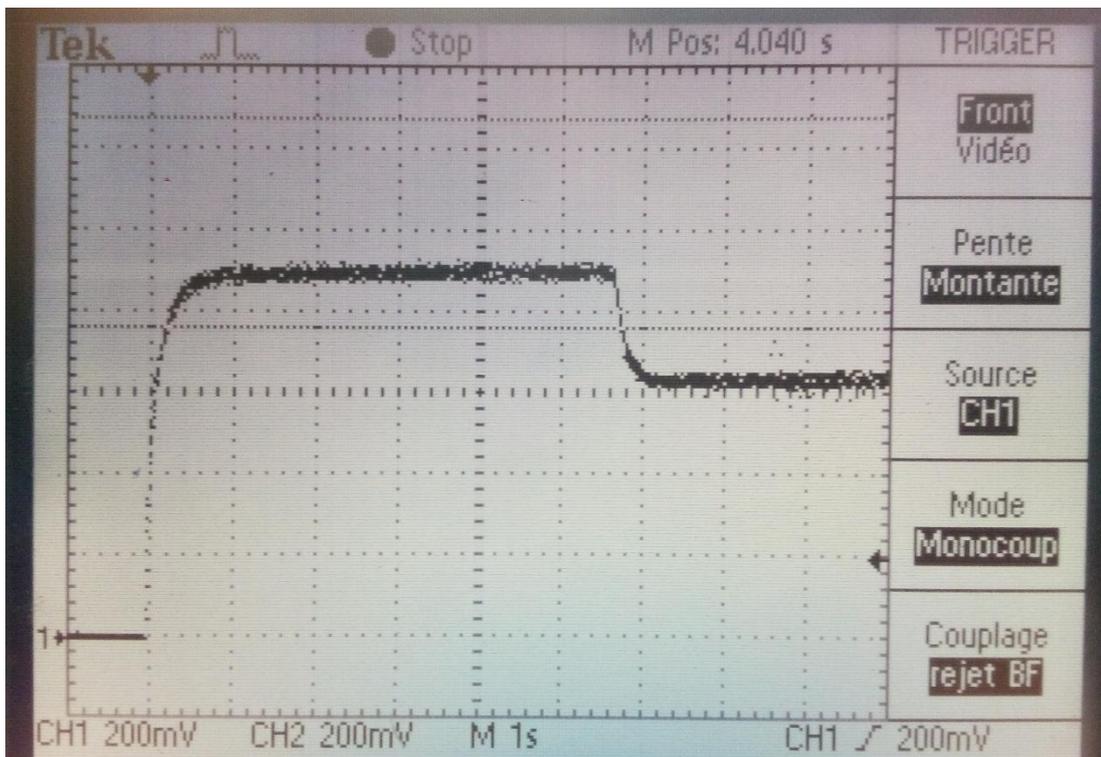


Figure 10. Evolution de la vitesse commandée en en boucle ouverte

c. Résultats de la commande en boucle fermée de la vitesse

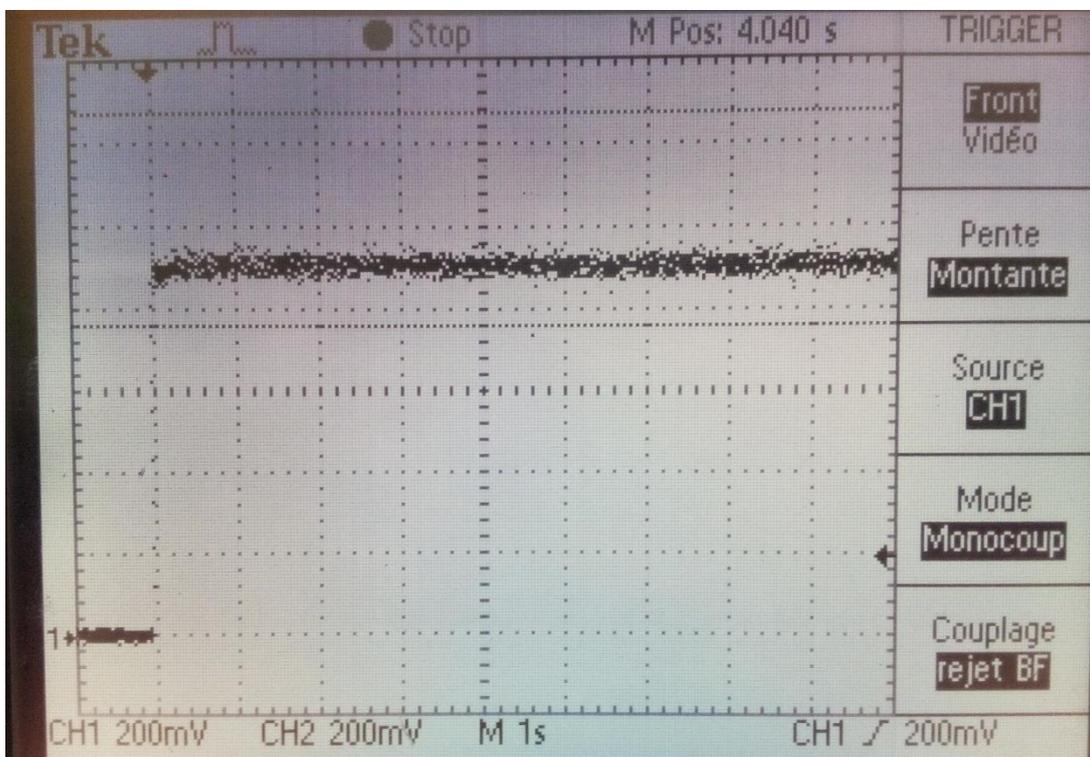


Figure 11. Evolution de la vitesse commandée en en boucle fermée

La figure 11, montre l'évolution de la vitesse, tracée sur l'oscilloscope, pour un démarrage direct de 0 à 500 tr/min et l'application d'une charge de 1 N.m.

On voit bien que la vitesse nécessite un faible temps (moins de 0.3 seconde) pour se stabiliser à 500 tr/min. En plus, elle reste presque insensible à l'application de la charge.

En comparant ces résultats avec ceux de la boucle ouverte, on peut dire que le réglage en boucle fermée a amélioré le temps de réponse et la précision de la commande de la vitesse de rotation de la MCC.

La figure 12, montre l'évolution de la vitesse dans les deux sens de rotation avec l'application d'une charge de 1 N.m. On voit bien que le réglage est efficace dans les deux sens.

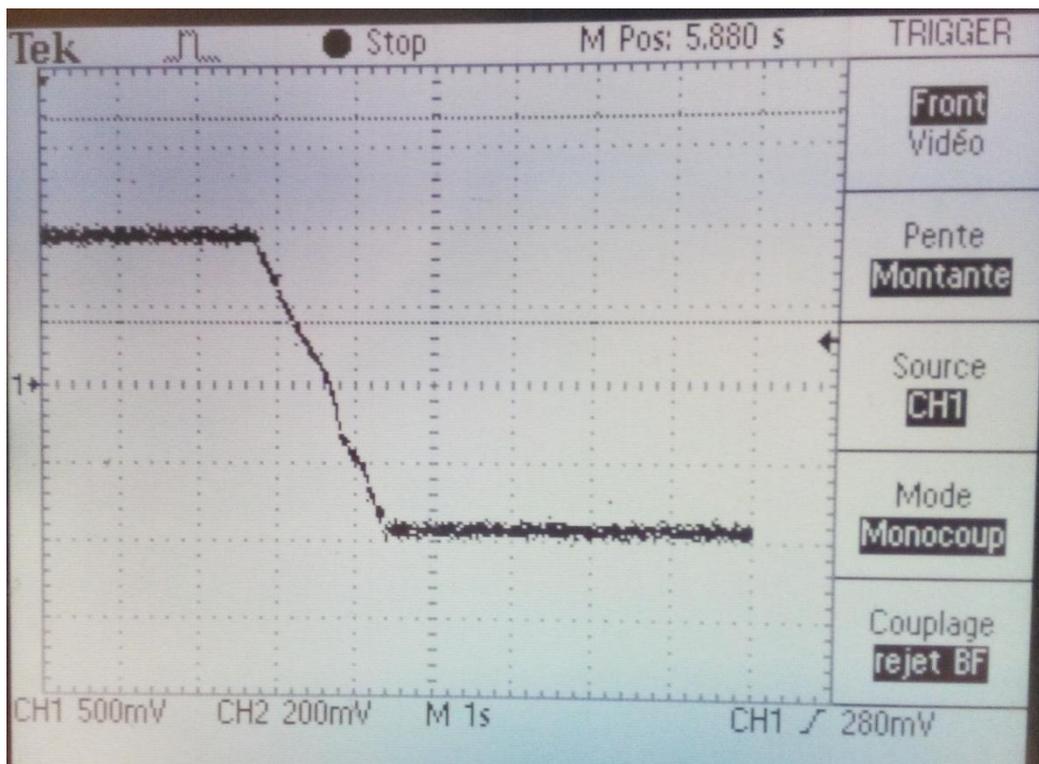


Figure 12. Evolution de la vitesse dans les deux sens (réglage en boucle fermée)

TP 3 : Association machine à courant continu et hacheur réversible en courant : commande en boucle ouverte

Durée : 1h30min

1. Objectif du TP :

- Familiariser l'étudiant avec le matériel qui sera utilisé dans ce TP (TP3) et le quatrième TP (TP4).
- Apprendre à l'étudiant la structure d'alimentation d'une MCC par un hacheur réversible en courant.

2. Matériels utilisés :

- Deux alimentations en tension continue variable.
- Bloc du Hacheur, de référence : Didalab EL 2020.
- Bloc du moteur à courant continu et de la génératrice de charge, de référence : Didalab EL 3748.
- Deux voltmètres.
- Fréquencemètre.
- Une résistance variable.
- Fils et cavaliers.

La figure 13, montre le montage complet utilisé dans le TP3 et le TP4.

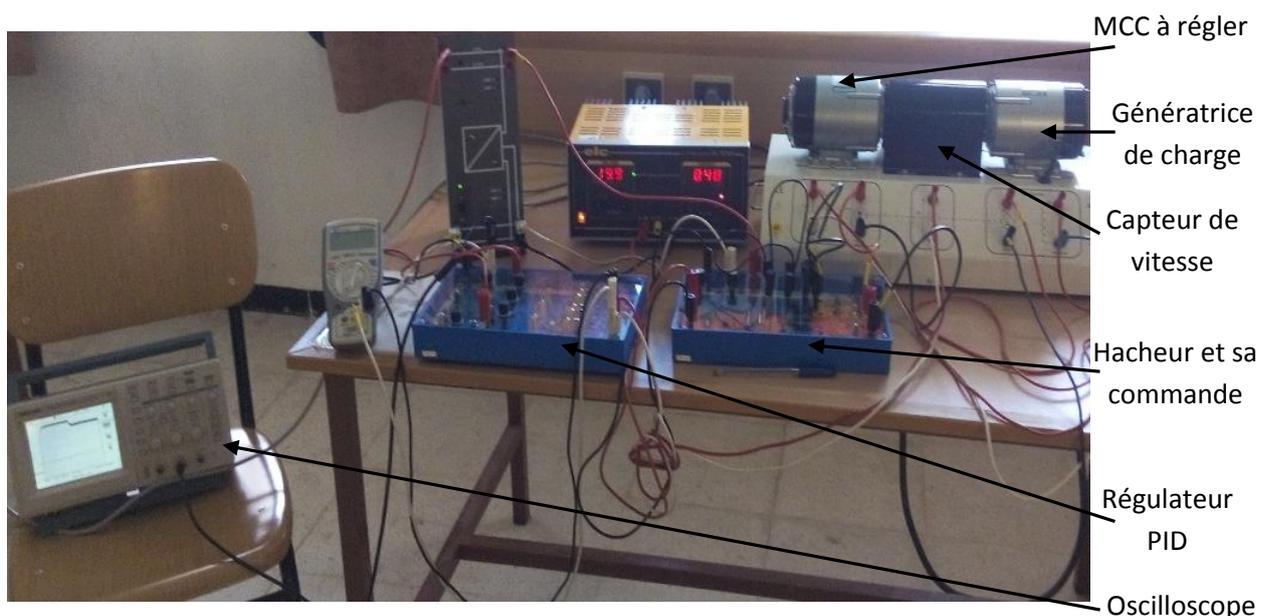


Figure 13. Vue globale du montage utilisé dans TP3 et TP4.

3. Réalisation pratique :

Réaliser le montage de l'association Hacheur-MCC, figure 15, en procédant de la manière suivante :

- Relier l'alimentation continue aux bornes d'entrée du hacheur.
- Relier la sortie du hacheur (bornes « c » et « E ») à l'induit de la MCC.
- Relier la deuxième alimentation au circuit d'excitation de la MCC.
- Relier la sortie du générateur de la rampe (porteuse en dents de scie) à la borne « d » du comparateur.
- Régler le potentiomètre de la fréquence de la porteuse au milieu.
- Relier la sortie de la commande de référence à la bornes « c » du comparateur.
- Relier la sortie du comparateur « e » aux bornes « f1 » et « f2 ».
- Alimenter le bloc du Hacheur (EL 2020) par une alimentation (15 V, 0 V et -15 V).
- Régler la tension d'alimentation continue du hacheur à 20 V.
- Régler la tension d'excitation de telle sorte que le courant d'excitation soit égal à 0.5 A.

Le capteur de vitesse utilisé dans ce TP est une génératrice synchrone tachymétrique à aimants permanents de 12 paires de pôles.

- Calculer le rapport entre la fréquence et la vitesse de rotation.
- Sachant que la vitesse maximale de la MCC est 3100 tr/min, calculer dans ce cas la fréquence qui correspond à cette vitesse limite.
- En variant la tension de commande de référence, que remarquez-vous sur le fréquencemètre.
- Fixer maintenant la tension de référence pour avoir une fréquence de 100 Hz sur le capteur de vitesse. Puis, diminuer la tension d'excitation. Que remarquez-vous sur le fréquencemètre.

- Modifier la position du potentiomètre qui règle la fréquence de la porteuse (la rampe), Que remarquez-vous sur le fréquencemètre.

Pour étudier l'effet de la charge sur la vitesse de rotation du moteur, on utilise la génératrice à courant continu entraînée par le moteur à régler. En effet, si on ferme le circuit de l'induit de la génératrice sur une résistance variable, un courant va circuler dans cette dernière. Ce courant est proportionnel au couple de la génératrice qui a tendance à freiner l'arbre en rotation. En plus, la variation de la valeur de la résistance fait varier le courant et par conséquent le couple de charge appliqué sur l'arbre.

Pour étudier ce système de charge du moteur, réaliser les étapes suivantes :

- Alimenter le circuit d'excitation par une tension continue pour avoir un courant d'excitation de 0.5 A.
- Relier l'induit de la génératrice à une résistance variable à travers un commutateur pour fermer (ou bien ouvrir) le circuit.
- Démarrer le moteur et régler la référence de commande pour avoir 100 Hz à la sortie du capteur de vitesse. Puis fermer le commutateur pour relier la génératrice à la résistance.
- Augmenter progressivement la valeur de la résistance variable. Que remarquez-vous sur le fréquencemètre.
- Refaire le même test pour référence qui donne une fréquence de 300 Hz et comparer avec le cas de 100 Hz.
- Faire une conclusion générale sur le TP.

Remarque :

1- Les grandeurs nominales des machines (elles sont identiques) sont :

$U_{\text{induit}}=24\text{v}$; $I_{\text{induit}}=5\text{ A}$; $n=3100\text{ tr/min}$; $I_{\text{exc}}= 0.6\text{A}$; $P_a=120\text{W}$; $C_{\text{util}}=0.29\text{ Nm}$

2- La génératrice synchrone contient 12 paires de pôles.

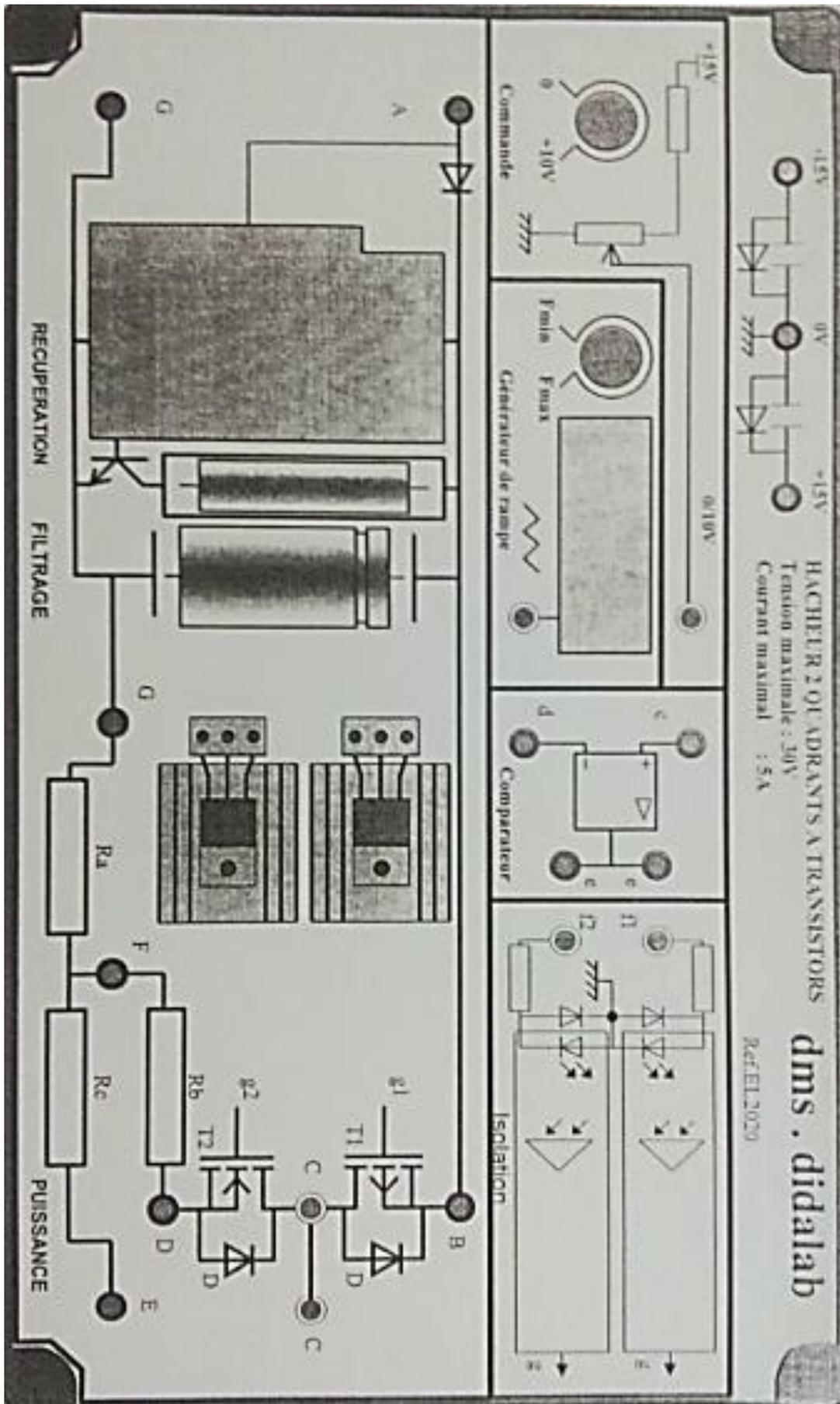


Figure 14. Hacheur et de sa commande sans câblage.

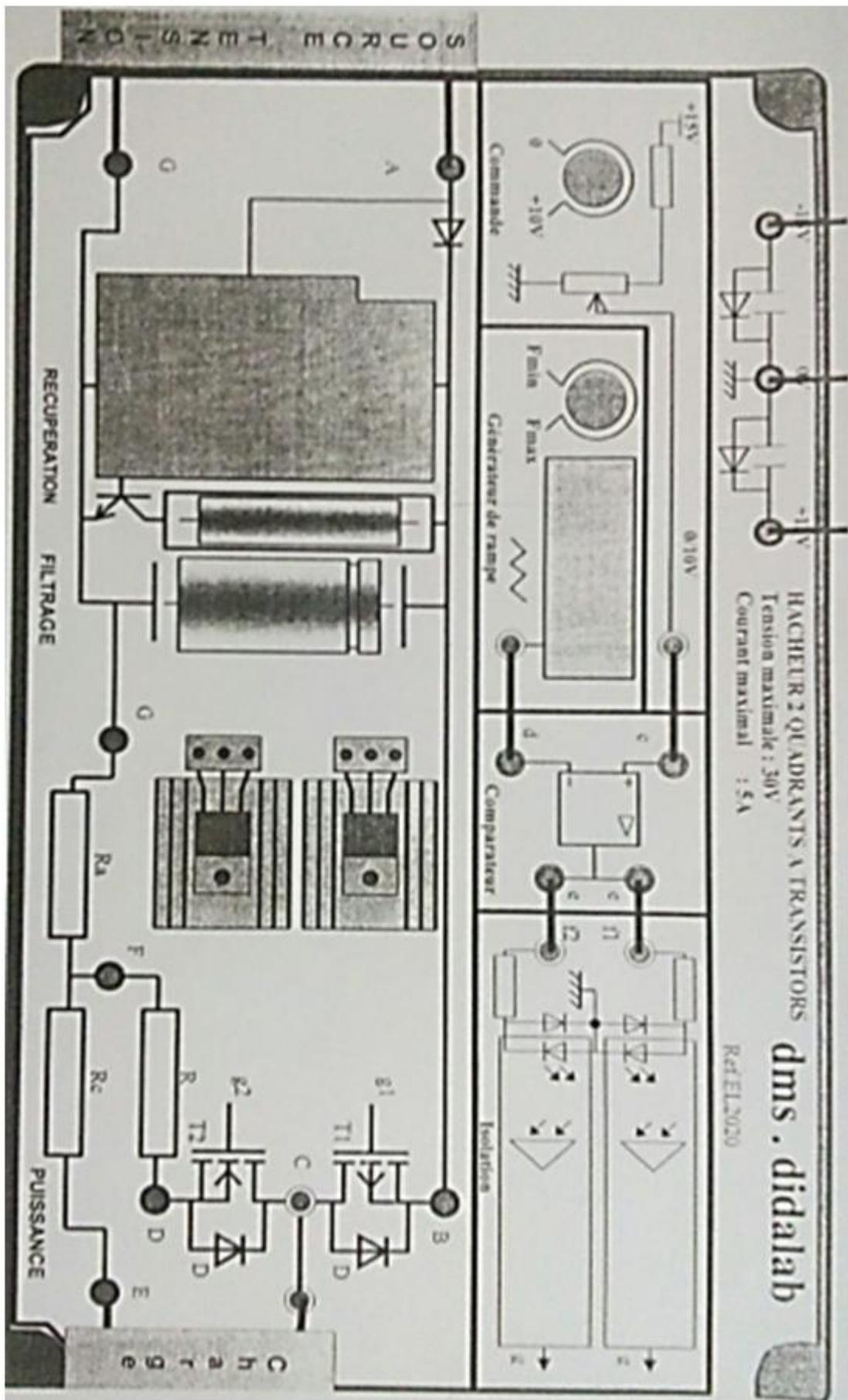


Figure 15. Hacheur et de sa commande après câblage.

4. Résultats de la manipulation :

Cette section est dédiée pour la présentation des résultats du troisième TP.

➤ *Calcul du rapport entre la fréquence et la vitesse :*

Dans une machine synchrone la relation entre la vitesse et la pulsation des grandeurs statoriques est donnée par la relation suivante :

$$N(\text{rad. s}^{-1}) = \frac{2\pi f}{p} \quad (9)$$

Puisque $p=12$, on aura dans ce cas la relation suivante, entre la vitesse en tours par minute et la fréquence :

$$n(\text{tr. min}^{-1}) = 5f \quad (10)$$

- La fréquence maximale qui correspond à la vitesse maximale (3100 tr/min) à ne pas dépasser est : **$f = 3100/5 = 620 \text{ Hz}$** .
- En faisant augmenter la tension de référence de la commande du hacheur la fréquence mesurée par le fréquencemètre augmente. En effet, la tension moyenne continue à la sortie du hacheur augmente proportionnellement en fonction de la référence, ce qui augmente la vitesse de rotation de la génératrice synchrone et par conséquent la fréquence de la tension qu'elle génère augmente.
- En faisant diminuer la tension d'excitation de la MCC, la fréquence mesurée par le fréquencemètre augmente. Cela est dû à l'augmentation de la vitesse de rotation si le flux diminue.
- La variation de la position du potentiomètre ne modifie pas la fréquence mesurée par le fréquencemètre, donc elle ne change pas la vitesse. Mais elle modifie le bruit audible qui dépend de la fréquence de hachage du hacheur contrôlée par ce potentiomètre.

- La modification de la valeur de la résistance variable, reliée à la génératrice à courant continu, fait diminuer la fréquence et donc la vitesse de rotation pour les deux cas de fréquence initiales ($f=100$ Hz et $f= 300$ Hz). Par contre cette diminution est plus grande pour le cas 300 Hz. En effet, pour ce cas la vitesse est plus grande, donc la tension générée et le courant débité sur la même résistance sont plus grands, donc le couple de charge est plus grand pour (300 Hz) que pour (100Hz).

TP 4 : Commande en boucle fermée d'une machine à courant continu alimentée par un Hacheur réversible en courant

Durée : 1h30min

1. Objectif du TP :

- Apprendre à l'étudiant la structure et le fonctionnement d'un système de commande à deux quadrants d'une MCC alimentée par un hacheur réversible en courant.
- Apprendre comment optimiser le régulateur PID de la boucle de vitesse.
- Examiner le comportement du système de commande par rapport aux perturbations et aux variations de la consigne de commande.

2. Matériels utilisés :

Dans ce TP4, on utilisera le même matériel du TP3 (p.23) plus :

- Un oscilloscope à mémoire.
- Le bloc du régulateur (PID + convertisseur fréquence/tension), de référence : Didalab EL 2030.

3. Réalisation pratique :

a. Commande en boucle ouverte de la vitesse

- Réaliser le montage de l'association Hacheur-MCC, vue dans le TP3 en suivant les mêmes étapes détaillées.
- Alimenter le bloc du régulateur (EL 2030) par une alimentation (15 V, 0 V et -15 V).

- Relier la sortie du capteur de vitesse (génératrice synchrone tachymétrique) aux entrées du convertisseur fréquence/tension (f/V) pour convertir la tension alternative en tension continue, variable en fonction de la fréquence, donc en fonction de la vitesse.
- Régler la tension de référence pour avoir une fréquence à la sortie du capteur de vitesse égale à 100 Hz. Puis mesurer la tension continue à la sortie du convertisseur f/V .
- Déterminer le rapport entre la tension continue (donnée par le convertisseur) et la vitesse de rotation en tr/min.
- Visualiser sur l'oscilloscope l'évolution de la vitesse pour un démarrage direct de 0 à 1000 tr/min (200 Hz) et l'application d'une charge dans le régime permanent.
- Commenter les résultats trouvés.

b. Commande en boucle fermée de la vitesse

- Dans le bloc du régulateur, figure 16, relier respectivement la référence de commande « a » de la vitesse et la tension (donnée par le convertisseur f/V) « d » aux bornes du comparateur « d » et « c ».
- Relier la sortie du comparateur « e » à la borne du dérivateur « ed ». Pour le proportionnel et l'intégrateur, elles sont déjà reliés à la sortie « e ».
- Relier respectivement la sortie du proportionnel « gp », de l'intégrateur « gi » et du dérivateur « gd » aux bornes de l'additionneur « ip », « ii » et « id ».
- Relier la sortie de l'additionneur « s » du bloc régulateur à la borne « c » du comparateur du bloc hacheur.
- Désactiver l'intégrateur et le dérivateur.

- Démarrer le moteur et optimisez le régulateur PID (en commençant par l'adaptation du proportionnel puis l'intégrateur et enfin le dérivateur) pour éliminer complètement l'erreur statique (l'erreur dans le régime permanent) pour une consigne de vitesse de 500tr/min.
- Visualiser sur l'oscilloscope l'évolution de la vitesse pour un démarrage direct de 0 à 1000 tr/min (200 Hz) et l'application d'une charge dans le régime permanent.
- Comparer les résultats trouvés avec ceux de la boucle ouverte.
- Donner une conclusion générale.

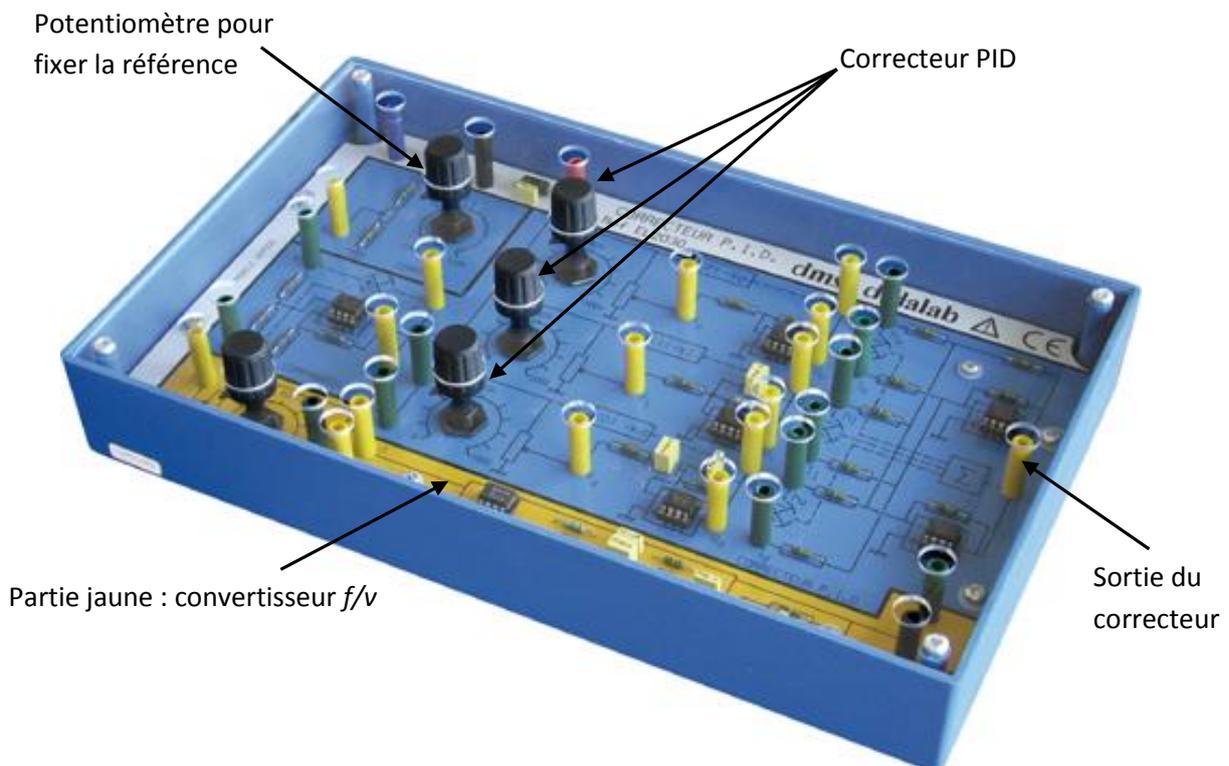


Figure 16. Bloc EL 2030 : régulateur PID + convertisseur fréquence/tension (f/v).

4. Résultats de la manipulation :

Cette section est dédiée pour la présentation des résultats du quatrième TP.

a. Résultats de la commande en boucle ouverte de la vitesse

- La tension mesurée à la sortie du convertisseur f/V pour une vitesse de 500 tr/min (une fréquence de 100 Hz) est 0.8 V.
- Donc pour une tension de 1 V à la sortie du convertisseur f/V la vitesse de rotation vaut 620 tr/min.

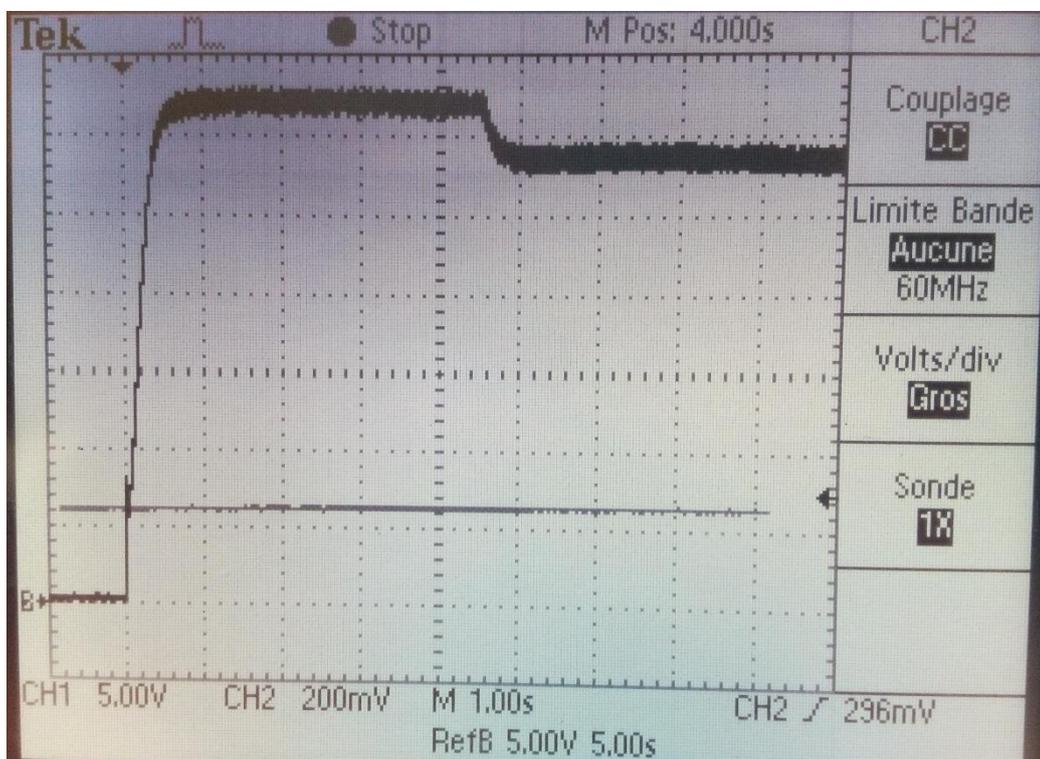


Figure 17. Évolution de la vitesse commandée en boucle ouverte.

La figure 17, montre l'évolution de la vitesse, tracée sur l'oscilloscope, pour un démarrage direct de 0 à 1000 tr/min et l'application d'une charge dans le régime permanent.

On voit bien que la vitesse chute beaucoup (environ 1 cm) quand on applique une charge.

Pour régler efficacement la vitesse de la MCC, il faut faire une commande en boucle fermée utilisant un correcteur adéquat.

b. Résultats de la commande en boucle fermée de la vitesse

La figure 18, montre l'évolution de la vitesse, tracée sur l'oscilloscope, pour un démarrage direct de 0 à 1000 tr/min et l'application d'une charge dans le régime permanent.

On voit bien que la commande rejette l'effet de la charge par l'augmentation de la vitesse pour la régler à la référence.

En comparant ces résultats avec ceux de la boucle ouverte, on peut dire que le réglage en boucle fermée diminue la sensibilité du moteur aux couples de charges et assure un réglage et un temps de réponse satisfaisants.

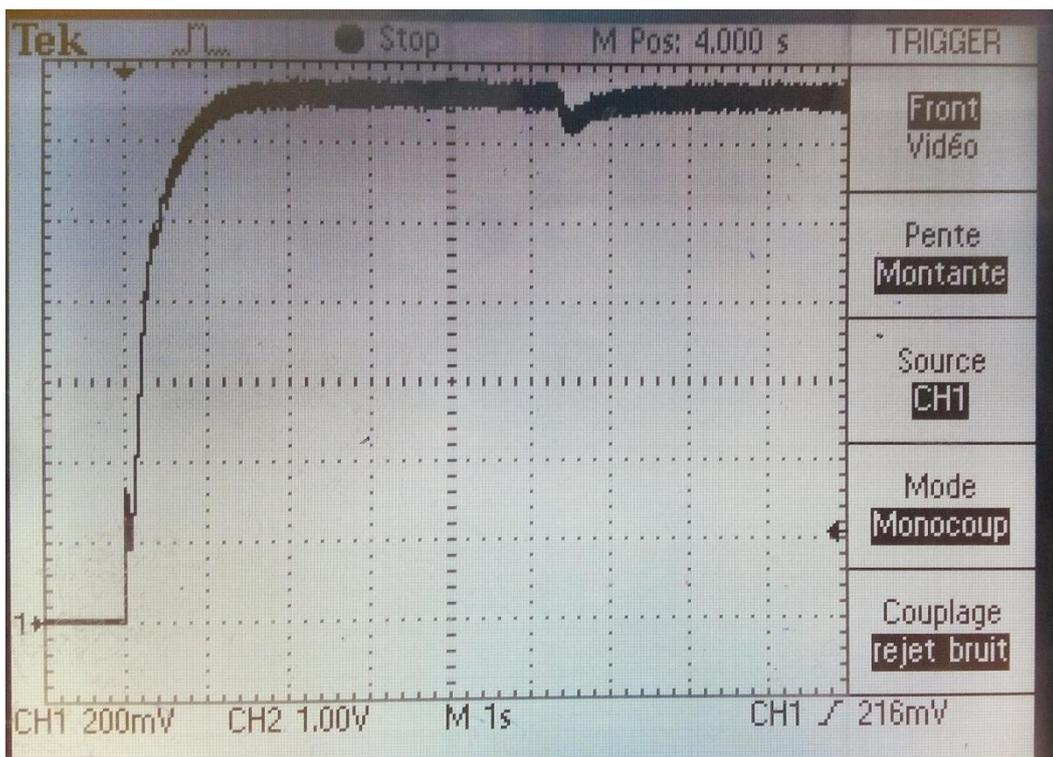


Figure 18. Évolution de la vitesse commandée en boucle fermée.

Bibliographique

- 1- F.Milsant, « Machines électriques T.2 : Machine à courant continu, asservissements linéaires », Edition Berti, 1991.
- 2- «Moteur à courant continu à excitation indépendante : ELD037480», DMS Didalab, 2006.
- 3- M.Rivoire, « Cours d'automatique : T.2 : Asservissement-régulation-commande analogique », Paris : Eyrolles - 1996.
- 4- «Commande et stabilisation du nombre de tours et réglage des moteurs à courant continu : EBD 1-3 », descriptions des expériences, LUCAS-NÜLLE, édition 2, 1997.
- 5- J. Laroche, « Electronique de puissance - Convertisseurs : Cours et exercices corrigés », Dunod, 2005.
- 6- «Hacheur deux quadrant : PDE020200 », DMS Didalab, 2007.
- 7- «Correcteur PID pour asservissement de vitesse : PDE020300 », DMS Didalab, 2007.