



Tutoriel sur les notions de régulation des entraînements électriques asservis



Généralités - aspects théoriques

Définitions

Régulateur PID

Régulateurs évolués

Régulateur d'un variateur

Structure du régulateur de la série CD1

Définition des signaux

Définition des grandeurs principales

Définition des termes du régulateur

Options de la procédure d'auto-tuning

Réglage d'un variateur

Exemple de réglage d'une boucle de vitesse PI

Exemple de réglage d'une boucle de position / vitesse

Elasticité des chaînes cinématiques et dynamique appropriée



Sommaire

Chapitre 1 – Généralités - aspects théoriques.....	2
1.1 - Définition	2
1.2 - Termes de régulation – exemple du régulateur PID	2
1.3 – Régulateurs évolués	4
Chapitre 2 – Boucle de position et boucle de vitesse	6
2.1 – Structure du régulateur de la série CD1	6
2.2 – Définition des signaux	6
2.3 – Définition des grandeurs principales agissant sur les gains des régulateurs	7
2.4 – Définition des termes du régulateur de position / vitesse	7
2.5 – Options de la procédure d’auto-tuning	8
Chapitre 3 – Réglage d’un variateur INFRANOR de la gamme CD1	9
3.1 – Exemple de réglage d’une boucle de vitesse PI	9
3.2 – Exemple de réglage d’une boucle de position / vitesse	12
3.3 - Elasticité des chaînes cinématiques et dynamique appropriée	18



Chapitre 1 – Généralités - aspects théoriques

1.1 - Définition

La régulation des procédés industriels regroupe l'ensemble des moyens matériels et techniques mis en œuvre pour maintenir une grandeur physique à régler, égale à une valeur désirée, appelée consigne. Dans un sens général, la régulation est l'ensemble des techniques permettant le maintien de la constance d'une fonction.

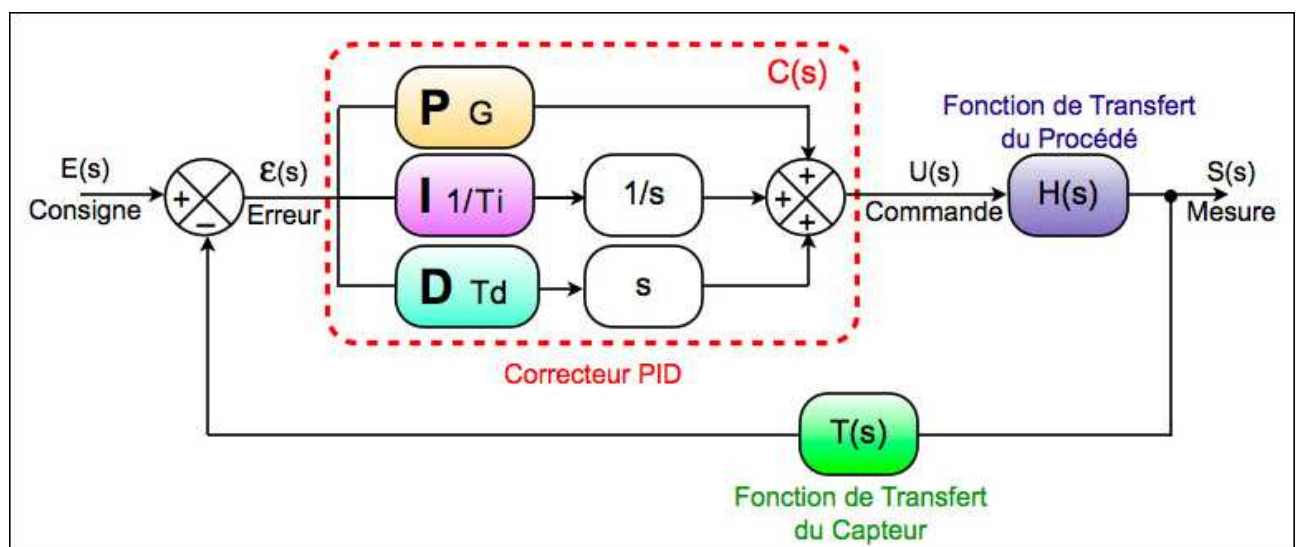
1.2 - Termes de régulation – exemple du régulateur PID

Un régulateur Proportionnel Intégral Dérivé (**PID**) est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un système industriel. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie et il permet de contrôler la grande majorité des procédés.

Le PID permet 3 actions simultanées sur l'erreur consigne/mesure :

- une action **Proportionnelle** : l'erreur est multipliée par un gain **G**
- une action **Intégrale** : l'erreur est intégrée sur un intervalle de temps s et divisée par un gain **Ti**
- une action **Dérivée** : l'erreur est dérivée suivant un temps s , puis multipliée par un gain **Td**

Il existe plusieurs architectures possibles pour combiner les 3 effets (série, parallèle ou mixte), on prendra une architecture parallèle ici :





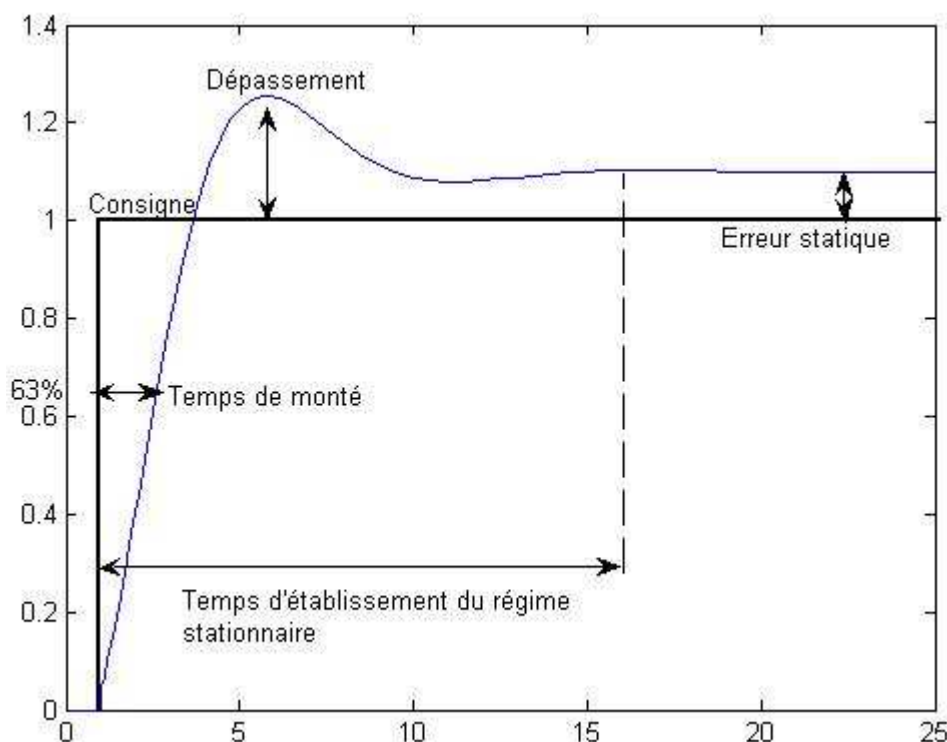
1.2.1 - Réglage d'un PID

Le réglage d'un PID consiste à trouver les coefficients **G**, **Td** et **Ti** dans le but d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. L'objectif est d'être **robuste**, **rapide**, **précis** et de limiter les **dépassements**. La robustesse est sans doute le paramètre le plus important et délicat. Il faut pour cela :

- Choisir des réglages permettant de limiter le ou les éventuels **dépassements** (*overshoot*) de la grandeur réglée et de permettre à celle-ci de retourner dans un temps raisonnable à sa valeur de consigne,
- Obtenir une grande stabilité : on dit qu'un système est robuste si la régulation fonctionne toujours même si le modèle change un peu, le régulateur doit être capable d'assurer sa tâche afin de s'adapter à des aléas de comportement (jeux mécaniques, frottements variables, élasticité, etc.),
- Chercher la meilleure dynamique possible : la rapidité du régulateur dépend du temps de montée et du temps d'établissement du régime stationnaire.

Le critère de précision est basé sur l'erreur statique (manifestation naturelle d'une dérive entre la valeur du signal de sortie à régler et la valeur de consigne qui lui est attribuée).

La réponse type d'un procédé stable est la suivante :





Les paramètres du PID influencent la réponse du système de la manière suivante :

G : Lorsque G augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement varie peu et l'erreur statique se trouve améliorée.

Ti : Lorsque $1/T_i$ augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement au régime stationnaire s'allonge mais dans ce cas on assure une erreur statique nulle. Donc plus ce paramètre est élevé, plus la réponse du système est ralentie.

Td : Lorsque T_d augmente, le temps de montée change peu mais le dépassement diminue. Le temps d'établissement au régime stationnaire est meilleur. Pas d'influences sur l'erreur statique. Si ce paramètre est trop élevé dans un premier temps il stabilise le système en le ralentissant trop mais dans un deuxième temps le régulateur anticipe trop et un système à temps mort élevé devient rapidement instable.

Pour ces trois paramètres, le réglage au-delà d'un seuil trop élevé a pour effet d'engendrer une oscillation du système de plus en plus importante menant à l'instabilité.

L'analyse du système avec un PID est très simple mais sa conception peut être délicate, voire difficile, car il n'existe pas de méthode unique pour résoudre ce problème. Il faut trouver des compromis, le régulateur idéal n'existe pas. En général on se fixe un cahier des charges à respecter sur la robustesse, le dépassement et le temps d'établissement du régime stationnaire.

Dans la pratique, les professionnels utilisent souvent la méthode par approches successives, qui répond à une procédure rigoureuse : on règle d'abord l'action P seule pour avoir un dépassement de 10 à 15% puis l'action dérivée de façon à "raboter" au mieux le dépassement précédent, enfin on ajuste si nécessaire l'action intégrale en se fixant un dépassement final compris entre 5 et 10%.

1.3 – Régulateurs évolués

1.3.1 - La commande prédictive

La **commande prédictive** (ou **compensation** ou **correction anticipatrice**) est une technique de commande avancée de l'automatique. Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. Le principe de cette technique est d'utiliser un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé. La commande prédictive fait partie des techniques de contrôle à modèle interne (*IMC : Internal Model Controller*). En anglais on utilise le terme **MPC** ou **MBPC** pour qualifier la commande prédictive : *Model (Based) Predictive Control* ou aussi PFC : "Predictive Functional Control". Cette méthode a été inventée par un Français, Jacques Richalet, en 1978 et généralisée par David W. Clarke en 1987 en accord avec de grands groupes industriels aux États-Unis et en Europe (Shell et Adersa).

La commande prédictive peut être utilisée pour commander des systèmes complexes comportant plusieurs entrées et sorties où le simple régulateur PID est insuffisant. Cette technique est particulièrement intéressante lorsque les systèmes possèdent des retards importants, des réponses inverses et de nombreuses perturbations.



1.3.2 – Régulateur RST

Un régulateur RST est un organe de contrôle à trois degrés de liberté permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un système industriel. Parler de régulateur RST, c'est avant tout parler de structure de régulateur. La structure RST est la structure de régulateur linéaire la plus générale. Les régulateurs RST multivariables sont assez complexes à appréhender, et plus encore à synthétiser (dans le contexte multivariable, il est donc préférable, d'un point de vue pratique, de se placer dans le cadre du formalisme d'état, plutôt que dans celui du « formalisme polynomial » du régulateur RST). Les régulateurs RST sont couramment utilisés dans les systèmes de commande, le plus souvent numériques, car, *dans le contexte monovarié*, ce sont les régulateurs qui offrent la plus grande souplesse d'utilisation.

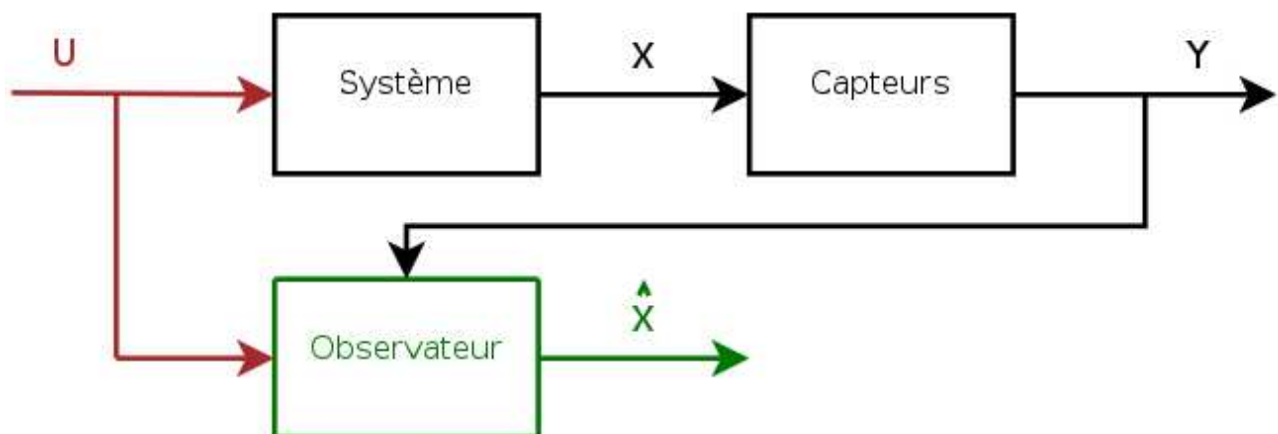
Ce type de correcteur peut être obtenu dans le formalisme du temps continu ou dans celui du temps discret. Plus les calculateurs deviennent rapides, plus c'est le formalisme continu qui devient pertinent. Le sigle RST vient du nom des 3 polynômes devant être déterminés afin d'obtenir une commande efficace. La synthèse de ce type de correcteur peut s'effectuer par placement de pôles (mais, comme on l'a dit plus haut, tout régulateur linéaire est de type RST : c'est le cas, par exemple, des régulateurs LQG, qui relèvent de la théorie de la commande optimale). Avec un régulateur RST, la dynamique de poursuite et celle de régulation peuvent être différentes, la première étant généralement choisie plus rapide que la seconde, ce qui fait un des gros avantages de ce type de correcteur.

1.3.3 – Observateur d'état

En automatique, un observateur d'état est une extension d'un modèle représenté sous forme de représentation d'état. Lorsque l'état d'un système n'est pas mesurable, on construit un observateur qui permet de reconstruire l'état à partir d'un modèle du système dynamique et des mesures d'autres grandeurs.

La théorie de l'observateur d'état déterministe a été introduite dans les années soixante par Luenberger pour les systèmes linéaires. Kalman a également formulé un observateur en considérant un système linéaire stochastique (le calcul stochastique est l'étude des phénomènes aléatoires dépendant du temps, à ce titre il est une extension de la théorie des probabilités). Pour les systèmes non-linéaires, l'observation reste un domaine où la recherche est très active, mais l'utilisation la plus commune est l'emploi d'un filtrage de Kalman étendu (EKF).

Architecture avec observateur :





1.3.4 – Commande a priori, régulation par action anticipative

Dans le domaine des entraînements, bien des systèmes actuels comportent des régulateurs comprenant un ou plusieurs termes anticipatifs afin de compenser des écarts de poursuites pendant les phases d'accélération, des frottements sec ou visqueux, etc.

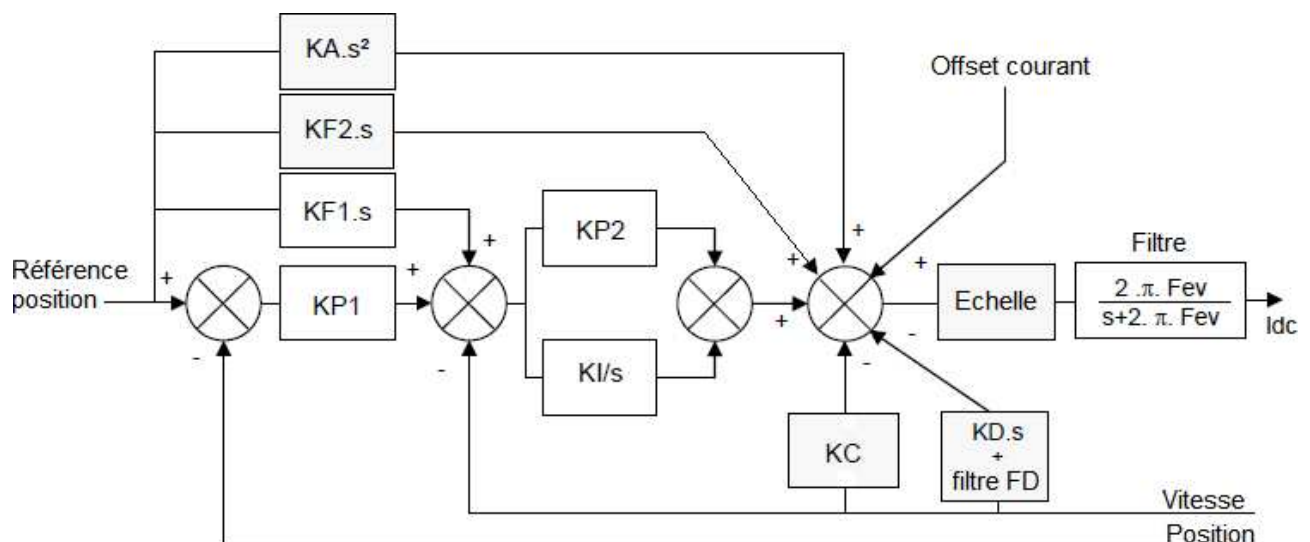
Les variateurs INFRANOR comportent de tels termes (v. **KF1**, **KF2**, **KA**).

Certains contrôleurs d'axes comportent une régulation digitale moderne (structure RST par placement des pôles). Les erreurs de traînée pouvant se révéler très pénalisantes par exemple dans les opérations d'interpolation, sont entièrement compensées grâce à des techniques de commande a priori élaborées. L'optimisation des axes se fait au travers d'une procédure d'identification de la fonction de transfert afin de créer un modèle quantifiant la dynamique du système. Un régulateur classique PID est aussi implémenté pour les modes de régulation de type consigne de vitesse au travers d'un bus de terrain.

Chapitre 2 – Boucle de position et boucle de vitesse

2.1 – Structure du régulateur de la série CD1

Les variateurs INFRANOR de la série CD1 comportent un régulateur de position et de vitesse très performant englobant les principes d'un PID et d'une régulation par action anticipative. Un modèle dynamique de la boucle de position est généré par un modèle de calcul qui est comparé avec la valeur réelle de l'erreur de la boucle de position, ceci afin de contrôler au mieux l'erreur de poursuite. La figure ci-dessous décrit la structure du régulateur de position et de vitesse de variateur. Le régulateur de courant (commande vectorielle à régulateur PI) n'est pas décrit dans ce document.



2.2 – Définition des signaux

- **Référence position** : référence issue du générateur de trajectoire interne ou externe
- **Vitesse** : signal de mesure de la vitesse du moteur (résolveur, codeur)
- **Position** : signal de mesure de la position (capteur moteur ou feedback externe)
- **Idc** : signal de sortie de la boucle de vitesse (erreur vitesse), référence de courant



2.3 – Définition des grandeurs principales agissant sur les gains des régulateurs

Nos variateurs comportent une régulation de type cascade, de la génération de la trajectoire au pilotage du courant dans le moteur.

Les trois boucles de régulation sont les suivantes :

- Boucle de courant, fréquence de coupure de 1000Hz à 45° de marge de phase
- Boucle de vitesse, bande passante maximale de 100Hz à 45° de marge de phase
- Boucle de position interne (CD1-a en axe électrique ou pas-à-pas, CD1-k, CD1-pm), période d'échantillonnage de 0.5ms

Les grandeurs principales régissant les gains des boucles sont les suivantes :

- Boucle de courant : **inductance moteur**, PWM, tension d'alimentation, calibre de courant variateur
- Boucle de vitesse : **inertie totale**, rigidité de la chaîne cinématique, caractéristiques variateur
- Boucle de position : **résolution de mesure**, dynamique de l'axe

2.4 – Définition des termes du régulateur de position / vitesse

Les principaux paramètres sont calculés pendant la procédure d'auto-tuning. Les valeurs dépendent de la bande passante et du type de filtre sélectionnés. Elles peuvent ensuite être modifiées par l'utilisateur. La valeur de l'échelle des gains (scaling gain) est aussi calculée.

Proportionnal position gain (KP1) : définit le gain proportionnel qui agit sur l'erreur de position.

Feedforward speed 1 gain (KF1) : définit l'amplitude du terme anticipatif correspondant à la consigne de vitesse. Ce terme permet de réduire l'erreur de poursuite pendant les phases d'accélération et de décélération du moteur. Sa valeur est mise à 1 après la procédure d'auto-tuning si une erreur de poursuite minimale est exigée.

Feedforward speed 2 gain (KF2) : définit l'amplitude du terme anticipatif correspondant aux frottements visqueux. Ce terme permet de réduire les effets des frottements visqueux pendant les phases d'accélération et de décélération du moteur. La valeur de gain est égale à la valeur de gain d'amortissement + le terme de compensation des frottements visqueux. Après la procédure d'auto-tuning, le gain de vitesse anticipatif 2 est défini comme égal à la valeur de gain d'amortissement si une erreur de poursuite minimale est exigée. Le terme de compensation des frottements visqueux peut être calculé en mesurant le rapport courant / vitesse à différentes valeurs de vitesse du moteur.

Feedforward acceleration (KA) : définit l'amplitude d'accélération du gain anticipatif correspondant à la consigne d'accélération. Ce terme permet de réduire l'erreur de poursuite pendant les phases d'accélération et de décélération du moteur. Sa valeur est calculée pendant la procédure d'auto-tuning si une erreur de poursuite minimale est exigée.

Proportional speed gain (KP2) : définit le gain proportionnel du régulateur qui agit sur l'erreur de vitesse.

Integral speed gain (Ki) : définit le gain intégral du régulateur qui agit sur l'erreur de vitesse.

Damping gain (KC) : définit le gain proportionnel du régulateur qui agit uniquement sur le signal de vitesse.

Derivative gain (KD) : définit le gain dérivatif du régulateur qui agit sur l'erreur de vitesse. Ce gain ne peut être déterminé par la procédure d'auto-tuning !

Derivative gain filter (FD) : définit la constante de temps du filtre du premier ordre qui agit sur le gain dérivé. Ce paramètre ne peut être déterminé par la procédure d'auto-tuning !

Speed error low-pass filter (Fev) : définit la fréquence de coupure à -3dB du filtre du 1^{er} ou 3^e ordre qui agit sur la consigne de courant (Idc).



2.5 – Options de la procédure d'auto-tuning

La procédure d'auto-tuning identifie les caractéristiques du moteur et de la charge et calcule les gains du régulateur. Au cours de la procédure, différents choix sont accessibles à l'utilisateur.

Time Interval for Speed Measurement (speed measurement filter) : le choix de l'intervalle de temps pour la mesure de vitesse (0.5, 1 ou 2ms) permet de sélectionner la valeur de résolution de la mesure de vitesse en fonction de la valeur de résolution du capteur de position:

$$\text{Résolution de vitesse (t/min)} = 6000 / \text{résolution capteur} / \text{intervalle de temps (ms)}$$

Plus la valeur de l'intervalle est élevée, meilleure est la résolution mais aussi plus les gains de la boucle d'asservissement sont faibles en raison d'un temps de mesure plus élevé.

Antiresonance filter : le choix du filtre anti-résonance est nécessaire en cas de fort bruit dans le moteur dû à l'élasticité de couplage entre le moteur et la charge, ceci surtout à l'arrêt. Cette méthode est applicable souvent lorsque l'on entraîne une inertie relativement importante via une courroie.

Max. stiffness filter : le choix du filtre de raideur maximale permet d'obtenir une raideur maximale sur l'axe du moteur par rapport aux perturbations de couple. Cependant, ce choix n'est possible que s'il n'y a aucune résonance induite par l'élasticité de la chaîne cinématique. **Ne pas utiliser ce filtre avec une régulation en vitesse P uniquement, les vitesses effectives sont divisées par deux par rapport aux vitesses de consigne !**

Bandwidth : le choix de la bande passante de la boucle de vitesse définit la valeur de fréquence de coupure de la réponse de fréquence de la boucle fermée (Low=50Hz, Medium=75Hz, High=100Hz).

Minimum following error : ce choix permet d'obtenir une poursuite précise de la valeur de référence de position pendant tout le déplacement du moteur. Dans ce cas, toutes les valeurs de gain anticipatif sont calculées.

Minimum position overshoot : ce choix permet d'obtenir un positionnement sans le moindre dépassement de la position finale. Dans ce cas, toutes les valeurs de gain anticipatif sont mises à 0 et la position du moteur est déphasée par rapport à la valeur de référence de la position pendant tout le déplacement.



Chapitre 3 – Réglage d'un variateur INFRANOR de la gamme CD1

3.1 – Exemple de réglage d'une boucle de vitesse PI

Le régulateur le plus couramment utilisé sur un variateur de vitesse est du type PI. L'influence de l'inertie ramenée au moteur agit proportionnellement sur la valeur des gains du régulateur. Toutefois, le réglage correct de la boucle de vitesse peut s'avérer ardu car passablement de problèmes peuvent se présenter. En voici une liste non-exhaustive :

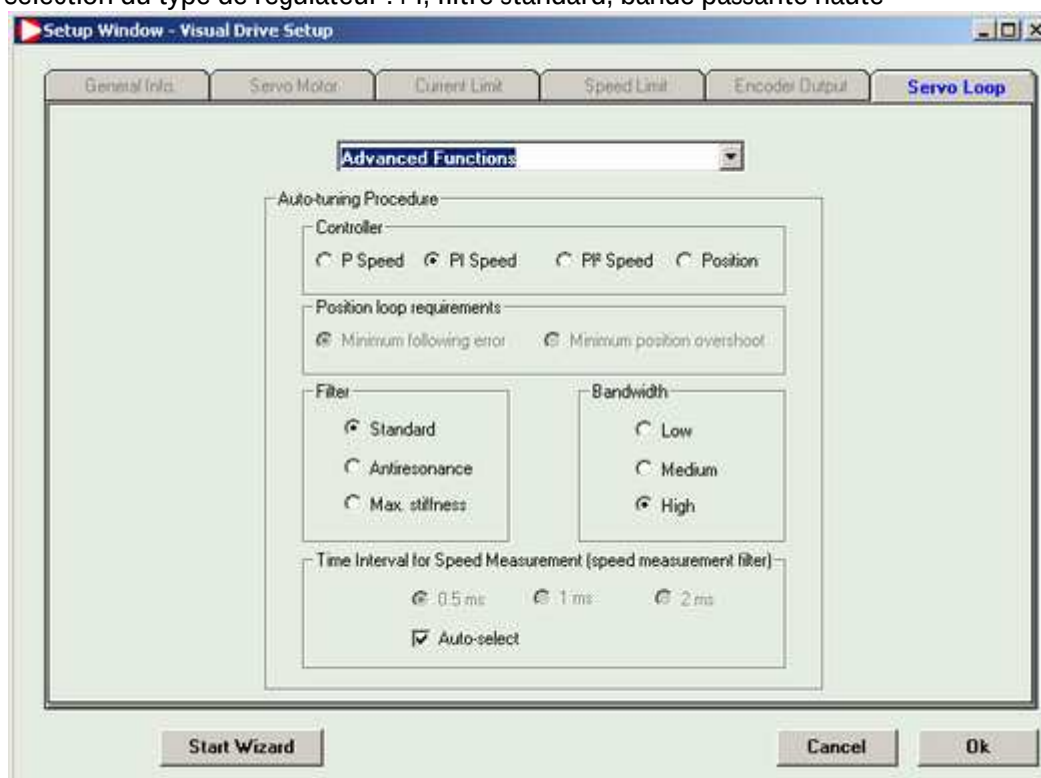
- Fort rapport d'inertie charge / inertie moteur
- Forte variation de ce rapport (axe à vide ou avec charge)
- Axe vertical non-compensé
- Présence d'élasticité (courroie, accouplement élastique, faible rigidité du châssis)
- Présence de jeu (réducteur ou pignon d'entraînement à grand jeu)
- Frottements importants, contraintes élevées (écrou de vis trop précontraint, réducteur à vis et couronne sans jeu)
- Mode mécanique défavorable (fréquence de résonance <100Hz)
- Combinaison de ces différents facteurs

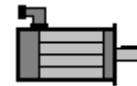
L'exemple suivant va démontrer l'influence directe de l'inertie ramenée au moteur (simple poulie) sur le comportement du régulateur.

Matériel : variateur CD1-a 230/10.5, moteur BS072A (inertie rotor $0.51 \times 10^{-4} \text{Kgm}^2$), poulie alu d'une inertie de $2.77 \times 10^{-4} \text{Kgm}^2$.

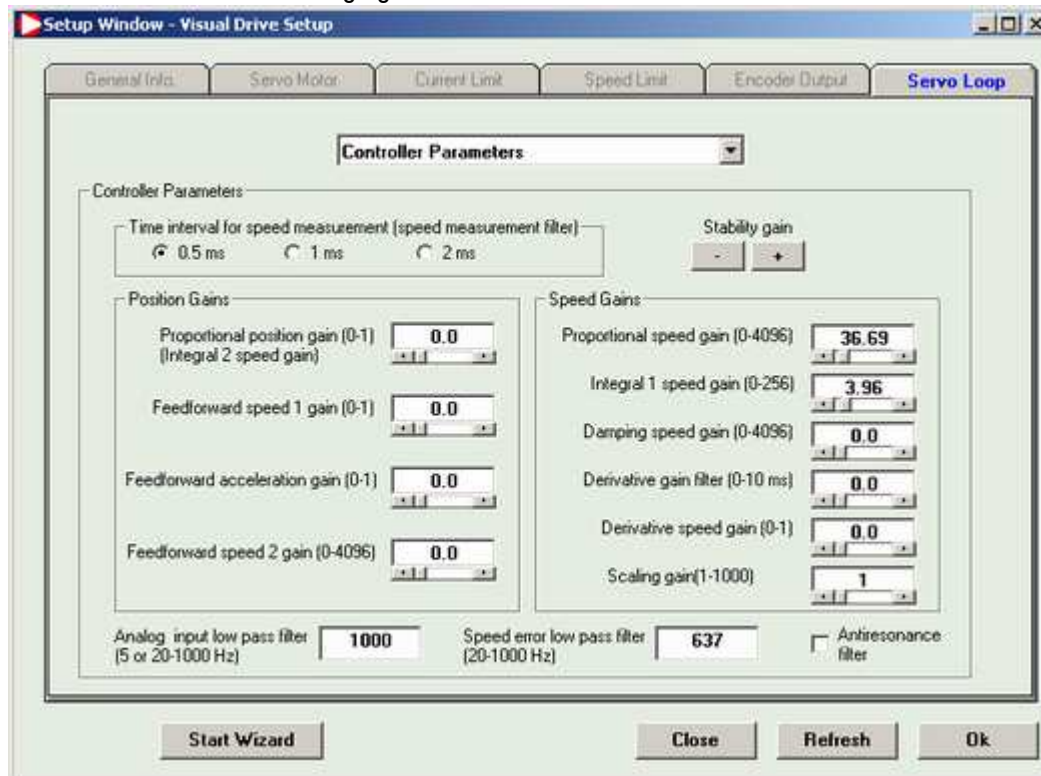
3.1.1 – Réglage avec logiciel VDSetup

Sélection du type de régulateur : PI, filtre standard, bande passante haute

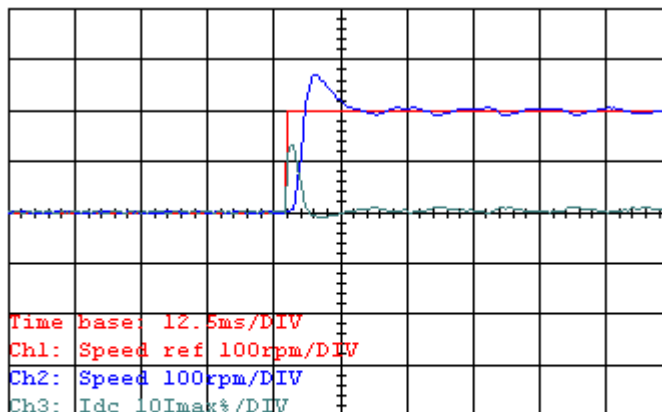




Paramètres issus de l'autoréglage moteur à vide :



Réponse à un saut indiciel de consigne de 200 t/min moteur à vide :



BS072A 0.51Kgcm2 loadless step 200rpm

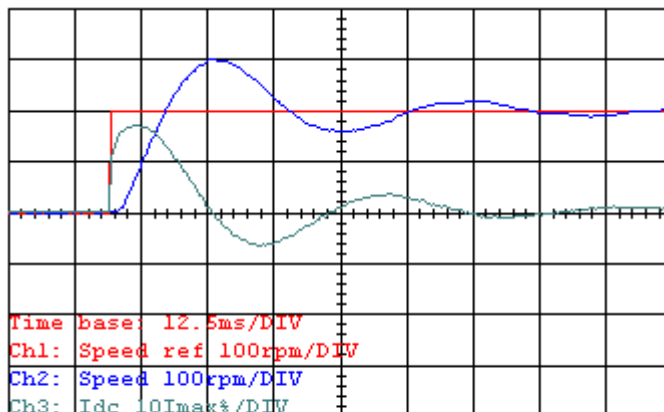
Autotuning PI standard high autoselect

P=36.69 I=3.96 Low pass filter=637Hz

On constate un dépassement de la vitesse rapidement amorti, le réglage est donc correct.

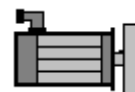


On rajoute l'inertie sur le moteur (5.43 x celle du moteur), paramètres identiques :

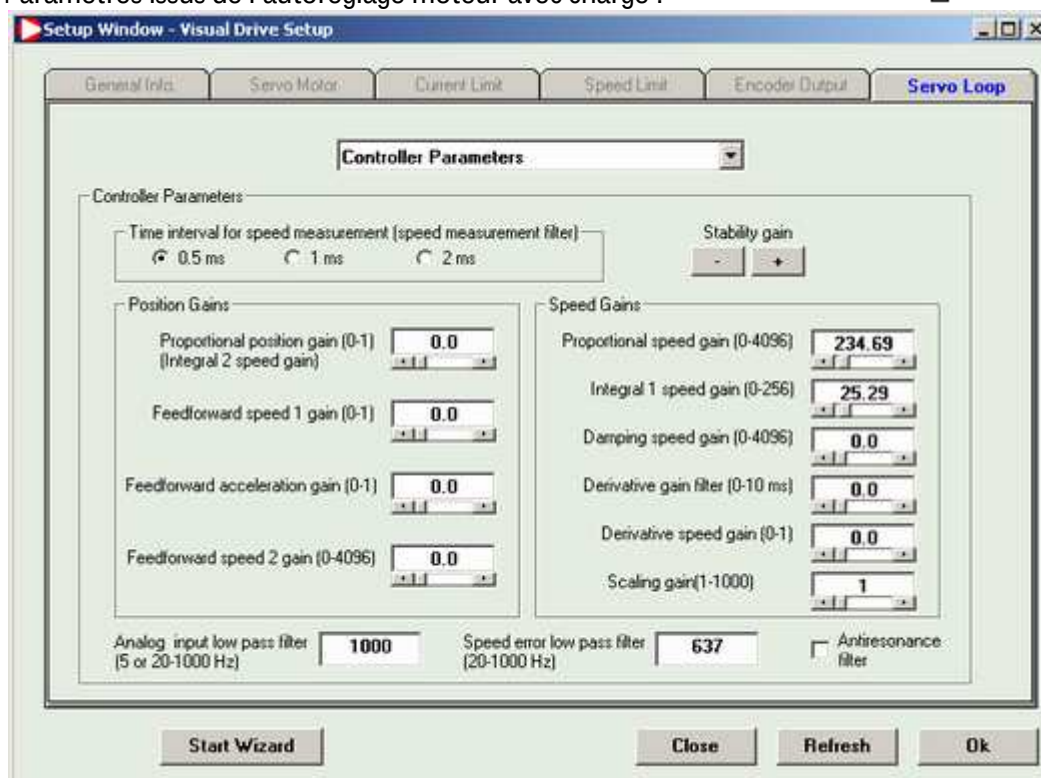


BS072A 0.51Kgcm2 loadless step 200rpm
 Load 2.77Kgcm2
 Same regulator parameters
 P=36.69 I=3.96 Low pass filter=637Hz

On constate un fort allongement du temps de stabilisation de la vitesse, le gain est donc trop mou. Un nouveau réglage est nécessaire. Le gain théorique que l'on doit obtenir avec la fonction d'autoréglage devrait augmenter proportionnellement avec l'inertie, soit 5.43 x la valeur obtenue moteur à vide plus cette valeur (gain P moteur à vide = 36.69, soit $36.69 + (5.43 \times 36.69) = 235.91$).



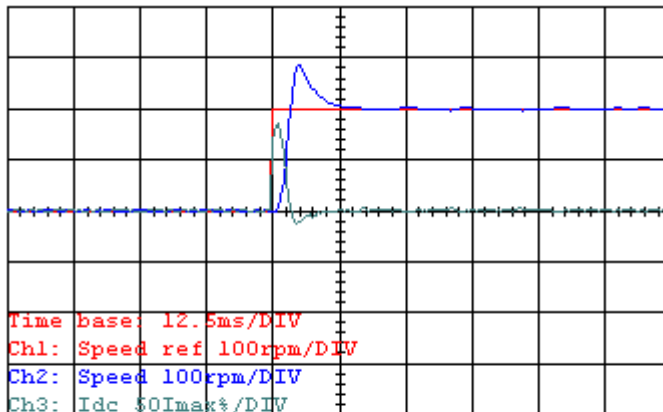
Paramètres issus de l'autoréglage moteur avec charge :



Le gain obtenu est conforme au calcul théorique, une inertie pure rigidement accouplée au moteur va agir proportionnellement sur les gains du régulateur.



Réponse à un saut indiciel de consigne de 200 t/min moteur avec charge :



BS072A 0.51Kgcm2 loadless step 200rpm
 Load 2.77Kgcm2
 Autotuning PI standard high autoselect
 P=234.69 I=25.29 Low pass filter=637Hz

On retrouve un comportement similaire avec le moteur à vide mais avec une ondulation résiduelle plus faible lissée par l'inertie supplémentaire.

Note : il est important de surveiller le courant (**Idc** et/ou **Iq**) lors du réglage, celui-ci ne doit jamais être au maximum du calibre du variateur ou de la limitation **Imax** pour assurer le bon fonctionnement de la régulation.

3.2 – Exemple de réglage d'une boucle de position / vitesse

Deux types d'autoréglage vont être abordés :

- Réglage des paramètres pour obtenir un minimum de dépassement lors du positionnement, ce qui implique une grande erreur de poursuite,
- Réglage des paramètres pour obtenir une erreur de poursuite minimale, ce qui peut impliquer un dépassement lors du positionnement.

L'autoréglage avec dépassement minimal sera adéquat pour des applications où l'écart entre la référence et la position réelle lors des différentes phases du mouvement n'a que peu d'importance, par exemple sur la majorité des axes robotiques indépendants de type pick & place mais où une grande douceur de positionnement est requise. Les différents termes anticipatifs ne seront pas calculés.

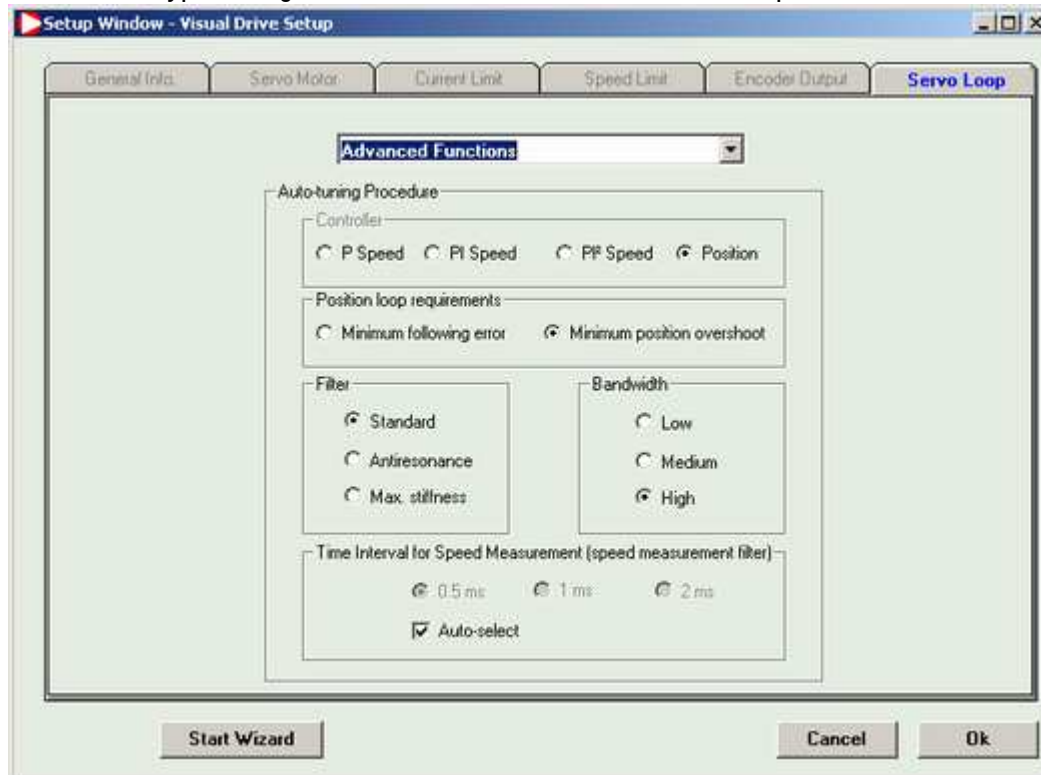
L'autoréglage avec erreur de poursuite minimale calculera et activera les différents termes anticipatifs. Ce mode sera retenu pour les applications où une erreur minimale de poursuite entre la référence issue du générateur de trajectoire et la position réelle de l'axe est exigée. En fonction de la chaîne cinématique et de la dynamique, un dépassement pourra apparaître lors du positionnement. En fonction du type de mesure de position (directement par le capteur du moteur ou second feedback sur la charge), il sera nécessaire d'intervenir sur les différents paramètres du régulateur.

Dans cet exemple, nous allons simplement reprendre le moteur et la poulie de la manipulation précédente. Un seul feedback (le résolveur du moteur) est employé. Le variateur est un positionneur CD1-pm 230/10.5. Le profil de position est du type S (interpolation bicubique) garantissant une translation plus douce qu'avec le profil de type trapèze.

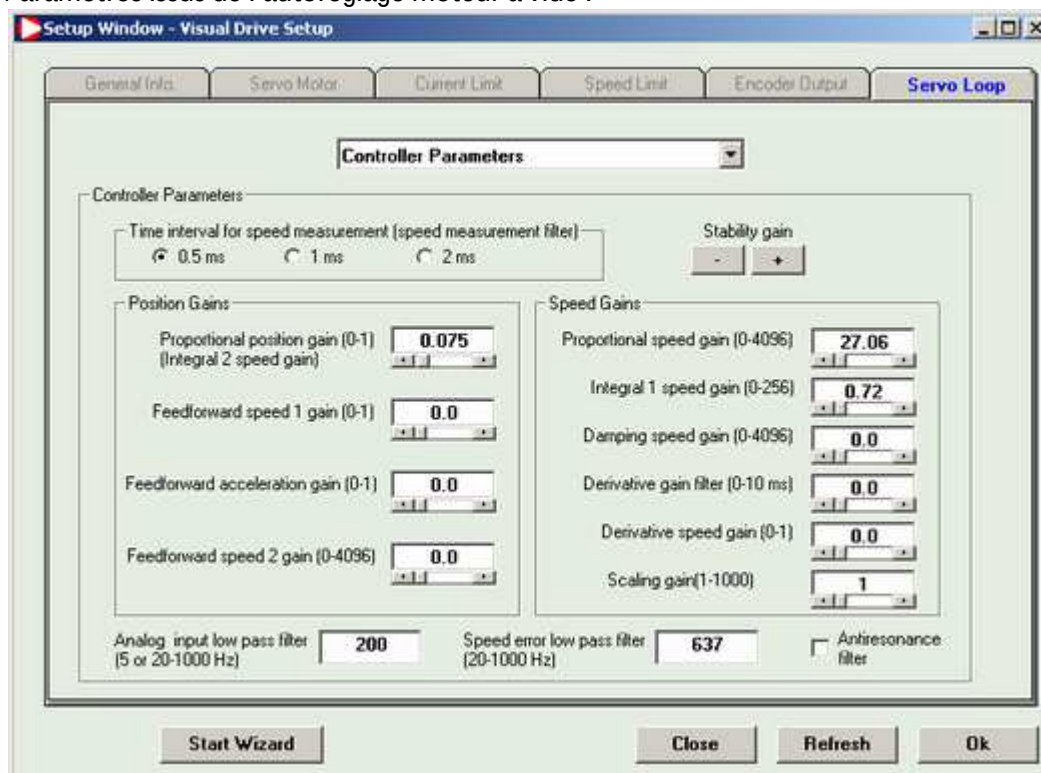
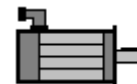


3.2.1 – Réglage avec logiciel VDSetup – dépassement minimal

Sélection du type de régulateur : Position, filtre standard, bande passante haute

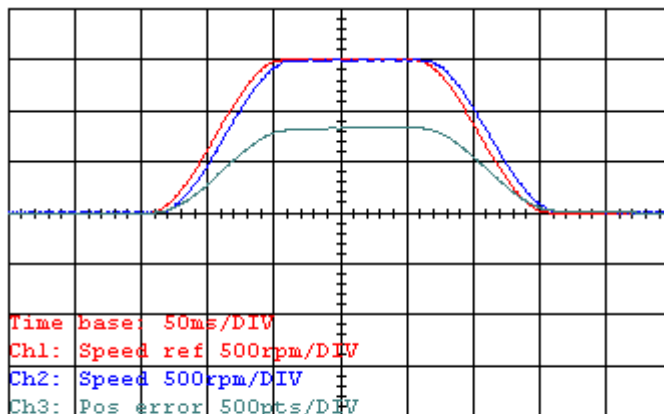


Paramètres issus de l'autoréglage moteur à vide :



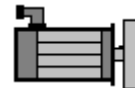


Analyse de la trajectoire :

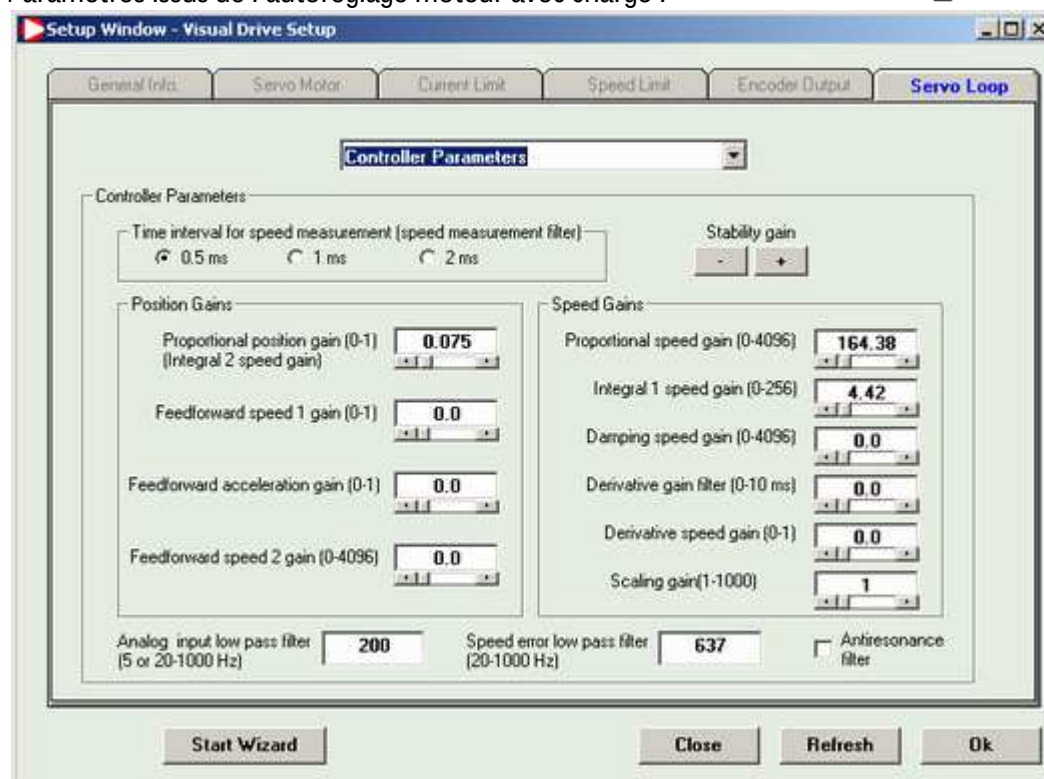


BS072A loadless pos. sequence
Autotuning Position standard high
Minimum overshoot selected

On constate un écart net entre la référence en rouge et la mesure en bleu. L'erreur de position est relativement importante pendant toutes les phases de la translation. Il n'y a par contre aucun dépassement de la position finale.



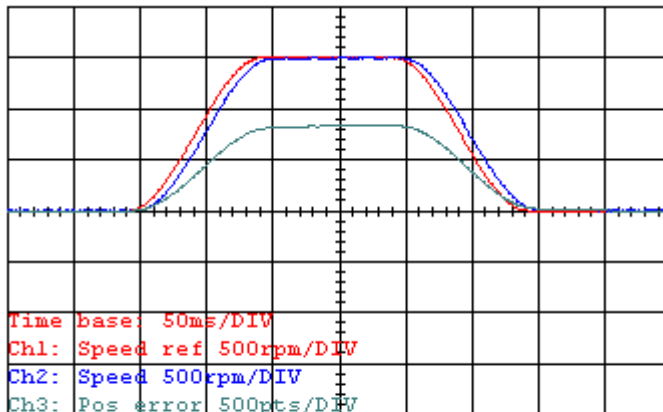
Paramètres issus de l'autoréglage moteur avec charge :



On ne constate qu'une augmentation des paramètres de gain de la boucle de vitesse d'un ordre proche de l'augmentation de l'inertie entraînée.



Analyse de la trajectoire :



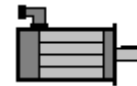
BS072A with load pos. sequence
Autotuning Position standard high
Minimum overshoot selected

La réponse est similaire à celle obtenue moteur à vide.

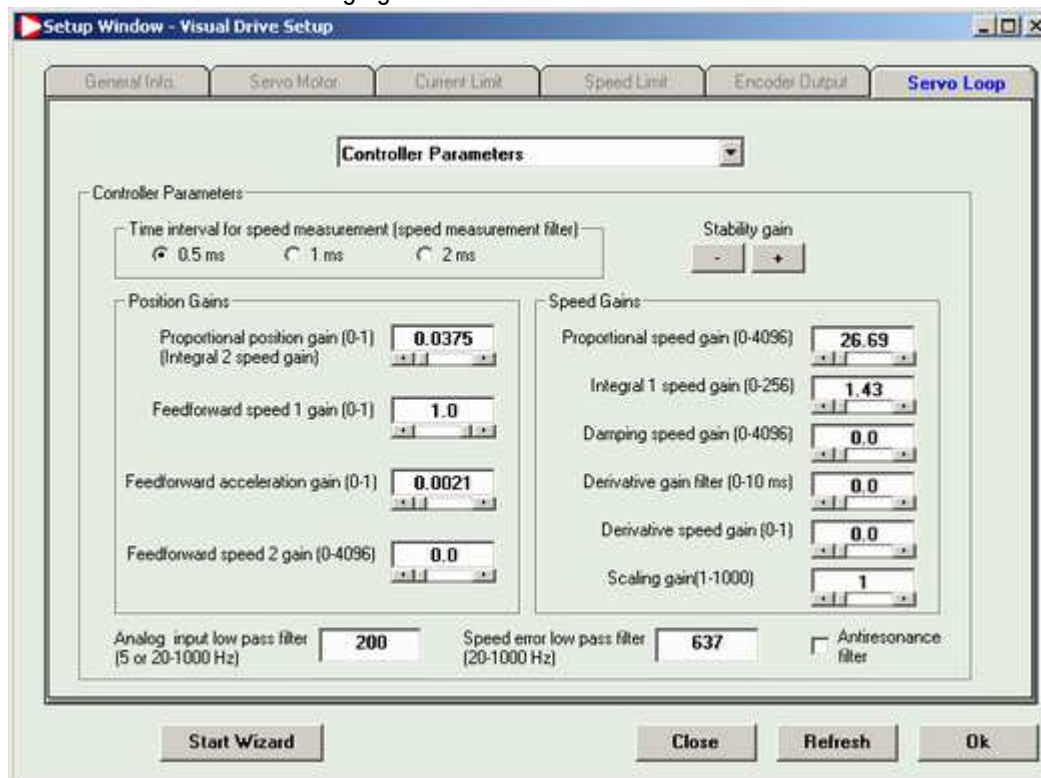
3.2.2 – Réglage avec logiciel VDSetup – erreur de poursuite minimale

Sélection du type de régulateur : Position, filtre standard, bande passante haute

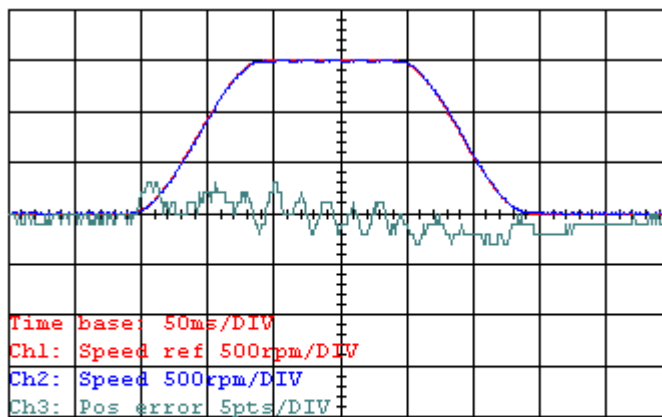




Paramètres issus de l'autoréglage moteur à vide :

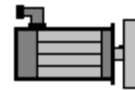


Analyse de la trajectoire :

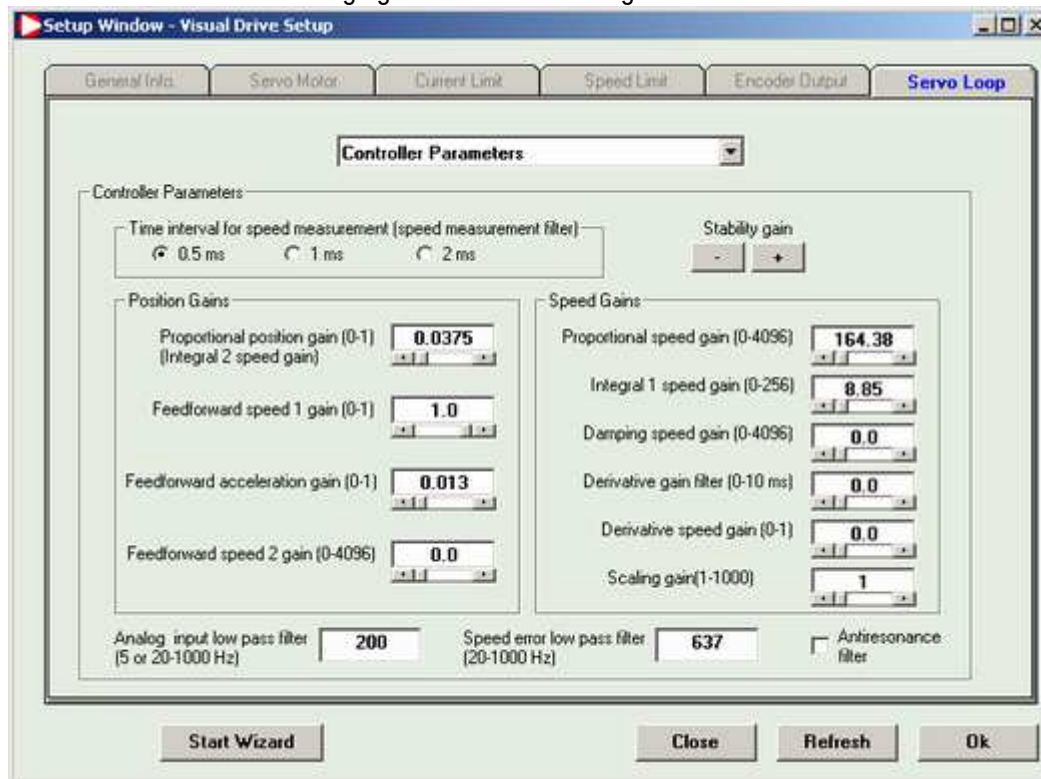


BS072A loadless pos. sequence
Autotuning Position standard high
Minimum following error selected

La référence et la mesure sont bien superposées. On constate un petit dépassement de la position finale. L'erreur de position est très faible pendant tout le mouvement.

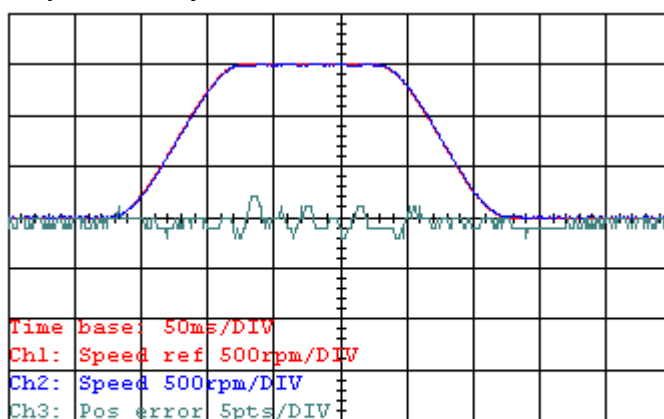


Paramètres issus de l'autoréglage moteur avec charge :



On constate une augmentation des paramètres de gain de la boucle de vitesse et une légère baisse de l'amplitude d'accélération du gain anticipatif correspondant à la consigne d'accélération.

Analyse de la trajectoire :



BS072A with load pos. sequence
 Autotuning Position standard high
 Minimum following error selected

La réponse est similaire à celle obtenue moteur à vide.



3.3 - Elasticité des chaînes cinématiques et dynamique appropriée

Les applications actuelles font de plus en plus appel à de fortes dynamiques, notamment dans le domaine des machines de production de haute précision. Cependant, pour atteindre ces buts, les chaînes cinématiques ainsi que les bâtis de machines doivent être les plus rigides possible afin de pousser vers le haut les différents modes propres en présence. Les fréquences basses de forte amplitude sont les plus handicapantes car elles génèrent de fortes perturbations dans le pilotage des axes. Afin d'éviter « d'accrocher » ces fréquences, il convient de limiter au maximum les perturbations induites par les caractéristiques des entraînements (couple d'engrenages des moteurs, erreur des capteurs, etc.) et d'adapter la dynamique (accélérations et réponses des axes) en fonction de la réponse mécanique des chaînes cinématiques en présence. Si la stabilité exige une forte baisse de dynamique et que celle-ci s'avère incompatible avec le cahier des charges, il faudra alors revoir le concept.

Point important à ne jamais perdre de vue : dans une chaîne cinématique, c'est presque toujours le plus petit diamètre entraîné qui présente la plus faible rigidité en torsion. Si, par exemple, on entraîne une vis à billes d'un diamètre de 20mm avec un arbre moteur de 11mm de diamètre, c'est ce dernier qui représentera l'élément le plus sensible en torsion, donc le plus élastique et le plus susceptible d'engendrer des instabilités.

3.3.1 – Estimation de la dynamique à appliquer

Le moyen le plus simple pour estimer au mieux la dynamique appropriée à adopter sur une chaîne cinématique donnée consiste en la manipulation suivante :

- Ouvrir la boucle de position,
- Choisir un régulateur de vitesse de type PI,
- Adapter les gains afin qu'aucune instabilité n'apparaisse moteur asservi à vitesse nulle,
- Appliquer de petits échelons de consigne, d'abord sans rampe d'accélération et sans saturation, puis analyser la réponse de l'axe : si de fortes perturbations sont visibles lors de l'accélération, il faudra alors progressivement augmenter le temps d'accélération jusqu'à ce que la différence entre la référence et la mesure de vitesse devienne acceptable. On connaîtra alors l'accélération maximale à ne jamais dépasser.

Il est clair que cette manipulation ne doit s'effectuer que lorsque les conditions de sécurité pour les personnes et le matériel sont garanties afin d'éviter tout risque intempestif. De plus, il faut s'assurer auparavant qu'aucun blocage ou frottement excessif ne vienne perturber la manipulation.

3.3.2 - Exemple d'une chaîne cinématique élastique

La manipulation effectuée en laboratoire a permis de mettre en évidence l'adaptation de la dynamique à une caractéristique propre d'une chaîne cinématique relativement élastique avec une inertie conséquente.



Représentation de la manipulation :



Matériel utilisé :

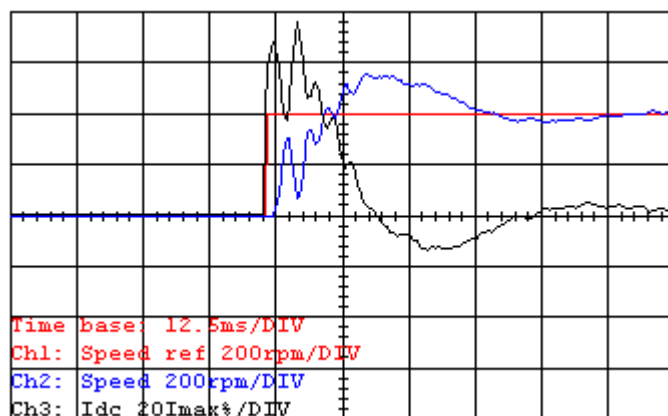
- Moteur BS072A,
- Variateur CD1-a 230/10.5
- Courroie crantée standard, denture trapézoïdale, pas de 5mm, largeur de 10mm, longueur totale de 600mm,
- Poulie d'entraînement fixée au moteur représentant environ 1 x l'inertie du rotor,
- Poulie entraînée représentant environ 10 x l'inertie du rotor.

Réglages :

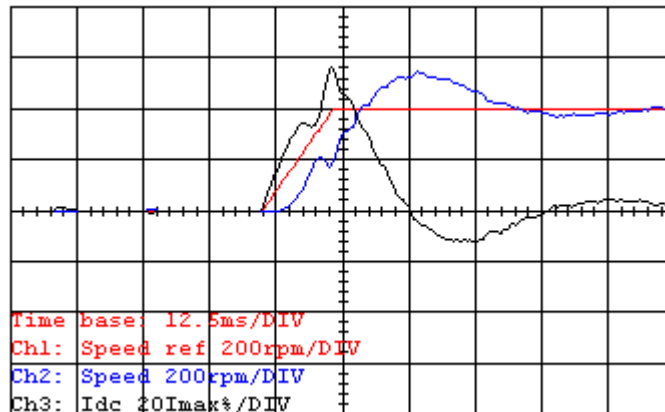
- Autotuning PI medium,
- Vitesse maximale de 3000 t/min,
- Tension de la courroie standard (on peut tourner le brin de 90° au milieu sans effort).

Mesures :

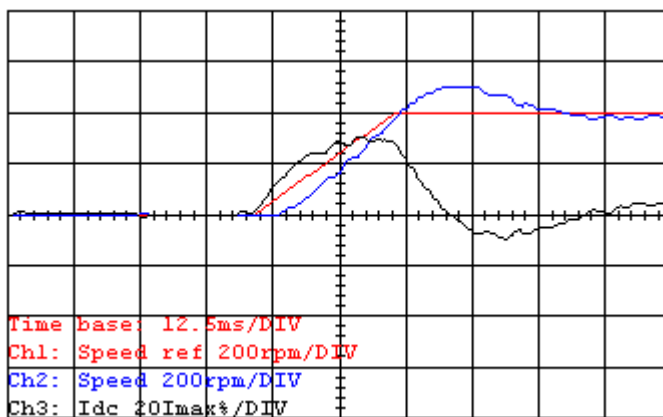
1 : saut indiciel de consigne de 400 t/min :



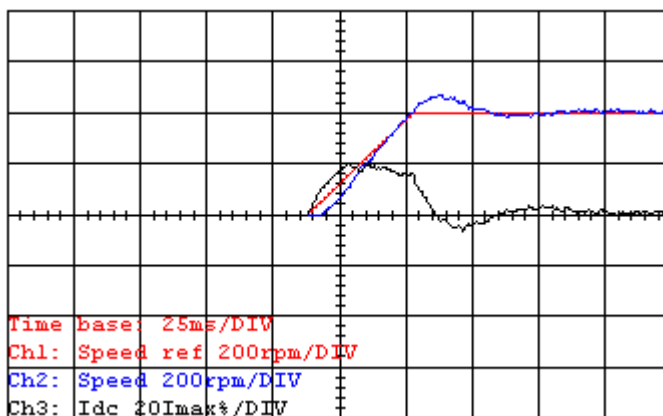
On constate de fortes perturbations pendant toute la phase de montée en vitesse jusqu'à l'overshoot. La fréquence « accrochée » est d'environ 250 Hz :

**2 : consigne de 400 t/min, rampe de 13.33 ms (soit 0.1s de 0 à 3000 t) :**

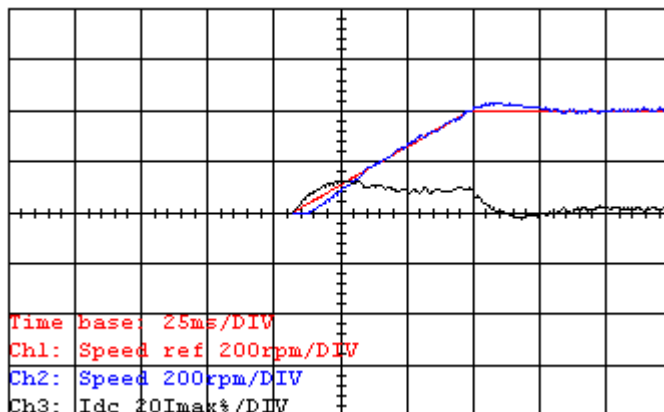
On améliore sensiblement le comportement, mais il subsiste encore une perturbation bien visible.

3 : consigne de 400 t/min, rampe de 26.66 ms (soit 0.2s de 0 à 3000 t) :

Le comportement commence à devenir acceptable.

4 : consigne de 400 t/min, rampe de 40 ms (soit 0.3s de 0 à 3000 t) :

On peut considérer ici le comportement comme acceptable pour cette application.

**5 : consigne de 400 t/min, rampe de 66.66 ms (soit 0.5s de 0 à 3000 t) :**

Avec une telle rampe, le comportement est bon avec un overshoot pratiquement amorti en une oscillation.

3.3.3 - Analyse

La chaîne cinématique de cet exemple est loin du cas idéal car l'inertie ramenée au moteur via la courroie dépasse un rapport de 10, ce qui est trop important pour une application de haut niveau mais par contre très courant dans maintes applications générales de handling par exemple.

Elle a toutefois le mérite de mettre en évidence la nécessité de l'adaptation de la dynamique à la rigidité de la chaîne cinématique si l'on veut garantir la stabilité des asservissements.

On peut, dans certains cas de transmission à courroie où l'inertie ramenée au moteur n'est pas trop importante, ajouter un peu de gain dérivé (KD) manuellement pour améliorer la stabilité axe asservi à l'arrêt. Attention toutefois, l'apport d'un gain dérivé engendre une sorte de bruit blanc souvent perceptible à l'oreille : dans ce cas, on tentera de jouer avec le filtre de gain dérivé (FD) pour trouver le meilleur compromis.

3.3.4 – Note concernant le choix des accouplements

Il existe plusieurs types d'accouplements mécaniques, certains mal adaptés aux entraînements, surtout lorsque l'on recherche une grande stabilité d'asservissement et un comportement dynamique élevé, d'autres cependant plus spécifiques aux entraînements asservis.

Il faut absolument éviter les accouplements rigides à la torsion à fente hélicoïdale en alu ou inox qui ont la particularité d'engendrer des oscillations résultantes de leur mode propre lors de translation de couple. Ces oscillations peuvent provoquer la rupture de l'accouplement.





Les accouplements inox à soufflet sont largement utilisés et conviennent bien aux entraînements à condition qu'ils soient bien dimensionnés. Les accouplements élastomères donnent souvent de très bons résultats, mais avec un élastomère de dureté élevée.



En conclusion

L'ajustement des paramètres de régulation ne fait pas seulement appel aux notions théoriques. Un modèle mathématique fiable reste certes important, mais une approche empirique permet très souvent de résoudre de complexes cas d'asservissement.

A chaque nouveau scénario, le technicien de mise en route verra son bagage de connaissances évoluer et cela lui permettra d'appréhender toute nouvelle application avec un maximum de confiance afin d'appliquer le choix de réglage le plus judicieux.

© D-MOTION CONSULTING 2026 / Daniel Cueroni

Sources

- INFRANOR Group
- EPFL
- Encyclopédies libres