



DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et systèmes

THEME

Intitulé du mémoire

**Commande d'un système AVR (Automatic Voltage Regulator)
par un régulateur PID basé sur la commande par mode glissant**

Présenté par le binôme :

- Mellouk Salima
- Taieb Mohammed Wassim

Devant le jury :

- | | | |
|-------------------|-----|-----------|
| - Djabri Riadh | MCB | Président |
| - Lemita Abdallah | MCB | Encadrant |
| -Amieur Toufik | MCA | Examineur |

2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative floral element consisting of a central flower with several petals and a stem with leaves, positioned at the beginning of the calligraphic text.

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail et a permis que nous soyons ce que nous sommes aujourd'hui.

Nous adressons nos sincères remerciements à Dr. Lemita Abdallah, pour avoir acceptée d'encadrer ce travail, et pour ses conseils et ces précieuses orientations, sa patience, et son accompagnement tout le long de notre recherche.

Nous tenons tout particulièrement à remercier vivement les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer ce modeste travail : Dr. Djebri Riadh, et Dr. Amieur Toufik.

Nous remercions toutes les personnes de l'université de Cheikh Larbi Tebessi.

Enfin, Nous présentons aussi nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études.

A toute ma famille pour leur amour, leur confiance, leurs conseils qui m'ont permis de réaliser les études pour lesquelles je me destine et par conséquent ce mémoire.

À mes chers amis, qui ont été ma source de réconfort, de rires et de ressourcement dans les moments de doute et de fatigue. Votre amitié a été le refuge précieux dans cette aventure.

Et à tous ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi, m'ont soutenu et m'ont encouragé à poursuivre mes rêves. Cette réalisation est autant la vôtre que la mienne.

Mellouk Salima

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études.

À mes chers amis et collègues, qui ont été ma source de réconfort, de rires et d'encouragement dans les moments de doute et de fatigue. Votre amitié a été le refuge précieux dans cette aventure.

Et à tous ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi, m'ont soutenu et m'ont encouragé à poursuivre mes rêves. Cette réalisation est autant la vôtre que la mienne.

Taieb Mohammed Wassim

Table des Matière

Table des Matière	i
Liste des Figures	iii
Liste des Tableaux.....	iv
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Commande par mode glissant.....	4
I-1) Introduction	4
I-2) Historique.....	5
I-3) Commande à structure variable	6
I-4) Principe de la commande par mode glissant	6
I-5) Etapes de construction de la commande par mode glissant	8
I-5-1) Choix de la surface de glissement.....	8
I-5-2) Etablissement de la loi de commande	9
I-5-2-1) Commande équivalente <i>ueq</i>	9
I-5-2-2) Commande discontinue.....	10
I-5-3) Etablissement des conditions de convergence.....	10
I-6) Phénomène de Chattering	11
I-6-1) Solutions pour atténuer le phénomène Chattering.....	12
I-7) Exemple démonstratif.....	14
I-8) Conclusion.....	21
Chapitre II : Commande du système AVR (Régulateur de tension automatique)	22

II-1) Introduction	22
II-2) Modélisation mathématique d'un AVR	23
II-3) Régulateur PID classique.....	27
II-3-1) Rôle des paramètres k_p , k_i et k_d	28
II-4) Commande par mode glissant du système AVR	30
II-5) Régulateur PID basée sur la commande mode glissant du système AVR	33
II-6) Conclusion	35
Chapitre III : Résultats et simulation.....	36
III-1) Résultats de simulation et discussion	36
III -2) régulateur PID.....	37
III -3) Commande par mode glissant	41
III-4) Régulateur PID basé sur la commande par mode glissant	47
III-5) Conclusion.....	53
Conclusion générale	54

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I .1 : Principe de la commande par mode glissant 7
Figure I .2 : Fonction signe..... 10
Figure I .3 : Phénomène de Chattering 12
Figure I .4 : Fonction saturation 13
Figure I .5 : Fonction sigmoïde. 13
Figure I .6 : Fonction tangente hyperbolique 14
Figure I .7 : Evolution de x_1 et x_2 16
Figure I .8 : Plan de phase du système 17
Figure I .9 : Evolution de x_1 et x_2 17
Figure I .10 : Plan de phase du système 18
Figure I .11 : Variable de commande 19
Figure I .12 : Evolution de x_1 et x_2 20
Figure I .13 : Plan de phase du système 20
Figure I .14 : Variable de commande u 21

Chapitre II

Figure II .1 : Model simplifié d'un AVR 24
Figure II .2 : Fonction de transfert du modèle AVR 25
Figure II .3 : schéma block de régulateur PID 28
Figure II .4 : Commande par mode glissant d'un régulateur AVR 31
Figure II .5 : Commande hybride d'un régulateur AVR..... 33

Chapitre III

Figure III .1 : Réponse indicielle de la tension de sortie du système AVR sans commande 36
Figure III .2 : Commande du système AVR par un régulateur PID 38
Figure III .3 : Réponse indicielle du système AVR : commande PID 38
Figure III .4 : Variable de commande : régulateur PID 39
Figure III .5 : Réponse indicielle du système AVR : commande PID avec perturbations internes et externe 40
Figure III .6 : Variable de commande : régulateur PID avec perturbations internes et externe..... 40
Figure III .7 : Commande du système AVR par la technique par mode glissant 41
Figure III .8 : Réponse indicielle du système AVR : commande par mode glissant .. 42
Figure III .9 : Les deux phases de la commande par mode glissant 43
Figure III .10 : Variable de commande : commande par mode glissant 44
Figure III .11 : Variable de commande : commande par mode glissant 45
Figure III .12 : Réponse indicielle du système AVR : commande par mode glissant avec perturbations internes et externe..... 46
Figure III .13 : Variable de commande : commande par mode glissant avec perturbations internes et externe 46
Figure III .14 : Commande du système AVR par un régulateur PID basé sur la commande par mode glissant..... 47

Figure III .15 : Réponse indicielle du système AVR : régulateur PID basé sur la commande par mode glissant.....	48
Figure III .16 : Variable de commande : régulateur PID basé sur la commande par mode glissant	48
Figure III .17 : Réponse indicielle du système AVR : régulateur PID basé sur la commande par mode glissant avec perturbations internes et externe.....	49
Figure III .18 : Variable de commande : régulateur PID basé sur la commande par mode glissant avec perturbations internes et externe.....	50
Figure III .19 : Réponse indicielle du système AVR : régulateur PID, commande par mode glissant, et commande hybride.....	51
Figure III .20 : Réponse indicielle du système AVR : régulateur PID, commande par mode glissant, et commande hybride avec perturbations internes et externe.....	51

Liste des Tableaux

Chapitre III

Tableau III .1: Variations paramétriques dans le système AVR	39
Tableau III .2: Tableau de comparaison de performances.....	52
Tableau III .3: Tableau de comparaison de performances avec perturbations	52

Introduction générale

Introduction générale

Un régulateur de tension automatique (AVR) est un dispositif utilisé dans les générateurs dans le but d'ajuster ou maintenir automatiquement la tension d'un générateur à une valeur constante, ce qui signifie qu'il transforme les fluctuations aux niveaux de la tension du générateur en tension constante. La fonction principale des régulateurs de tension automatiques (AVR) est de stabiliser la tension de sortie des générateurs soumis à des charges variables [1]. Ils peuvent également diviser la charge réactive entre les générateurs fonctionnant en parallèle (chute de tension) et aident le générateur à répondre aux surcharges.

Les générateurs non contrôlés ou régulés, c'est-à-dire des générateurs sans régulateur de tension automatique (AVR), sont généralement incapables de répondre suffisamment aux besoins et exigences en énergie de chaque équipement ou appareil connecté au générateur. En effet, certains générateurs non régulés sont incapables de contrôler ou de réguler la tension, de sorte que la tension continue toujours à diminuer quand les demandes d'énergie de la charge continuent d'augmenter.

Si la tension d'un générateur n'est pas maintenue à une valeur constante et fixe, les performances globales du générateur peuvent être négativement affectées et tous les équipements ou machines alimentés par le générateur peuvent également être négativement affectés par le générateur non régulé.

Le régulateur de tension automatique (AVR) est directement lié aux performances et à la longévité de générateur, ainsi qu'aux éléments auxquels le générateur alimente, et garantit que la tension de sortie délivrée sera cohérente dans son courant de charge même si des fluctuations devaient survenir. Cela permet d'atténuer et même d'éliminer les dommages que toute fluctuation peut causer aux appareils, machines et équipements.

La fonction la plus importante des régulateurs de tension automatiques (AVR) est de contrôler automatiquement la tension du générateur et de maintenir la sortie constante dans la plage de niveaux de tension appropriée pour le générateur, quel que soit le courant consommé par la charge [2].

Les AVR aident non seulement à ajuster les tensions à des niveaux sûrs, mais peuvent également fournir une protection contre les surtensions électriques, les pointes et la surcharge du générateur. Comme mentionné, les régulateurs de tension automatique aident également le générateur à réagir et à gérer les surcharges pour éviter les courts-circuits, et peuvent également diviser la charge réactive entre les générateurs fonctionnant en parallèle [3].

Les fonctionnalités de l'AVR [4]:

- * Il contrôle la tension du système et rapproche le fonctionnement de la machine de la stabilité en régime permanent.
- * Il répartit la charge réactive entre les alternateurs fonctionnant en parallèle.
- * Les régulateurs de tension automatique réduisent les surtensions qui se produisent en raison de la perte soudaine de charge sur le système.
- * Il augmente l'excitation du système en cas de défaut afin que la puissance de synchronisation maximale existe au moment de l'élimination du défaut [5].

Pour que le régulateur de tension automatique fonctionne correctement, un contrôleur est nécessaire, car la chute de tension de sortie du générateur est inévitable dans de tels systèmes. Pour ce faire, on va utiliser les techniques de commande suivantes :

1- Un régulateur PID : qui est un contrôleur qui permet de réguler les systèmes automatiques en boucle fermée. Il combine trois actions différentes (proportionnelle (P), intégrateur (I) et dérivateur (D)) pour générer un signal de commande qui permet de maintenir la grandeur régulée à la valeur de consigne souhaitée [6].

2- Commande par mode glissant : qui est une commande non linéaire [7] à structure variable, qu'on peut l'utiliser pour commander les systèmes linéaires, ou non linéaires. Elle est caractérisée par sa robustesse aux variations paramétriques et aux perturbations externes. Le principe de fonctionnement de cette commande est divisé en deux phases:

- * Phase de convergence vers la surface de glissement.
- * Phase de glissement sur la surface de glissement.

3- Commande hybride (commande par un régulateur PID basé sur la technique de commande par mode glissant) : c'est une approche qui combine le régulateur PID et de la commande par mode glissant.

L'organisation de ce mémoire est composée de trois chapitres organisés comme suit :

- Le premier chapitre, sera consacré à la commande par mode glissant, son principe de fonctionnement est divisé en deux phases : phase de convergence vers la surface de glissement, et phase de glissement vers l'état désiré, les différentes étapes de conception de la loi de commande. L'inconvénient majeur de la commande par mode glissant est connu sous le nom de chattering [8], ainsi les solutions apportées pour l'éliminer. A la fin du chapitre, un exemple démonstratif sera détaillé pour montre clairement le principe de fonctionnement de cette commande, ainsi les étapes de construction de la loi de commande de celle-ci. On conclura ce chapitre par une conclusion.
- Dans le deuxième chapitre, premièrement on va parler du système AVR, sa définition, son principe de fonctionnement, et sa modélisation mathématique. Dans ce chapitre on va présenter aussi des trois techniques de commande utilisées pour le système AVR [9]. La première est celle d'un régulateur PID classique [10] (sa définition, ses avantages et ses inconvénients, sa la loi de commande). La deuxième est la commande par mode glissant, et la dernière est une commande hybride qui combine le régulateur PID avec cette de mode glissant.
- Dans le troisième chapitre, on va analyser et interpréter les résultats trouvés pour la commande d'un système AVR.
- Finalement, on va conclure notre travail par une conclusion.

Chapitre I :
Commande par mode
glissant

I-1) Introduction

Dans toute formulation d'un problème de commande, le modèle mathématique développé dans le but d'établir la loi de commande ne reflète pas exactement le système réel, à cause : des fortes non-linéarités dans le système, des dynamiques non modélisées, des variations des paramètres du système, des perturbations externes...etc.

La commande par mode glissant relève le défi à ce problème, voire sa propriété de convergence rapide et en temps fini, ainsi, que sa robustesse par rapport aux erreurs de modélisation et certains types de perturbations extérieures.

La commande par mode glissant a été largement étudiée et développée depuis son introduction. Elle appartient à une classe plus large appelée "commande à structure variable". L'objectif de la commande par mode glissant est à l'aide d'une commande discontinue, de contraindre le système à évoluer au bout d'un temps fini et de maintenir sur une surface appelée "surface de glissement", où le comportement résultant correspond aux dynamiques souhaitées [11] [12].

Cette technique de commande est robuste et efficace pour commander des systèmes dynamiques non linéaires. Voici quelques propriétés de cette méthode :

1. *La robustesse :*

- La commande par mode glissant est reconnue par sa robustesse, ce qui signifie qu'elle est capable de rejeter les perturbations et les variations de certains paramètres du système.

2. *La simplicité :*

- Cette méthode est appréciée pour un concept de simplicité et sa mise en œuvre relativement directe, ce qui la rend accessible pour diverses applications de contrôle.

3. *Convergence asymptotique :*

- La commande par mode glissant permet une convergence rapide vers la surface de glissement.

Tous ces aspects positifs n'empêchent pas la présence de certains inconvénients :

1. Présence des oscillations (phénomène de chattering): provoquées par la partie discontinue de la commande.
2. Le système (commandé par la commande par mode glissant) est soumis à chaque instant à une commande à fréquence élevée afin d'assurer sa convergence vers l'état désiré, ce qui n'est pas souhaitable ou possible pour certains systèmes.

Il existe des solutions pour atténuer ces effets, notamment en remplaçant les termes discontinus par des fonctions continues.

Ce chapitre sera organisé comme suit : on commencera tout d'abord par une brève historique sur la commande par mode glissant, ensuite, on citera son principe de fonctionnement, les différentes étapes de conception de la commande par mode glissant et le problème de Chattering et comment l'éliminer. Après, on donnera un exemple démonstratif qui montre clairement le principe de fonctionnement ainsi que les étapes de construction de la commande par mode glissant, et on finira ce chapitre par une conclusion.

I-2) Historique

La théorie des systèmes de contrôles à structures variables VSS (Variable Structure System) fait l'objet de multiples études depuis une cinquantaine d'années. Les premiers travaux sur ce type de systèmes sont ceux d'Anosov [13], de Tzypkin [14] et d'Emelyanov [15, 16], et d'Hamel [17] sur la commande à relais. Ces recherches ont connu un nouvel essor à la fin des années soixante-dix lorsque Utkin introduit la théorie des modes glissants [18]. Actuellement, cette technique de commande est très utilisée dans des domaines très variés tels que la robotique [19], la mécanique et l'électrotechnique [20, 21, 22].

L'algorithme de commande par mode de glissement est classifié dans les systèmes de contrôles à structures variables. Le principe de ce type de système à structure variable consiste à amener, quelles que soient les conditions initiales, la trajectoire d'état du système sur une hyper-surface de l'espace de phase (représentant un ensemble de relations, entre les variables d'état). La surface considérée est alors désignée comme étant la surface de glissement ou de commutation. Le comportement dynamique

résultant, appelé régime glissant idéal, est complètement déterminé par les paramètres et les équations définissant la surface.

L'utilisation des surfaces linéaires dans la synthèse des lois de commande par mode de glissement est jugée satisfaisante par les auteurs en terme de stabilité [23, 24]. Toutefois, la dynamique imposée par ce choix est relativement lente et pour surmonter ce problème, des surfaces de glissement non linéaires peuvent être utilisées [25]. Malheureusement cette surface requiert trop de calcul. Pour cela, ses applications sont restreintes pour le cas des systèmes d'ordre supérieur.

I-3) Commande à structure variable

Les techniques de commande classiques sont très efficaces et donnent de bons résultats dans le cas des systèmes linéaires à paramètres constants. Cependant, de nombreux systèmes réels et notamment les machines électriques présentent, en plus des perturbations extérieures, des non linéarités et des erreurs paramétriques.

Donc, pour les systèmes linéaires ou non linéaires ayant des paramètres non constants, ces techniques de commande seront insuffisantes. Donc, on doit faire appel à des lois de commande dites à structure variable, qui sont insensibles aux variations de paramètres, aux perturbations et aux non linéarités.

La commande à structure variable est une approche de commande non linéaire dont la structure change pendant son fonctionnement, elle est caractérisée par le choix d'une structure et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à l'autre à tout instant. Cette commande est robuste et basée sur la commutation de fonctions de variables d'état, ce qui lui confère une certaine adaptabilité aux systèmes présentant des non-linéarités et des variations de paramètres.

La commande à structure variable est utilisée dans divers domaines tels que la modélisation et le contrôle de systèmes hydrauliques, de machines asynchrones, ou encore pour contrôler la vitesse ou la position de moteurs synchrones à aimants permanents.

I-4) Principe de la commande par mode glissant

Le principe de fonctionnement de la commande par mode glissant consiste à attirer la trajectoire d'état du système vers une région appelée 'surface de glissement', et ensuite

la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'à l'amener à l'état désiré [26, 27].

La figure ci-dessous montre le principe de commande par mode glissant.

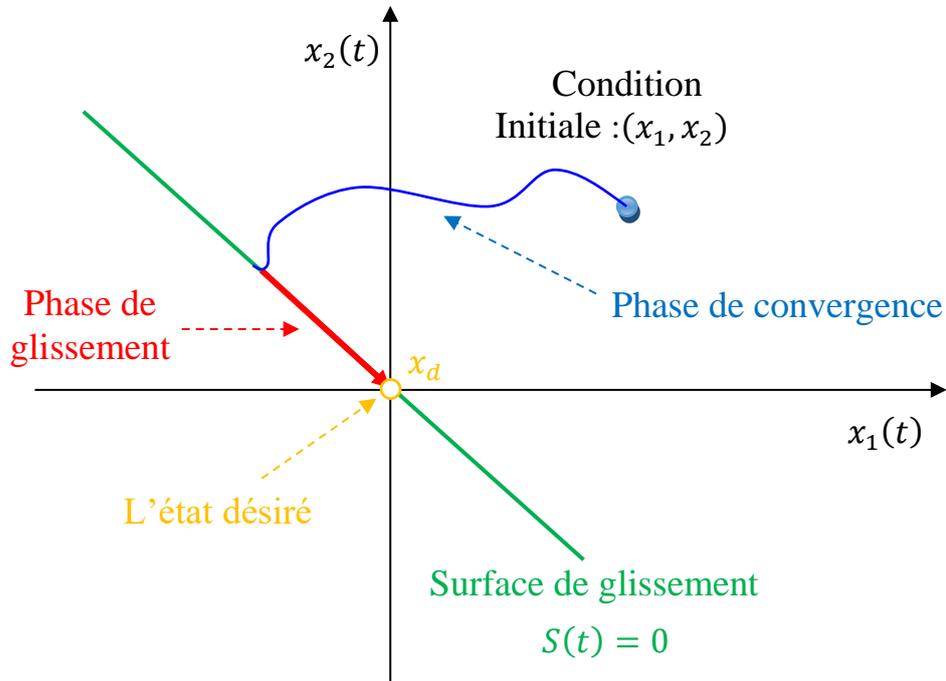


Figure I.1 : Principe de la commande par mode glissant

* Mode de convergence (MC) :

Durant ce mode la trajectoire d'état du système se déplace à partir d'un point initial (x_{10}, x_{20}) dans le plan de phase du système et converge vers la surface de glissement $S(x) = 0$ en temps fini [28]. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence [29].

Durant cette phase, le système "reste sensible" aux variations paramétriques, aux incertitudes et aux perturbations externes.

* Mode de glissement (MG) :

Le mode de glissement (MG) est une phase durant laquelle la variable d'état atteint la surface de glissement et tend vers l'état désiré du système. La dynamique de ce mode est déterminée par le choix de la surface de glissement, notée $S(x) = 0$. Ce mode est caractérisé par une commande spécifique et un critère de convergence [30], [31].

Le comportement du système durant cette phase ne dépend plus du système lui-même ou des perturbations, mais uniquement des propriétés de la surface de glissement [32].

I-5) Etapes de construction de la commande par mode glissant

Soit un système non linéaire décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (1.1)$$

Avec :

$$x = [x_1 x_2 \dots x_n].$$

x : représente le vecteur d'état du système.

f et g : sont des fonctions linéaires ou non linéaires, avec g doit être inversible.

u : représente le vecteur commande.

On pourrait résumer les étapes de construction de la commande par mode glissant en trois étapes fondamentales :

- La détermination d'une surface de glissement convenable.
- La détermination de la loi de commande.
- L'établissement des conditions de convergence.

I-5-1) Choix de la surface de glissement

La surface de glissement est une fonction scalaire sur laquelle la trajectoire d'état du système à régler glisse et tend vers l'état désiré.

Le choix de la surface de glissement repose sur le comportement dynamique désiré du système et des contraintes environnementales pour garantir une commande efficace et stable par mode glissant.

Il existe plusieurs formes de la surface de glissement, mais la surface la plus utilisée qui assure que le système convergence vers un état désiré est proposée par J.J Slotine:

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \alpha\right)^{r-1} e \quad (1.2)$$

Avec : $e = x_d - x$.

e : représente l'erreur entre la valeur actuelle x et désirée x_d .

α : est un constant positif.

r : représente le degré relatif, qui est égale au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie du système pour que la commande u apparaisse.

* Si $r = 1$: $S = e$.

* Si $r = 2$: $S = \frac{de}{dt} + \alpha e = \dot{e} + \alpha e$.

* Si $r = 3$: $S = \left(\frac{d}{dt} + \alpha\right)^2 e = \ddot{e} + 2\alpha\dot{e} + \alpha^2 e$.

La surface de glissement doit satisfaire deux conditions :

1- La première condition : si $S = 0 \Rightarrow x = x_d$.

2- La deuxième condition : la dérivée par rapport au temps de la surface de glissement S doit contenir l'expression de la commande u .

La dérivée par rapport au temps de la surface de glissement s'écrit par :

$$\dot{S} = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial S}{\partial x} (f(x) + g(x)u) \quad (1.3)$$

I-5-2) Etablissement de la loi de commande

Le but de la commande par mode glissant est de forcer l'état du système à atteindre la surface de glissement et le contraindre à y rester (malgré la présence des incertitudes et des perturbations) et ensuite l'amener vers l'état désiré.

La loi de commande par mode glissant se divise en deux parties [33]: la commande équivalente et la commande discontinue.

$$u = u_{eq} + u_{dis} \quad (1.4)$$

I-5-2-1) Commande équivalente u_{eq}

La commande équivalente sert à maintenir la trajectoire d'état du système sur la surface de glissement [34]. Elle peut être interprétée comme étant un retour d'état linéarisant jouant le rôle d'un signal de commande appliqué sur le système à commander.

L'utilisation de l'équation (1.3) nous permet d'obtenir la commande équivalente :

$$\dot{S} = \frac{\partial S}{\partial x} (f(x) + g(x)(u_{eq} + u_{dis})), \quad u_{dis} = 0 \quad (1.5)$$

La commande équivalente est obtenue par la résolution de l'équation $\dot{S} = 0$. Ce qui conduit à l'expression :

$$\dot{S} = 0 \Rightarrow u_{eq} = - \left(\frac{\partial S}{\partial x} g(x) \right)^{-1} \left(\frac{\partial S}{\partial x} f(x) \right) \quad (1.6)$$

I-5-2-2) Commande discontinue

C'est la commande discontinue, une fois la trajectoire d'état du système atteint la surface de glissement, la commande discontinue l'amène vers l'état désiré.

Plusieurs choix pour la commande discontinue peuvent être faits, mais la fonction la plus simple est la fonction signe (relais simple) :

$$Sign(S) = \begin{cases} 1, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ -1, S < 0 \end{cases} \quad (1.7)$$

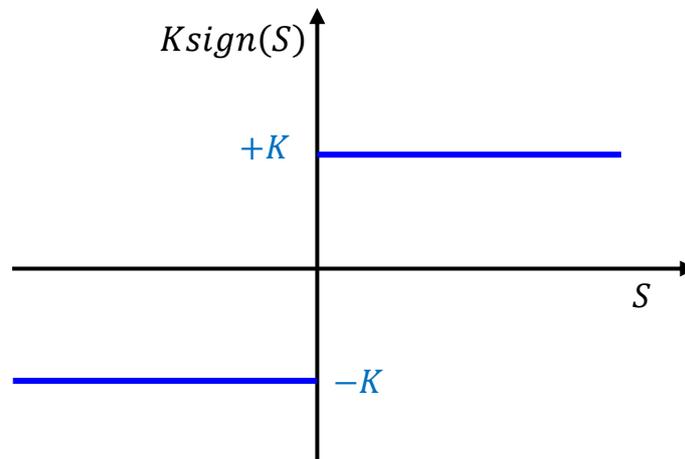


Figure I. 2 : Fonction signe

Donc, la commande totale sera :

$$u = u_{eq} + u_{dis} = - \left(\frac{\partial S}{\partial x} g(x) \right)^{-1} \left(\frac{\partial S}{\partial x} f(x) \right) - Ksign(S) \quad (1.8)$$

Le gain K doit être positif pour vérifier la condition de stabilité. La valeur de K est très influente, car, s'il est choisi très petit, le temps de réponse sera très long, s'il est choisi trop grand, il y aura des fortes oscillations (phénomène de Chattering) au niveau de l'organe de la commande.

I-5-3) Etablissement des conditions de convergence

C'est la condition de convergence (appelée aussi "condition d'attractivité") qui permet aux dynamiques du système de converger vers la surface de glissement en temps fini et

d'y rester indépendamment de la perturbation [35]. Il existe deux conditions pour assurer le mode de convergence : Approche directe et approche de Lyapunov.

* Fonction directe de commutation

C'est l'approche de convergence la plus ancienne, elle a été proposée par Emilyanov et Utkin [36]. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{S}(x) > 0 & \text{lorsque } S(x) < 0 \\ \dot{S}(x) < 0 & \text{lorsque } S(x) > 0 \end{cases} \quad (1.9)$$

Cette condition est toutefois difficile à utiliser, particulièrement dans le cas d'un système à plusieurs entrées.

*Fonction de Lyapunov

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système, et de choisir la loi de commutation qui fait décroître cette fonction, c'est-à-dire $\dot{V}(x) < 0$. Cette fonction est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes linéaires non linéaires.

Soit la fonction candidate de Lyapunov $V(S)$ définie positive, c'est-à-dire : $V(0) = 0$ et $V(S) > 0, S \neq 0$.

$$V(S) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (1.10)$$

Pour que la fonction de Lyapunov puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative. Ceci est vérifié si :

$$\dot{V}(S) = S(x)\dot{S}(x) < 0 \quad (1.11)$$

L'équation (1.10) représente le carré de la distance entre un point donné du plan de phase du système et la surface de glissement.

Tant la relation $S(x)\dot{S}(x) < 0$ est vérifié, la dynamique du système sur $S(x)$, ainsi que sa stabilité dépendent uniquement des paramètres de la surface choisie. Ceci explique l'invariance de ces lois de commande par rapport aux perturbations agissants sur la partie commande.

I-6) Phénomène de Chattering

Durant la phase de glissement, l'utilisation de la commande discontinue $u_{disc} = K \text{sign}(S)$, signifie que cette commande u_{disc} commute entre deux valeurs $\pm K$ avec des

oscillations à fréquences élevées se manifestant autour de la surface de glissement S . Ce phénomène est connu sous le nom de ‘‘réticence’’ ou ‘‘Chattering’’ en anglais.

Ce phénomène est le principal inconvénient de la commande par mode glissant. Dans la pratique, ce phénomène est indésirable, car, quand la fréquence de commutation sera élevée, cela cause un retard entre la mesure de la sortie (capteurs et observateurs), ce qui retarde le moment où le régulateur (commande par mode glissant) prend conscience qu'il faut inverser la commande. Cela conduit le système à quitter la surface de glissement sans que la commande ne puisse réagir [37,38]. Ainsi, ce phénomène peut endommager les actionneurs et des organes mécaniques et peut provoquer une augmentation de température dans les systèmes électriques.

La figure ci-dessous montre le phénomène de chattering.

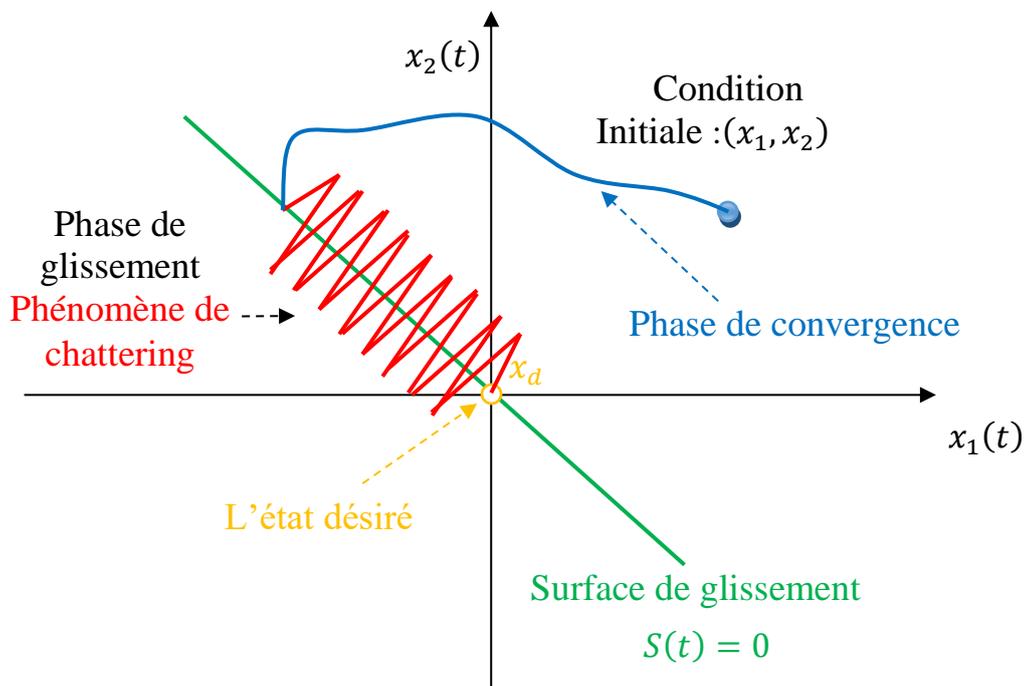


Figure I.3 : Phénomène de Chattering

I-6-1) Solutions pour atténuer le phénomène Chattering

De nombreuses solutions ont été effectuées dans le but de réduire ou d'éliminer le phénomène de réticence (chattering), Parmi elles, on peut distinguer :

* **Solution de couche limite** : cette solution consiste à remplacer la fonction *sign* par des fonctions plus adéquates qui filtrent les hautes fréquences. Parmi les fonctions

utilisées, il existe : la fonction saturation, la fonction sigmoïde et tangente hyperbolique. Ces fonctions réduisent le phénomène de Chattering.

$$sat(S) = \begin{cases} 1, S > a \\ \frac{1}{a}, -a \leq S \leq a \\ -1, S < -a \end{cases} \quad (1.12)$$

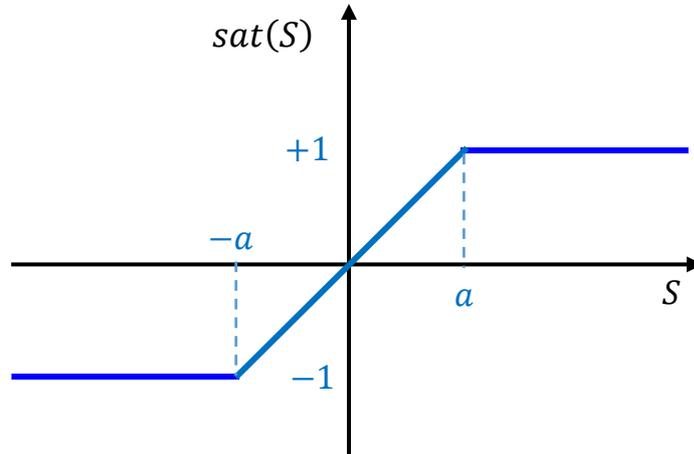


Figure I. 4 : Fonction saturation

$$sigm(S) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1.13)$$

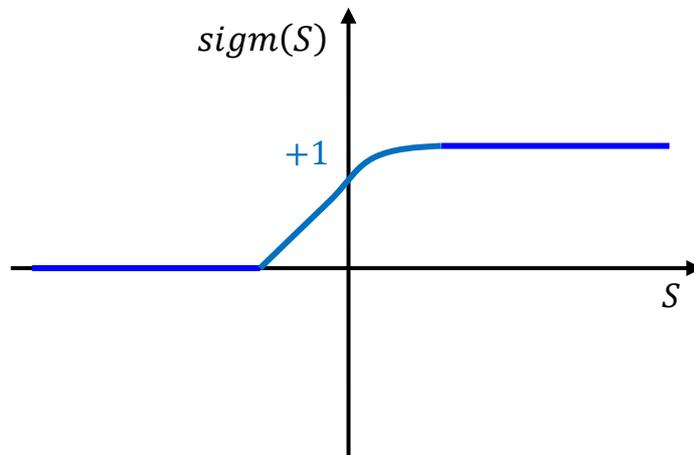


Figure I. 5 : Fonction sigmoïde.

$$tanh(S) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (1.14)$$

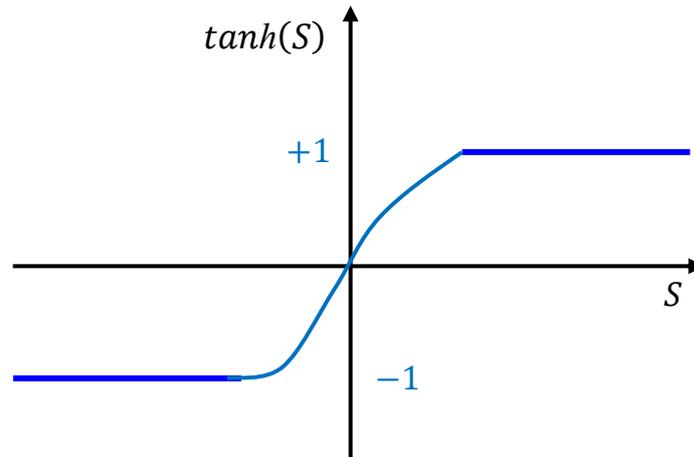


Figure I. 6 : Fonction tangente hyperbolique

Le phénomène de Chattering est réduit en utilisant ces fonctions (saturation, sigmoïde et tangente hyperbolique), cependant, le système ne converge pas précisément vers l'état désiré mais vers un voisinage de cette dernière.

* **Solution par mode glissant d'ordre supérieur** : pour remédier au problème de Chattering, le mode glissant d'ordre supérieur a été introduit tout en gardant les propriétés de la commande par mode glissant classique (robustesse et convergence vers l'état désiré en temps fini). Dans cette approche, le terme discontinu n'apparaît pas directement dans l'expression de la commande synthétisée, mais dans une de ses dérivées supérieures ce qui permet de réduire le Chattering.

I-7) Exemple démonstratif

On considère le système non linéaire suivant (pendule simple) :

$$\ddot{\theta} = -\frac{g}{l}\sin(\theta) + \frac{1}{ml^2}u \quad (1.15)$$

θ : représente l'angle du pendule par rapport à l'axe verticale.

m et l : représente la masse et la longueur du pendule.

g : représente la gravité.

On considère que : $x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}$.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \dot{\theta} = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{\theta} = -\frac{g}{l}\sin(\theta) + \frac{1}{ml^2}u = -\frac{g}{l}\sin(x_1) + \frac{1}{ml^2}u \end{cases} \quad (1.16)$$

Soit e : l'erreur entre la sortie désirée x_{1d} et la sortie du système x_1 .

$$e = x_{1d} - x_1 \quad (1.17)$$

1- La première étape est la détermination de la surface de glissement:

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \alpha\right)^{r-1} e \quad (1.18)$$

Le degré relatif est $r = 2$, donc, la surface de glissement devient :

$$S = \left(\frac{de}{dt} + \alpha e\right) = \dot{e} + \alpha e \quad (1.19)$$

La dérivée de la surface de glissement :

$$\dot{S} = \ddot{e} + \alpha \dot{e} = \ddot{x}_{1d} - \dot{x}_2 + \alpha(\dot{x}_{1d} - x_2) \quad (1.20)$$

$$\dot{S} = \ddot{x}_{1d} + \frac{g}{l} \sin(x_1) - \frac{1}{ml^2} u + \alpha(\dot{x}_{1d} - x_2) \quad (1.21)$$

2- La deuxième étape est la détermination de l'expression de la loi de commande (la commande équivalente et la commande discontinue) :

$$u = u_{eq} + u_{dis} \quad (1.22)$$

La commande équivalente u_{eq} elle est obtenue en mettant $\dot{S} = 0$:

$$\dot{S} = 0 \Rightarrow u_{eq} = ml^2 \left(\ddot{x}_{1d} + \frac{g}{l} \sin(x_1) + \alpha(\dot{x}_{1d} - x_2) \right) \quad (1.23)$$

La commande discontinue u_{dis} choisie est celle de fonction signe :

$$u_{dis} = K \text{sign}(S), \quad K > 0 \quad (1.24)$$

L'expression finale de la loi de commande devient :

$$u = u_{eq} + u_{dis} = ml^2 \left(\ddot{x}_{1d} + \frac{g}{l} \sin(x_1) + \alpha(\dot{x}_{1d} - x_2) + K \text{sign}(S) \right) \quad (1.25)$$

3- La troisième étape est l'établissement de la condition de convergence. On considère la fonction de Lyapunov suivante :

$$V(S) = \frac{1}{2} S^2 \quad (1.26)$$

La dérivée de la fonction de Lyapunov est :

$$\dot{V}(S) = S\dot{S} = S \left(\ddot{x}_{1d} + \frac{g}{l} \sin(x_1) - \frac{1}{ml^2} u + \alpha(\dot{x}_{1d} - x_2) \right) \quad (1.27)$$

$$\dot{V}(S) = S\dot{S} = S \left(\ddot{x}_{1d} + \frac{g}{l} \sin(x_1) - \frac{1}{ml^2} \left[ml^2 \left(\ddot{x}_{1d} + \frac{g}{l} \sin(x_1) + \alpha(\dot{x}_{1d} - \dot{x}_2) + K \text{sign}(S) \right) + \alpha(\dot{x}_{1d} - \dot{x}_2) \right] \right)$$

$$\dot{V}(S) = -KS \text{sign}(S) \quad (1.28)$$

$$\text{sign}(S) = \begin{cases} 1, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ -1, S < 0 \end{cases} \Rightarrow S * \text{sign}(S) = \begin{cases} S, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ -S, S < 0 \end{cases} \quad S * \text{sign}(S) = |S| \quad (1.29)$$

$\dot{V} = -K|S| < 0$, donc, la condition de stabilité et de convergence est bien vérifiée.

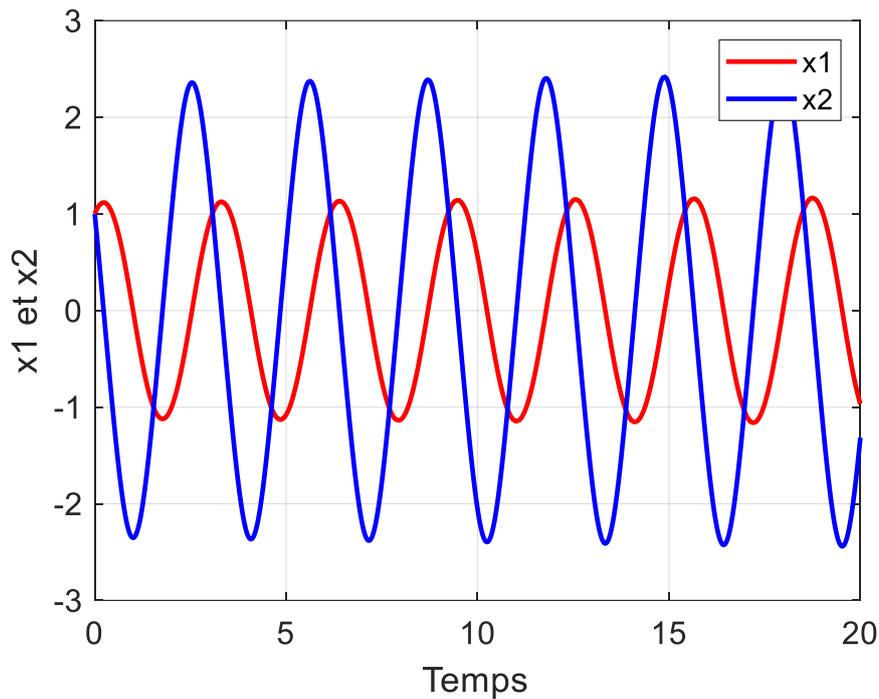


Figure I. 7 : Evolution de x_1 et x_2

Cette figure représente l'évolution de l'angle x_1 et sa variation x_2 par rapport au temps en boucle ouverte. On peut bien remarquer que l'angle du pendule ainsi que sa variation oscillent autour du point d'équilibre (0,0).

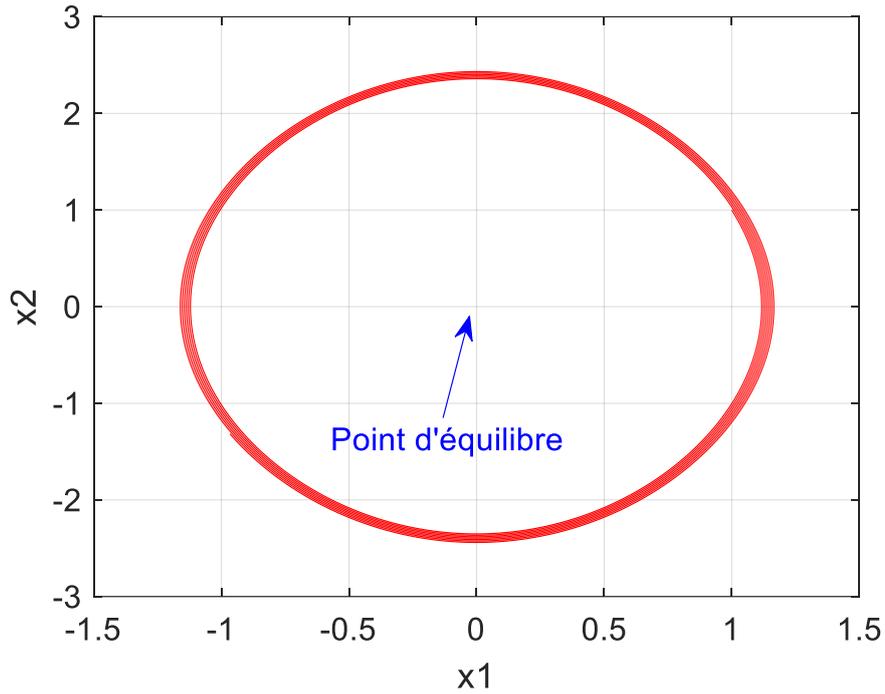


Figure I. 8 : Plan de phase du système

La figure ci-dessus représente le plan de phase du système (x_1 par rapport à x_2). Elle montre que le point d'équilibre (0,0) est un point centre (valeurs propres du système linéarisé autour du point d'équilibre sont imaginaires pures), donc, le système est stable.

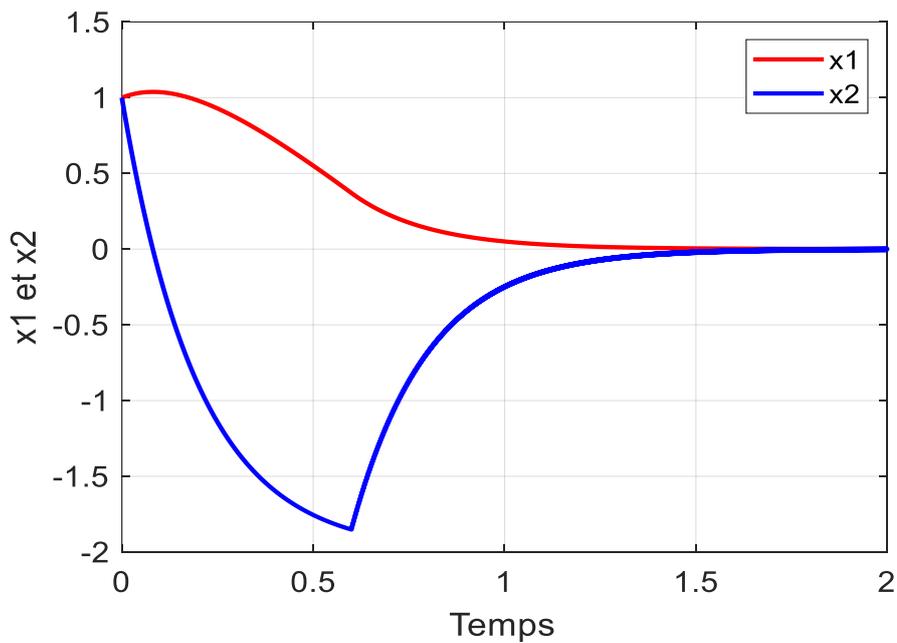


Figure I. 9 : Evolution de x_1 et x_2

Cette figure représente l'évolution de x_1 et x_2 commandés par la commande par mode glissant. On peut clairement remarquer que les variables d'état du pendule simple x_1 et x_2 convergent rapidement vers le point d'équilibre $(0,0)$.

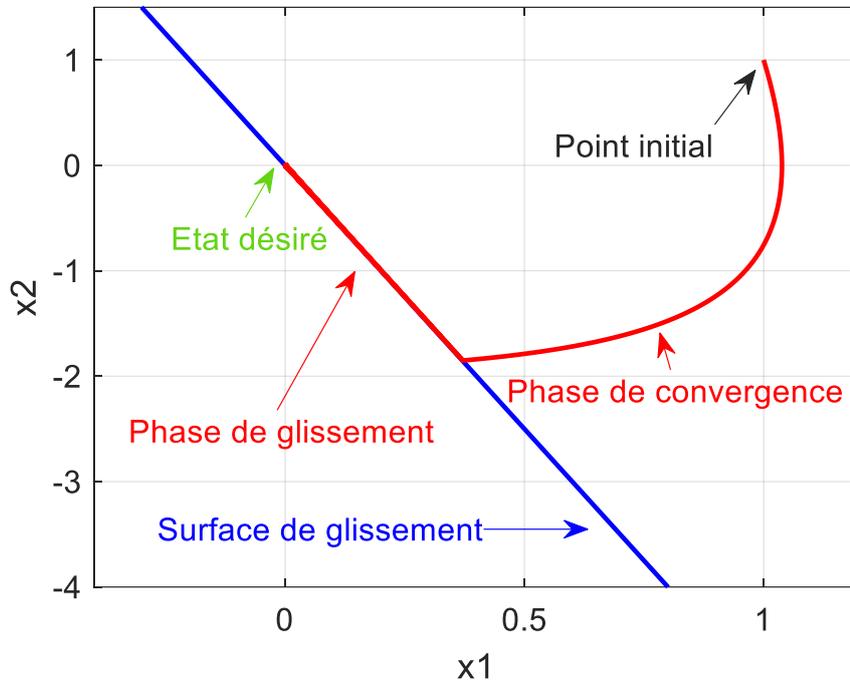


Figure I. 10 : Plan de phase du système

La figure 10, montre le principe de fonctionnement de la commande par mode glissant : cette commande a attiré la trajectoire du système à partir d'une condition initiales $(1,1)$ vers la surface de glissement en un temps fini (phase de convergence), après l'a fait glisser vers l'état désiré $(0,0)$ (phase de glissement).

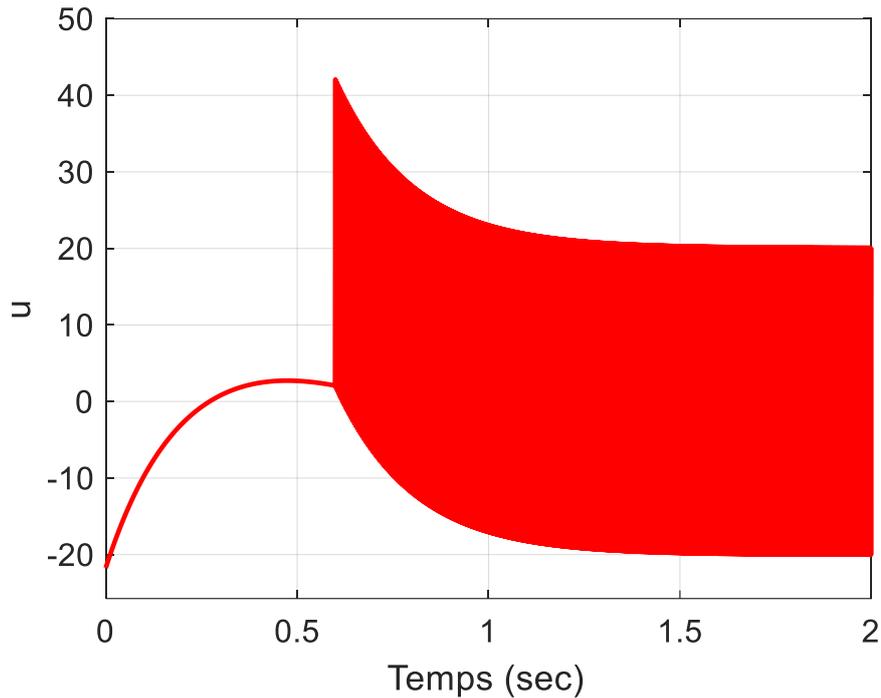


Figure I .11 : Variable de commande u

Cette figure représente l'évolution de la commande u . Elle montre clairement l'inconvénient majeur de la commande par mode glissant, c'est le phénomène de Chattering : durant la phase de glissement, la commande u_{disc} commute entre deux valeurs $\pm K$ avec des oscillations à fréquences élevées se manifestant autour de la surface de glissement S .

Pour résoudre ce problème, il vaut mieux changer la fonction de la commande discontinue $Ksign(S)$ par une autre fonction plus adéquate (Smooth), telle que la fonction $Ktanh(S)$.

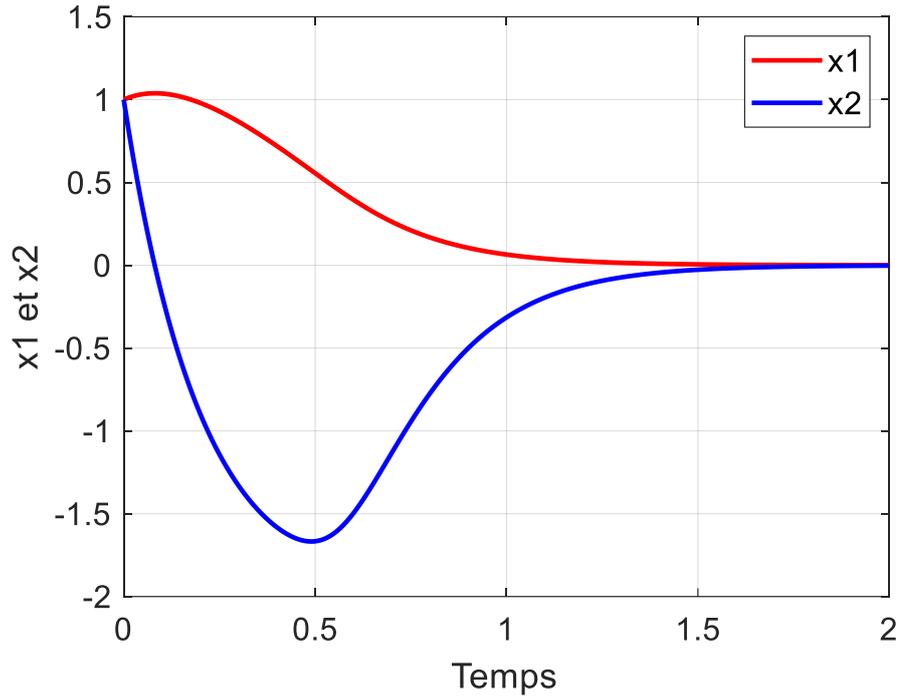


Figure I. 12 : Evolution de x_1 et x_2

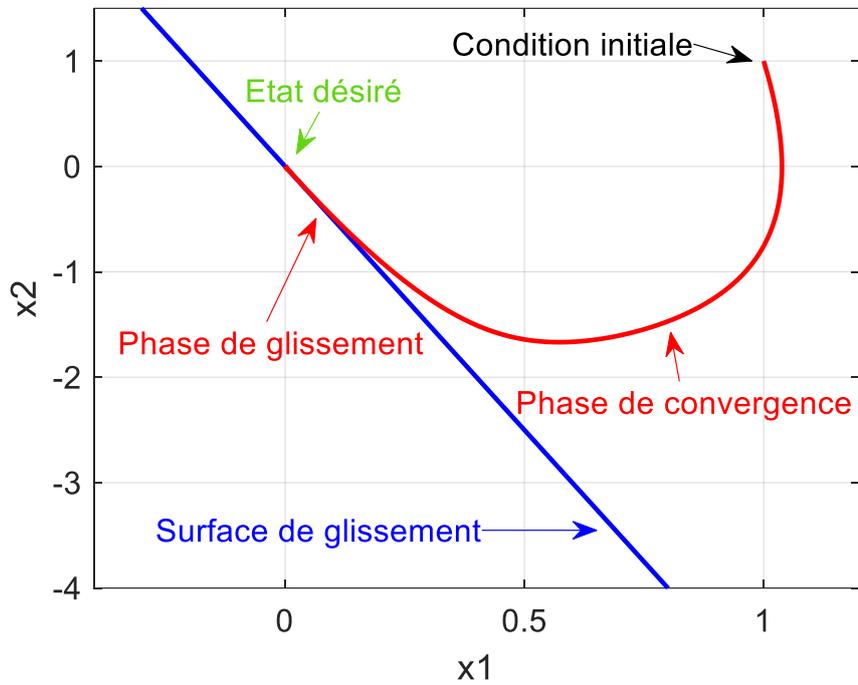


Figure I. 13 : Plan de phase du système

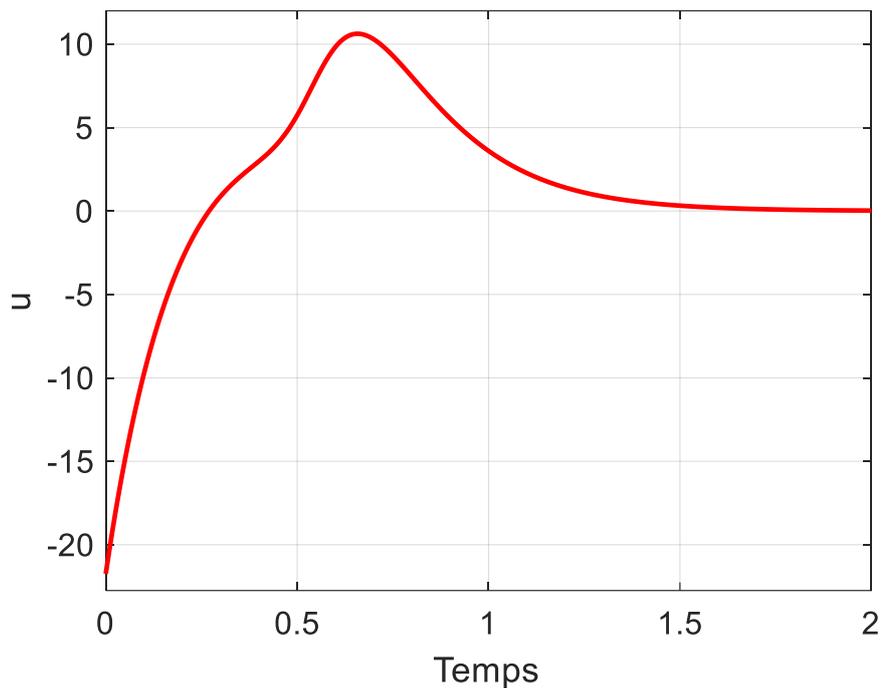


Figure I. 14 : Variable de commande u

Après avoir remplacé la commande discontinue $K\text{sign}(S)$ par la commande $K\tanh(S)$, le problème de chattering a été éliminé.

I-8) Conclusion

La commande par mode glissant est une technique de commande robuste utilisée dans divers domaines de l'automatique. Elle consiste à amener la trajectoire d'état d'un système vers une surface de glissement, ensuite, la faire commuter pour atteindre un état désiré. Cette méthode présente trois modes distincts : le mode de convergence, le mode de glissement, et le mode du régime permanent. Le mode de convergence permet à la variable à régler de se déplacer vers la surface de glissement, le mode de glissement amène la variable d'état vers l'état désiré, et le mode du régime permanent étudie la réponse du système autour de son point d'équilibre. La commande par modes glissants offre des performances avantageuses en termes d'insensibilité aux perturbations et de liberté dans la dynamique du système.

Chapitre II :
Commande du
systeme AVR
(Régulateur de
tension automatique)

II-1) Introduction

Les systèmes AVR (Automatic Voltage Regulator) sont des dispositifs électroniques qui permettent de maintenir une tension électrique stable et constante dans un réseau électrique. Ils sont utilisés dans divers domaines, notamment pour l'alimentation électrique des groupes électrogènes, les microcontrôleurs et les générateurs d'électricité.

Dans le domaine des générateurs d'électricité, les systèmes AVR sont utilisés pour régler la tension de sortie du générateur en contrôlant le courant d'excitation de l'excitateur.

Les systèmes AVR sont également utilisés dans les microcontrôleurs, comme l'ATmega328p, pour réguler la tension d'alimentation et garantir une alimentation électrique stable pour les équipements connectés [39].

Dans le domaine des groupes électrogènes, les systèmes AVR sont utilisés pour maintenir une tension électrique stable et constante, même lorsque les équipements consomment une forte intensité énergétique.

Enfin, les systèmes AVR sont également utilisés dans l'industrie électrique pour régler la tension dans les réseaux électriques, notamment dans les systèmes de marche en parallèle entre machines et en parallèle avec le réseau [40].

La stabilité et la constance du niveau de tension nominale dans un réseau de l'énergie électrique sont les principaux problèmes dans la commande du système d'alimentation électrique, puisque tous les équipements connectés à ce réseau électrique sont conçus pour un certain niveau de tension appelée tension nominale. Si la tension de fonctionnement est différente de la tension nominale, les performances des équipements électriques seront affectées et leur espérance de vie diminuée. De plus, l'autre raison importante pour contrôler la valeur nominale de tension est la perte de ligne réelle. Ces pertes dépendent du flux de puissance réelle et réactive et le flux de puissance réactive dépend fortement des tensions des bornes du système d'alimentation. Il est possible de minimiser les pertes de ligne réelles en contrôlant le niveau de tension nominale. Pour résoudre ces problèmes de commande, un système de régulation de tension automatique (AVR) est appliqué aux unités de production d'énergie [41].

Malgré le potentiel des techniques de commande moderne, le correcteur PID classique est encore largement utilisé dans la commande du système AVR parce qu'il offre une performance robuste pour une large gamme de conditions de fonctionnement et une implémentation facile. Différentes approches de réglage du correcteur PID du système AVR ont été proposées dans la littérature. Les méthodes classiques de réglage [42] ont été utilisées pour le calcul des paramètres du correcteur PID du système AVR. Cependant, ces dernières ne peuvent généralement pas accomplir des performances optimales.

Dans ce chapitre on va présenter trois techniques de commande pour le système AVR. La première est celle d'un régulateur PID classique. La deuxième est la commande par mode glissant, et la dernière est une commande hybride qui combine le régulateur PID avec celle du mode glissant. Une comparaison des performances pour montrer la robustesse de la commande par mode glissant aux variations paramétriques du système AVR par rapport au régulateur PID classique sera établie par la suite dans le troisième chapitre.

II-2) Modélisation mathématique d'un AVR

L'AVR est un appareil électronique qui maintient automatiquement la tension du générateur AC à une valeur souhaitée. Le premier rôle d'un AVR consiste à supprimer les variations de tension du générateur afin de fournir une puissance constante et fiable à la charge. Il fait partie du système d'excitation du générateur, il est placé dans le boîtier de commande principal du générateur AC, dans la boîte à bornes, ou située sous le capot arrière de l'alternateur. Le système AVR est représenté dans la figure (II.1)

Le système AVR comprend quatre composantes : l'amplificateur, l'excitateur, le générateur et le capteur. La tension de sortie du générateur électrique AC est continuellement surveillée par un capteur de tension. Cette dernière est redressée et filtrée afin d'être comparée au signal de référence DC. L'erreur entre les tensions DC de référence et du réseau électrique obtenue à la sortie du comparateur est amplifiée pour générer la tension d'excitation adéquate du générateur pour son bon fonctionnement [43].

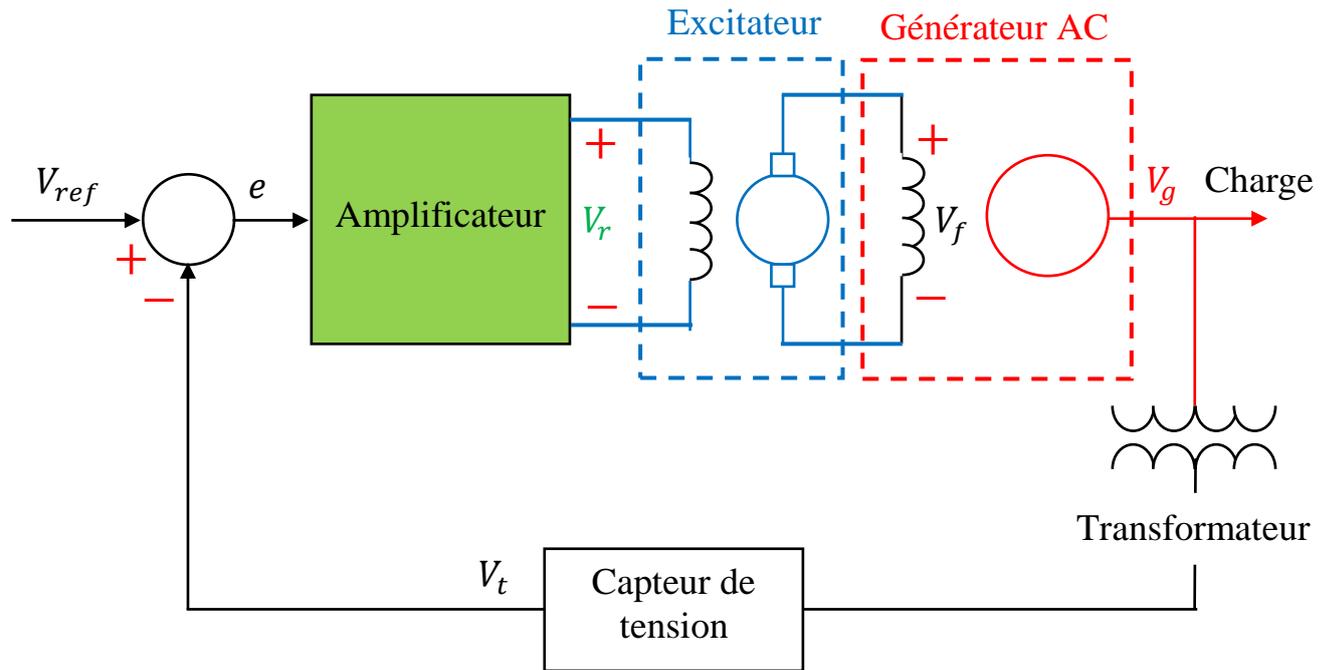


Figure II. 1 : Model simplifié d'un AVR

L'AVR sur le générateur remplit plusieurs fonctions telles que : la régulation, le contrôle et la surveillance de la tension aux bornes du générateur. Initialement, le signal d'erreur de tension e est généré par détection de la différence entre la tension du générateur alternatif V_t et la tension de référence V_{ref} ; ensuite, l'erreur de tension est utilisée pour modifier le flux du courant en abaissant ou augmentant le flux de courant pour le stator de l'excitatrice. Cela conduit à une tension inférieure ou supérieure à la borne du générateur AC ; c'est-à-dire s'il y a un changement dans la tension du générateur, la sortie du générateur est automatiquement stabilisée par l'AVR.

Le modèle mathématique du système AVR utilisé dans ce travail est un modèle linéaire qui prend en compte les principales constantes de temps et ignore la saturation et d'autres non-linéarités. Le schéma fonctionnel du modèle du système AVR avec les fonctions de transfert de ses différentes composantes est donné dans la figure (II.2).

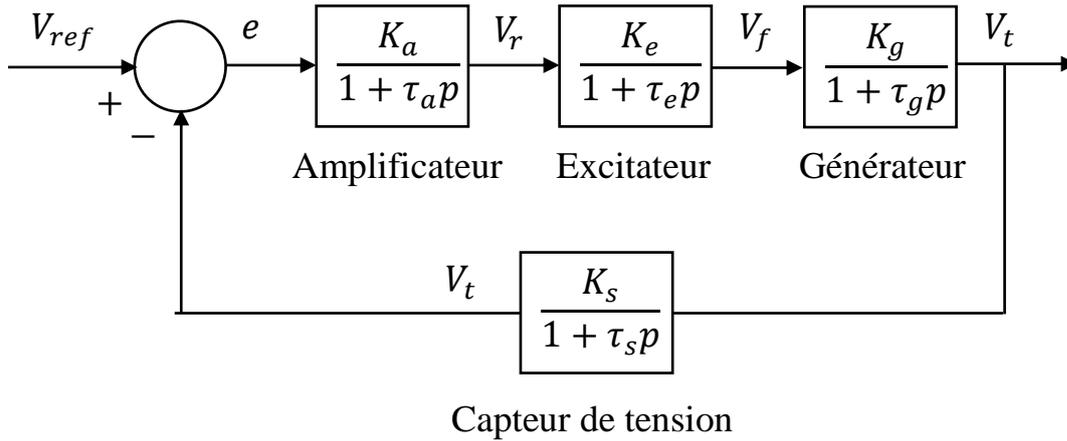


Figure II. 2 : Fonction de transfert du modèle AVR

Amplificateur :

La tension de sortie de l'amplificateur $V_r(p)$ dépend de la tension d'erreur $e(p)$:

$$\Delta V_r(p) = k_a \Delta e(p) \quad (2.1)$$

Le modèle de l'amplificateur est une fonction de transfert du premier ordre définie comme suit :

$$G_a(p) = \frac{\Delta V_r(p)}{\Delta e(p)} = \frac{k_a}{1 + \tau_a p} \quad (2.2)$$

Avec : k_a et τ_a représentent respectivement le gain et la constante de temps de l'amplificateur.

Les valeurs numériques du gain k_a et de la constante de temps τ_a sont telles que $10 < k_a < 40$ et $0,02 < \tau_a < 0,1$ s. Les valeurs nominales de ces paramètres sont $k_a = 10$ et $\tau_a = 0,1$ s.

Excitateur :

L'excitateur de champ fournit un signal de commande approprié pour le contrôle de la tension aux bornes de l'alternateur.

Soit R_e et L_e représentent respectivement la résistance et l'inductance du champ d'excitation ; alors on obtient l'équation suivante :

$$\Delta V_r = R_e \Delta i_e + L_e \frac{d\Delta i_e}{dx} \quad (2.3)$$

$$\Delta V_r(p) = R_e \Delta i_e(p) + L_e p \Delta i_e(p) \quad (2.4)$$

Le changement du courant de champ d'excitation Δi_e produit une tension de champ appropriée ΔV_f . La variation de la tension de champ dépend de la variation du courant de champ.

$$\Delta V_r(p) = K_e \Delta i_e(p) \quad (2.5)$$

$$\Delta V_f(p) = \frac{K_e}{1 + \tau_e \Delta V_r(p)} \quad (2.6)$$

Avec $\tau_e = \frac{L_e}{R_e}$: représente la constante de temps du champ d'excitation.

Le modèle de l'excitateur est un système du premier ordre dont la fonction de transfert est :

$$G_e(p) = \frac{\Delta V_f(p)}{\Delta V_r(p)} = \frac{k_e}{1 + \tau_e p} \quad (2.7)$$

Les valeurs numériques du gain k_e et de la constante de temps τ_e sont : $1 < k_e < 10$ et $0,4 < \tau_e < 1,0$ s. Les valeurs nominales des paramètres k_e et τ_e sont $k_e = 1$ et $\tau_e = 0,4$ s.

Générateur :

Généralement, le champ du générateur était excité par la tension de champ V_f .

Soit R_f et L_f désignent respectivement la résistance et la réactance du champ du générateur. À vide (aucune charge appliquée), la tension aux bornes du générateur V_f , est proportionnelle au courant de champ i_f .

$$G_g(p) = \frac{\Delta V_t(p)}{\Delta V_f(p)} = \frac{k_g}{1 + \tau_g p} \quad (2.8)$$

k_g : représente le gain du générateur AC.

$\tau_g = \frac{L_f}{R_f}$: représente la constante de temps du générateur AC.

Où le gain k_g et la constante du temps τ_g sont en fonction de la variation des charges dans le réseau électrique. Les valeurs de ces deux paramètres sont telles que $0,7 < k_g < 1,0$ et $1,0 < \tau_g < 2,0$ s. Leurs valeurs nominales sont $k_g = 1$ et $\tau_g = 1,0$ s.

Capteur :

La tension du générateur AC est mesurée par le dispositif de détection de tension, passée à travers le circuit redresseur et filtrage, puis différenciée avec la tension de point de référence $V_{réf}$ pour générer un signal d'erreur de tension. Le principal avantage de

l'utilisation d'un capteur de tension est qu'il répond rapidement à la tension aux bornes du générateur.

$$G_s(p) = \frac{V_s(p)}{V_t(p)} = \frac{k_s}{1 + \tau_s p} \quad (2.9)$$

Avec : K_s et τ_s désignent respectivement le gain et la constante de temps du capteur de tension.

Les valeurs du gain k_s et de la constante du temps τ_s sont $k_s = 1$ et $0,001 < \tau_s < 0,06$ s. Les valeurs nominales de ces paramètres sont $k_s = 1$ et $\tau_s = 0,01$ s.

Alors, la fonction de transfert en boucle ouverte $G(p)$ du système AVR de la figure (II.2) est donnée par:

$$G(p) = G_a(p)G_e(p)G_g(p) = \frac{k_a k_e k_g}{(1 + \tau_a p)(1 + \tau_e p)(1 + \tau_g p)} \quad (2.10)$$

II-3) Régulateur PID classique

Un régulateur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) est un régulateur de contrôle qui permet de réguler les systèmes automatiques en boucle fermée. Il est largement utilisé dans l'industrie pour contrôler un grand nombre de processus comme la température, la pression, la vitesse, etc.

La loi de commande du régulateur PID est une combinaison de trois termes qui permettent de contrôler une grandeur physique en fonction de la différence entre la consigne et la valeur réelle de cette grandeur. Ces termes sont :

- Proportionnel (P) : Cette partie de la commande est liée à l'écart entre la consigne et la valeur réelle de la grandeur. Le coefficient k_p correspond à cette fonction est responsable de la vitesse de réponse du système.
- La valeur de l'intégrale (I): Cette partie de la commande est proportionnellement à l'intégrale de l'erreur entre la consigne et la valeur réelle de la grandeur physique. L'erreur finale du système est annulée par le coefficient k_i , qui permet d'annuler l'erreur finale du système.
- La dérivée (D) : Cette partie de la commande est liée à la dérivée de l'erreur entre la consigne et la valeur réelle de la grandeur physique. Le coefficient k_d représente cette fonction assure la stabilité du système en diminuant les oscillations.

Le schéma bloc d'un régulateur PID est montré dans la figure suivante :

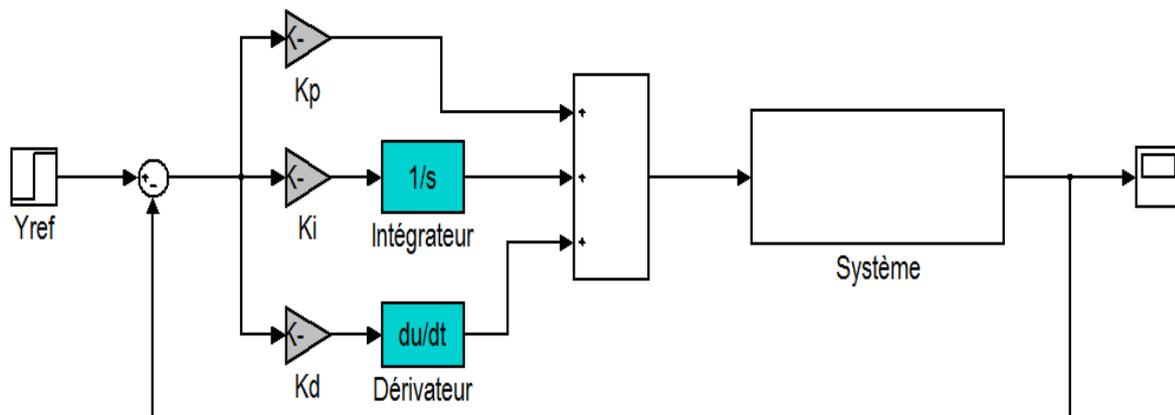


Figure II. 3 : schéma block de régulateur PID

La loi de commande du régulateur PID peut être représentée par l'équation suivante :

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

Avec :

$u(t)$: représente le signal de commande.

$e(t)$: est l'erreur entre la consigne et la valeur réelle du système.

k_p, k_i , et k_d : sont respectivement les coefficients de régulation proportionnelle, intégrale, et dérivée.

II-3-1) Rôle des paramètres k_p, k_i et k_d

Les paramètres du régulateur PID k_p, k_i et k_d ont des fonctions différentes et cruciales dans la régulation des processus. La description détaillée de chaque paramètre et de son impact sur le fonctionnement du régulateur PID est présentée ci-après :

1) Le coefficient proportionnel k_p surveille la réaction immédiate du système face à l'erreur actuelle. Sa fonction principale est de garantir la stabilité du système et de réagir rapidement aux perturbations. Lorsque la valeur de k_p est élevée, le système réagit plus rapidement, mais il peut aussi être plus vulnérable aux perturbations. Avec une valeur faible de k_p , le système réagit plus lentement, mais il est plus sensible aux perturbations.

2) Le coefficient intégrateur k_i est un paramètre qui gère la réaction du système en fonction de l'intégrale de l'erreur générée. Il assure la précision de la régulation et la capacité du système à compenser les erreurs constantes. Quand la valeur de k_i est élevée, le système a une réaction plus intense aux erreurs permanentes, mais il peut aussi être plus vulnérable aux perturbations. Avec une valeur faible k_i , le système réagit moins intensément aux erreurs permanentes, mais il est plus sensible aux perturbations.

3) Le coefficient dérivateur k_d est un paramètre qui gère la réaction du système en fonction de la dérivée de l'erreur. Il est responsable de la réaction rapide du système aux perturbations et de sa capacité à éviter les oscillations. Lorsque la valeur de k_d est élevée, le système peut réagir plus rapidement aux perturbations, mais il peut aussi être plus vulnérable aux erreurs permanentes. Si la valeur de k_d est faible, le système réagit moins rapidement aux perturbations, mais il est plus résistant aux erreurs permanentes.

En bref, la stabilité, la rapidité, la précision et la résistance aux perturbations du système sont influencées par les paramètres k_p , k_i et k_d du régulateur PID. Les paramètres les plus appropriés sont déterminés par la nature du processus à gérer et les exigences de performance du système.

Les avantages du régulateurs PID :

- Simplicité de mise en œuvre : Le régulateur PID présente souvent une simplicité de mise en œuvre supérieure à celle d'autres types de régulateurs, car il utilise des paramètres de réglage clairement définis et des algorithmes de régulation précis.
- Stabilité et précision : sa capacité à maintenir une valeur de consigne avec une précision et une stabilité élevée, ce qui revêt une importance capitale dans les applications industrielles où la précision et la stabilité sont indispensables pour garantir la qualité du produit ou du service.
- Compensation des perturbations : le régulateur PID a la capacité de compenser les perturbations du système, comme les fluctuations de température ou de pression, en ajustant sa sortie afin de maintenir la valeur de consigne.
- Flexibilité : le régulateur PID peut être employé dans divers systèmes, tels que les systèmes thermiques et les systèmes de production de produits chimiques. Il

est fréquemment employé dans les applications où la précision et la stabilité sont indispensables.

Les inconvénients du régulateur PID :

- Complexité du réglage : le processus de réglage d'un régulateur PID peut être complexe et demander une expertise en régulation et en contrôle, car il nécessite l'établissement de paramètres de réglage spécifiques pour chaque système.
- Sensibilité aux paramètres de réglage : Les paramètres de réglage tels que le gain proportionnel, d'intégration et de dérivation sont sensibles au régulateur PID, ce qui nécessite une adaptation minutieuse afin d'obtenir une régulation efficace.
- Limitations dans les systèmes à faible gain : Les systèmes à faible gain peuvent présenter des limitations dans l'efficacité du régulateur PID, car il peut être difficile de maintenir une régulation précise avec des signaux de sortie inférieurs.
- Coûts élevés : Les coûts des régulateurs PID peuvent être élevés, surtout s'ils sont équipés de fonctionnalités avancées comme la régulation personnalisée ou la surveillance en temps réel.

En bref, le régulateur PID est dispositif puissant pour le contrôle de systèmes, mais ses performances dépendent essentiellement de ses paramètres k_p, k_i et k_d afin d'obtenir des résultats efficaces.

II-4) Commande par mode glissant du système AVR

La commande par mode glissant est une technique de commande puissante dans la théorie de contrôle qui fournit un signal de commande précise pour maintenir la sortie d'un système à une valeur désirée, même en présence des variations paramétriques dans le système et des perturbations externes. Dans ce contexte, La commande par mode glissant est utilisée pour commander la tension de sortie de générateur synchrone par le régulateur de tension automatique AVR.

La figure ci-dessous montre la commande par mode glissant du régulateur de tension automatique (AVR).

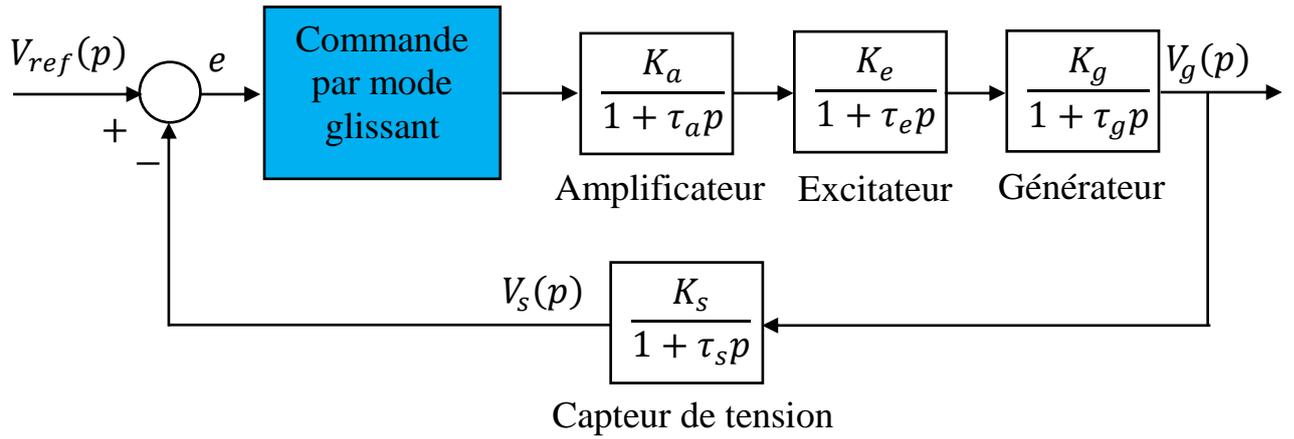


Figure II. 4 : Commande par mode glissant d'un régulateur AVR

La fonction de transfert du système AVR en boucle ouverte est :

$$\frac{V_g(p)}{U_a(p)} = \frac{K_a K_e K_g}{(1 + \tau_a p)(1 + \tau_e p)(1 + \tau_g p)} \quad (2.12)$$

$$\frac{V_g(p)}{U_a(p)} = \frac{K_a K_e K_g}{\tau_a \tau_e \tau_g S^3 + (\tau_a \tau_e + \tau_a \tau_g + \tau_e \tau_g) S^2 + (\tau_a + \tau_e + \tau_g) S + 1} \quad (2.13)$$

$$\frac{V_g(p)}{U_a(p)} = \frac{K}{a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + 1} \quad (2.14)$$

Avec : $K = K_a K_e K_g$, $a_1 = \tau_a \tau_e \tau_g$, $a_2 = \tau_a \tau_e + \tau_a \tau_g + \tau_e \tau_g$, $a_3 = \tau_a + \tau_e + \tau_g$.

En appliquant la transformation de Laplace inverse à l'équation (2.14), on peut trouver la représentation d'état :

$$a_1 \ddot{V}_g(t) + a_2 \dot{V}_g(t) + a_3 V_g(t) + V_g(t) = K u_a(t) \quad (2.15)$$

On considère que : $x_1 = V_g$, $x_2 = \dot{V}_g$ et $x_3 = \ddot{V}_g$, on obtient la représentation d'état du système AVR :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{a_1} (-a_2 x_3 - a_3 x_2 - x_1 + K u_a) \end{cases}$$

Soit e : l'erreur entre la sortie désirée $V_{réf}$ et la sortie du système AVR x_1 .

$$e = V_{réf} - x_1 \quad (2.16)$$

1- Détermination de la surface de glissement :

Le degré relatif est $r = 3$, donc, la surface de glissement est :

$$S = \left(\frac{de}{dt} + \alpha e \right)^2 = \ddot{e} + 2\alpha\dot{e} + \alpha^2 e \quad (2.17)$$

La dérivée de la surface de glissement :

$$\dot{S} = \ddot{e} + 2\alpha\dot{e} + \alpha^2 e = \ddot{V}_{réf} - \dot{x}_3 + 2\alpha(\ddot{V}_{réf} - x_3) + \alpha^2(\dot{V}_{réf} - x_2) \quad (2.18)$$

$$\dot{S} = \ddot{V}_{réf} - \frac{1}{a_1}(-a_2x_3 - a_3x_2 - x_1 + Ku_a) + 2\alpha(\ddot{V}_{réf} - x_3) + \alpha^2(\dot{V}_{réf} - x_2) \quad (2.19)$$

2- Détermination de l'expression de la loi de commande :

La commande équivalente u_{eq} elle est déterminée quand $\dot{S} = 0$:

$$\dot{S} = 0 \Rightarrow u_{eq} = \frac{a_1}{K} \left[\ddot{V}_{réf} - \frac{1}{a_1}(-a_2x_3 - a_3x_2 - x_1) + 2\alpha\ddot{e} + \alpha^2\dot{e} \right] \quad (2.20)$$

La commande discontinue u_{dis} choisie est la fonction signe :

$$u_{dis} = Dsign(S), \quad D > 0 \quad (2.21)$$

L'expression finale de la loi de commande est :

$$u = \frac{a_1}{K} \left(\ddot{V}_{réf} - \frac{1}{a_1}(-a_2x_3 - a_3x_2 - x_1) + 2\alpha\ddot{e} + \alpha^2\dot{e} + Dsign(S) \right) \quad (2.22)$$

3- Etablissement de la condition de convergence :

Soit la fonction de Lyapunov suivante :

$$V(S) = \frac{1}{2} S^2 \quad (2.23)$$

$$\dot{V}(S) = S\dot{S} = S \left(\ddot{V}_{réf} - \frac{1}{a_1}(-a_2x_3 - a_3x_2 - x_1 + Ku_a) + 2\alpha\ddot{e} + \alpha^2\dot{e} \right) \quad (2.24)$$

Si on remplace l'expression de la commande dans l'équation ci-dessus, on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{V}(S) = S \left(-\frac{1}{a_1} \left(-a_2x_3 - a_3x_2 - x_1 \right. \right. \\ \left. \left. + K \left[\frac{a_1}{K} \left(\ddot{V}_{réf} - \frac{1}{a_1}(-a_2x_3 - a_3x_2 - x_1) + 2\alpha\ddot{e} + \alpha^2\dot{e} \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + Dsign(S) \right) \right] \right) \right) + 2\alpha\ddot{e} + \alpha^2\dot{e} + \ddot{V}_{réf} \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\dot{V}(S) = -D S sign(S) = -D |S| < 0 \quad (2.26)$$

$\dot{V} < 0$, donc, la condition de stabilité et de convergence est bien vérifiée.

II-5) Régulateur PID basée sur la commande mode glissant du système AVR

La commande par mode glissant (SMC) est considérée comme étant une commande robuste. Dans cette partie, une combinaison de la commande par mode glissant et d'un régulateur PID est considérée. Étant donné que le régulateur PID ne nécessite pas de modélisation précise du système, la surface de glissement pour la commande par mode glissant est conçue à l'aide des paramètres du régulateur PID. Le régulateur PID ajuste les erreurs du système en boucle fermée et la commande par mode glissant assure une convergence rapide vers la surface en mode glissant. Par conséquent, cette commande hybride possède les caractéristiques des deux techniques (régulateur PID et la technique par mode glissant) et obtient une meilleure stabilité du système.

Cette commande hybride est aussi utilisée pour commander la tension de sortie de générateur par le régulateur de tension automatique AVR.

Le schéma bloc de la commande hybride est montré dans la figure suivante :

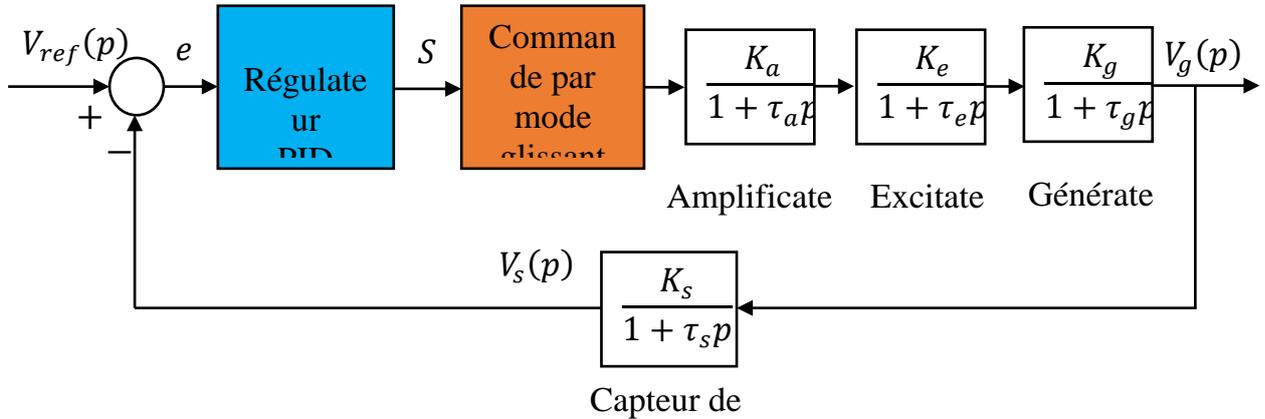


Figure II. 5 : Commande hybride d'un régulateur AVR

1- Détermination de la surface de glissement :

L'expression de la surface de glissant proposée pour le régulateur PID basé sur la commande par mode glissant est :

$$S = k_p e(t) + k_i \int e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.27)$$

Avec : k_p , k_i et k_d sont les paramètres du régulateur PID.

L'expression de la dérivée seconde de la surface de glissement est :

$$\ddot{S} = k_p \ddot{e} + k_i \dot{e} + k_d \ddot{e} \quad (2.28)$$

$$\ddot{S} = k_p \ddot{e} + k_i \dot{e} + k_d (\ddot{V}_{réf} - \dot{x}_3) \quad (2.29)$$

$$\ddot{S} = k_p \ddot{e} + k_i \dot{e} + k_d \left(\ddot{V}_{réf} - \frac{1}{a_1} (-a_2 x_3 - a_3 x_2 - x_1 + K u_a) \right) \quad (2.30)$$

2- Détermination de l'expression de la loi de commande :

La commande équivalente u_{eq} elle est déterminée quand $\ddot{S} = 0$:

$$\ddot{S} = 0 \Rightarrow u_{eq} = \frac{a_1}{k_d K} (k_p \ddot{e} + k_i \dot{e} + k_d \ddot{V}_{réf} - \frac{k_d}{a_1} (-a_2 x_3 - a_3 x_2 - x_1)) \quad (2.31)$$

La commande non linéaire discontinue u_{dis} choisie est :

$$u_{dis} = \mu S + D \text{sign}(\dot{S}), \quad D > 0 \quad (2.32)$$

L'expression finale de la loi de commande est :

$$u = \frac{a_1}{k_d K} \left(k_p \ddot{e} + k_i \dot{e} + k_d \ddot{V}_{réf} - \frac{k_d}{a_1} (-a_2 x_3 - a_3 x_2 - x_1) + \mu S + D \text{sign}(\dot{S}) \right) \quad (2.23)$$

3- L'établissement de la condition de convergence :

Soit la fonction de Lyapunov suivante :

$$V(S, \dot{S}) = \frac{1}{2} S^2 + \frac{1}{2} \dot{S}^2 \quad (2.34)$$

La dérivée de la fonction de Lyapunov est :

$$\dot{V}(S, \dot{S}) = S \dot{S} + \dot{S} \ddot{S} \quad (2.35)$$

$$\dot{V}(S, \dot{S}) = S \dot{S} + \dot{S} \left(k_p \ddot{e} + k_i \dot{e} + k_d \ddot{V}_{réf} + \frac{k_d a_2}{a_1} x_3 + \frac{k_d a_3}{a_1} x_2 + \frac{k_d}{a_1} x_1 - \frac{k_d K}{a_1} u_a \right) \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}(S, \dot{S}) = S \dot{S} + \dot{S} \left(k_p \ddot{e} + k_i \dot{e} + k_d \ddot{V}_{réf} + \frac{k_d a_2}{a_1} x_3 + \frac{k_d a_3}{a_1} x_2 + \frac{k_d}{a_1} x_1 \right. \\ \left. - \frac{k_d K}{a_1} \left[\frac{a_1}{k_d K} \left(k_p \ddot{e} + k_i \dot{e} + k_d \ddot{V}_{réf} + \frac{k_d a_2}{a_1} x_3 + \frac{k_d a_3}{a_1} x_2 + \frac{k_d}{a_1} x_1 + \mu S \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + D \text{sign}(\dot{S}) \right) \right] \right) \end{aligned} \quad (2.37)$$

$\dot{V} = -D |\dot{S}| < 0$ donc, la condition de stabilité et de convergence est bien vérifiée.

II-6) Conclusion

Les systèmes AVR sont des dispositifs électroniques qui permettent de maintenir une tension électrique stable et constante dans un réseau électrique.

Dans ce chapitre on a présenté trois techniques de commande pour le système AVR. La première est celle d'un régulateur PID classique. La deuxième est la commande par mode glissant, et la dernière est une commande hybride qui combine le régulateur PID avec celle du mode glissant. En associant les avantages du régulateur PID et la commande par mode glissant, cette méthode permet d'obtenir une régulation précise de la tension, une amélioration de la stabilité du système et des performances dynamiques améliorées. L'utilisation du mode glissant de la commande PID dans le système AVR assure une alimentation électrique de haute qualité.

Chapitre III :

Résultats et

simulation

III-1) Résultats de simulation et discussion

La tension de sortie du générateur synchrone AC est souvent maintenue par le régulateur de tension automatique (AVR) pour garantir la qualité constante et élevée de l'électricité envoyée à la charge ou dans le réseau. Donc l'AVR est indispensable pour limiter les fluctuations de tensions à la sortie du générateur, ce qui permet de réduire les risques de dommages aux appareils électriques alimentés par le générateur.

Il contrôle le courant de champ, qui à son tour contrôle l'intensité du champ magnétique du rotor. En régulant le courant de champ, le système AVR est capable de maintenir un niveau de tension constant dans le réseau électrique, même en présence de fluctuations ou de variations.

La figure 1 représente la réponse indicielle du système AVR sans correcteur.

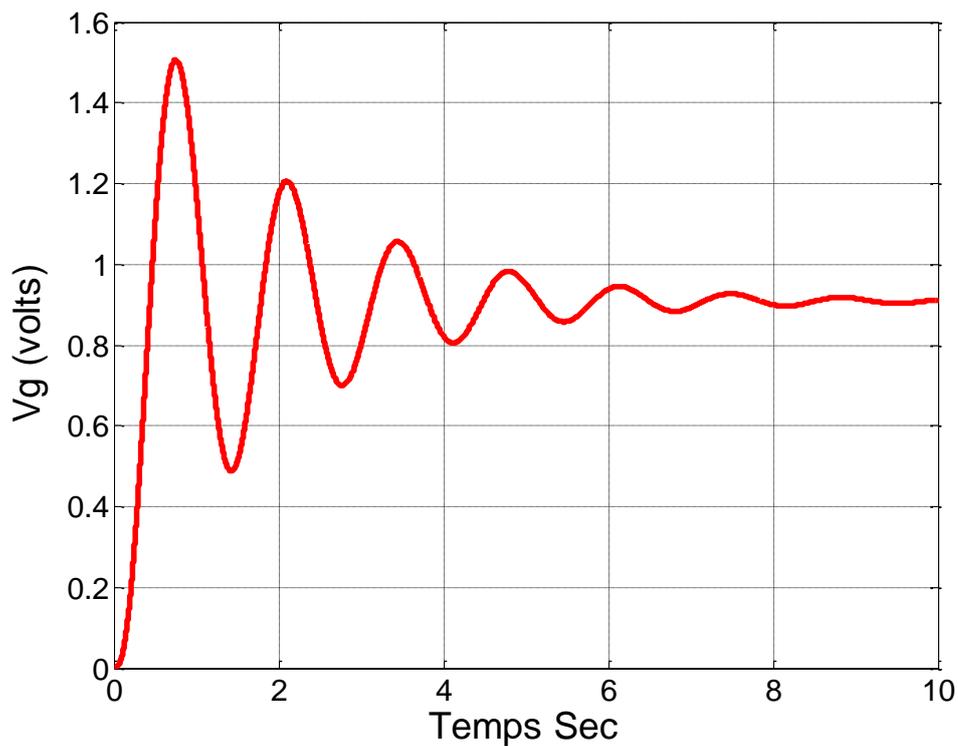


Figure III. 1 : Réponse indicielle de la tension de sortie du système AVR sans commande

Cette figure montre la tension de sortie du générateur AC. Elle est indiquée par unité de base.

On peut clairement noter que la tension de sortie du générateur ne suit pas la référence souhaitée. La réponse présente des oscillations élevées, avec un grand dépassement d'environ 65%, et un long temps de réponse $t_r = 0.7547$ s et un temps de montée $t_m = 0.2607$ s. La réponse en régime permanent comporte une erreur statique $e_r = 0.0907$.

Ce comportement influence la stabilité et la sécurité de la charge ou du réseau alimentés par le générateur asynchrone.

En cas de panne de l'AVR, cela provoque une diminution soudaine de la tension du côté du générateur, et le générateur doit s'arrêter lorsqu'un défaut de sous-tension se produit. Si le générateur ne dispose d'aucune protection contre les sous-tensions, il peut fonctionner, mais il y aura de graves dommages du côté de la charge. Donc, la tension de sortie du générateur et le comportement en régime transitoire doivent être améliorés et l'erreur en régime permanent doit être réduite à zéro. Ceci doit être fait en ajoutant un contrôleur approprié à l'AVR.

Pour ce faire, on a utilisé les techniques de commande suivantes : le régulateur PID classique, la commande par mode glissant, et une commande hybride qui combine un régulateur PID et la commande par mode glissant.

Les exigences des performances dynamiques du système AVR sont :

- * Un temps de réponse petit.
- * Un dépassement (%) très réduit.

III -2) régulateur PID

Le régulateur PID est utilisé dans le système AVR pour améliorer la réponse du système grâce à sa simplicité de mise en œuvre supérieure à celle d'autres types de régulateurs. L'ajout d'un régulateur PID approprié à l'AVR donne la possibilité d'améliorer et de manipuler la tension de sortie du générateur asynchrone via un signal de commande qui combine des trois paramètres k_p , k_i et k_d . Le rôle et l'influence de chaque paramètre a été expliqué précédemment.

Le schéma du système AVR avec un régulateur PID est présenté dans la figure ci-dessous.

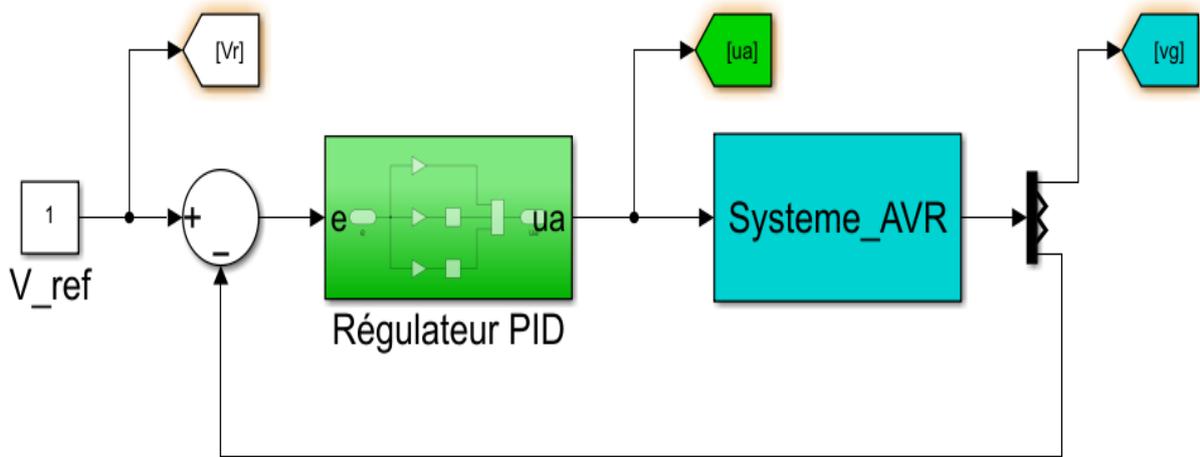


Figure III. 2 : Commande du système AVR par un régulateur PID

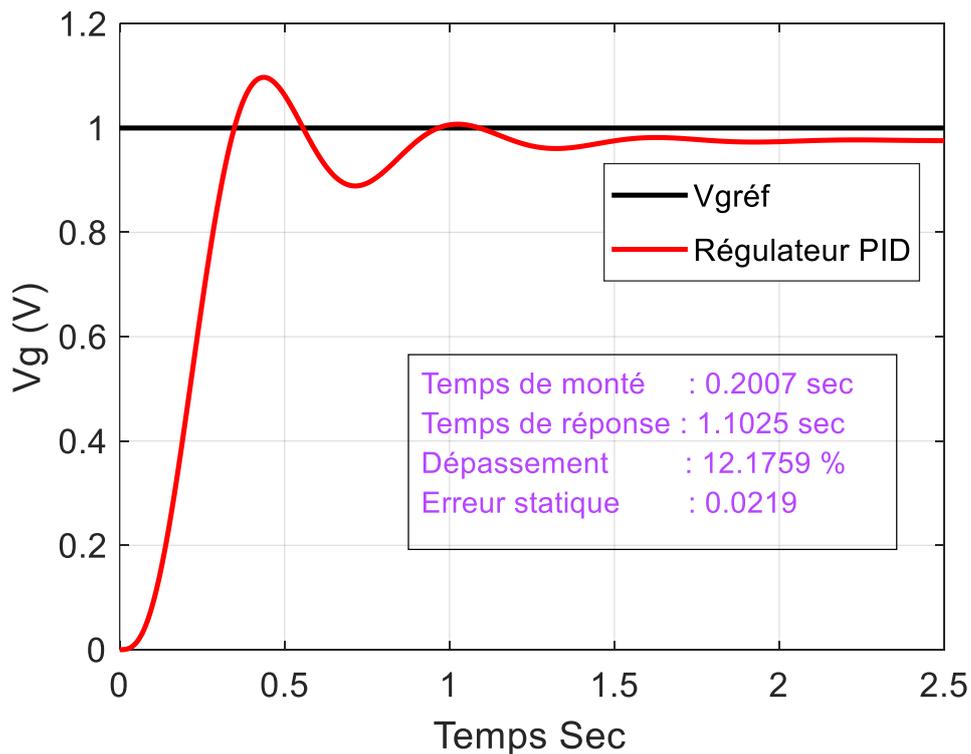


Figure III. 3 : Réponse indicielle du système AVR : commande PID

Cette figure représente une réponse du système AVR plus au moins rapide, avec un temps de réponse $t_r = 1.1025 \text{ s}$ et un temps de montée $t_m = 0.2007 \text{ s}$. La réponse en régime permanent comporte une erreur statique $e_r = 0.0219$. On voit clairement que les oscillations ont été réduites, avec un dépassement d'environ 12%.

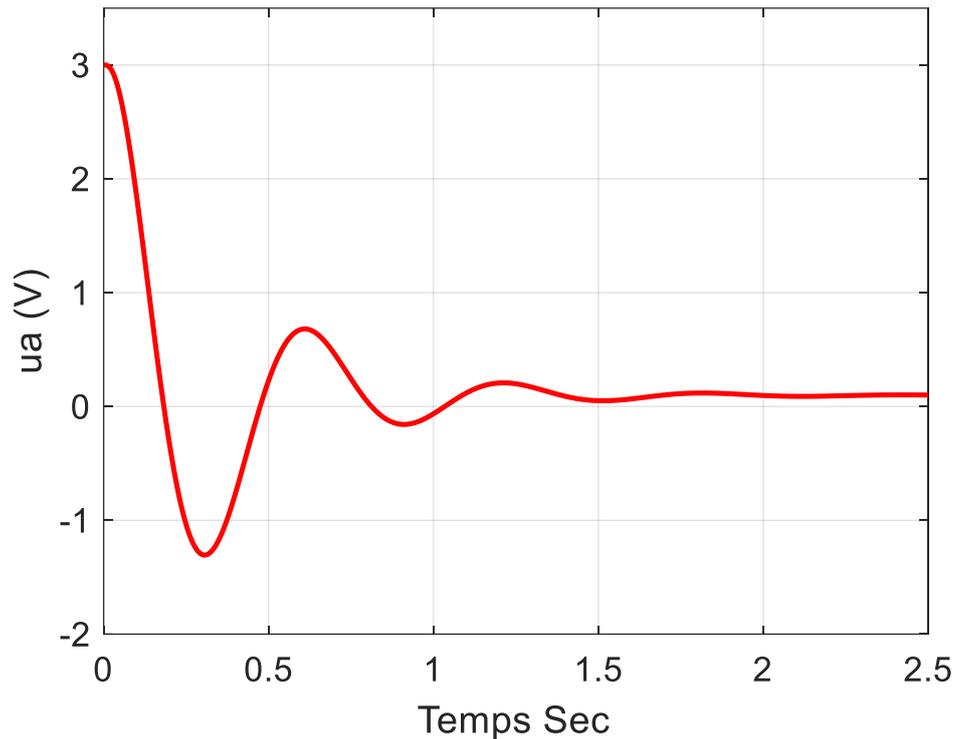


Figure III. 4 : Variable de commande : régulateur PID

Une façon de vérifier la robustesse du régulateur PID consiste à appliquer une perturbation externe à la tension d'excitation du champ, et introduire des incertitudes paramétriques dans le système AVR.

Elément	Fonction de transfert	Variations des gains	Variations des constantes du temps
Amplificateur	$\frac{K_a}{1 + \tau_a p}$	$10 \leq K_a \leq 40$	$0.02 \leq \tau_a \leq 0.1$
Excitateur	$\frac{K_e}{1 + \tau_e p}$	$1 \leq K_e \leq 10$	$0.4 \leq \tau_e \leq 1$
Generateur	$\frac{K_g}{1 + \tau_g p}$	$0.7 \leq K_g \leq 1$	$1 \leq \tau_g \leq 2$
Capteur	$\frac{K_s}{1 + \tau_s p}$	$0.9 \leq K_s \leq 1.1$	$0.001 \leq \tau_s \leq 0.06$

Tableau III.1: Variations paramétriques dans le système AVR

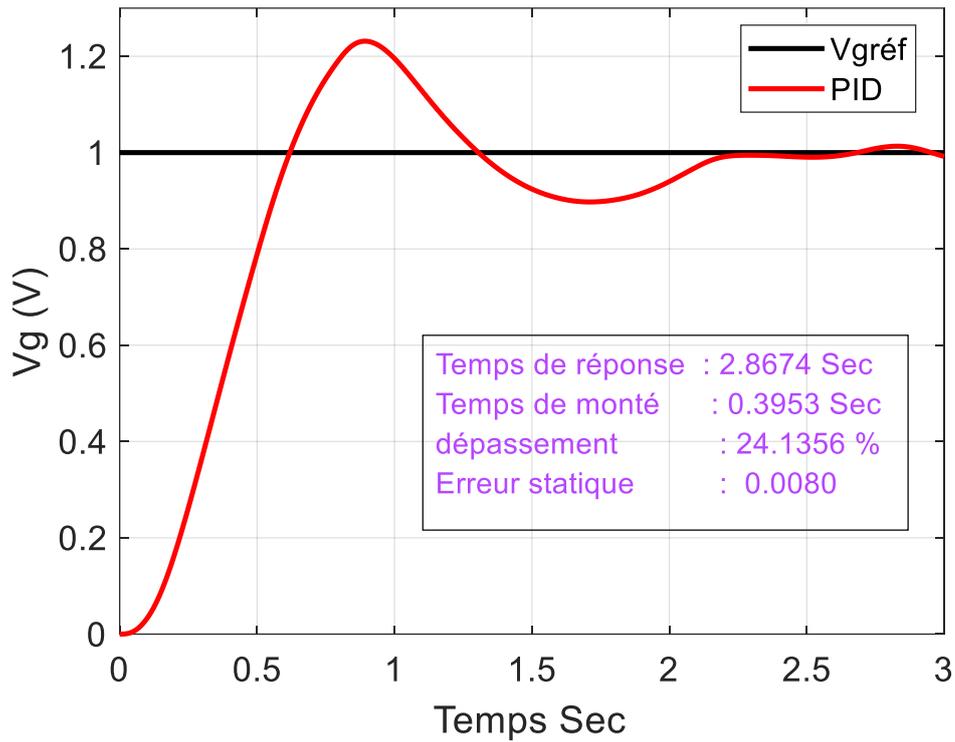


Figure III. 5 : Réponse indicielle du système AVR : commande PID avec perturbations internes et externe

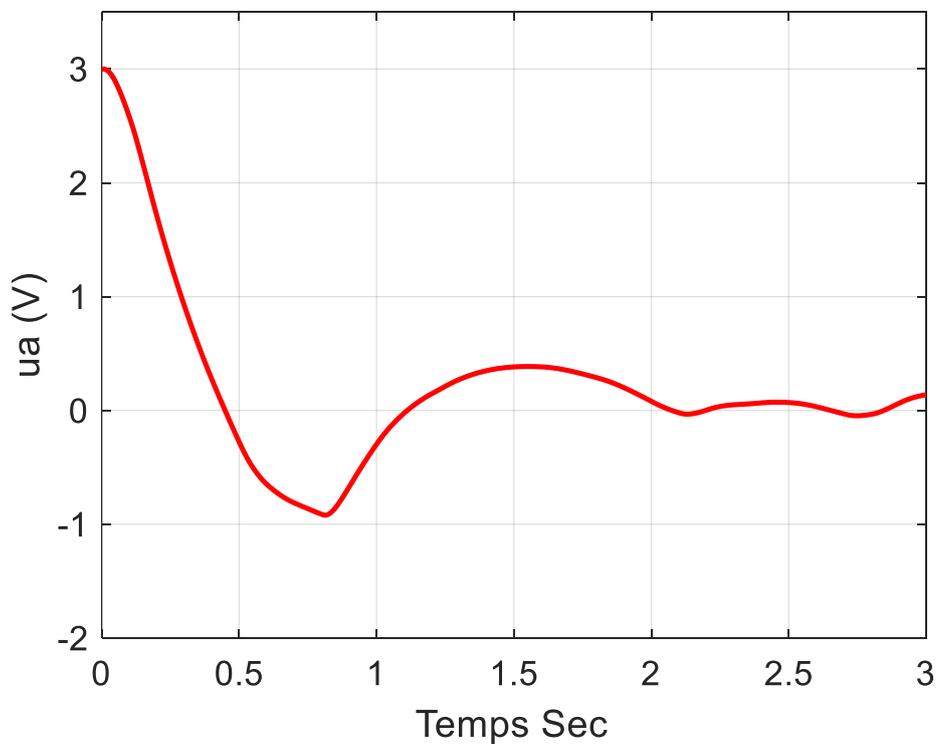


Figure III. 6 : Variable de commande : régulateur PID avec perturbations internes et externe

La figure 5 montre que le régulateur PID possède une faible robustesse aux perturbations externes et aux variations paramétriques du système.

La tension de sortie du générateur et le comportement en régime transitoire doivent être améliorés et l'erreur en régime permanent doit être réduite à zéro. Afin d'y parvenir, un contrôleur de haute performance robuste aux variations paramétriques et aux perturbations doit être ajouté au système AVR.

III -3) Commande par mode glissant

Les perturbations externes parfois causées par des changements brusques de la charge, les incertitudes et les variations paramétriques rendent le système AVR non linéaire. Pour résoudre ces problèmes, il existe des méthodes de commande robustes, y compris la commande en mode glissant.

La commande par mode glissant est une technique de commande robuste qui s'adapte bien aux systèmes à paramètres variables. Elle est caractérisée par une structure de commande qui change de manière discontinue en fonction des variables d'état, créant ainsi une "variété" ou "surface" de glissement [43].

Le schéma du système AVR avec la commande par mode glissant est présenté sur la figure ci-dessous.

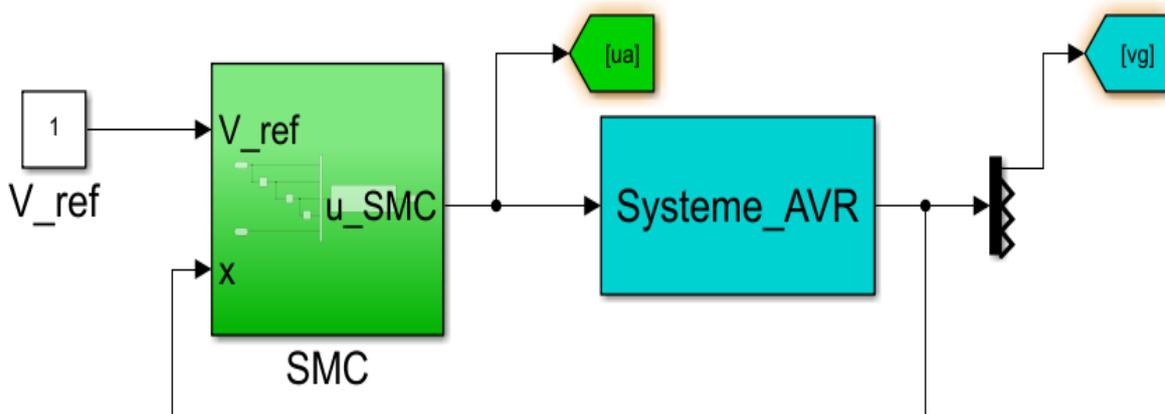


Figure III. 7 : Commande du système AVR par la technique par mode glissant

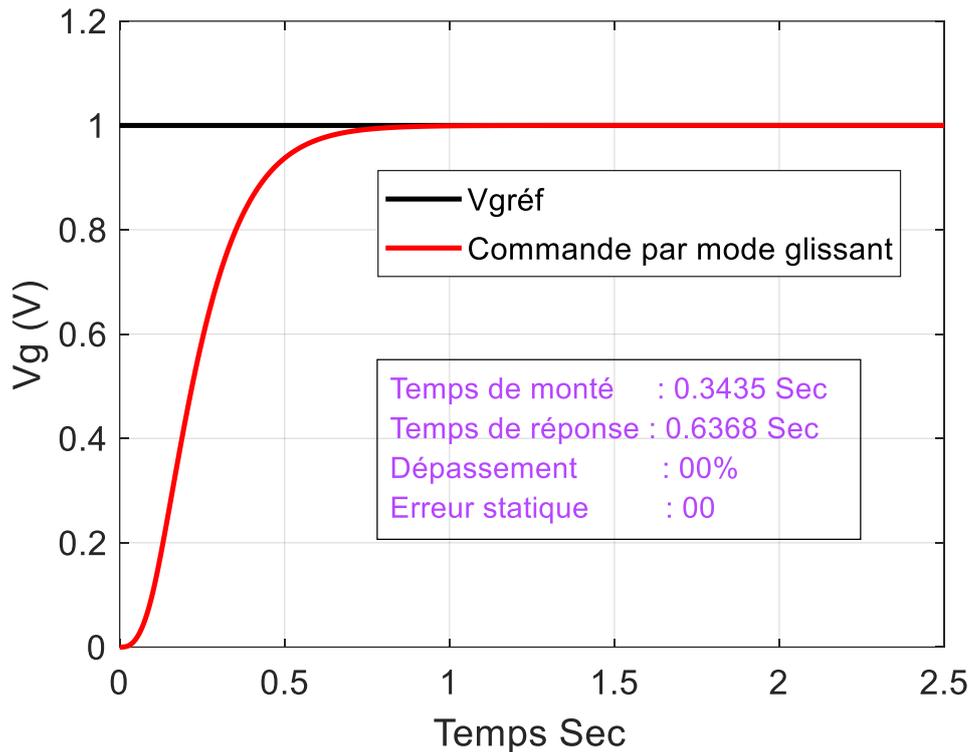


Figure III. 8 : Réponse indicielle du système AVR : commande par mode glissant

Cette figure montre clairement que la commande par mode glissant donne des résultats meilleurs, avec un temps de réponse $t_r = 0.3435 \text{ s}$ et un temps de monté $t_m = 0.6368 \text{ s}$. La réponse en régime permanent comporte une erreur statique nulle $e_r = 0$. On voit clairement que les oscillations ont été éliminés (il n'y a pas de dépassement : 0%).

La figure ci-dessous montre le principe de fonctionnement de la commande par mode glissant.

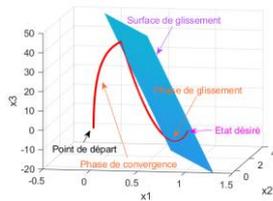


Figure III. 9 : Les deux phases de la commande par mode glissant

Les deux phases de la commande par mode glissant sont illustrées dans cette figure. La commande par mode glissant amène la trajectoire du système AVR à partir d'un point de départ (condition initiale) vers la surface de glissement, une fois la trajectoire atteint la surface de glissement, elle converge vers l'état désiré (phase de glissement).

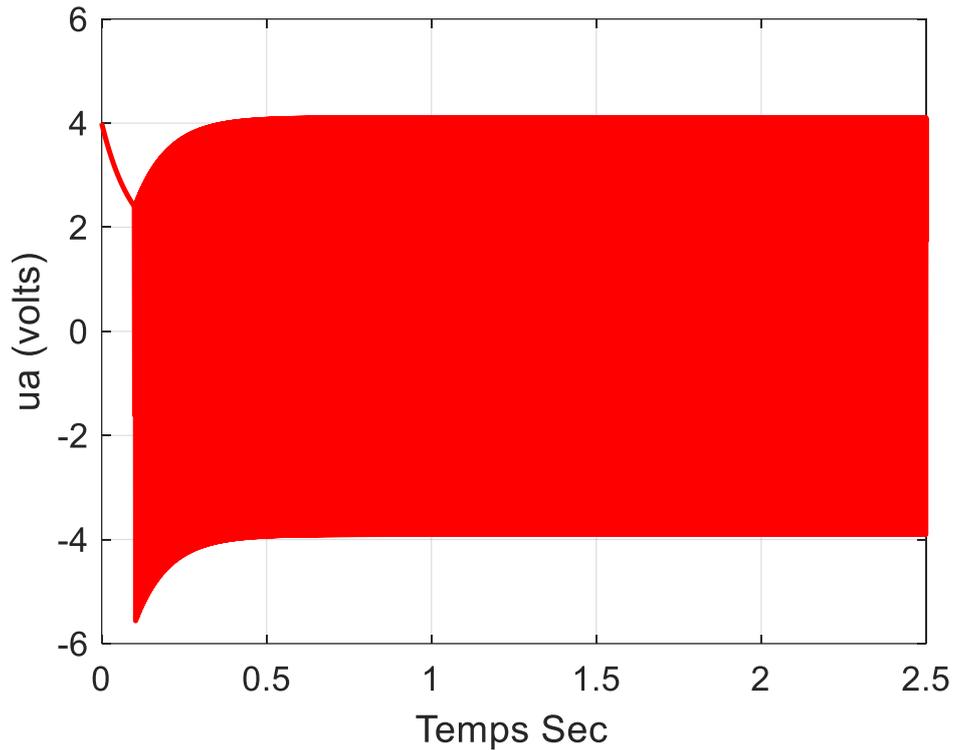


Figure III. 10 : Variable de commande : commande par mode glissant

Malgré les avantages de la commande par mode glissant, cependant elle présente un inconvénient majeur, qui est le phénomène de Chattering, cela signifie que la commande u_{disc} commute entre deux valeurs $\pm K$ avec des oscillations à fréquences élevées se manifestant autour de la surface de glissement S durant la phase de glissement.

Pour résoudre ce problème, et éliminer le phénomène de Chattering, on doit remplacer la fonction *sign* par une fonction plus adéquate telle que la fonction tangente hyperbolique.

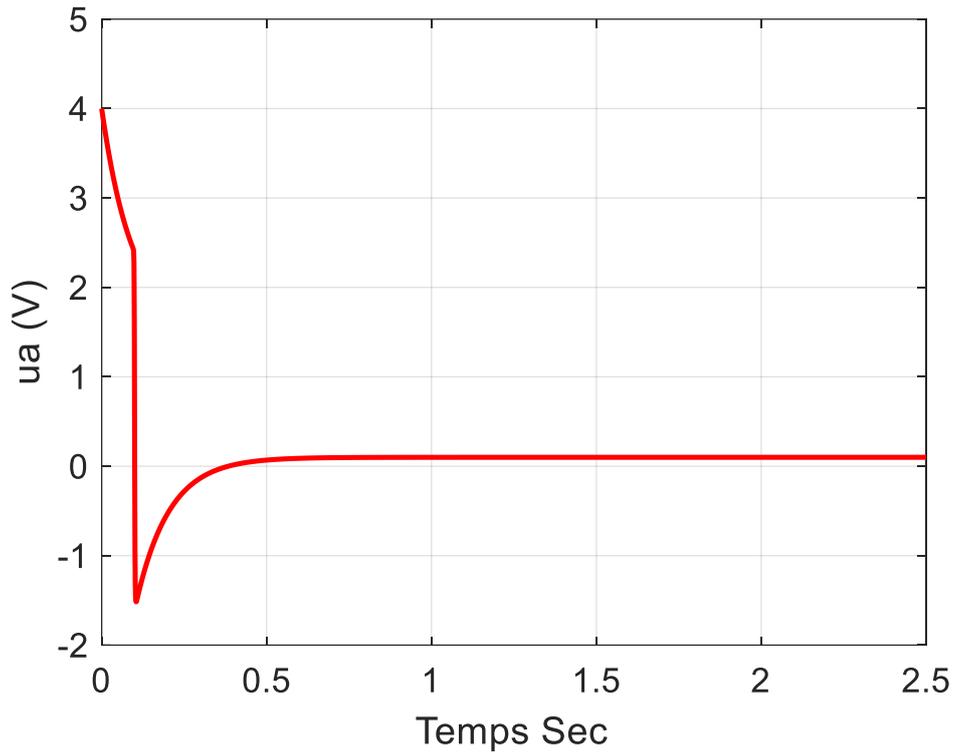


Figure III. 11 : Variable de commande : commande par mode glissant

Après avoir remplacé la fonction *sign* par une des fonctions les plus adéquates (tangente hyperbolique). On remarque que le phénomène de chattering a été éliminé.

Afin de vérifier la robustesse de la commande par mode glissant, on applique des variations paramétriques dans les paramètres du système AVR et une perturbation externe à la tension d'excitation du champ.

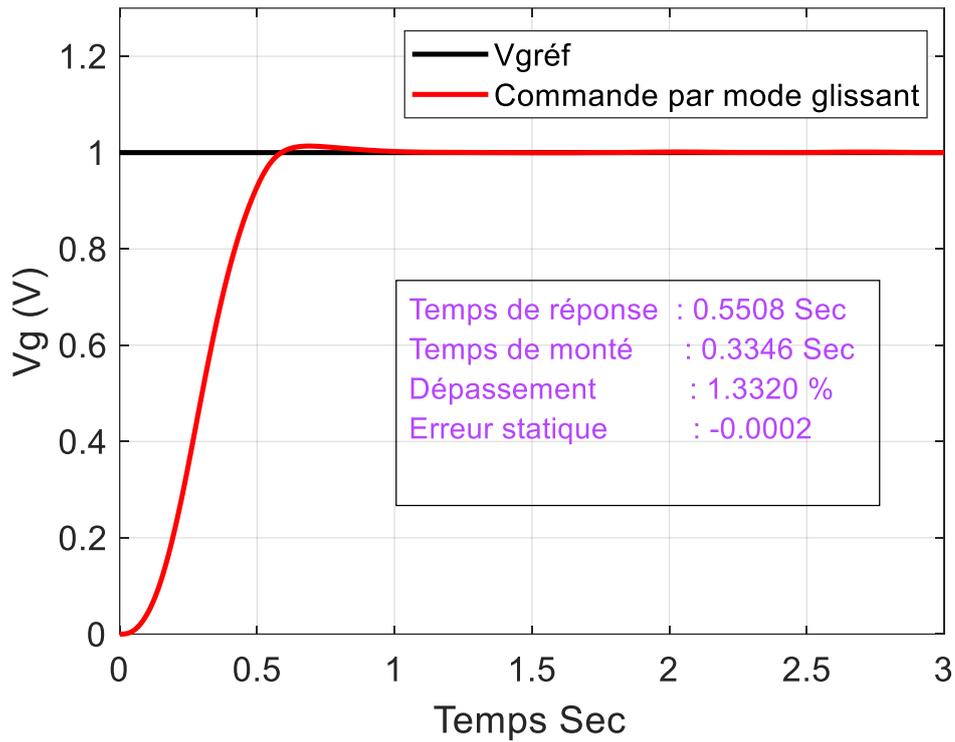


Figure III. 12 : Réponse indicielle du système AVR : commande par mode glissant avec perturbations internes et externe

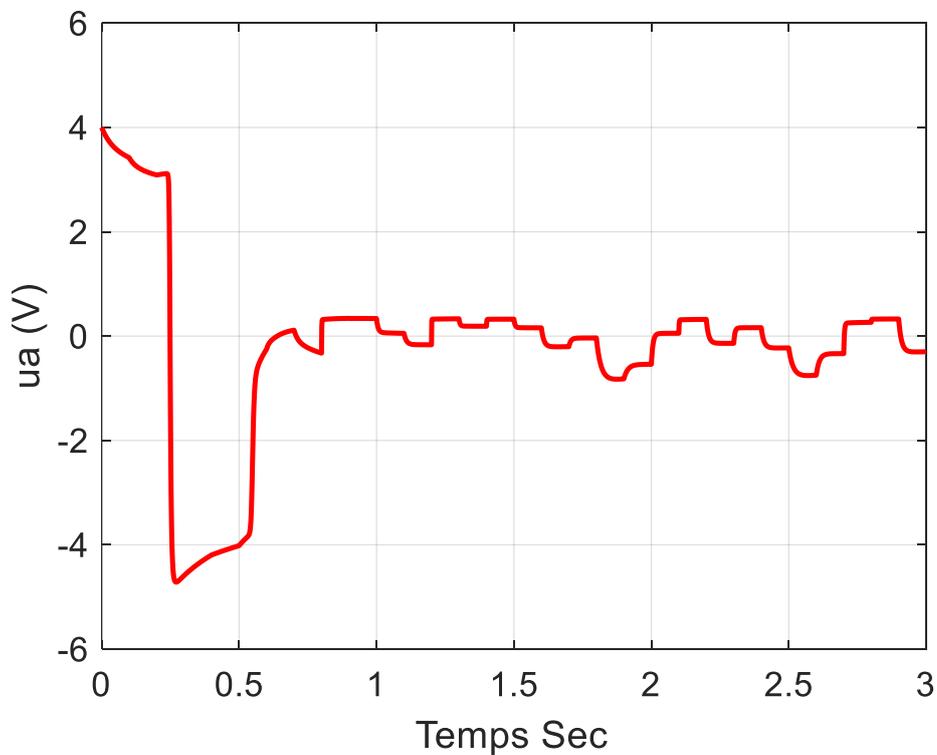


Figure III. 13 : Variable de commande : commande par mode glissant avec perturbations internes et externe

La figure 12 montre clairement que la commande par mode glissant présente une robustesse aux perturbations externes et aux variations paramétriques du système. La commande par mode glissant donne des résultats meilleurs, avec un temps de réponse $t_r = 0.5508 \text{ s}$ et un temps de monté $t_m = 0.3346 \text{ s}$. La réponse en régime permanent comporte une erreur statique presque nulle $e_r = -0.0002$. On voit clairement que oscillations ont été presque éliminés (dépassement : 1.3320 %).

III-4) Régulateur PID basé sur la commande par mode glissant

Le régulateur PID peut être sensible aux perturbations et aux variations paramétriques du système à contrôlé, ce qui peut avoir un impact sur sa précision et sa rapidité. La commande par mode glissant, quant à elle, est une technique de commande robuste. Cette approche est particulièrement performante pour les systèmes non linéaires et les systèmes ayant des perturbations significatives et des variations paramétriques.

La combinaison des deux méthodes permet d'obtenir une solution plus robuste et plus précise pour le système AVR. Grâce à cette commande hybride, il est possible de réagir rapidement aux perturbations et aux modifications des paramètres du système AVR, tout en préservant la précision et la stabilité souhaitées.

Le schéma du système AVR avec le régulateur PID basé sur la commande par mode glissant est présenté sur la figure ci-dessous.

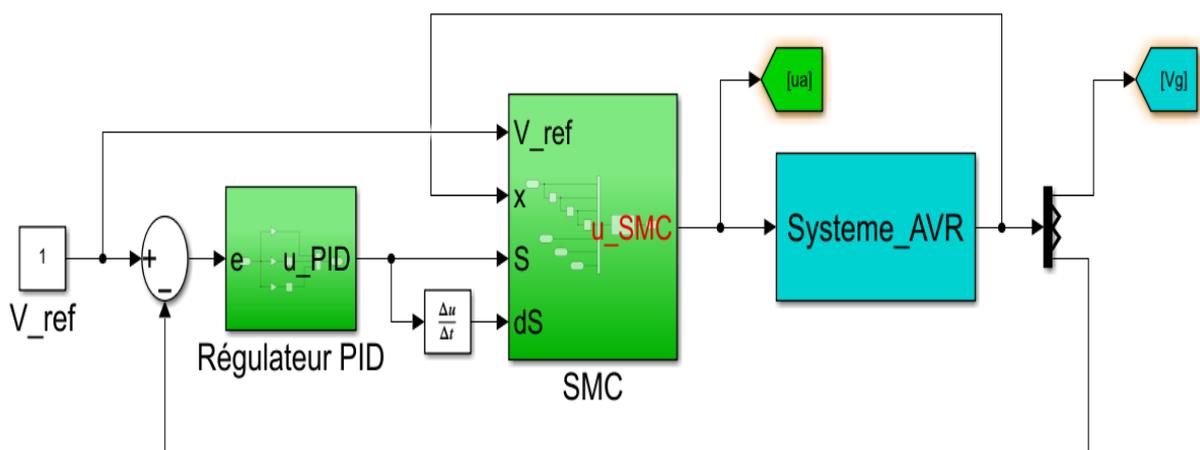


Figure III. 14 : Commande du système AVR par un régulateur PID basé sur la commande par mode glissant

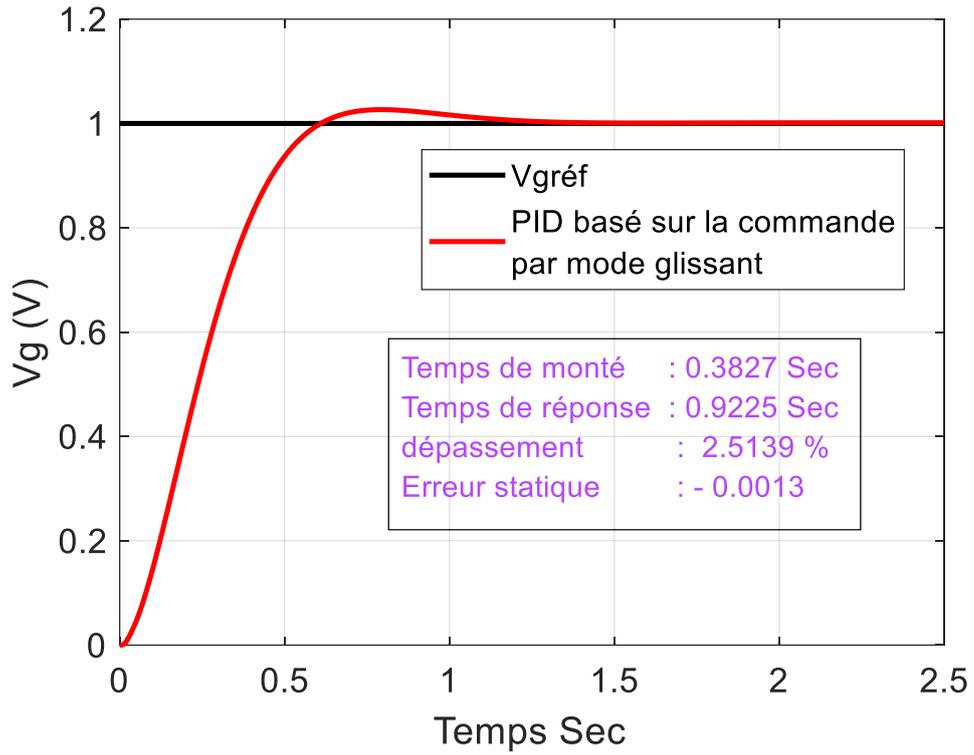


Figure III. 15 : Réponse indicielle du système AVR : régulateur PID basé sur la commande par mode glissant

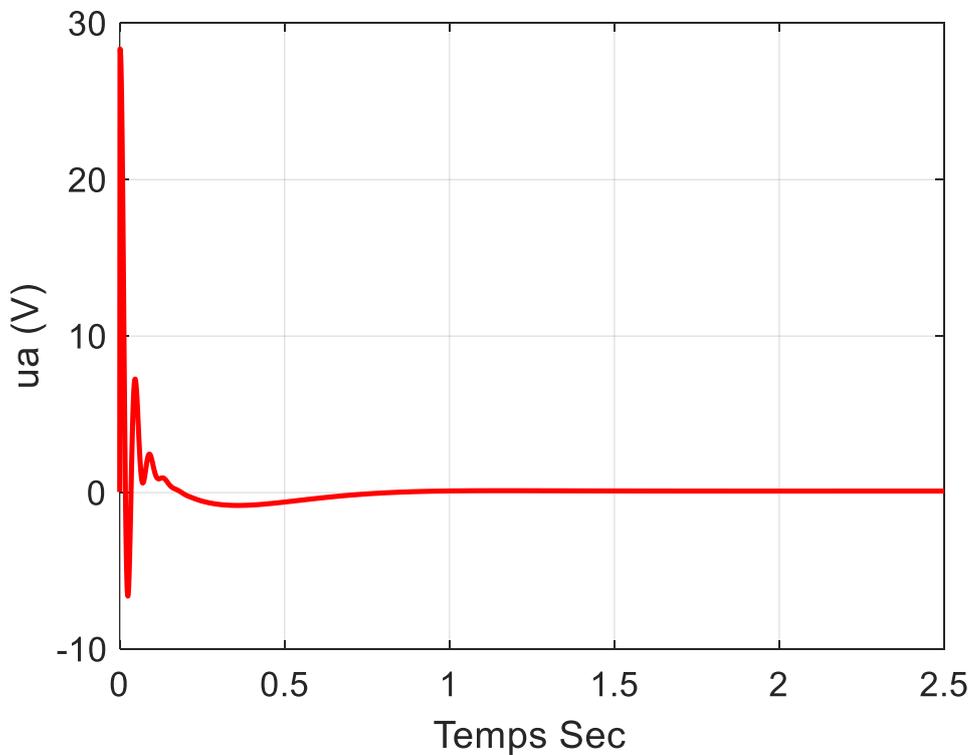


Figure III. 16 : Variable de commande : régulateur PID basé sur la commande par mode glissant

Cette figure montre une bonne réponse du système AVR commandé par un régulateur PID basé sur la commande par mode glissant, le temps de réponse $t_r = 0.9225$ s et le temps de montée $t_m = 0.3827$ s. La réponse en régime permanent comporte une erreur statique très réduite $e_r = -0.0013$. On voit bien que les oscillations ont été réduites, avec un dépassement d'environ 2.5%.

Pour vérifier la robustesse du régulateur PID basé sur la commande par mode glissant, on applique des perturbations externes et internes dans le système AVR.

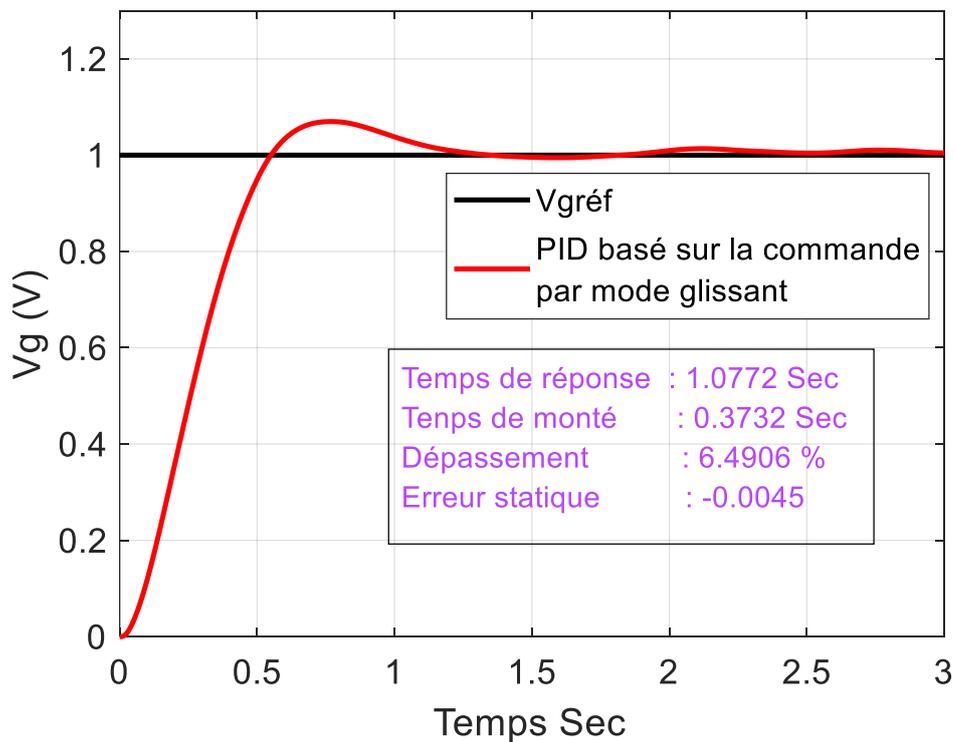


Figure III. 17 : Réponse indicielle du système AVR : régulateur PID basé sur la commande par mode glissant avec perturbations internes et externe

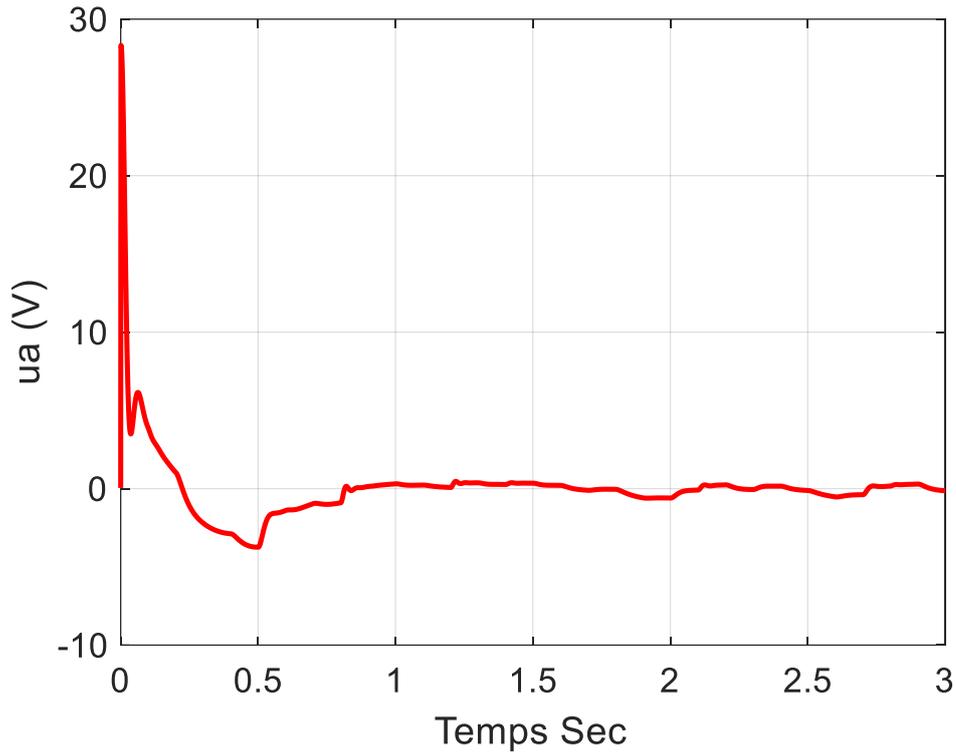


Figure III. 18 : Variable de commande : régulateur PID basé sur la commande par mode glissant avec perturbations internes et externe

La figure 17 montre que la commande hybride présente une robustesse acceptable aux perturbations externes et aux variations paramétriques du système.

Les figures ci-dessous récapitulent la réponse indicielle du système AVR pour les techniques de commande utilisées.

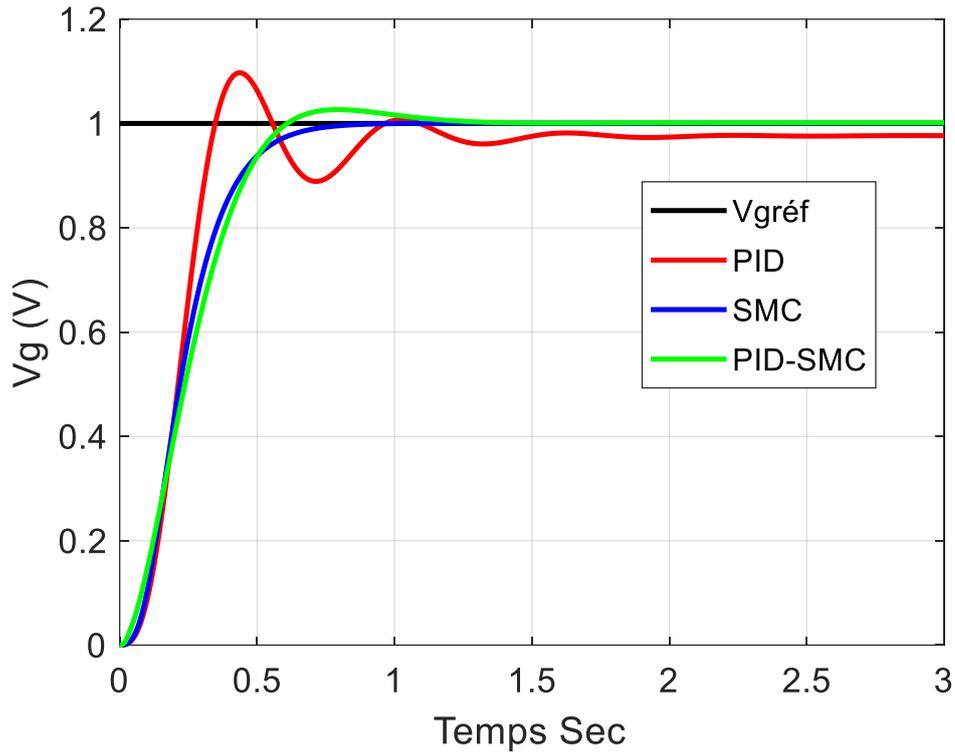


Figure III. 19 : Réponse indicielle du système AVR : régulateur PID, commande par mode glissant, et commande hybride

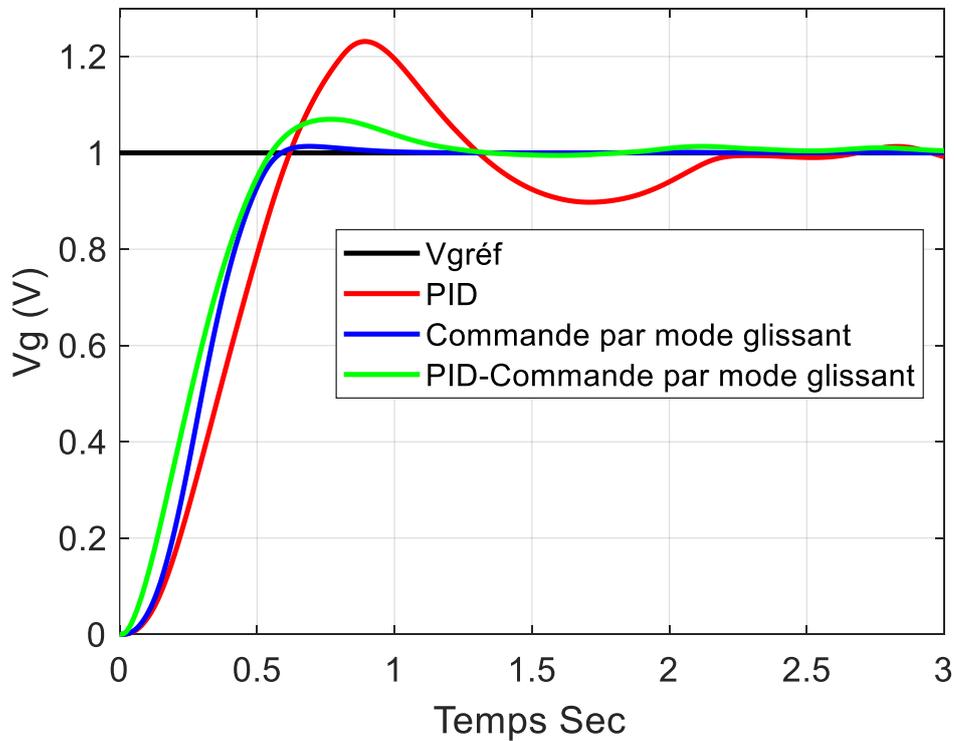


Figure III. 20 : Réponse indicielle du système AVR : régulateur PID, commande par mode glissant, et commande hybride avec perturbations internes et externe

Ces figures montrent une comparaison entre les trois types de commande : régulateur PID, commande par mode glissant, régulateur PID basé sur la technique de commande par mode glissant. D'après les résultats trouvés, on a trouvé que la commande par mode glissant a donné des meilleurs résultats par rapport aux autres types de commande.

Le tableau suivant récapitule les performances de chaque technique de commande utilisées.

Techniques de commande	Temps de monté (sec)	Temps de réponse (sec)	Dépassement %	Erreur statique
Système sans commande	0.2607	0.7547	65.4272	0.0907
Régulateur PID	0.2007	1.1025	12.1759	0.2190
Commande par mode glissant	0.3435	0.6368	0	0
Commande hybride	0.3827	0.9225	02.5139	-0.0013

Tableau III. 2: Tableau de comparaison de performances

Techniques de commande	Temps de monté	Temps de réponse	dépassement	Erreur statique
Régulateur PID	2.8674	0.3953	24.1356	0.0080
Commande par mode glissant	0.5508	0.3346	1.3320	-0.0002
Commande hybride	1.0772	0.3732	6.4906	-0.0045

Tableau III. 3: Tableau de comparaison de performances avec perturbations

III-5) Conclusion

Les systèmes AVR sont des dispositifs électroniques qui permettent de maintenir une tension électrique stable et constante dans un réseau électrique. Selon les mauvais résultats obtenus pour le système AVR sans commande, il est nécessaire de le commander par une commande robuste et adéquate. Afin d'accomplir cela, on a employé les types de commandes suivantes : le régulateur PID classique, la commande par mode glissant, et une commande hybride qui associe le régulateur PID à la commande par mode glissant.

La mise en place d'un régulateur PID adéquat à l'AVR permet d'améliorer et de contrôler la tension de sortie du générateur asynchrone. Selon les résultats de la simulation, l'intégration du régulateur PID dans le système AVR permet d'obtenir une réponse plus rapide, des oscillations réduites et un dépassement réduit. Cependant, le régulateur PID a présenté une faible robustesse aux perturbations externes et aux variations paramétriques.

La technique de commande par mode glissant a plusieurs avantages : elle est caractérisée par sa robustesse aux variations paramétriques et aux perturbations externes, et sa convergence (asymptotique) rapide vers l'état désiré. Les résultats de simulation montrent l'ajout de la commande par mode glissant au système AVR donne une réponse rapide, et un dépassement nul.

La dernière commande est la commande hybride. Les résultats de simulation montrent l'ajout cette commande au système AVR donne une réponse satisfaisante, une erreur statique presque nulle et des oscillations très réduites.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le régulateur de tension automatique (AVR) est un dispositif important pour régler la tension de sortie du générateur synchrone. La fonction principale des régulateurs de tension automatiques (AVR) est de stabiliser la tension de sortie des générateurs soumis à des charges variables.

D'après les mauvais résultats trouvés pour le système AVR sans commande, un contrôleur approprié doit être ajouté à l'AVR. Pour ce faire, on a utilisé les techniques de commande suivantes : le régulateur PID classique, la commande par mode glissant, et une commande hybride qui combine le régulateur PID et la commande par mode glissant.

Le régulateur PID est utilisé dans le système AVR pour améliorer la réponse du système grâce à sa simplicité de mise en œuvre par rapport aux autres contrôleurs. L'ajout d'un régulateur PID approprié à l'AVR donne la possibilité d'améliorer et de manipuler la tension de sortie du générateur asynchrone. Les résultats de simulation montrent l'ajout du régulateur PID au système AVR donne une réponse plus au moins rapide, des oscillations réduites, avec un dépassement réduit. Pour vérifier la robustesse du régulateur PID, on a appliqué une perturbation externe à la tension d'excitation du champ, et introduit des incertitudes paramétriques dans le système AVR. Les résultats de simulation montrent que le régulateur PID possède une faible robustesse aux perturbations externes et aux variations paramétriques du système.

La tension de sortie du générateur et le comportement en régime transitoire doivent être améliorés et l'erreur statique doit être réduite à zéro. Afin d'y parvenir, il faut ajouter un contrôleur robuste aux variations paramétriques et aux perturbations au système AVR.

La deuxième commande qu'on a utilisée est la commande par mode glissant. Cette technique de commande a plusieurs avantages : elle est caractérisée par sa robustesse aux variations paramétriques et aux perturbations externes, et sa convergence (asymptotique) rapide vers l'état désiré. Les résultats de simulation montrent l'ajout de la commande par mode glissant au système AVR donne une réponse rapide, et pas des oscillations (il n'y a pas de dépassement: 0%). Pour vérifier la robustesse de la

commande par mode glissant, on a appliqué des perturbations externes et introduit des incertitudes paramétriques dans le système AVR. Les résultats de simulation montrent la robustesse de la commande par mode glissant aux perturbations externes et aux variations paramétriques dans le système AVR.

La troisième commande qu'on a utilisée est le régulateur PID basé sur la commande par mode glissant. Cette combinaison des deux méthodes permet d'obtenir une solution plus robuste et plus précise pour le système AVR. Grâce à cette commande, il est possible de réagir rapidement aux perturbations et aux modifications des paramètres du système AVR, tout en préservant la précision et la stabilité souhaitées. Les résultats de simulation montrent l'ajout de cette commande au système AVR donne une réponse satisfaisante, une erreur statique presque nulle et des oscillations très réduites (dépassement : 2.5%). Les résultats montrent aussi une robustesse acceptable aux perturbations externes et aux variations paramétriques du système AVR.

Résumé

Résumé

Les systèmes AVR (Automatic Voltage Regulator) sont des dispositifs électroniques qui permettent de maintenir une tension électrique stable et constante dans un réseau électrique. Ils sont utilisés dans divers domaines, notamment pour l'alimentation électrique des groupes électrogènes, les microcontrôleurs et les générateurs d'électricité...etc.

D'après les mauvais résultats trouvés pour le système AVR sans commande, un contrôleur approprié doit être ajouté à l'AVR. Pour ce faire, on a utilisé les techniques de commande suivantes : le régulateur PID classique, la commande par mode glissant, et une commande hybride qui combine le régulateur PID et la commande par mode glissant. Les résultats de simulations sont discutés et validés par le logiciel matlab/simulink.

Mots clés:

Systèmes à structures variables, commande par mode glissant, régulateur de tension automatique, régulateur PID.

Abstract

AVR (Automatic Voltage Regulator) systems are electronic devices that maintain a stable and constant electrical voltage in an electrical network. They are used in various fields : for the power supply of generators, microcontrollers and electricity generators...etc.

Based on the poor results found for the controlless AVR system, a suitable controller needs to be added to the AVR. To do this, the following control techniques were used: the classic PID regulator, sliding mode control, and a hybrid control which combines the PID regulator and sliding mode control. The simulation results are discussed and validated by the matlab/simulink software.

Key words:

Systems with variable structures, sliding mode control, automatic voltage regulator, PID regulator.

ملخص

أنظمة AVR (منظم الجهد الالي) هي أجهزة إلكترونية تحافظ على جهد كهربائي ثابت ومستقر في الشبكة الكهربائية. يتم استخدامها في مجالات مختلفة، أبرزها إمداد المولدات الكهربائية والمتحكمات الدقيقة ومولدات الكهرباء... الخ.

بناءً على النتائج الضعيفة التي تم العثور عليها لنظام AVR من دون التحكم فيه، يجب إضافة وحدة تحكم مناسبة إلى AVR. للقيام بذلك، تم استخدام تقنيات التحكم التالية: منظم PID الكلاسيكي، والتحكم في الوضع المنزلق، والتحكم الهجين الذي يجمع بين منظم PID والتحكم في الوضع المنزلق. تمت مناقشة نتائج المحاكاة والتحقق من صحتها بواسطة برنامج matlab/simulink.

الكلمات المفتاحية:

الأنظمة ذات الهياكل المتغيرة، التحكم في الوضع المنزلق، منظم الجهد الأوتوماتيكي، منظم PID.

Bibliographie

- [1] Power System Stability and Control" by Prabha Kundur - This classic textbook covers power system stability, including the role of AVR in maintaining system stability
- [2] Voltage Control and Stability in Power Systems" by Francisco M. Gonzalez-Longatt - Provides an in-depth understanding of voltage control techniques, including AVR.
- [3] Comparison of AVR Techniques for Power System Stability" by K. Ramesh et al. - Compares different AVR techniques and their impact on power system stability.
- [4] Electrical Power Systems Quality" by Roger C. Dugan - Covers AVR function in improving power quality by regulating voltage fluctuations
- [5] Optimal Placement of AVR Systems in Power Networks" by A. K. Mohapatra et al. - Investigates the optimal placement of AVR systems in power networks for improved voltage regulation.
- [6] right power company "Things to know about the Automatic Voltage Regulator".
- [7] Woodstock power company, "WHAT IS AN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR)?".
- [8] Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control" by Shankar Sastry and Marc Bodson - Includes a section on sliding mode control, offering a concise overview within the broader context of nonlinear control systems.
- [9] AVR Systems for Grid Integration of Distributed Energy Resources" by G. S. Rao et al. - Examines the challenges and solutions for integrating distributed energy resources into the grid using AVR systems.
- [10] Process Control: Modeling, Design, and Simulation" by B. Wayne Bequette - Includes chapters on PID control theory, design, and tuning, with practical examples and simulation exercises.
- [11] Shamik Chatterjee, V. Mukherjee, "PID controller for automatic voltage regulator using teaching-learning based optimization technique" Department of Electrical Engineering, Indian School of Mines, Dhanbad, Jharkhand, India
- [12] Woodstock power company, "WHAT IS AN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR)?".
- [13] right power company "Things to know about the Automatic Voltage Regulator".
- [14] automen système, "What Is Automatic Voltage Regulator?".
- [15]: Amar si Amour, Contribution de la commande par modes glissants d'ordre fractionnaire, Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou, 2011.
- [16] D.V. Anosov, "On stability of equilibrium points of relay systems," Automation and Remote Control, vol.2, pp. 135-149, 1959.

- [17] Y.Z. Tzypkin, Theory of Control Relay Systems, Moscow : Gostekhizdat, 1955.
- [18] S.V. Emel'yanov, "On peculiarities of variables structure control systems with discontinuous switching functions," Doklady ANSSR, vol. 153, pp. 776-778, 1963.
- [19] S.V. Emel'yanov, Variable Structure Control Systems, Moscow. Nauka, 1967.
- [20] B. Hamel, Contribution à l'étude mathématique des systèmes de réglage par Tout ou Rien, Centre d'études de mécanique, no.17, 1949.
- [21] V.I. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 22, no 2, pp. 212-222, 1977.
- [22] D. Boukhetala, F. Boudjema, T. Madani, M.S. Boucherit and N.K. M'Sirdi, "A new decentralized variable structure control for robot manipulators," Int. J. of Robotics and Automation, vol. 18, pp. 28-40, 2003.
- [23] M.E. Aggoune, F. Boudjema, A. Bensenousi, A. Hellal, M.R. Elmesai and S.V. Vadari, "Design of adaptive variable structure voltage regulator using artificial neural networks," Proc. 2nd IEEE Conf. in Control Applications, Vancouver, pp. 337-343, 1993.
- [24] M.E. Aggoune, F. Boudjema, A. Bensenousi, A. Hellal, M.R. Elmesai and S.V. Vadari, "Design of variable structure voltage regulator using pole assignement technique," IEEE Trans. Autom. Control, AC-39, pp. 2106-2110, 1994.
- [25] F. Boudjema and J.L. Abatut, "Sliding-Mode : A new way to control series resonant converters," 1990 IEEE Conf. Ind. Electron. Society, Pacific Grove, CA, pp. 938-943, 1990.
- [26] EL. Ghezawi, O.M.E. Zinober, "Analysis and design of variable structure systems using a geometric approach," ibid, pp.657-671, 1983.
- [27] V.I. Utkin, K. D. Young, "Methods for constructing discontinuity planes in multidimensional variable structure systems," Auto. & Remote control, pp. 1466-1470, 1978.
- [28] D.S. Lee, M.J. Youn, "Controller design of variable structure systems with nonlinear sliding surface," Electronics Letters, vol. 25, no. 25, pp.1715-1716, 1989.
- [29] : Vincent BREGEAULT. (quelques contributions à la théorie de la commande par modes glissants) École Centrale De Nantes 2010.
- [30] D. Rachedi Nedjmi. Commande hybride avec observation d'un UAV de type quadrotor. Thèse de Magistère, Ecole Militaire Polytechnique, Alger, Algérie, 2010.
- [31] U.Itkis. Control systems of variable structure. J. Wiley: New York, 1976.
- [32] V.I. Utkin. Sliding modes in control optimization. Communication and control Engineering series, Springer Verlag, 1992 286 pages ISBN 3540535160, 9783540535164.

- [33] D. Rachedi Nedjmi. Commande hybride avec observation d'un UAV de type quadrotor. Thèse de Magistère, Ecole Militaire Polytechnique, Alger, Algérie, 2010.
- [34] V. Bregeault. Quelques contributions à la théorie de la commande par modes glissants. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, France ,2010.
- [35] china everlasting parts co limited “Comment Fonctionne L'AVR Dans Un Alternateur”.
- [36] lisc univ-littoral “Les microcontrôleurs de la famille AVR d'Atmel”.
- [37] groupe électrique “Groupe électrogène AVR : guide d’achat et fonctionnement AVR d’un groupe électrogène”.
- [38] Genpowerusa “Régulateur Automatic voltage regulator Installation et/and maintenance”.
- [39] Hadji abd elmelek et Amirat Boudjemaa. commande des systèmes non linéaires par mode glissant , Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA
- [40] U.Itkis. Control systems of variable structure. J. Wiley: New York, 1976.
- [41] D. Rachedi Nedjmi. Commande hybride avec observation d’un UAV de type quadrotor. Thèse de Magistère, Ecole Militaire Polytechnique, Alger, Algérie, 2010.
- [42] PID Controllers: Theory, Design, and Tuning" by Tore Haggglund, Karl Johan Astrom
- [43] IEEE Xplore - An online library for IEEE publications where you can find numerous research papers on PID control
- [44] Åström, K. J., & Häggglund, T. (1995). PID controllers: Theory, design, and tuning. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America.
- [45] Sliding Mode Control: Theory and Applications" by Vadim Utkin, J. Guldner, J. Shi.
- [46] Utkin, V. I. (1992). Sliding mode control: principles and applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 36(3), 21-27
- [47] Edwards, C., & Spurgeon, S. K. (1998). Sliding mode control: theory and practice. CRC Press.
- [48] Su, Y., & Xu, J. (2007). A PID sliding mode control method and its application. Journal of Zhejiang University Science A, 8(6), 914-918
- [49] Yousefi-Koma, A., & Jalili, A. (2017). PID sliding mode control of a nonlinear electrohydraulic system. Journal of Vibration and Control, 23(13), 2133-2144.
- [50] ResearchGate and Google Scholar - These platforms provide access to various research papers and articles related to PID-SMC.

Bibliographie

[51] Make: AVR Programming: Learning to Write Software for Hardware" by Elliot Williams

[52] AVR Freaks - A community website dedicated to AVR microcontrollers, featuring forums, tutorials, projects, and resources.

[53] Programming AVR Microcontrollers in C" by Tim Sharpe.