Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 89 (1998)

Heft: 12

Artikel: Stratégies de réglage pour la sustentation et le guidage magnétique des véhicules de Swissmetro

Autor: Colombi, Silvio / Rufer, Alfred / Zayadine, Michel

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902089

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

La sustentation et le guidage magnétique ont plusieurs applications industrielles: véhicules à haute vitesse, machines-outils, paliers magnétiques et convoyeurs ([1], [2]). Dans cet article, on compare différentes stratégies de réglage pour la sustentation et le guidage magnétique des véhicules de Swissmetro. Pour la validation expérimentale, on utilise le banc d'essais de la figure 1, constitué par un véhicule sustenté par quatre inducteurs.

Stratégies de réglage pour la sustentation et le guidage magnétique des véhicules de Swissmetro

■ Silvio Colombi, Alfred Rufer, Michel Zayadine, Michel Girardin

Modélisation

Introduction

Le système à régler, c'est-à-dire l'inducteur électromagnétique, est instable et fortement non linéaire. Il est bien connu que le meilleur modèle est le plus simple qui permet de représenter le phénomène désiré. Ainsi, on présente deux modèles de complexité différente qui seront ensuite validés par rapport à des résultats expérimentaux obtenus sur un banc d'essais. Pour finir, on discutera brièvement la modélisation des perturbations.

Modèle idéal

Hypothèses

Pour la modélisation de l'inducteur électromagnétique, on fait les hypothèses suivantes:

- fer à perméance infinie et sans saturation magnétique
- pas d'hystérésis
- pas de flux de fuite
- pas de flux de frange
- force d'attraction appliquée au centre de l'inducteur

Equations électromagnétiques et dynamiques

La figure 2 montre l'inducteur avec les référentiels considérés. Avec les hypothèses, le modèle magnétique équivalent de l'inducteur est composé d'une perméance $\Lambda(\delta)$, fonction de l'entrefer δ, et d'une source de potentiel électromagnétique θ, donnée par la loi d'Ampère $\theta = Ni$, où N est le nombre de spires de la bobine et i est le courant.

Le bobinage est caractérisé par sa résistance R et son inductance L, liée à la perméance

Adresse des auteurs
Dr *Silvio Colombi**, Prof. *Alfred Rufer**
Dr *Michel Zayadine***, *Michel Girardin****

* Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
Laboratoire d'électronique industrielle
1015 Lausanne

** Malea str., 17676 Kalithea, Athens, Greece
*** Warner Electric Int. SA
1029 Villars-Ste-Croix

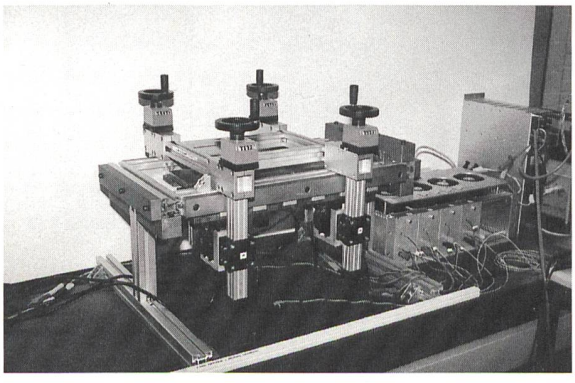


Figure 1 Banc d'essais pour la sustentation magnétique.

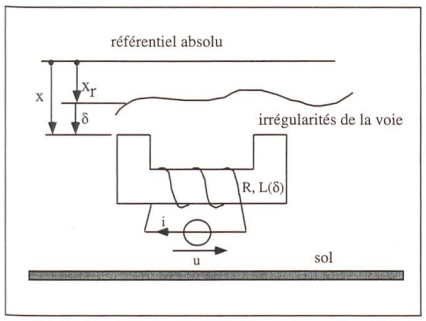


Figure 2 Inducteur et référentiels.

$$L(\delta)=\frac{1}{2}N^2\Lambda(\delta)=L_n\left(\frac{\delta_n}{\delta}\right) \qquad (1)$$

L_n est l'inductance pour l'entrefer nominal, donnée par

$$L_n=\frac{N^2\mu_0 A}{2\delta_n} \qquad (2)$$

où A, d_n et m_0 sont respectivement la surface du pôle, l'entrefer nominal et la perméabilité du vide.

L'équation de tension donne

$$u_d=Ri+L_n\frac{\delta_n}{\delta}\left(\frac{di}{dt}-\frac{i}{\delta}\frac{d\delta}{dt}\right) \qquad (3)$$

Les forces appliquées à l'inducteur sont la force électromagnétique F_x et la force de gravité. La loi de Newton fournit alors l'accélération

$$\frac{d^2x}{dt^2}=-\frac{F_x}{m}+g=-\frac{1}{2m}L_n\delta_n\left(\frac{i}{\delta}\right)^2+g \qquad (4)$$

Une déviation du rail d'une valeur de x_r (voir figure 2) par rapport à sa position nominale est perçue par l'inducteur comme une perturbation. L'équation (3) montre que c'est la dérivée de l'entrefer qui agit sur le système

$$\frac{d\delta}{dt}=\frac{dx}{dt}-\frac{dx_r}{dt} \qquad (5)$$

Avec les équations (3) et (4), on obtient le schéma bloc de l'inducteur magnétique représenté à la figure 3 qui montre clairement la nature non linéaire du système.

Modèle avec flux de fuite et chutes de potentiel magnétique dans le fer

La figure 4 montre l'inducteur avec les flux de fuite. Avec ces derniers et avec les chutes de potentiel magnétique dans le fer, le modèle devient assez complexe [3] et on renonce à reporter ici les expressions résultantes.

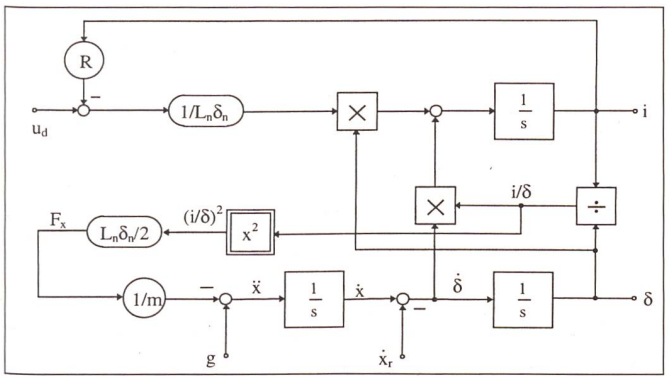


Figure 3 Schéma bloc de l'inducteur de sustentation magnétique en négligeant les flux de fuite et de frange, les chutes de potentiel magnétique dans le fer ainsi que la saturation.

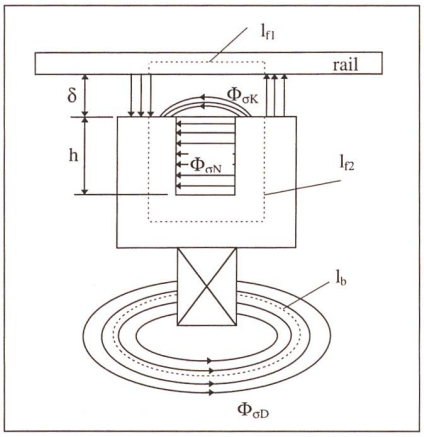


Figure 4 Inducteur avec flux de fuite.

Validation des modèles

Pour valider les deux modèles par rapport à des résultats expérimentaux, on utilise un essai en boucle ouverte sur le banc d'essais de la figure 1. Partant d'un entrefer initial de 2 mm, on applique une tension constante au bobinage de l'inducteur. Un film mince (300 mm) est utilisé pour éviter le collage. Les figures 5 et 6 comparent le courant dans l'inducteur réel au courant calculé avec le modèle idéal et avec le modèle complexe. Il est clair que les flux de fuite et les chutes de potentiel magnétique dans le fer doivent être pris en considération. Par ailleurs, l'effet de la saturation magnétique est moins important [3], car l'inducteur est dimensionné pour travailler dans le domaine linéaire.

Modélisation de la perturbation

Deux types de perturbation peuvent arriver. La première est une perturbation d'entrefer due à des irrégularités du rail et la seconde est une perturbation de force due à des phénomènes aérodynamiques

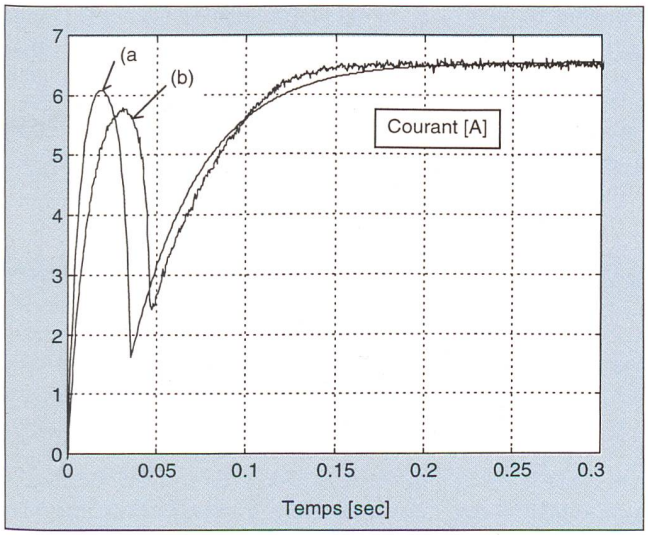


Figure 5 Courant d'inducteur dû à une réponse indicielle en tension: (a) modèle idéal; (b) inducteur réel.

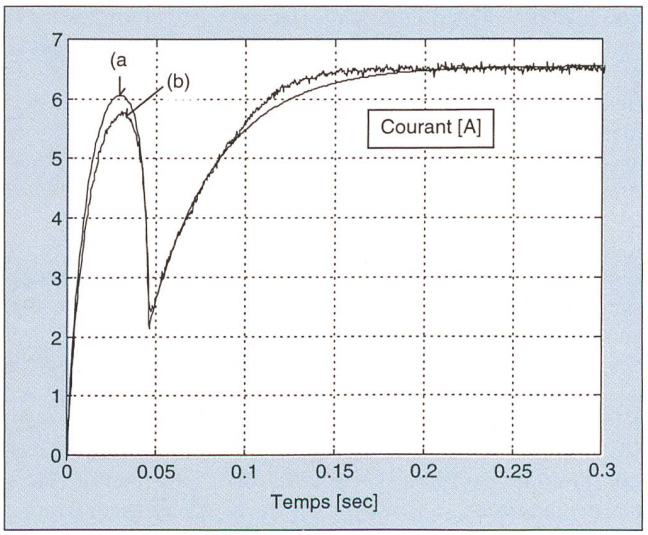


Figure 6 Courant d'inducteur dû à une réponse indicielle en tension: (a) modèle avec flux de fuite et chutes de potentiel magnétique dans le fer; (b) inducteur réel.

(sustentation) ou à des forces centripètes (guidage). La première perturbation est la plus grave, car quand l'inducteur arrive très près du rail il y a risque de collage.

Stratégies de réglage de position

Introduction

Différentes stratégies sont possibles pour le réglage de position de systèmes sustentés électromagnétiquement. Les facteurs de comparaison sont: performances (par rapport à des variations de consigne et de perturbation), robustesse (par rapport à des variations de paramètres), complexité, fiabilité et nombre de capteurs nécessaires. Ci-après, on discute les avantages et inconvénients de chaque stratégie et on conclut avec une évaluation comparative en vue de l'application réelle sur un véhicule échelle 1:1.

Réglage d'état, commande en tension

Le système à régler est fortement non linéaire [voir équations (3), (4) et (5)] et doit être linéarisé autour d'un point de fonctionnement nominal. La stabilité est assurée autour de ce point, mais pas ailleurs. En fait, le système reste stable dans un domaine de travail assez large, mais avec des performances réduites. Ainsi, un réglage d'état adaptatif avec adaptation continue des coefficients peut être réalisé [4]. La stabilité est assurée dans tout le domaine de fonctionnement, ce qui est intéressant, car l'adaptation continue des coefficients peut conduire à l'instabilité [5].

Méthode inverse, commande en tension

Une approche alternative est l'utilisation de la méthode inverse [6]. Ici, les non-linéarités du système sont explicitement compensées de manière à obtenir une fonction de transfert linéaire entre l'entrefer et sa valeur de consigne. La méthode nécessite une bonne connaissance du système, en particulier de ses non-linéarités. Aussi, la petite constante de temps doit être négligeable pour permettre une bonne compensation des non-linéarités. Un accéléromètre est nécessaire. En contrepartie, son utilisation améliore le comportement par rapport à des perturbations de force.

Réglage d'état, commande en courant

Les trois stratégies de réglage discutées jusqu'ici sont basées sur une commande en tension et sont donc sensibles aux phénomènes qui peuvent influencer la tension elle-même [3]. Pour éviter de compenser ces phénomènes, il est intéressant d'utiliser une commande en courant. En particulier, en combinant un réglage de courant par mode de glissement avec un réglage d'état de position, il est possible de réduire l'ordre du système. La structure est présentée à la figure 7. La consigne de courant est déterminée par la consigne de force et par l'entrefer à partir d'une fonction de compensation non linéaire qui tient compte des flux de fuite et des chutes de potentiel magnétique dans le fer. Ceci linéarise le système. La stratégie de la figure 7 a été validée avec succès sur le banc d'essais de la figure 1. Les résultats expérimentaux et théoriques sont comparés à la figure 8 pour un dimensionnement sans composante intégrale.

Figure 7 Schéma bloc du réglage d'état avec fonction de compensation non linéaire et commande en courant.

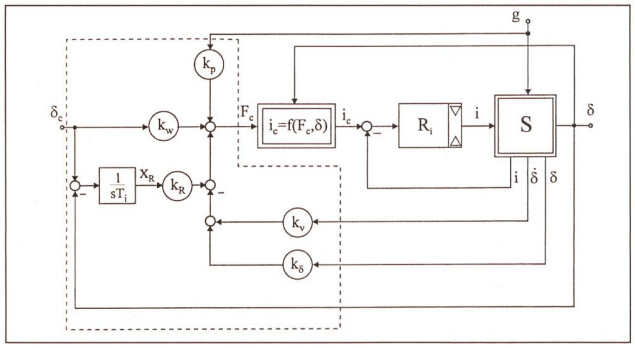
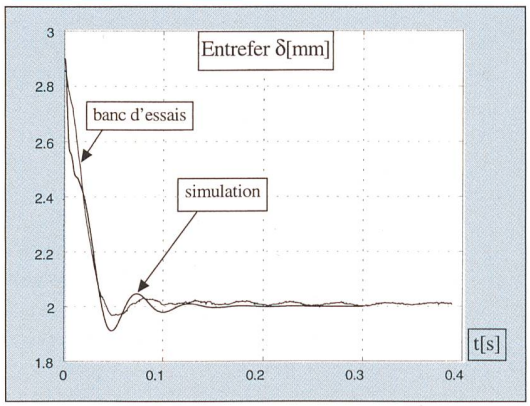


Figure 8 Réponses indicielles en simulation et sur le banc d'essais pour le réglage de position.



Les oscillations sont dues à l'élasticité de la structure porteuse du rail. Cet effet a également été simulé, mais avec un modèle simple, ce qui justifie les différences entre les réponses théoriques et expérimentales.

Evaluation comparative

Le réglage digital peut être basé sur une commande en tension ou en courant. Pour les réglages basés sur une commande en tension, on a montré [4] que la méthode inverse donne des performances supérieures par rapport au réglage d'état adaptatif, essentiellement à cause d'une plus grande robustesse par rapport à des variations de masse. Aussi, on a montré que l'utilisation d'un régulateur intégrateur a différentes implications qui doivent être prises en considération. Un réglage basé sur une commande en courant a les caractéristiques suivantes:

- indépendant de la caractéristique de charge du convertisseur (temps morts des «interrupteurs»)
- indépendant des variations de la tension intermédiaire
- indépendant des variations de résistance de la charge (p. ex. température)
- fréquence de pulsation variable (en fonction de l'inductance de la charge), ondulation de courant constante
- facile à réaliser
- l'ordre du système est réduit

Ainsi globalement, la stratégie la plus adaptée pour notre application est le réglage d'état avec fonction de compensation non linéaire et commande en courant.

Estimateur d'entrefer

Introduction

Selon la stratégie utilisée pour le réglage de position, différentes informations sont nécessaires. Toutes les stratégies nécessitent l'entrefer et sa dérivée, la vitesse. Pour les stratégies avec une commande en courant, une contre-réaction de courant est nécessaire. La méthode inverse quant à elle nécessite l'accélération, c'est-à-dire la deuxième dérivée de l'entrefer. Il existe des capteurs de courant rapides, précis et bon marché. Plusieurs

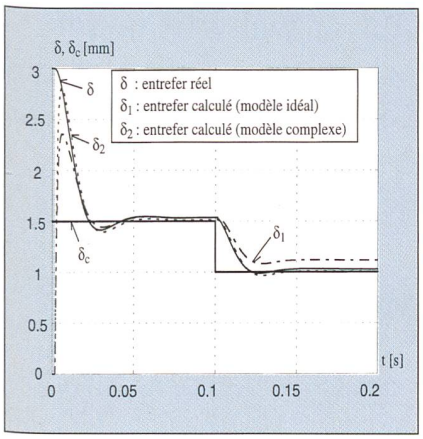


Figure 9 Réponse indicielle simulée pour le réglage de position et pour l'estimateur d'entrefer.

capteurs de position sont disponibles à des prix et performances différents. Par exemple, dans le banc d'essais de la figure 1, on utilise quatre capteurs de position laser relativement chers. Il est donc très intéressant de développer un estimateur d'entrefer pour éliminer les capteurs de position. Ceci réduit les coûts et peut améliorer la fiabilité. On présente ici une stratégie basée sur la détermination de l'inductance.

Principe de l'estimateur d'entrefer

L'inductance du bobinage dépend de l'entrefer. Pour déterminer l'inductance, on part de l'équation de tension

$$u_d = Ri + \frac{d}{dt}\left(L(\delta)i\right) \qquad (6)$$

qui permet de calculer la dérivée du courant

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L(\delta)}\left\{u_d - Ri - i\frac{\partial L}{\partial \delta}\frac{d\delta}{dt}\right\} \qquad (7)$$

En considérant la différence des pentes de variation de courant durant deux durées de commutation ON et OFF successives, on doit déterminer l'importance relative des trois termes de droite de l'équation (7). Comme la tension u_d est pulsée entre U_d et $-U_d$, on a

$$\left|\Delta u_d\right| \equiv 2U_d \qquad (8)$$

L'amplitude des deux autres termes est plus difficile à déterminer. Une estimation, bien que pour un cas particulier, peut être trouvée en simulation. Pour l'inducteur du banc d'essais de la figure 1 et avec $U_d = 48V$, les variations typiques entre deux instants de commutation des deuxième et troisième termes de (7) sont

$$\Delta(Ri) \equiv 0.9V(<1\%\,\Delta u_d) \qquad (9)$$

$$\left|\Delta\left(i\frac{\partial L}{\partial \delta}\frac{d\delta}{dt}\right)\right| \equiv 0.07V(<0.1\%|\Delta u_d|) \qquad (10)$$

c'est-à-dire moins que 1, respectivement 0,1% du terme (8). Il est donc possible de déterminer l'inductance en utilisant l'approximation

$$L(\delta) \approx \frac{2U_d}{\left.\frac{di}{dt}\right|_{ON} - \left.\frac{di}{dt}\right|_{OFF}} \qquad (11)$$

L'entrefer est ensuite calculé avec (1) pour le «modèle idéal», ou

$$L(\delta) \approx \frac{a_0 + a_1\delta + a_2\delta^2}{b_0 + b_1\delta + b_2\delta^2} \qquad (12)$$

pour le modèle avec flux de fuite et chutes de potentiel magnétique dans le fer.

Résultats de simulation

La figure 9 montre une réponse indicielle du réglage de position ainsi que l'entrefer calculé avec l'estimateur d'entrefer basé sur le modèle idéal et sur le modèle complexe. On a utilisé un réglage de courant par mode de glissement avec un calcul numérique de la dérivée du courant. Ceci est possible, car les instants de commutations sont connus. Il est clair qu'il n'est pas possible de déterminer la position quand il n'y a pas de courant qui circule dans l'inducteur. Ainsi, au démarrage la position estimée part de zéro, mais très rapidement elle rejoint la position réelle. Avec le modèle idéal, il y a une erreur statique sur l'entrefer estimé. Le problème est résolu avec le modèle complexe qui permet aussi une estimation plus rapide au démarrage.

Conclusions

Pour les véhicules de Swissmetro, sustentés et guidés magnétiquement, nous avons comparé différentes stratégies pour le réglage de position. La stratégie la plus appropriée est le réglage d'état avec une fonction de compensation non linéaire et commande en courant. Ce réglage peut être complété avec un estimateur d'entrefer afin d'éliminer les capteurs de position. Le principe, basé sur la détermination de l'inductance, a été testé en simulation numérique et est actuellement en cours de validation sur le banc d'essais pour le guidage latéral.

Remerciements

Cet article résume une partie de l'expérience du Laboratoire d'électronique industrielle dans le réglage de la sustentation et du guidage latéral de véhicules. La contribution principale à cette connaissance a été portée par Michel Zayadine avec son travail de thèse. Un autre effort important est dû à Michel Girardin qui a réalisé le banc d'essais pour le guidage latéral et a démarré les activités de réglage sans capteurs.

Bibliographie

[1] *B. V. Jayawant*: Electromagnetic suspension and levitation techniques, Proc. R. Soc. Lond. A 416, pp. 245–320, 1988.

[2] *K. Heinrich, R. Kretzschmar*: Magnetbahn Transrapid – die neue Dimension des Reisens, Hestra-Verlag, Darmstadt, 1989.

[3] *M. Zayadine*: Etude de réglage en position de la sustentation magnétique par attraction, Thèse EPFL n. 1508, EPFL-LEI, Lausanne, 1996.

[4] *M. Zayadine, S. Colombi*: Active Control of a Magnetic Suspension System, International Symposium MV2 on Active Control in Mechanical Engineering, pp. 281–294, Hermes, Paris, 1995.

[5] *P.-J. Riedo*: Adaptation continue des coefficients de réglage, Bulletin ASSPA, 1986-2.

[6] *H. Bühler*: Mécatronique, Cours polycopié EPFL, Lausanne, 1992.

Regelstrategien für elektromagnetisches Trag- und Führungssystem der Swissmetro-Fahrzeuge

Elektromagnetische Trag- und Führungssysteme haben mehrere industrielle Anwendungen: Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge, Werkzeugmaschinen, magnetische Lager- und Fördersysteme. In diesem Beitrag werden verschiedene Strategien zur Regelung für den elektromagnetischen Auftrieb und die Führung der Swissmetro-Fahrzeuge verglichen. Für die experimentelle Evaluation benutzte man eine Versuchsvorrichtung mit einem von vier Induktoren gehaltenen Fahrzeug.