بسم الله الرحمن الرحيم

٣٨٨٨١

۱۳۸۰ /۱۰/ ۲

دانشگاه تهران

دانشکده فنی

گروه مهندسی برق و کامپیوتر

عنوان:

کنترل سیستمهای غیرخطی نامعین و غیرکمینه فاز با استفاده از کنترل لغزشی تطبیقی

توسط

کمال‌الدین باریک‌بین

015597

زیر نظر

دکتر محمد جواد یزدان‌پناه

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی برق – گرایش کنترل

آذرماه ۱۳۸۰

۳۸۸۸۱

دانشگاه تهران
دانشکده فنی
گروه مهندسی برق و کامپیوتر

عنوان:

کنترل سیستمهای غیرخطی نامعین و غیرکمینه فاز با استفاده از کنترل لغزشی تطبیقی

توسط

کمال‌الدین باریک‌بین

از این پایان‌نامه در تاریخ ۱۳۸۰/۹/۱۹ در محضر هیأت داوران دفاع به عمل آمد و مورد تصویب قرار گرفت.

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکدهٔ فنی:	دکتر محمدعلی بنی هاشمی
مدیر آموزشی گروه مهندسی برق و کامپیوتر:	دکتر محمود کمره‌ای
سرپرست تحصیلات تکمیلی گروه:	دکتر جواد فیض
استاد راهنما:	دکتر محمدجواد یزدان‌پناه
عضو هیأت داوران:	دکتر کارو لوکس
عضو هیأت داوران:	دکتر علی خاکی صدیق
عضو هیأت داوران:	دکتر بهزاد مشیری

دانشکده فنی دانشگاه تهران
تحصیلات تکمیلی

تقدیر ز آن کسی که توفیقم از اوست

یاریگر ذهن و فکر هر دانشجوست

وانگه سببش مادر خوب است و پدر

اسباب دگر کتاب و استاد نکوست

دارم ز همه تشکر و شکر و سپاس

تقدیم کنم من این اثر را به تو دوست

چکیده

کنترل سیستمهای غیر کمینه فاز به علت ناپایدار بودن سیستم معکوس، معمولاً مشکل ساز است. کنترل لغزشی یکی از مقاومترین روشهای شناخته شده در کنترل است که طراحی آن برای کنترل سیستمهای غیر خطی کمینه فاز، امری میسر است ولی در مورد سیستمهای غیر کمینه فاز، روش کاملی برای طراحی کنترل کننده‌های لغزشی موجود نیست. در این پایان‌نامه یک الگوریتم کنترلی ترکیبی از روشهای خطی و غیر خطی برای کنترل سیستمهای غیر کمینه فاز ارائه شده است. الگوریتم مزبور ترکیبی از مباحث خطی سازی، تعریف مجدد خروجی، جایابی صفر، شکل دادن ورودی، کنترل لغزشی و کنترل تطبیقی می‌باشد. از عمدهٔ محاسن الگوریتم مورد نظر می‌توان به مقاوم بودن آن و سادگی الگوریتم اشاره کرد. در انتهای پایان‌نامه، روش مورد نظر روی یک سیستم عملی پیاده سازی شده و نتایج شبیه سازی در ادامه آمده است. با تکیه به تمام مطالب عنوان شده در این پایان‌نامه و نتایج شبیه سازی می‌توان ادعا کرد که روش ارائه شده، روشی موفق و عملی برای کنترل سیستمهای غیر کمینه فاز است.

کلمات کلیدی: مد لغزشی، غیر کمینه فاز، تعریف مجدد خروجی، جایابی صفر، شکل دادن ورودی، سیستمهای تطبیقی، کنترل زمان گسسته.

فهرست مندرجات

۱ مقدمه ۵

۱.۱ تاریخچه ۶

۲.۱ توصیف ریاضی مد لغزشی ۷

۳.۱ روشهای کنترل لغزشی ۸

۲ تعاریف و مبانی کنترل لغزشی ۱۰

۱.۲ کنترل معادل ۱۵

۲.۲ شرایط وجود مد لغزشی ۲۰

۳.۲ استفاده از صورتهای درجهٔ دوم ۲۰

۴.۲ روش قطری سازی در طراحی ۲۲

۵.۲ مد لغزشی در سیستم یک ورودی ۲۳

۳ مد لغزشی و سیستمهای کمینه فاز ۲۶

۱.۳ یک سیستم خاص ۲۷

۲.۳ پایدارسازی سیستمهای کمینه فاز ۳۲

۳.۳ ردیابی سیستمهای کمینه فاز ۳۵

۴.۳ کنترل لغزشی تطبیقی ۳۶

۵.۳ یک کنترل لغزشی تطبیقی با پسخور دینامیکی خروجی ۳۸

۴ تعریف مجدد خروجی ۴۴

۵ شکل دادن ورودی ۵۱

۱.۵ صورت کلی مسألهٔ شکل دادن ورودی ۵۳

۲.۵ بعضی خاصیتهای شکل دادن ورودی ۶۱
۱.۲.۵ خطی بودن ۶۱
۲.۲.۵ انتقال زمانی ۶۲

۳.۵ روش محاسبهٔ ضرایب k_i ۶۳

۴.۵ شکل دادن ورودی برای بعضی سیگنالهای مهم ۶۷
۱.۴.۵ ورودی پله ۶۸
۲.۴.۵ ورودی سینوسی ۷۲
۳.۴.۵ ورودی مربعی ۸۰
۴.۴.۵ ورودی دندانه ارهای ۸۳
۵.۴.۵ ورودی شیب ۸۵
۶.۴.۵ ورودیهای خطی پارهای ۸۵

۶ الگوریتم نهایی کنترل ۸۹

۱.۶ شرط پایداری ۹۱

۲.۶ شرط ردیابی ۹۲

۷ مثال عملی و شبیه سازی ۹۳

۸ نتیجه‌گیری ۱۱۰

فصل ۱

مقدمه

در بیشتر روشهای کلاسیک کنترل، برای طراحی کنترل کننده به مدل کامل سیستم و معادلات توصیف کنندهٔ آن به صورت معین و قطعی نیاز داریم. از آنجایی که در بسیاری از سیستمهایی که در عمل با آنها مواجه هستیم، نامعینی‌های[۱] مختلفی در پارامترها و معادلات توصیف کنندهٔ سیستم و حتی در مرتبهٔ دینامیکی سیستم وجود دارد، مجبوریم برای تضمین کنترل صحیح، از روشهای کنترلی مقاوم استفاده کنیم. از میان روشهای کنترل مقاوم، کنترل لغزشی[۲] یکی از موفقترین روشهای موجود برای کنترل سیستمهای مختلف است که به علت داشتن ساختار غیرخطی، توانایی بالایی برای کنترل سیستمهای غیرخطی دارد.

تئوریهای اولیه و مبنایی کنترل لغزشی تحت عنوان کنترل ساختار متغیر[۳] (VSC) مطرح شده‌اند که علت این نامگذاری، تغییر ساختار کنترل کننده در حین فرایند کنترل می‌باشد. این تغییر ساختار، همیشه در جهتی انجام می‌پذیرد که مقدار یک تابع معین موسوم به سطح ناپیوستگی، به سمت صفر میل کند. این سطح ناپیوستگی باید طوری تعیین شده باشد که در

---

[۱] Uncertainty

[۲] Sliding Mode Control

[۳] Variable Structure Control

صورت صفر شدن آن، خطای سیستم نیز به سمت مبدأ میل کند. به دلیل اینکه تغییر ساختار کنترل کننده، در نهایت منجر به نوسانهای بسیار کوچکی حول سطح مزبور می‌شود، این کنترل کننده‌ها به کنترل کننده‌های لغزشی مشهور شده‌اند و به سطح ناپیوستگی نیز اصطلاحاً سطح لغزش[۱] گفته می‌شود. البته بعدها کنترل دیگری نیز از نوع ساختار متغیر با عنوان سیستم کنترل فازی[۲] مطرح شد که کار آن از لحاظ منطقی، شبیه کنترل لغزشی است ولی با این حال، هنوز هم عنوان کنترل ساختار متغیر به طور اختصاصی برای کنترل کننده‌های لغزشی بکار می‌رود.

۱.۱ تاریخچه

اولین روشهای کنترل ساختار متغیر در حدود دههٔ سی میلادی در کشور شوروی سابق، تحت عنوان کنترل کننده‌های ارتعاشی[۳] مطرح شد[۲۲] که تا اواسط دههٔ پنجاه مقالات پراکنده‌ای در این زمینه و کاربردهای آن مانند کنترل ولتاژ ژنراتورها و ... موجود می‌باشد[۵]. تا اینکه اولین تئوری سازمان یافته در زمینهٔ کنترل ساختار متغیر تحت عنوان تئوری نوسانات توسط ا. ا. آندرونوف به چاپ رسید[۲]. مبنای این روش، استفاده از یک قانون کنترل ناپیوسته به صورت $u = \pm\Psi$ است که در آن، علامت کنترل بوسیلهٔ یک تحلیل توسعه یافته از صفحهٔ فاز تعیین می‌شود.

مبانی اولیهٔ تئوری کنترل لغزشی در اوائل دههٔ شصت توسط س. و. املیانوف بیان شد که می‌توان از او به عنوان پدر کنترل لغزشی یاد کرد[۱۲]. بعدها این تئوری به صورت کاملتر و کلاسیک توسط و. ا. اتکین مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن به صورت اولین کتاب تخصصی در زمینهٔ کنترل لغزشی منتشر گردید[۴۱].

---

[۱] Sliding Surface

[۲] Fuzzy System

[۳] Vibrational Controllers

۲.۱ توصیف ریاضی مد لغزشی

سیستم عمومی یک ورودی زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{x} = f(x,t,u) \qquad (۱-۱)$$

که در آن x و f بردارهایی n بعدی هستند و u یک تابع عددی[۱] با ناپیوستگی در سطح لغزش $s(x) = ۰$ است. شکل عمومی یک کنترل کنندهٔ لغزشی به فرم زیر است:

$$u = \begin{cases} u^+(x,t) & \text{if} \quad s(x) > ۰ \\ u^-(x,t) & \text{if} \quad s(x) < ۰ \end{cases} \qquad (۱-۲)$$

که در آن، توابع $u^+(x,t)$ ، $u^-(x,t)$ و $s(x)$ پیوسته‌اند و $u^+ \neq u^-$. در طراحی یک کنترل کنندهٔ لغزشی هدف ما تعیین کردن توابع $u^+(x,t)$ ، $u^-(x,t)$ و $s(x)$ است بطوریکه دو شرط اساسی زیر برآورده شود:

۱) وجود مد لغزشی

۲) پایداری

شرط اول تضمین کنندهٔ حرکت به سمت سطح لغزش و باقی ماندن در کنار آن است و شرط دوم نیز متضمن پایداری حالت پس از آمدن روی سطح لغزش و برآورده شدن معادلهٔ $s(x) = ۰$ می‌باشد.

در سیستمهای چند ورودی به ازای هر ورودی یک سطح لغزش وجود دارد:

$$u_i(x,t) = \begin{cases} {u_i}^+(x,t) & \text{if} \quad s_i(x) > ۰ \\ {u_i}^-(x,t) & \text{if} \quad s_i(x) < ۰ \end{cases} \quad ; \quad i = ۱, \cdots, m \qquad (۱-۳)$$

که شرایط فوق باید برای هر سطح لغزش برقرار باشد[۴۱].

---

[۱] Scaler

۳.۱ روشهای کنترل لغزشی

برای کنترل سیستمهای خطی بوسیلهٔ کنترل لغزشی، روشهای تحلیلی عمومی مختلفی بر اساس پسخور حالت و پسخور خروجی وجود دارد.

برای کنترل سیستمهای غیرخطی نیز در بعضی حالات خاص کاربردی، روشهای طراحی معینی ارائه شده‌اند ولی در حالت کلی سیتسمهای غیرخطی، پیدا کردن یک قانون کنترل ساختار متغیر معین، بسیار مشکل است و منجر به حل تساویها و ناتساویهای غیرخطی متعددی می‌شود که روش خاصی برای حل تحلیلی آنها وجود ندارد و فقط ممکن است که در بعضی مواقع، با روشهای ابتکاری بتوان آنها را حل کرد. به همین دلیل در بسیاری از موارد عملی، برای محاسبهٔ کنترل از روشهای تطبیقی لغزشی[۱] استفاده می‌شود که امروزه کاربردهای فراوانی نیز در صنعت دارند[۴] [۳۱] [۳۴]. ترکیب روشهای تطبیقی، فازی و هوشمند با کنترل لغزشی، علاوه بر آنکه ساختار کنترل کننده را ساده‌تر می‌کند، مقاوم بودن کنترل کننده را نیز تا حدود زیادی حفظ می‌کند[٦] [۳۷] [۴۵].

همانطوریکه می‌دانیم، غایت کنترل ردیابی[۲] است. با توجه به اینکه کنترل کننده‌های لغزشی همیشه در جهت صفر کردن خطا کار می‌کنند، پس توانایی ردیابی سیگنالهای متغیر با زمان را نیز خواهند دشت. این توانایی یکی از عمده‌ترین مزایای کنترل لغزشی است و در سیستمهای کمینه فاز[۳]، این ردیابی می‌تواند تنها با استفاده از پسخور خروجی انجام شود[۱۵].

یکی از دشوارترین بخشهای کنترل، کنترل سیستمهای غیر کمینه فاز[۴] است که کنترل این سیستمها به علت ناپایدار بودن سیستم معکوس، معمولاً مشکل ساز است و روش کاملی

---

[۱] Adaptive Sliding Mode Control

[۲] Tracking

[۳] Minimum-Phase

[۴] Nonminimum-Phase

برای طراحی کنترل لغزشی سیستمهای غیر خطی غیر کمینه فاز موجود نیست[۱۶] [۲۷].

در این پایان‌نامه یک الگوریتم عملی برای ردیابی سیستمهای غیر خطی غیر کمینه فاز ارائه شده است که مبتنی بر ترکیب روشهای جایابی صفر[۱] و کنترل لغزشی است. قانون کنترل این الگوریتم یک قانون تطبیقی است که در نهایت باید به صورت گسسته و با یک برنامهٔ کامپیوتری به سیستم اعمال شود. در فصل دوم این پایان‌نامه به بیان مقدمات، تعاریف و مبانی کنترل لغزشی می‌پردازیم. فصل سوم به کنترل لغزشی سیستمهای کمینه فاز و طراحی یک کنترل کنندهٔ لغزشی تطبیقی در این زمینه اختصاص داده شده است. در فصل چهارم روش تعریف مجدد خروجی[۲] و جایابی صفر برای سیستمهای خطی عنوان می‌شود و در ادامه در فصل پنجم، مبحث جامع شکل دادن ورودی[۳] مطرح می‌شود که لازمهٔ ردیابی سیستمهایی است که برای آنها خروجی جدیدی تعریف شده است. فصل ششم به بیان الگوریتم نهایی که ترکیبی از سه فصل قبل است، اختصاص دارد. در فصل هفتم الگوریتم مورد نظر روی یک سیستم عملی پیاده سازی شده که نتایج شبیه سازی و بحث روی آن نیز، در ادامه آمده است و نهایتاً در فصل هشتم به نتیجه‌گیری از تمام مباحث فوق پرداخته شده است.

---

[۱] Zero Assignment

[۲] Output Redefinition

[۳] Input Shaping

فصل ۲

تعاریف و مبانی کنترل لغزشی

فرض کنید $h : \mathcal{R}^n \to \mathcal{R}$ یک تابع عددی هموار[۱] و $f : \mathcal{R}^n \to \mathcal{R}^n$ یک میدان برداری هموار روی $\mathcal{R}^n$ باشد. در این صورت مشتق لی[۲] تابع h نسبت به میدان f به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۵]:

$$L_f h(x) \triangleq \frac{\partial h(x)}{\partial x} f(x) = \left[\frac{\partial h}{\partial x_1} \cdots \frac{\partial h}{\partial x_n} \right] f(x)$$

همانطوریکه مشخص است، خروجی این عملگر یک عدد است.

جبر لی یک ابزار ساده و قدرتمند برای نمایش مشتقات پاره‌ای در معادلات دیفرانسیل معمولی است که خصوصاً در ریاضیات کنترل غیرخطی، کاربرد زیادی دارد.

$$L_f^0 h(x) = h(x)$$

$$L_f^1 h(x) = L_f h(x)$$

$$L_f^i h(x) = L_f L_f^{i-1} h(x)$$

$$L_f L_g h(x) \neq L_g L_f h(x)$$

---

[۱] Smooth

[۲] Lie