دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

کنترل مقاوم سرعت و نیرو در درایو موتور سنکرون مغناطیس دائم خطی بر اساس روش ترکیبی گام به گام به عقب و مود لغزشی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق – قدرت

احمدرضا ملک نیا

استاد راهنما

دکتر جعفر سلطانی

۱۳۸۵

قدردانی

بعد از سپاس خدای یکتا، خدای نیکیها و روشناییها لازم میدانم از خانواده ام تشکر کنم.

همچنین سپاس خود را نثار تمامی معلمین و استادانم از جمله آقای دکتر سلطانی استاد راهنما،آقای دکتر شیخ الاسلام استاد مشاور و داوران محترم پایان نامه ام آقایان دکتر معلم و دکتر حسین نیا می نمایم.

از سرکار خانم نکویی که بدون چشمداشت قسمت بزرگی از زحمات آموزش تکمیلی دانشکده را بر عهده دارند صمیمانه متشکرم.

و در پایان خود را مدیون دوستانم می دانم و امیدوارم همه اقبال داشتن چنین دوستان خوبی را داشته باشند.

احمدرضا ملک نیا اردیبهشت ۱۳۸۶

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست

چکیده..... ۱

فصل اول:مقدمه

۱-۱-کلیات..... ۲

۱-۲-مروری بر کارهای گذشته..... ۳

۱-۳-اهداف و نوآوریها..... ۵

۱-۴-ترتیب ارائه مطالب..... ۵

فصل دوم:موتورهای خطی سنکرون مغناطیس دائم

۲-۱-مقدمه..... ۶

۲-۲-مواد سازنده هسته فرومغناطیسی مغناطیسی..... ۸

۲-۳-مواد مغناطیسی..... ۸

۲-۴-مدل میدان و نیرو در موتور خطی سنکرون مغناطیس دائم..... ۱۳

۲-۴-۱-مدل فازوری و محاسبه مستقیم نیرو..... ۱۸

۲-۵-مدل دینامیکی موتور خطی سنکرون مغناطیس دائم..... ۲۱

فصل سوم مقدمه‌ای بر کنترل غیر خطی

۳-۱-مقدمه..... ۲۴

۳-۲-علت استفاده از کنترل غیرخطی..... ۲۵

۳-۳-کنترل تعقیب و کنترل تنظیم..... ۲۷

۳-۴-تابع لیاپانوف..... ۲۸

۳-۵-خطی سازی با فیدبک..... ۳۱

۳-۵-۱-خطی سازی ورودی-حالت..... ۳۲

۳-۵-۲-خطی سازی ورودی-خروجی..... ۳۲

۳-۵-۳ سیستمهای فیدبک سخت..... ۳۵

۳-۶-کنترل وفقی..... ۳۸

۳-۶-۱کنترل وفقی مستقیم ۳۹

۳-۷-کنترل لغزشی..... ۴۰

۳-۷-۱-ایده اصلی کنترل لغزشی..... ۴۰

۳-۷-۱-شرایط رسیدن به سطح سوییچینگ..... ۴۱

۳-۸-شبکه‌های عصبی ۴۲
۳-۸-۱-اصول تخمین به وصیله شبکه های عصبی..... ۴۲
۳-۸-۲-شبکه های عصبی پیش خور. ۴۳
۳-۸-۳-مدل سازی توابع غیر خطی فرایند تحت کنترل به وسیله شبکه عصبی..... ۴۴

فصل چهارم:

کنترل تطبیقی موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم بدون در نظر گرفتن کارکرد موتور خارج از محدوده مغناطیس دائم

۴-۱-مقدمه. ۴۷
۴-۲-اعمال روش خطی‌سازی ورودی خروجی به موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم..... ۴۸
۴-۲-۱-کنترل کننده مد لغزشی..... ۵۱
۴-۳-نتایج شبیه‌سازی..... ۵۳
۴-۴-اعمال روش خطی‌سازی با فیدبک ورودی-خروجی به موتورسنکرون خطی..... ۵۶
مغناطیس دائم داخلی
۴-۵-استراتژی ماکزیمم نیرو به گشتاور در موتور سنکرون خطی مغناطیس..... ۵۷
دائم داخلی
۴-۶-نتایج شبیه‌سازی درایو سنکرون خطی مغناطیس دائم داخلی..... ۶۰
۴-۷-اعمال روش گام به گام به عقب تطبیقی به موتور سنکرون خطی مغناطیس..... ۶۳
دائم صاف
۴-۸- اعمال روش گام به گام به عقب تطبیقی به موتور سنکرون خطی مغناطیس..... ۶۸
دائم داخلی
۴-۹-شبیه‌سازی کامپیوتری برای موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم صاف..... ۷۳
۴-۱۰- شبیه‌سازی کامپیوتری برای موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم داخلی..... ۷۵

فصل پنجم کنترل غیر خطی موتور سنکرون خطی مغناطیس با در نظر گرفتن کارکرد موتور خارج از محدوده مغناطیس دائم

۵-۱-مقدمه. ۷۸
۵-۲-مدل موتور ۷۹
۵-۳-کنترل لغزشی موتور خطی سنکرون مغناطیس دائم داخلی با در نظر گرفتن اثر لبه..... ۸۳
۵-۳-۱-مدل موتور در وضعیت کارکرد آرماتور خارج از محدوده آرایه مغناطیس دائم..... ۸۴
۵-۴-نتایج شبیه‌سازی.. ..... ۸۸

۵-۴-۱-نتایج شبیه‌سازی هنگامی که آرماتور در محدوده آرایه مغناطیس دائم ۹۱
۱۱۲حرکت می‌کند
۵-۴-۲-نتایج شبیه‌سازی هنگامی که آرماتورخارج از محدوده آرایه مغناطیس دائم..... ۹۳
حرکت می‌کند
۵-۵-کنترل بازگشت به عقب عصبی موتور خطی سنکرون مغناطیس دائم داخلی با در نظر. ۹۳
گرفتن کارکرد آرماتور خارج از محدوده مغناطیس دائم
۵-۵-۱-مدل موتور در وضعیت عدم تعادل مغناطیسی.. ..... ۹۳
۵-۵-۲-استراتژی کنترلی بازگشت به عقب..... ۹۳
۵-۵-۳-اثبات پایداری حلقه بسته...۹۵
۱۲۰۵-۵-۴-ساختار شبکه عصبی..... ۹۶
۵-۶-نتایج شبیه‌سازی ۹۹
۵-۶-۱-نتایج شبیه سازی هنگامی که آرماتور در محدوده مغناطیس دائم حرکت می کند..... ۹۹
۵-۶-۱-نتایج شبیه سازی هنگامی که آرماتور خارج ازمحدوده مغناطیس دائم حرکت می کند..... ۱۰۲

فصل ششم نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱-نتیجه گیری..... ۱۰۴
۶-۲-پیشنهادات..... ۱۰۵

مراجع..... ۱۰۶

چکیده

موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم دارای مزایای متعددی از جمله بازدهی بالا، حذف جعبه‌دنده بین موتور و قسمت متحرک، کاهش تلفات مکانیکی، دقت بالا، نویز کم و غیره است. با توجه به این مزیتها ، موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم کاربردهای فراوانی در فرآیندهای صنعتی و سیستم‌های حمل و نقل و ساختمان یافته است. با وجود این‌که اصول کنترل درایو موتور سنکرون مغناطیس دائم خطی شبیه نوع دوار آن است، ولی خصوصیات کنترلی آن پیچیده‌تر است که این امر ناشی از عوامل متعددی از جمله متغیر بودن پارامترها ناشی از تغییر سرعت موتور و دما و خارج شدن آرماتور از محدوده مغناطیس دائم می‌باشد. به این معنی که اگر قسمت متحرک از محدوده شار منظم خارج شود معادلات موتور متفاوت خواهد بود.در این پایان‌نامه با استفاده از روش‌های خطی‌سازی با فیدبک، کنترل مدلغزشی، گام‌به‌گام‌به‌عقب تطبیقی و شبکه‌های عصبی، کنترل تعقیب موقعیت و شار یک درایو سنکرون خطی مغناطیس دائم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا کنترل‌کننده‌هایی برای سیستم درایو سنکرون خطی هنگامی که آرماتور در محدوده آرایه مغناطیس دائم حرکت می کند معرفی شده و نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری آن ارائه می‌گردد. با توجه به پیچیده‌تر شدن معادلات خارج از محدوده آرایه مغناطیس دائم و نامعینیهای قابل توجه در پارامترهای موتور و همچنین پیچیده بودن شکل معادلات، کنترل‌کننده‌ها و روش‌های تخمین ارائه شده عملاً نمی‌توانند در این محدوده کارایی مناسبی داشته باشند. با توجه به این موضوع ، در ادامه با درنظر گرفتن عملکرد آرماتور خارج از محدوده شار آرایه مغناطیس دائم، کنترل‌کننده مقاوم مدلغزشی و همچنین کنترل کننده عصبی بازگشت به عقب برای کنترل موقعیت و شار موتور معرفی می‌شوند.

فصل اول
مقدمه

۱-۱-مقدمه

در میان درایو موتورهای مختلف، درایو موتور سنکرون به صورت خود کنترل شونده و با سرعت متغیر ، دارای مزیتهایی است که آنها را نسبت به نوعهای همراه با موتور القایی یا موتور DC برتری می‌بخشد . از جمله اینکه بکارگیری موتور سنکرون بدین منظور ، باعث بهبود وضعیت پایداری سیستم و جلوگیری از نوسانات سرعت می‌شود و می‌توان با انتخاب روشهای کنترلی خاص به مشخصه‌های عملکرد شبیه به موتور DC دست یافت بدون اینکه محدودیتهای حاصل از انجام عمل کموتاسیون یا اثر جاروبکها در حداکثر سرعت قابل دسترسی و ولتاژ و یا مسایل مربوط به نگهداری مداوم وجود داشته باشد .

امروزه به علت پیشرفت تکنولوژی مواد مغناطیس دائم کاربرد انواع مختلف موتورهای سنکرون مغناطیس دائم از جمله نوع خطی آن گسترش یافته است موتورهای سنکرون خطی تا اوایل دهه هشتاد به طور عملی مورد استفاده قرار نمی‌گرفتند ولی از آن پس و با معلوم شدن مزایای بیشمار کاربردآنها در حمل و نقل و صنایع ابزار دقیق و ساختمان سازی و قطار برقی روز به روز گسترش یافته است[1].

موتورهای خطی می‌توانند بدون نیاز به جعبه دنده و یا شفتهای تابدار حرکت خطی ایجاد کنند این مزیت آنها نسبت به موتورهای دوار باعث کم شدن حجم و استهلاک و نویز و تداخل در سیستم درایو می شود.

این تحقیق به طور خاص بر روی موتورهای خطی سنکرون مغناطیس دائم متمرکز می‌شود. این موتورها بهترین انتخاب در توانها و مسافتهای پایین و متوسط هستند زیرا افزایش توان و یا مسافت باعث افزایش طول آرایه مغناطیس دائم می‌شوند که ساختار گرانقیمتی دارد.این موتورها نسبت نیرو به جریان بالایی دارند که باعث شده تا در بسیاری از زمینه‌ها مانند ماشینهای حمل و نقل، قطارهای برقی مورد استفاده قرار گیرند نوع خاص آنها همراه با مغناطیس طبیعی بر روی روتور، با توجه به جایگزینی سیم پیچ تحریک ، منبع تغذیه DC و رینگهای لغزان با مغناطیس دائم در کاربردهای سرو درایو مانند روباتهای صنعتی و ماشینهای ابزار از نوع NC ، به منظور کنترل سرعت و وضعیت دقیق مورد استفاده قرارمی گیرد. استفاده از موتورهای خطی سنکرون مغناطیس دائم نیاز به درک این موتور از لحاظ کنترلی دارد زیرا مدل ریاضی این موتور بطور طبیعی غیرخطی است . بکارگیری روشهای کنترل غیرخطی برای این موتور در سیستم حلقه بسته، آنرا تبدیل به یک موتور با کارآئی بالا خواهد کرد.

تئوریهای کنترل غیرخطی روشهای بسیار مناسب برای غلبه بر طبیعت غیرخطی موتور سنکرون مغناطیس دائم است .

۱-۲-مروری بر کارهای گذشته

امروزه موتورهای سنکرون خطی مغناطیس دائم[۱] به علت مزایایی که دارند بیش از پیش مورد توجه مراکز تحقیقاتی و صنعتی قرار گرفته‌اند. برخی از این مزایا عبارتند از دقت و سرعت بالا مخصوصا در کاربردهای کنترل موقعیت[1]. بازدهی بالا و وزن کم و عدم نیاز به ادوات واسطه مانند جعبه دنده در حرکتهای خطی و در نتیجه کاهش تلفات مکانیکی ناشی از آنها [2] .

تا کنون برای کنترل مقاوم گشتاور و سرعت موتورهای سنکرون مغناطیس دائم از نوع دوار چندین کار تحقیقاتی انجام شده است[3]-[6].

---

[۱] -Permanent Magnet Linear synchronous Motor

در مرجع [3] روشهای کنترلی بازگشت به عقب و خطی‌سازی تطبیقی[1] بر روی موتور سنکرون مغناطیس دائم از دونوع سطحی و داخلی انجام شده است.

در [4] بر پایه خطی سازی و با استفاده ازکنترل کننده لغزشی[2] بردارهای فرمان ولتاژ مرجع فرمان دهنده اینورتر ساخته می‌شود.در[5] روشهای خطی‌سازی ورودی خروجی و کنترل کننده مد لغزشی برای کنترل موتور سنکرون مغناطیس دائم به کار رفته است.

مرجع[6] از تئوری کنترلی بازگشت به عقب[3] برای کنترل موتور سنکرون مغناطیس دائم استفاده کرده است.

کنترل مقاوم نوع خطی موتور سنکرون مغناطیس دائم مانند نوع دوار آن مورد توجه نبوده و در این زمینه کارهای انگشت شماری انجام شده است.

در [7] با روش کنترل لغزشی مؤلفه‌های بردار ولتاژ برای اینورتر pwm فراهم شده و در نتیجه نیرو و شار موتور خطی سنکرون مغناطیس دائم کنترل می‌شوند. این روش نسبت به تغییرات پارامترهای مکانیکی مقاوم نیست.

در [8] با استفاده از کنترل کننده ترکیبی عصبی- بازگشت به عقب مرجع جریان محور q برای کنترل موقعیت یک موتور سنکرون ایجاد می کند این روش نسبت به تغییرات پارامترهای الکتریکی مقاوم نیست و اساساً از معادله الکتریکی موتور صرف نظر شده است.

یکی دیگر از نکاتی که در کنترل موتورهای سنکرون خطی مغناطیس می‌تواند مورد توجه قرار گیرد کارکرد قسمت متحرک آنها خارج از محدوده شار منظم است. بر خلاف موتورهای خطی القایی که به هم پدیده عدم تعادل شار بین اولیه و ثانویه از سرعت ثانویه متحرک ایجاد می‌شود در موتورهای سنکرون خطی مغناطیس دائم عدم تعادل شار بیشتر ناشی خارج شدن قسمت متحرک از محدوده شار منظم است[9].

در مرجع [10] با استفاده از روش برداری موقعیت یک موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم که آرماتور آن در محدوده‌ای گسترده و خارج از آرایه مغناطیسی نیز حرکت می کند،کنترل می‌شود.

---

[1] -Adaptive feedback linearization
[2] -Sliding mode control
[3] -Backstepping Theory

در مرجع [11] مدل سازی موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم در حالت گذرا و دائمی با در نظر گرفتن اثر لبه و عدم تعادل مغناطیسی انجام شده است طول آهن نگه دار[1] برای سادگی محاسبات بینهایت فرض شده است.

در سالیان اخیر سعی شده است تا روش کنترل تطبیقی برای سیستمهای غیرخطی که مدل آنها به طور دقیق مشخص نیست به کار رود. ولی با این همه این روش بر روی محدوده کوچکی ازازسیستمهای غیر خطی قدرت مانور دارد. اما خوشبختانه با گسترش دانش شبکه های عصبی آنها را می توان به طور وسیعی در شناسایی وکنترل سیستمهای غیر خطی به کار گرفت. افرادی مانند فونوهاشی، هورنیک، زیمن،هیچت و نیلسون با به کار گیری تکنیکهای متفاوتی نشان داده اند که شبکه عصبی چند لایه می توانند به خوبی در شناسایی سیستمهای غیر خطی به کار روند[12] و[13] . اما به علت وجود رابطه غیر خطی بین ورودیها وخروجیهای شبکه عصبی بررسی پایداری آنها کار مشکلی است[13].

مرجع [14] تخمین‌زن تطبیقی عصبی با استفاده از کنترل غیر خطی بازگشت به عقب را معرفی می کند. در این مرجع تخمین پارامترهای سیستم تحت کنترل به صورت به هنگام انجام می‌شود.

مرجع [15] روشی را برای کنترل مقاوم[2] سیستمهای غیر خطی با کنترل بازگشت به عقب و با استفاده از شبکه عصبی ارائه میدهد که این روش در مراجع[17] و[16] برای کنترل یک موتور القایی استفاده شده است.

مرجع[18] یک کنترل کننده عصبی صنعتی با استفاده از کنترل بازگشت به عقب معرفی می‌کند که رهنمون بسیار خوبی برای کارهای جدیدتر است.

۱-۳-اهداف و نوآوریها

در این تحقیق از کنترل کننده‌های دینامیکی و استاتیکی مقاوم برای کنترل موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم استفاده شده است. به این منظور از روشهای خطی سازی ورودی-خروجی وفقی و روش کنترل گام به گام به عقب تطبیقی و کنترل لغزشی استفاده شده است. در مورد موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم از نوع سطحی همه پارامترهای الکتریکی و مکانیکی با معلوم بودن کرانهای بالا و پایین نامعین فرض شده اند برای

---

[1] Back iron
[2] Robust control

بهره برداری از نیروی رلوکتانسی موتور سنکرون خطی از مغناطیس دائم از نوع داخلی از استراتژی ماکزیمم نیرو به جریان استفاده شده است.

جهت تخمین دینامیک نامعین سیستم در صورت وجود عدم تعادل مغناطیسی و خارج شدن آرماتور از محدوده آرایه مغناطیسی از کنترل کننده استاتیکی لغزشی و همچنین از کنترل کننده دینامیکی عصبی بازگشت به عقب استفاده شده است.کنترل مقاوم این نوع موتور در گستره خارج از آرایه مغناطیسی تا کنون مورد توجه نبوده است.

کنترل کننده‌های مذکور قادرند بر نامعینیها و اغتشاشات تحمیل شده به موتور در یک محدوده تعریف شده فائق آیند وشار و موقعیت موتور را با یک دینامیک مطلوب به شار و موقعیت مرجع برسانند.

1-۴-ترتیب ارائه مطالب

ابتدا در فصل دوم راجع به موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم توضیح داده می‌شود و مدل ریاضی و معادلات دینامیک آن با اجمال شرح داده می‌شود. در فصل سوم مقدمه‌ای فشرده درباره کنترل غیرخطی و شبکه‌های عصبی ذکر می‌شود. در فصل چهارم روشهای غیرخطی مقاوم بر روی موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم پیاده می‌شوند و نتایج حاصل از شبیه‌سازی آنها ارائه می‌شود.در فصل پنجم مدل موتور هنگامی که آرماتور خارج از محدوده کار می‌کند توضیح داده می‌شود و به همراه آن از روشهای لغزشی و بازگشت به عقب عصبی به عنوان دو روش دینامیکی و استاتیکی برای کنترل موقعیت آرماتور استفاده می‌شود. و سپس شبیه‌سازیهای حاصله ارائه می‌شوند.

فصل ششم نیز مربوط به نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای ادامه این تحقیق است.

فصل دوم[1]
موتورهای خطی سنکرون مغناطیس دائم

امروزه به علت پیشرفت تکنولوژی مواد مغناطیس دائم کاربرد انواع مختلف موتورهای سنکرون مغناطیس دائم از جمله نوع خطی آن گسترش یافته است موتورهای سنکرون خطی تا اوایل دهه هشتاد به طور عملی مورد استفاده قرار نمی‌گرفتند ولی از آن پس و با معلوم شدن مزایای بیشمار کاربردآنها در حمل و نقل و صنایع و ساختمان سازی روز به روز گسترش یافته است[1].

موتورهای خطی می‌توانند بدون نیاز به جعبه دنده و یا شفتهای تابدار حرکت خطی ایجاد کنند این مزیت آنها نسبت به موتورهای دوار باعث کم شدن حجم و استهلاک و نویز و تداخل در سیستم درایو می شود.

موتورهای خطی سنکرون بر پایه جریان مولد میدان الکترومغناطیسی به دو دسته تقسیم می‌شوند.

جریان پیوسته (موتور خطی سنکرون با جریان ac)

جریان سوئیچ شونده(موتورهای پله ای خطی یا موتورهای سوییچ رلوکتانسی خطی)قسمتی از موتور که مولد میدان الکتریکی متحرک است آرماتور[2] و قسمت دیگر که شار ثابت و یا مسیر متغیر رلوکتانسی را ایجاد می‌کند سیستم تحریک نامیده می‌شود. هر کدام از این دو قسمت می‌توانند متحرک و یا ثابت باشند. در ماشینهای سنکرون معمولا از نامهای اولیه و ثانویه که مخصوص موتورهای القایی و ترانسها است پرهیز می‌شود.

---

[1] اشکال و بیشتر مطالب این فصل از مرجع[۱] گرفته شده.

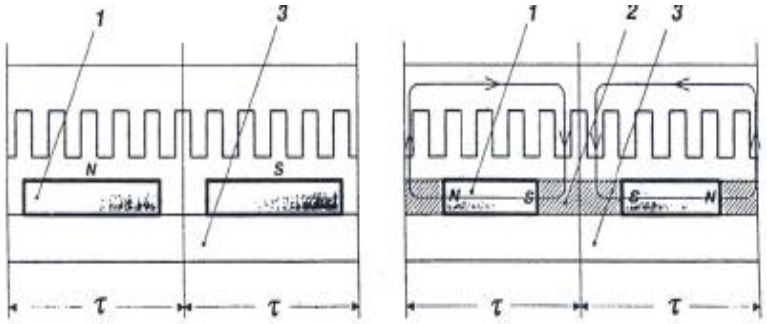
2 Armature.

جایگزین کردن سیستم تحریک dc با ماده مغناطیس دائم همانند موتورهای دوار در موتورهای خطی نیز معمول است. این تحقیق به طور خاص بر روی موتورهای خطی سنکرون مغناطیس دائم متمرکز می‌شود. این موتورها بهترین انتخاب در توانها و مسافتهای پایین و متوسط هستند زیرا افزایش توان و یا مسافت باعث افزایش طول آرایه مغناطیس دائم می‌شوند که ساختار گرانقیمتی دارد.

ساختار موتورهای خطی سنکرون مغناطیس دائم متنوع و متفاوت است که بستگی به کاربرد آنها دارد به طور مثال این موتورها به صورت مسطح ویا استوانه‌ای ساخته می‌شوند این موتور همچنین ممکن است یک پهلو و یا دوپهلو باشد همچنین انواع مختلف با شیار و بدون شیار ساخته شود [1].

این موتورها در دو نوع قطب برجسته و قطب صاف ساخته می‌شوند.در ساختار قطب صاف ماده مغناطیس دائم به صورت سطحی بر روی سیستم تحریک قرار می گیرد ولی در ساختار قطب برجسته ماده مغناطیس دائم درون سیستم تحریک و به صورت داخلی قرار می گیرد.

شکل ۲-۱-۱ یک موتور خطی مغناطیس دائم سطحی مسطح یک پهلو و با آرماتور شیاردار و شکل ۲-۱-۲ همین موتور را با مغناطیس دائم داخلی رانشان می‌دهد.



Single sided flat PM LSMs with slotted armature core and: (a) surface PMs, (b) buried PMs. 1 -PM, 2 - mild steel pole, 3 - yoke.

شکل(۲-۱-۱).نوع داخلی[1]　　شکل(۲-۱-۲).نوع سطحی[1]

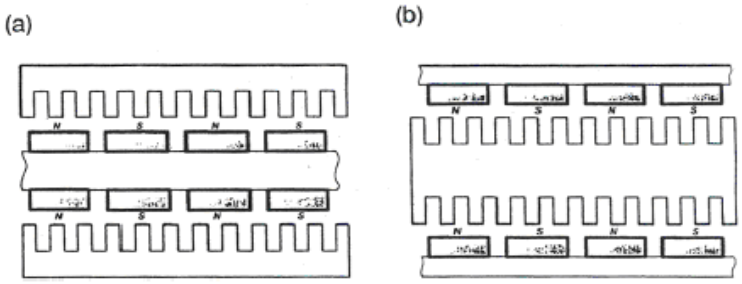
در نوع سطحی یوغ (back iron) از جنس فرومغناطیس است اما در نوع داخلی یوغ از مواد غیرفرومغناطیس مانند آلومونیوم ساخته می‌شود.

معمولاً موتورهای سنکرون مغناطیس دائم میراگر دارند. موتورهای سنکرون دوار میراگری دارند که در شیار قطب سیم‌پیچی می‌شود.مجموعه میدان دوار و شار حاصل از جریان القا شده در سیم‌پیچی میراکننده باعث می‌شوند که موتور بتواند در حالت آسنکرون راه اندازی شود.همچنین در هنگام افزایش و کاهش سریع گشتاور نیز نوسانات زودتر میرا شده و موتور زودتر به سرعت سنکرون خواهد رسید.میراکننده معمولا

از پوششی از جنس آلومونیوم ساخته می‌شود. به علاوه این پوشش می‌تواند ازماده مغناطیس دائم در برابر ضربات مکانیکی محافظت کند.

موتورخطی دوپهلو ساختاری مشابه موتور یک پهلو دارد، با این تفاوت که شامل دو سیستم تحریک مغناطیسی و یک آرماتور و یا یک آرماتور و دو سیستم تحریک می‌باشد(شکل ۲-۲).

در انواع بدون شیار این موتور سیمپیچها بر روی آرماتوری صاف با هسته ای نرم و یا بدون هسته پیچیده می‌شوند که حسن آن تولید نوسانات کم نیروی الکتریکی ولی در عوض پایین آمدن چگالی نیرواست.زیرا کم شدن فاصله هوایی در موتور به معنی افزایش ماده مغناطیسی لازم برای تولید چگالی مغناطیسی یکسان است.



[1] Double sided flat PM LSMs with: (a) two external armature systems, (b) one internal armature system.

شکل(۲-۲).موتور دوپهلو

۲-۲-مواد سازنده هسته فرومغناطیسی

هسته موتورPMLSM بیشتر ورقه ورقه ساخته می‌شود. از منظر الکترومغناطیسی هسته‌های فرومغناطیسی ورقه شده برای یکنواخت کردن و بهبود پخش میدانهای مغناطیسی در ماده فرومغناطیسی به کار می‌روند.اگر قطر این ورقه‌ها کمتر از یک میلی متر باشد اثر پوستی برای فرکانسهای حدود پنجاه تا شصت هرتز تقریبا ناپدید می‌شود و اثرات مخرب جریانهای گردابی در کاهش گشتاور را کم می‌کند.سطح خارجی ورقه‌ها با لایه نازکی از اکسیدان و یا سرامیک پوشانده می‌شود تا ورقه‌ها ازنظر الکتریکی هم جدا شوند.

۲-۳-مواد مغناطیسی

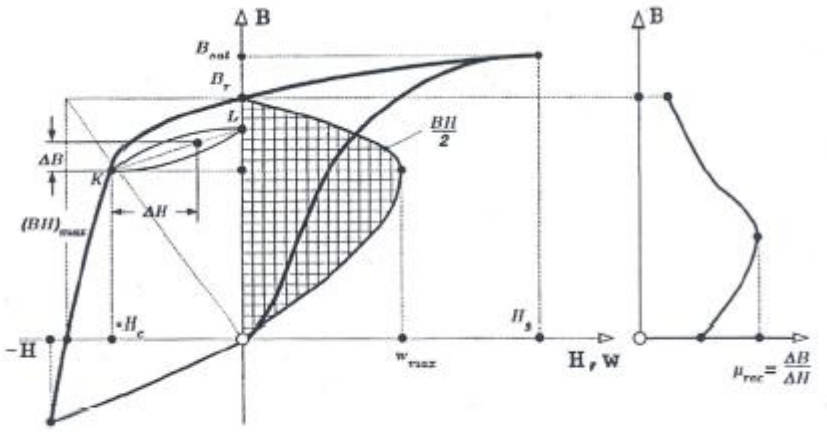
ماده مغناطیسی[1] بدون احتیاج به سیم‌پیچ و منبع تغذیه، می‌تواند شار مغناطیسی را در فاصله هوایی تولید کند.مانند دیگر مواد فرومغناطیسی یک PM[1] را می‌توان با حلقه هسترزیس B-H مدل کرد.گاهی مواد مغناطیسی را به علت داشتن حلقه نسبتا پهن هسترزیس مواد مغناطیس سخت نیز نامیده می‌شوند.

---

[1] Permanent magnet

2Magnet material

قسمت اصلی باند هسترزیس منحنی مغناطیس زدایی نام دارد که در ربع دوم منحنی B-H واقع شده است. (شکل۲-۳).



Demagnetization curve, recoil loop, energy of a PM, and recoil magnetic permeability.

شکل(۲-۳).منحنی هسترزیس

اگر میدان مغناطیسی منفی به PM اعمال شودچگالی شار مغناطیسی افت می کند و هنگامی که این میدان برداشته شود منحنی به نقطه L باز می گردد.اعمال دوباره میدان نقطه کار را به K می‌برد حلقه کوچک رفت و برگشت را می‌توان با یک خط راست موسوم به خط برگشت[۲] قریب زد. شیب این خط ضریب نفوذپذیری مغناطیسی μ_{rec} نامیده می‌شود. اگر شدت میدان مغناطیسی بیشتر از حد معینی به مغناطیس دائم اعمال شود نقطه کار با شیب کمتری بازمیگردد و در نتیجه ضریب نفوذپذیری ماده مغناطیس دائم کم می‌شود به همین جهت در موتورهای مغناطیس دائم سطحی تضعیف شار ممکن نیست.

بعضی از پارامترهایی که هر ماده مغناطیسی با آن شناخته می‌شود عبارتند از.

چگالی شار پسماند B_r که معادل چگالی شار مغناطیس دائم هنگامی که میدان خارجی به آن اعمال نمی‌شوداست.

H_c که مقدار میدان مغناطیسی لازم برای صفر کرن چگالی شار مغناطیسی است.

ضریب نفوذپذیری مغناطیسی که نسبت چگالی شار مغناطیسی[۳] به شدت میدان است و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\mu_{rec} = \mu_0 \mu_{rrec} = \frac{\Delta B}{\Delta H} \qquad (۱-۲)$$

---

[1] recoil line

[2] magnet flux

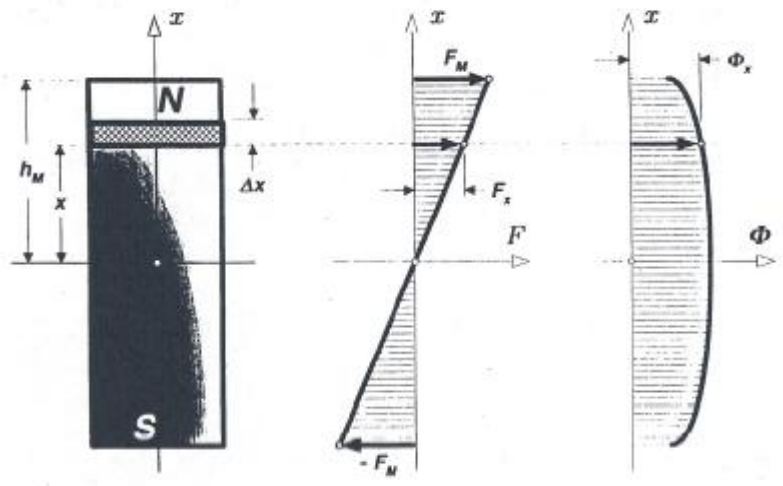
که μ_0 ضریب نفوذپذیری هوا و $\mu_{rrec} = 1...3$ یک ضریب است.

مقدار ماکزیمم انرژی به ازای واحد حجم که با رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$w_{\max} = \frac{(BH)_{\max}}{2} J/m^3 \qquad (۲-۲)$$

نکته دیگری که درباره مواد مغناطیسی باید مورد توجه قرار گیرد این است که پخش شار در سطح آن به صورت نامتعادل است. برای سادگی فرض می‌کنند که پخش شار در همه جای آن یکسان است و تمام حجم ماده مغناطیسی از یک منحنی B-H واحد پیروی می‌کند. که در عمل شار پسماند آن ۵ تا ۱۰ درصد کمتر ازماده واقعی است اما در واقعیت شار تولیدی ماده مغناطیسی در لبه‌های آن کمتر و در وسط بیشتر است.

رفتار MMF عکس شار است شکل ۲-۴ ماده مغناطیسی به طول 2h و شار و MMF تولیدی آن را نشان می‌دهد.



[1] Distribution of the MMF and magnetic flux along the height h_M of a rectangular PM.

شکل(۲-۴)توزیع mmf در مغناطیس دائم

همان طور که ذکر شد سطح PM هم پتانسیل نیست و پتانسیل هر نقطه تابعی از فاصله آن نقطه از وسط ماده مغناطیسی است به دست آوردن شار معادل برای یک ماده مغناطیسی یکی از مشکلترین کارهاست و معمولا با سعی و خطای فراوان همراه است.

هنگامی که از ماده مغناطیسی به عنوان سیستم تحریک استفاده می‌شود آنچه برای ما اهمیت داردچگالی شار است.

این چگالی که از فرمول زیر به دست می‌آید[1].

$$B_g = \sqrt{\mu_0 \frac{V_m}{V_g} B_m H_m} \qquad (۳-۲)$$

این فرمول نشان می‌دهد که B_g چگالی شار تولید شده در حجم فاصله هوایی V_g متناسب است با جذر حاصل ضرب حجم ماده مغناطیسی V_m در انرژی ماده مغناطیسی یا $B_m H_m$ بنابراین طبیعی است که یکی از اهداف اصلی در علم مواد مغناطیسی دستیابی به مواد مغناطیسی با انرژی بیشتر و در نتیجه حجم و وزن کمتر باشد.

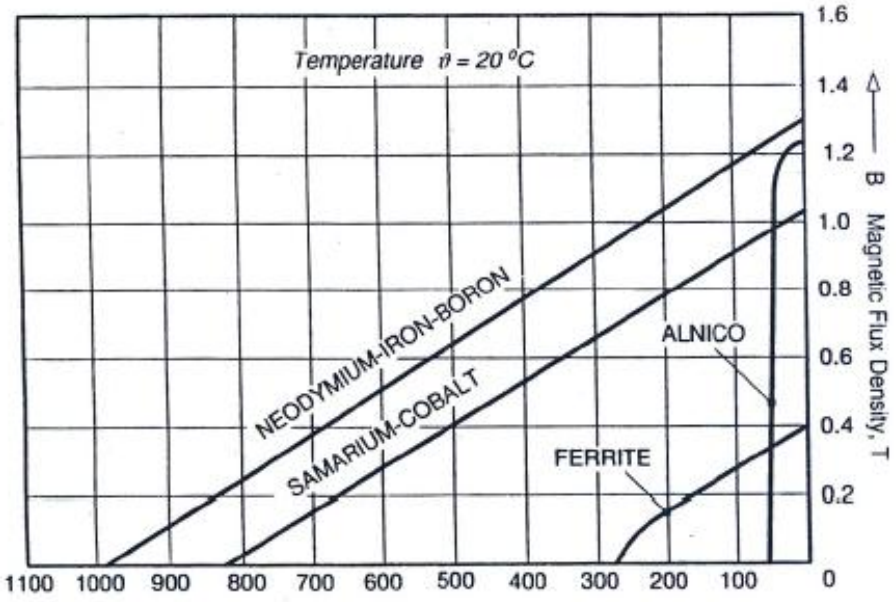
در موتورهای الکتریکی معمولا مواد زیر کاربرد دارند.

1-Alnico(Al,Ni,Co,Fe)

2-stranum ferrite, Barium ferrit

3-samarium-cobalt SmCo and neodymium iron-boron NdFeB.

منحنی مشخصه این مواد در شکل زیر نشان داده شده است.



[1] Demagnetization curves for different permanent magnet materials

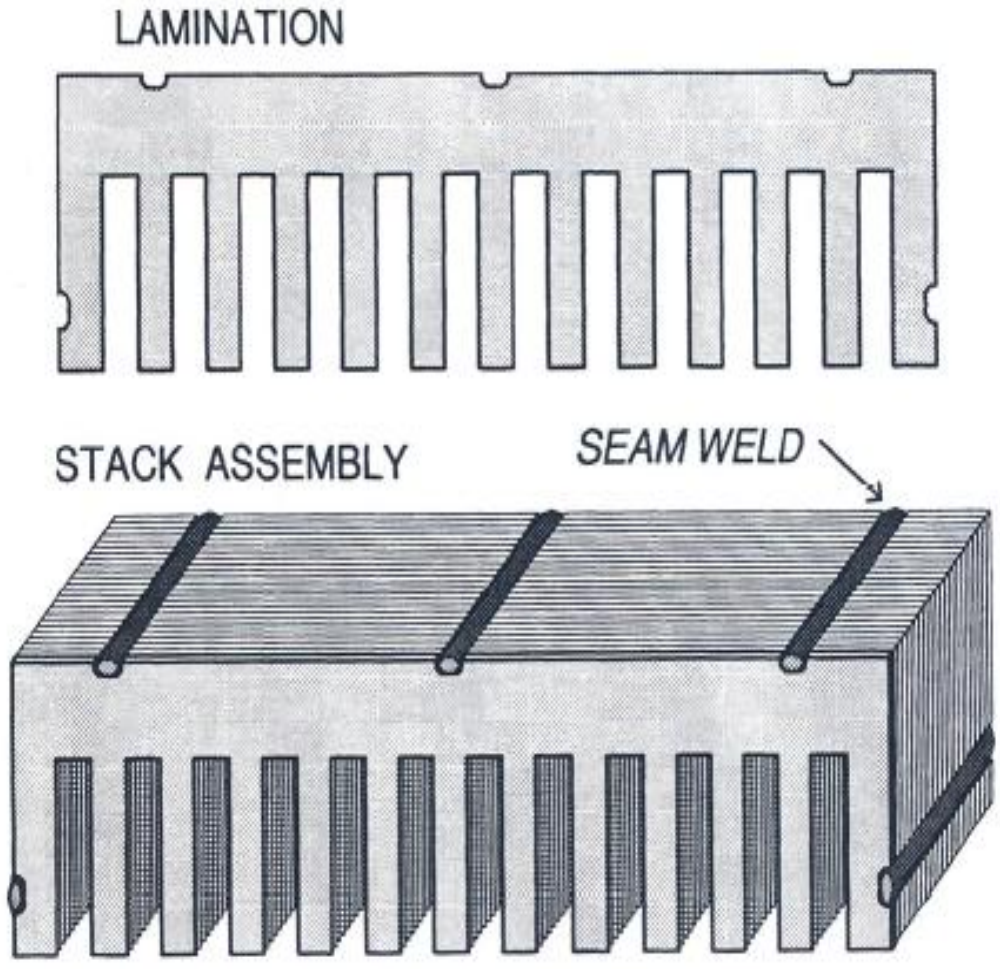
شکل (۲-۵) منحنی مغناطیس زدایی برخی از مواد مغناطیسی

مزیت مهم Alnico پسماند مغناطیسی بزرگ وپایداری زیاد در برابر دماهای زیاد است اما متأسفانه شار مغناطیسی آن سریع افت می‌کند و منحنی مغناطیسی مربوط به آن نیز به شدت غیرخطی است Alnico از 1940 تا 1970 که فریتها جایگزین آن شدند از رایجترین مواد مغناطیسی به کار رفته در موتورهای مغناطیس دائم بود.stranum ferrite و Barium ferrit در سال 1950 کشف شدند فریتها H_c بزرگتری نسبت به Alnico دارند ولی شار پسماند آنها کوچکتر است. مهمترین مزیت فریتها قیمت کم آنها و مقاومت الکتریکی بالای آنها است و این به معنی کاهش تلفات جریانهای گردابی و افزایش بازدهی موتور است.در سالهای اخیر پیشرفت قابل توجهی در زمینه تکنولوژی مواد مغناطیسی و در نتیجه افزایش انرژی تولیدی آنها و کاهش حجم آنها ایجاد شده. ا امروزه کاربرد مغناطیسها rare-earth با کارآیی بالا گسترش فراوانی داشته

و از جمله کاربردهای زیاد آن در درایو موتورهای مغناطیس دائم است است .کشف NdFeB در اواسط دهه هشتادمنجر به کاهش قیمت و حجم و افزایش کارایی موتورهای مغناطیس دائم شده است.

۲-۴-ساختار آرماتور

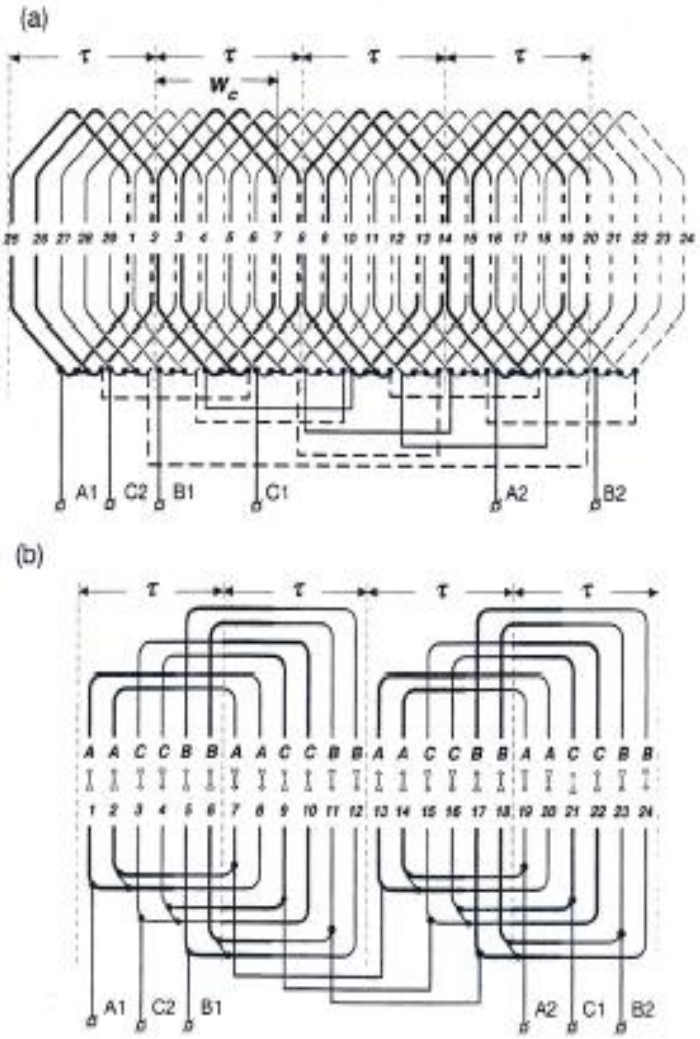
اکثر موتورهای سنکرون خطی مغناطیس دائم از آرماتورهایی با هسته‌های مورق بهره می‌بزنند در صنعت که معمولا فرکانس برق آرماتور کمتر از ۵۰ تا ۶۰ هرتز است اغلب ورقه‌ها با ضخامتهای بین 5mm. تا 6mm. ساخته می‌شوند این ورقه‌ها با جوش خوردن به هم متصل می‌شوند و هسته آرماتور را می‌سازند.شکل(۲-۶).



شکل(۲-۶).هسته آرماتور [1]

سیم‌پیچی آرماتور معمولا از سیمهای مسی ایزوله شده ساخته می‌شو د در مسافتهای طولانی گاهی آلومونیوم ترجیح داده می‌شود.سیم‌پیچی آرماتور می‌تواند تک لایه و یا دو لایه باشد. شکل (۲-)۷ سیم‌پیچی

تک لایه و دو لایه را برای یک موتور خطی سه‌فاز چهارقطب نشان می‌دهد.



Three-phase, four-pole (2p = 4) full pitch windings of a LSM distributed in 24 slots totally filled with conductors: (a) double-layer winding, (b) single-layer winding.

شکل(۲-۷).سیم‌بندی آرماتور [1]

2-٤-مدل میدان و نیرو در موتور خطی سنکرون مغناطیس دائم

توزیع زمانی و مکانی میدان مغناطیسی را در یک سیستم سه فاز متعادل برای یک موتور خطی می توان به صورت زیر نوشت.

$$F(x,t)=\frac{N_1\sqrt{2}I_a}{p\pi}\sin(\omega t)\sum_{\nu=1}^{\infty}\frac{1}{\nu}k_{\omega 1\nu}\cos(\nu\frac{\pi}{\tau}x)+\frac{N_1\sqrt{2}I_a}{p\pi}\sin(\omega t-\frac{2\pi}{m_1})\sum_{\nu=1}^{\infty}\frac{1}{\nu}k_{\omega 1\nu}\cos\nu(\frac{\pi}{\tau}x-\frac{2\pi}{m_1})+..$$

$$\frac{N_1\sqrt{2}I_a}{p\pi}\sin(\omega t-\frac{(m_1-1)2\pi}{m_1})\sum_{\nu=1}^{\infty}\frac{1}{\nu}k_{\omega 1\nu}\cos\nu(\frac{\pi}{\tau}x-\frac{(m_1-1)2\pi}{m_1})=\frac{1}{2}\sum F_{m\nu}\left\{\sin\left[(\omega t-\frac{\nu\pi x}{\tau})+(\nu-1)\frac{2\pi}{m_1}\right]\right.$$

$$\left.+\sin\left[(\omega t+\frac{\nu\pi x}{\tau})-(\nu+1)\frac{2\pi}{m_1}\right]\right\} \qquad (۴-۲)$$

که I_a جریان فاز m_1 تعداد فازها و p تعداد قطبها است. N_1 تعداد دورهای سری به ازای یک فاز، $k_{\omega 1\nu}$ضریب سیم پیچی ω فرکانس زاویه‌ای و τ گام سیم پیچی می باشد.

دامنه νامین هارمونیک mmf از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$F_{m\nu} = \frac{2m_1\sqrt{2}}{\pi p} N_1 I_a \frac{1}{\nu} k_{\omega 1\nu} \qquad (۵-۲)$$

ضریب سیم‌پیچی برای ν امین هارمونیک از ضرب ضریب توزیع، $k_{d\nu 1}$ و ضریب گام سیم‌پیچ $k_{p1\nu}$ به دست می‌آید.

$$k_{\omega 1\nu} = k_{d1\nu} k_{p1\nu} \qquad (۶-۲)$$

$$k_{d1\nu} = \frac{\sin(\frac{\pi\nu}{2m_1})}{q_1 \sin(\frac{\pi\nu}{2m_1 q_1})}$$

$$k_{p1\nu} = \sin(\nu \frac{\pi}{\tau} w_c / 2)$$

با فرض اینکه xجابه جایی متحرک باشدو $\omega t \pm \nu\pi x \frac{1}{\tau} = 0$ سرعت سنکرون هارمونیک ν ام برابر خواهد بود با:

$$V_{s\nu} = \pm 2 f \tau \frac{1}{\nu} \ . \qquad (۷-۲)$$

اگر تنها هارمونی اول در نظر گرفته شود و از بقیه هارمونیکها صرف نظر شود برای سیستم سه فاز متعادل mmf از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$F(x,t) = \frac{1}{2} F_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{\tau}) \qquad (۸-۲)$$

$$F_m = \frac{2m_1\sqrt{2}}{\pi p} N_1 I_a k_{\omega 1} \approx .9 \frac{m_1 N_1 k_{\omega 1}}{p} I_a$$

مقدار ماکزیمم چگالی جریان از فرمول زیر به دست می‌آید.

$$A_m = \frac{m_1\sqrt{2} N_1 I_a}{p\tau} \qquad (۹-۲)$$

ضریب فرم میدان مغناطیسی از تقسیم هارمونیک اصلی به مقدار ماکزیمم چگالی شار فاصله هوایی برابر:

$$k_f = \frac{B_{mg1}}{B_{mg}} = \frac{4}{\pi} \sin\frac{\alpha_i \pi}{2} \qquad (۱۰-۲)$$

$$\alpha_i = \frac{b_p}{\tau}$$

در(۲-۱۰) b_p طول کمان قطب و τ گام سیم‌پیچی است.