روش جدید کاهش تلفات در موتورهای القایی دور متغیر

صادق واعظ زاده

دانشیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر – دانشکده فنی - دانشگاه تهران

سید فرشاد هندی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق و کامپیوتر – دانشکده فنی - دانشگاه تهران

آزمایشگاه پژوهشی سیستمهای حرکت پیشرفته

(تاریخ دریافت ۷۹/۷/۹، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده۸۲/۱۱/۳، تاریخ تصویب۸۳/۱/۳۱)

http://eng.ut.ac.ir/Motion-Lab

vaezs@ut.ac.ir

چکیده

استفاده روزافزون از موتورهای الکتریکی و مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید برق در نیروگاهها از یک طرف و افزایش تصاعدی هزینه انرژی از طرف دیگر، ابداع و توسعه روشها و طراحی و ساخت محرکه هایی که انرژی را به صورت بهینه مصرف نمایند، ضروری کرده است. کنترل بهینه بازده موتورها با حداقل کردن تلفات الکتریکی یکی از راه کارهای مؤثر برای تحقق این منظور است. در این مقاله پس از ارائه مدل دینامیکی موتور القایی سه فاز شامل تلفات مسی و آهنی، تلفات الکتریکی موتور به عنوان تابعی از متغیرهای موتور مشروحاً تحلیل می شود و شرایط کمینه شدن آن تشریح می کردد. سپس سیستم کنترل نوینی برای یافتن نقطه کمینه تلفات و در نتیجه بهینه سازی همزمان بازده موتور در سرعت و بار متغییر پیشنهاد می شود. در این سیستم، متغیر کنترلی موتور به منظور جستجوی نقطه کمینه تلفات به صورت پیوسته تغییر می نمایند. روش جدید منجر به صرفه جویی بیشتر انرژی و رفتار نرمتر موتور در مقایسه با روشهای موجود کاهش همزمان تلفات در موتور القایی می شود. مقایسه نتایج شبیه سازی کامل یک موتور القایی سه فاز تحت کنترل برداری با سیستم کنترل پیشنهادی و سیستم کنترل معمول، برتری سیستم ارایه شده را اثبات می کند.

واژه های کلیدی: موتور القایی سه فاز، محرکه های الکتریکی، کنترل همزمان بازده، کنترل تلفات الکتریکی، بهینه سازی مصرف انرژی

مقدمه

در حال حاضر اکثر انرژی مصرفی در سطح جهان از منابع تجدید ناپذیر سوختهای فسیلی تامین می شود. این سوختها دارای قیمت بالا همراه با نوسان زیاد می باشد. از سوی دیگر با افزایش جمعیت جهان و گسترش صنعت و فن آوری و استفاده روز افزون از ماشینها، بشر با مشکلات زیست محیطی عدیده ناشی از مصرف بی رویه انرژی مواجه شده است. ازاینرو صرفه جویی هر چه بیشتر در مصرف انرژی در دنیای امروز ضروری است.

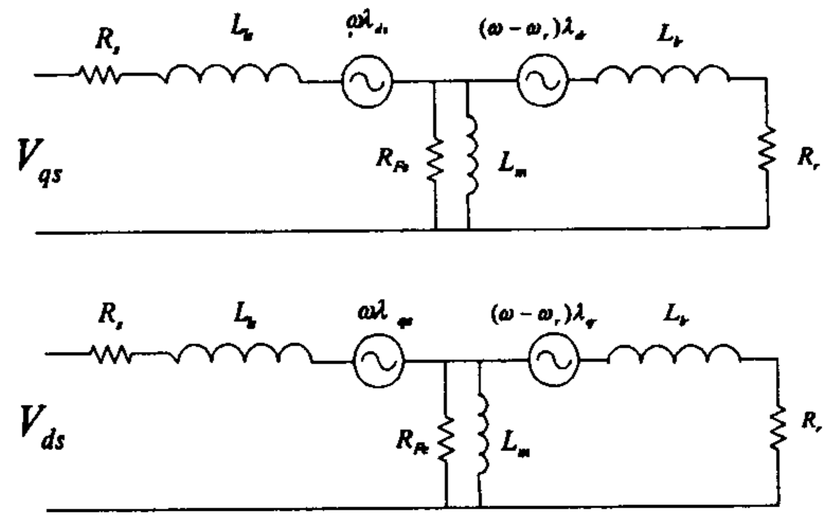
حدود ۶۰ درصد از کل انرژی الکتریکی مورد استفاده در صنعت، توسط موتورهای الکتریکی مصرف می شود [۱] . محرکه های الکتریکی با قابلیت کنترل سرعت در صنایع سنتی و پیشرفته نقش مهمی دارند و درصد قابل توجهی از موتورهای الکتریکی را شامل می شوند. گستره استفاده از این محرکه ها از یک سو صنایع سنگین مانند نورد و فولاد و از سوی دیگر ماشین های ابزار بسیار ظریف و روباتها را در بر می گیرد. علاوه بر این، رواج و توسعه کاربردهای جدید نظیر خودروهای برقی جهش بی سابقه در استفاده از محرکه های الکتریکی را در افق قابل پیش بینی نشان می دهد [۲]،[۳]. از اینرو کاهش تلفات و بهبود بازده در موتورهای الکتریکی در شمار مهمترین عوامل مهار مصرف فزاینده انرژی و مبارزه با آلودگی محیط زیست قرار دارد.

از اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی کمینه سازی تلفات موتور های الکتریکی به عنوان یک موضوع کاملا جدی مطرح شده است. بررسی کارهای انجام شده در این زمینه نشان می دهد که با پیشرفت هر چه بیشتر ادوات الکترونیک قدرت و ریز پردازنده ها به عنوان اجزای اصلی سیستم کاهش تلفات، این سیستمها نیز به ساختارهای کنترلی پیشرفته تر و ارزانتر و نتایج عملکردی بهتر نائل شده اند؛ در نتیجه مقبولیت و کاربرد بیشتری یافته اند. پیش بینی می شود در آینده این سیستمها به عنوان بخش تفکیک ناپذیر محرکه های الکتریکی درآیند. می توان اساس کلیه روشهای کنترلی کاهش تلفات و بهینه سازی بازده موتور را ایجاد تعادل بین تلفات آهنی و تلفات مسی موتور دانست. موتورهای القایی به شرط آنکه خوب طراحی شوند در بار نامی و سرعت نامی دارای بازده قابل قبول می باشند. اما در بارهای کم، بازده موتورهای القایی به دلیل عدم تعادل در تلفات مسی و آهنی به شدت افت می نماید. روشهای نوین کاهش تلفات با تنظیم متغیرهای کنترلی موتور سعی می کنند این تعادل همواره برقرار بماند. یکی از روشهای متداول برای کنترل و کاهش تلفات موتورها روش جستجو می باشد. اساس این روش که به صورت همزمان اجرا می شود، ثابت نگهداشتن توان خروجی موتور و یافتن نقطه کاری است که در آن توان ورودی کمینه باشد. نحوه یافتن این نقطه کار مبتنی بر اندازه گیری توان ورودی و تغییر پله ای و مکرر یک متغیر کنترلی مؤثر بر تلفات، مانند شار یا مؤلفه طولی جریان استاتور است تا زمانی که توان ورودی کمینه مشخص شود. در این روش پس از اعمال یک تغییر پله ای به متغیر کنترلی مدت زمانی طول می کشد تا موتور شرایط گذرای خود را طی کند و به حالت دائمی برسد، در این حالت تغییرات توان ورودی اندازه گیری می شود، اگر این تغییرات در جهت کاهش توان ورودی باشد پله ای دیگر به متغیر کنترلی اعمال می شود و این عمل تا رسیدن به نقطه کمینه توان ورودی ادامه می یابد. در صورتی که توان خروجی موتور حین تغییر متغیر کنترلی ثابت نگهداشته شود، کمینه توان ورودی متناظر با کمینه تلفات الکتریکی و در نتیجه متناظر با حداکثر بازده ماشین است [۴]. از آنجایی که میزان تغییر پله ها و نیز زمان اعمال آنها به سیستم در سرعت همگرایی روش و پایداری و رفتار نرم ماشین نقش بسزایی دارد، تلاشهای زیادی برای رسیدن به اندازه بهینه پله ها و نیز زمان اعمال آنها انجام شده است[۵]،[۶]. با وجود این، مسأله ایجاد ضربان در گشتاور ماشین القایی ناشی از اعمال پله های متوالی به متغیر کنترلی همچنان حل نشده باقی مانده است. علاوه بر این، زمان نسبتاً زیادی که صرف جستجو برای یافتن مقدار بهینه متغیر کنترلی می شود موجب تداوم کار ماشین تحت بازده نامطلوب و اتلاف انرژی می گردد. در این مقاله روشی برای تغییر متغیر کنترلی موتور القایی پیشنهاد می گردد که از ایجاد ضربان گشتاور پیشگیری می کند و زمان جستجو را کاهش می دهد . نشان داده خواهد شد این روش که قبلا برای موتور مغناطیس دائم سنکرون پیشنهاد و اجرا شده است[۷] ، برای موتور القایی نیز با نتایجی سریع و پایدار همراه است.

مدل ماشین

برای طراحی کنترل و انجام شبیه سازیهای دقیق و نیز محاسبات مربوط به کاهش تلفات در موتور الکتریکی به مدل دینامیکی ماشین با دقت کافی و قابلیت اطمینان زیاد نیاز می باشد. انتخاب یا توسعه چنین مدلی امر ساده ای نیست. در تئوری کنترل برداری و نیز کنترل کننده هایی که بر پایه تئوری عمومی کنترل برداری طراحی میشوند معمولاً فرض برصرفنظر کردن از تلفات آهنی می باشد؛اگر چه این تلفات در رفتار ماشین بی تأ ثیر نیست[۸]، [۹]. لیکن با توجه به اساس روشهای کنترل تلفات در ماشین های الکتریکی، که ایجاد تعادل بین تلفات آهنی و تلفات مسی می باشد، نیاز به مدلی که تلفات آهنی را نیز در بر بگیرد، بدیهی است. از طرف دیگر مدل هایی که تلفات آهنی ماشین را در بر می گیرند معمولا حالت ماندگار ماشین را بیان می دارند و لذا برای طراحی کنترل کننده و شبیه سازی دینامیکی مناسب نیستند. یک راه حل مبتنی بر استفاده از دو مدل؛ یکی مدل دقیق حالت ماندگار و دیگری مدل تقریبی دینامیکی، می باشد. این راه حل ساده و عملی است ولی تأثیر متقابل رفتار دینامیکی و تلفات را نادیده می گیرد. راه حل دیگر بدست آوردن مدلی مفصل شامل هر دو جنبه تلفات و دینامیک ماشین است. برای این منظور ممکن است مدل های گسترده ماشین القایی را که شامل تلفات مسی و آهنی میباشند توسعه داد به طوریکه رفتار دینامیکی ماشین را نیز بیان کنند[۵]، [۶]. امّا طراحی کنترل

بر اساس مدلهای مذکوربسیار پیچیده و شبیه سازی دینامیکی آنها بسیار وقتگیر و بلکه غیر ضروری است. ازاینرو در مدلسازی ماشین، علاوه بر تلفات، مسائل طراحی کنترل و شبیه سازی و پیاده سازی سیستم (همچون زمان محاسبات و حافظه مورد نیاز) را نیزباید در نظر گرفت. با توجه به مباحث بالا، در این مقاله مدلی مورد استفاده قرار می گیرد که همه جنبه های مورد اشاره، در حد ضرورت در آن ملحوظ شود. این مدل در شکل (۱) به صورت مدار معادل رسم شده است [۱۰].



شکل ۱: مدل ماشین شامل تلفات مسی و آهنی به صورت مدار معادل در دستگاه مرجع دو محوری چرخان با سرعت سنکرون؛ مدار معادل در راستای محور عرضی q (بالا)، مدار معادل در راستای محور طولی d (پایین).

با استفاده از این مدل معادلات حالت ماشین در دستگاه مرجع ساکن بصورت زیر نوشته خواهد شد:

$$\dot{i}_{qs} = \frac{-1}{L_{ls}}\left[(R_s + R_{Fe})i_{qs} - R_{Fe}i_{qm} + R_{Fe}i_{qr} - V_{qs}\right] \quad (۱)$$

$$\dot{i}_{qm} = \frac{-1}{L_m}\left[R_{Fe}i_{qs} - R_{Fe}i_{qm} + R_{Fe}i_{qr}\right] \quad (۲)$$

$$\dot{i}_{qr} = \frac{-1}{L_{lr}}\begin{bmatrix} R_{Fe}i_{qs} - R_{Fe}i_{qm} + (R_{Fe} + R_r)i_{qr} \\ -\omega(L_m i_{dm} + L_{lr}i_{dr}) \end{bmatrix} \quad (۳)$$

$$\dot{i}_{ds} = \frac{-1}{L_{lr}}\left[(R_s + R_{Fe})i_{ds} - R_{Fe}i_{dm} + R_{Fe}i_{dr} - V_{ds}\right] \quad (۴)$$

$$\dot{i}_{dm} = \frac{-1}{L_m}\left[R_{Fe}i_{ds} - R_{Fe}i_{dm} + R_{Fe}i_{dr}\right] \quad (۵)$$

$$\dot{i}_{dr} = \frac{-1}{L_{lr}}\begin{bmatrix} R_{Fe}i_{ds} - R_{Fe}i_{dm} + (R_{Fe} + R_r)i_{dr} + \\ \omega(L_m i_{qm} + L_{lr}i_{qr}) \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$T_e = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)\left[\lambda_{dr}(i_{qm} - i_{qr}) - \lambda_{qr}(i_{dm} - i_{dr})\right] \quad (۷)$$

تلفات در موتورهای القایی

با توجه به مدل ماشین که در شکل (۱) نشان داده شد، می توان تلفات موتور در حالت ماندگار را بر حسب مؤلفه های جریان استاتور و فرکانس ماشین بدست آورد [۱۱]، [۱۲]. با استفاده از این روابط که بدلیل مفصل بودن از ذکر آن در اینجا خودداری می شود، می توان مکان هندسی تلفات در نتیجه تغییر مؤلفه های جریان استاتور را رسم کرد. شکل (۲) چگونگی تغییرات تلفات آهنی موتور را بر حسب جریانهای i_{ds} و i_{qs} در سرعت ۱۰۰۰ دور در دقیقه برای موتوری با مشخصات مندرج در جدول (۱) نشان می دهد. مشاهده می شود تلفات آهنی با کم شدن جریان i_{ds} به صورت یکنوا کم می شود. این پدیده با توجه به وابستگی تلفات آهنی به شار و کم شدن شار با کاهش i_{ds} توجیه می شود. شکل (۳) تغییرات تلفات مسی استاتور بر حسب تغییرات i_{ds} و i_{qs} را نشان می دهد. این تغییرات با کم شدن جریان i_{ds} به صورت یکنوا کم می شود؛ زیرا کاهش i_{ds} موجب کاهش دامنه جریان استاتور میگردد که مجذور دامنه آن متناسب با تلفات مسی استاتور است.

جدول۱ : مقادیر نامی و پارامترهای موتور شبیه سازی شده.

مقادیر نامی موتور	پارامترهای موتور
10(HP) 208(V) 29.4(A) 1740(r/min) 60(Hz) 3(phase) 4 (pole)	Rs=0.164 Ohm Rr=0.137 Ohm Rm=110 Ohm Ls=0.023 H Lr=0.023 H Lm=0.022 H J=0.01 B=0.005

شکل (۴) تلفات مسی روتور را بر حسب i_{ds} و i_{qs} نشان می دهد. برخلاف دو مورد گذشته، با کم شدن جریان i_{ds} این تلفات زیاد می شود. این پدیده با توجه به معادلات شار و مدار معادل ماشین قابل توجیه است. تأثیر تغییرات i_{ds} بر روی تلفات مسی روتور در مدار معادل در راستای محور "d" ناچیز است. لیکن با کاهش i_{ds}، شار λ_d کاهش می یابد. در نتیجه در مدار معادل در راستای محور "q"

ولتاژ $\omega\lambda_{ds}$ کم میشود و متعاقباً ولتاژی که روی دو سر مدار روتور می افتد زیاد می گردد. علاوه بر این با کم شدن جریان i_{ds}، شار λ_{dr} و در نتیجه ولتاژ $(\omega-\omega_r)\lambda_{dr}$ در مدار روتور کاهش می یابد. این دو عامل موجب می شود با کم شدن جریان i_{ds}، جریان i_{qr} و در نتیجه تلفات مسی روتور افزایش پیدا کند. شکل(۵) کل تلفات الکتریکی موتور را بر حسب جریانهای i_{ds} و i_{qs} نشان می دهد. در این شکل با کم شدن جریان i_{ds} ابتدا از تلفات کاسته می شود تا به نقطه کمینه برسد؛ پس از گذشتن از این نقطه با کم شدن i_{ds}، تلفات افزایش می یابد. نظیر این نمودارها را بر حسب تغییرات شار موتور نیز می توان بدست آورد. هدف این مقاله رسیدن به نقطه کمینه تلفات تحت هر شرایط کاری، با تغییر متغیر کنترلی موتور، در کمترین زمان می باشد.

کاهش تلفات

کاهش تلفات و افزایش بازده در موتور های الکتریکی در حالت کلی با یکی از روشهای زیر انجام می شود:

۱-انتخاب موتور با توان ومشخصات مناسب

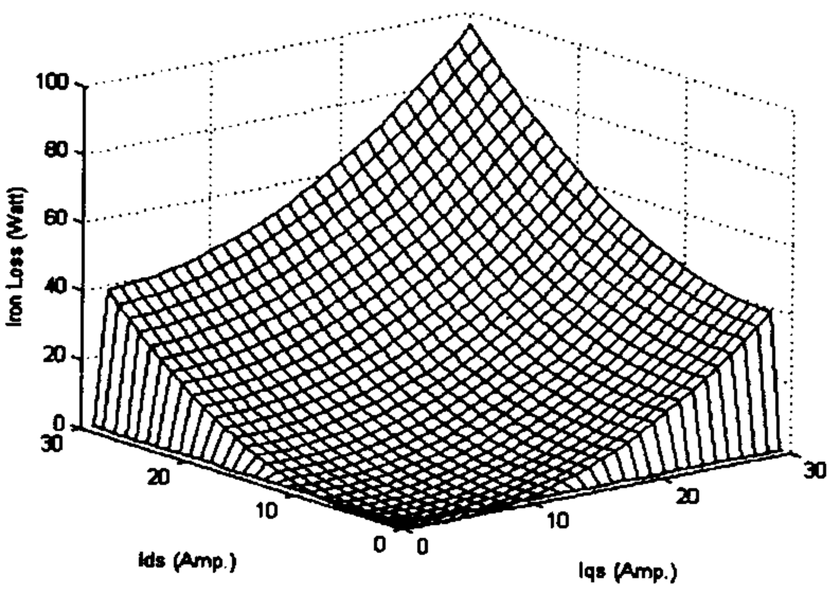
۲- طراحی بهینه موتور

۳-بهبود شکل موج ورودی و کاهش هارمونیک ها

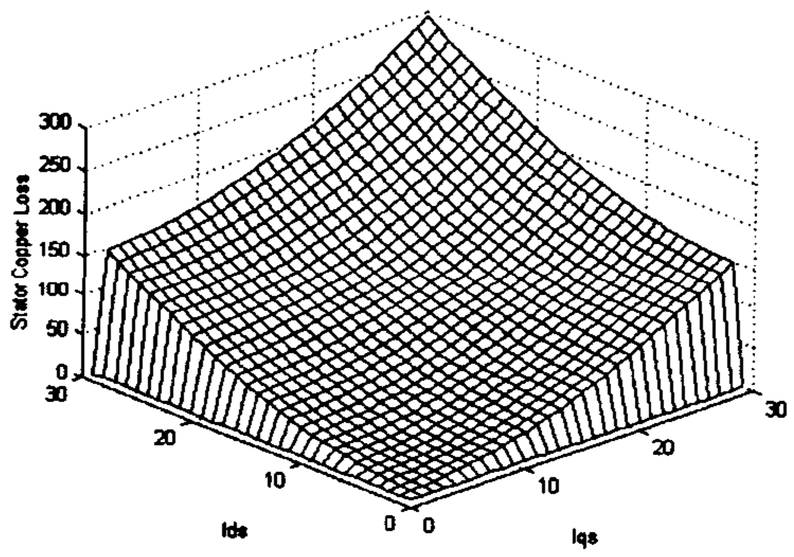
۴-کنترل و تنظیم شار و یا متغیر دیگری از ماشین مانند ولتاژ، جریان و فرکانس در هر نقطه کار

کاربرد توأم روشهای مزکور امکانپذیر بلکه مطلوب است. در این مقاله روش آخر مورد نظر می باشد.

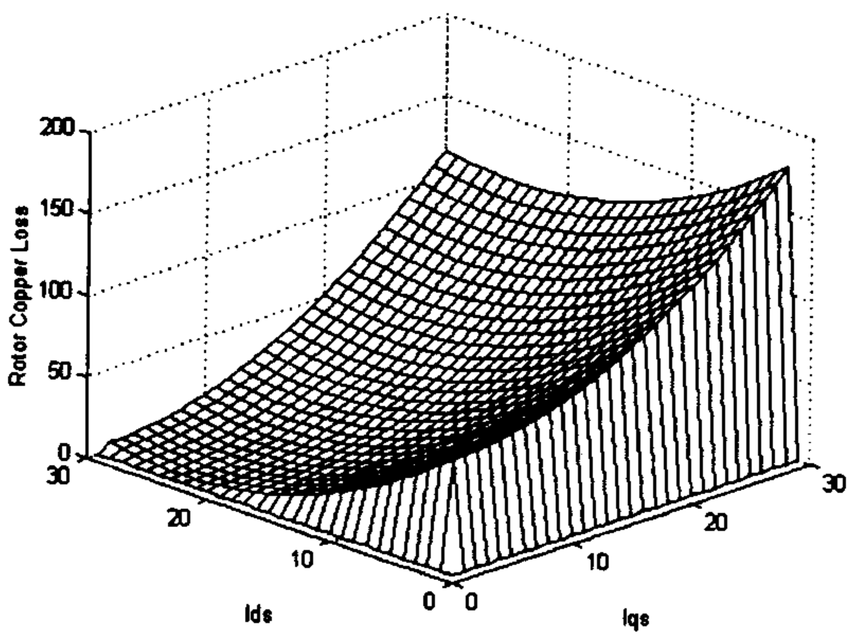
موتورهای القایی معمولاً برای کار در فرکانس، ولتاژ و بار نامی طراحی می شوند و به هنگام کار در چنین شرایطی دارای بازده بهینه می باشند. در بارهای کمتر، اگر شار مغناطیسی ثابت نگهداشته شود، بازده افت می نماید. زیرا هنگامی که شار ثابت نگهداشته شود، تلفات هسته ثابت می ماند. از طرف دیگر می دانیم که تلفات مسی روتور کم است و تلفات مسی استاتور هم که عمده تلفات مس را تشکیل می دهد با جریان مغناطیس کنندگی رابطه مستقیم دارد. با کاهش ولتاژ ، شار کاهش یافته و در اثر این کاهش تلفات آهنی و مسی استاتور کاهش می یابد در حالی که تلفات مسی روتور اندکی افزایش را نشـــان می دهد.



شکل۲: مکان هندسی تلفات آهنی نسبت به مؤلفه های جریان استاتور.



شکل۳: مکان هندسی تغییرات تلفات مسی استاتور با تغییرات مؤلفه های جریان استاتور.

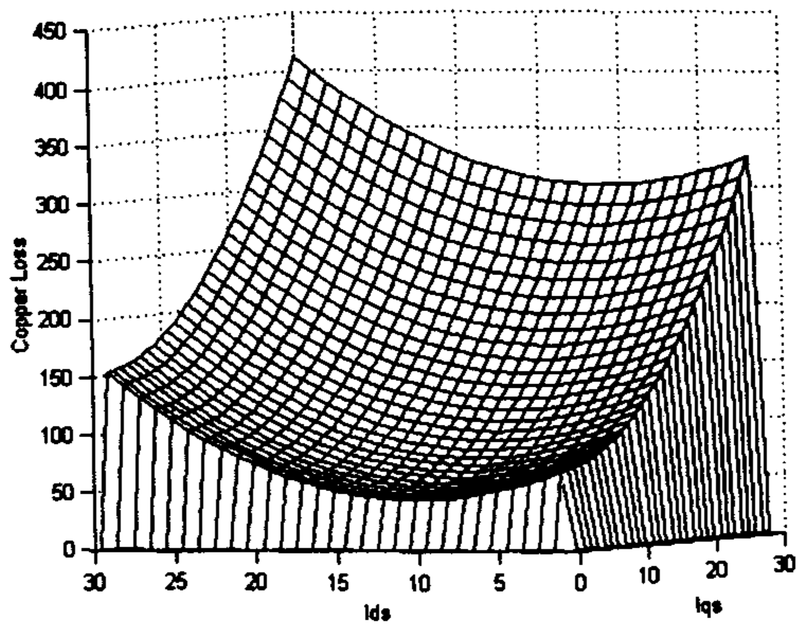


شکل٤: مکان هندسی تغییرات تلفات مسی روتور با تغییرات مؤلفه های جریان استاتور.

اگر ولتاژ و شار خیلی کاهش یابد، تلفات آهنی خیلی کم می شود ولی در عوض تلفات مسی روتور و تلفات ناشی از القای جریان روتور در استاتور زیاد می شود. به طور

خلاصه آنکه برای هر گشتاور و سرعت، یک میزان شار خاص وجود دارد که منجر به تلفات کمینه کل سیستم می شود. در شکل (۵) که تغییرات تلفات موتور به ازای تغییرات جریانهای i_{ds} و i_{qs} را نشان می دهد، دیده می شود که به ازای مقدار بهینه جریان i_{ds} (که متناظر با شار بهینه است) مقدار تلفات موتور کمینه می باشد. سیستمهای کنترل بهینه بازده موتور به این پرسش پاسخ می دهند که میزان شار بهینه چقدر است.

برای محرکه های کمتر از ۵۰ کیلووات، تلفات مربوط به مبدل توان در مقایسه با تلفات موتور ناچیز و در سیستمهای کنترل بازده قابل صرفنظر کردن است. در این شرایط همچنین می توان ثابت کرد که اگرتلفات موتور کمینه باشد، تلفات مبدل توان هم تقریبا کمینه است [۱۳]. برای محرکه های با توان چند صد کیلووات شرایط به گونه دیگری است. در این حالت تلفات موتور و مبدل نزدیک به هم است و هر دو باید در نظر گرفته شوند [۱۳].



شکل۵: مکان هندسی تغییرات کل تلفات موتور با تغییرات مؤلفه های جریان استاتور.

دو رویکرد عمده برای کنترل تلفات یا کنترل بهینه بازده وجود دارد که عبارتند از کنترل بر پایه مدل ماشین و کنترل همزمان مبتنی بر روش جستجو. با پیشرفت پردازنده های سریع و نیز ارزان شدن قیمت آنان، روش همزمان که نیاز به محاسبات همزمان پیچیده دارد به روشی متداول برای کاهش تلفات موتورهای القایی تبدیل شده است. اساس روش جستجو ثابت نگهداشتن توان خروجی و یافتن مقدار بهینه شار یا متغیر کنترلی دیگری است که در آن توان ورودی کمینه باشد. نحوه یافتن این نقطه، اندازه گیری توان ورودی و تغییر مکرر متغیر کنترلی با پله های کوچک است تا زمانی که توان ورودی کمینه مشخص شود. توان خروجی با ثابت نگهداشتن سرعت وگشتاور ثابت می ماند. در موتورهای القایی تحت بارهای کم، کاهش شار باعث کاهش تلفات و در نتیجه بالا رفتن بازده می شود. روند کاهش تلفات تا رسیدن به نقطه کمینه ادامه دارد، ولی از آن پس کم کردن شار باعث افزایش تلفات می شود. در روش جستجوی همزمان برای موتورهایی که با کنترل برداری راهبری می شوند بدون صرف هزینه اضافی و نیز بدون تحمیل پیچیدگی زیاد به سیستم می توان بازده سیستم را افزایش داد. در حقیقت چون برای پیاده سازی کنترل برداری معمولا از یک ساختار میکروپروسسوری، همراه با حسگرهای جریان و سرعت و نیز مبدلهای آنالوگ به دیجیتال استفاده می شود، برای انجام محاسبات مربوط به بهینه سازی بازده نیز می توان از همان ساختار استفاده نمود.

یکی از نکات کلیدی در کنترل بهینه بازده، رسیدن به سرعت قابل قبول برای کاهش تلفات می باشد. روش همزمان کنترل بهینه بازده به دلیل محاسبات همزمان و ماهیت الگوریتم استفاده شده، دارای سرعت پائینی در مقایسه با روشهای غیر همزمان می باشد. از اینرو کند بودن این روش می تواند تا حد زیادی گستره استفاده از آن را کم کند [۱۱]. زیرا در کاربردهایی که نقطه کار ماشین متناوباً تغییر می کند، کنترل و تنظیم متغیر کنترلی در هر نقطه کار جدید زمان بر است و در طی این مدت ماشین تحت بازده غیر بهینه کار می کند. از مواردی که می توان با آن سرعت رسیدن به جواب بهینه را زیاد کرد، چگونگی کاهش متغیر کنترلی می باشد [۱۳]. مشکل دیگر این روش وجود ضربان گشتاور به علت تغییرات پله ای متغیر کنترلی است که در کاربردهای دقیق نامطلوب می باشد.

روش جدید

در روش معمول، الگوی متداول برای تغییر متغیر کنترلی (معمولاً مؤلفه d جریان استاتور) الگوی پله ای است. در این روش یک تغییر پله ای به متغیر کنترلی اعمال می شود. مدت زمانی طول می کشد تا موتور شرایط گذرای خود را طی کند و به حالت دائمی برسد. در

این حالت تغییرات توان ورودی اندازه گیری می شود، اگر این تغییرات در جهت کاهش توان ورودی باشد پله ای دیگر به متغیر کنترلی اعمال می شود و این عمل تا رسیدن به نقطه کمینه توان ورودی ادامه می یابد. در صورتی که توان خروجی ثابت باشد، کمینه توان ورودی متناظر با کمینه تلفات و در نتیجه متناظر با بازده بهینه است.

روش تغییر پله ای متغیر کنترلی ذاتاً دارای چند اشکال می باشد. اول آنکه تغییر پله ای می تواند منبع ایجاد اختلال در گشتاور خروجی موتور باشد. از طرف دیگر روش تغییر پله ای علیرغم اعمال روشهای جدید شامل روش های فازی و عصبی از سرعت قابل قبولی برخوردار نیست. با توجه به آنکه یکی از بارزترین موارد استفاده موتورهای AC با قابلیت کنترل سرعت و گشتاور در کاربردهایی مثل خودروهای برقی می باشد که در آنها حالت دائمی کوتاه بوده و متناوبا نقطه کار (سرعت و گشتاور) تغییر می کند، روش معمول بهینه سازی همزمان غیر عملی به نظر می رسد. بالاخره آنکه حتی اگر برای رسیدن به حالت بهینه زمان کافی در اختیار باشد، در فاصله زمانی رسیدن به حالت بهینه (که در این روش طولانی است) مقداری انرژی تلف می شود. حال اگر تغییرات نقطه کار زیاد باشد این تلفات حالت گذرا خود به نوعی در تضاد با مفهوم بهینه سازی بازده و کاهش تلفات قرار می گیرد.

در این مقاله راهبرد جدیدی برای تغییر متغیر کنترلی موتور ارائه می گردد. نشان داده خواهد شد که در این روش در مقایسه با روش معمول زمان رسیدن به حالت کمینه کوتاهتر و نوسانات گشتاور کمتر می باشد. در این روش تغییر پله ای متغیر کنترلی با تغییر پیوسته این متغیر جایگزین می شود. لازم به ذکر است که پیشرفت قدرت محاسباتی و سرعت پردازنده ها (از جمله *DSP* ها) و نیز پائین آمدن قیمت این پردازنده ها که باعث استفاده متداول آنها در صنعت شده است پیاده سازی چنین روشی را امکانپذیر کرده است. این روش برای موتورهای آهنربای دائم سنکرون پیشنهاد و اجرا شده است [۷]، [۱۴]. لیکن اعمال آن بر روی موتور القایی تا کنون انجام نگرفته است. برای تغییر پیوسته متغیر کنترلی الگوهای مختلفی را می توان در نظر گرفت. در اینجا از الگوی خطی استفاده می شود. استفاده از مسیر پیوسته برای متغیر کنترلی دارای نتایج مثبت متعددی می باشد؛ از جمله باعث حذف شوکهای تکرار شونده اعمال شده به موتور بر اثر تغییرات پله ای می شود، در نتیجه عملکرد سیستم بسیار نرم تر و پایدارتر می گردد. همچنین در این روش احتمال تغییر سرعت ناخواسته ماشین، ناشی از اعمال تغییرات پله ای، منتفی است. لذا کنترل کننده بهینه بازده از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار می شود. استفاده از الگوی پیوسته، باعث کاهش زمان رسیدن به نقطه تلفات کمینه نیز خواهد شد؛ زیرا مدت زمان صرف شده برای حالت گذرا پس از اعمال هر پله صرفه جویی می شود. در ادامه اجزاء اصلی کنترل کننده بهینه بازده پیشنهادی شامل تشخیص دهنده حالت ماندگار، الگوریتم کاهش تلفات و جبران ساز گشتاور بر اساس روندنمای شکل (۶) توضیح داده خواهد شد.

تشخیص دهنده حالت ماندگار

از آنجایی که روشهای همزمان کنترل بهینه بازده در حالت دائمی ماشین عمل می نمایند، قبل از همه باید زمانی که سیستم به حالت ماندگار یا دائمی می رسد مشخص گردد. موتور القایی تحت کنترل برداری پس از راه اندازی و شتاب گرفتن به فوریت به سرعتی نزدیک نقطه به سرعت فرمان داده شده می رسد. در اینجا لازم است تعریفی برای حالت ماندگار ارایه داد. بنا بر این تعریف، حالت ماندگار زمانی است که سرعت برای مدت زمان معینی (دو یا سه دوره نمونه برداری) به اندازه کافی نزدیک نقطه فرمان سرعت باشد. بسته به اندازه موتور و سرعت و بار آن، ε به عنوان معیار تشخیص حالت ماندگار انتخاب می شود. لذا در حالتی که موتور برای مدت زمان مذکور دارای خطای سرعتی کمتر از ε باشد، واقع در حالت ماندگار تلقی می شود.

زمان نمونه برداری از سیگنال سرعت نیز بستگی به شرایط موتور و کنترل آن دارد و توسط کاربر تنظیم می شود. خروجی قسمت تشخیص دهنده حالت ماندگار، فعال کننده دو قسمت جبران ساز گشتاور و الگوریتم کاهش تلفات می باشد. اگر نقطه کار سیستم عوض شود، این قسمت خارج شدن موتور از حالت ماندگار را تشخیص

می دهد و دو قسمت دیگر کنترل کننده را غیر فعال می کند. پس از گذشتن موتور از حالت گذرا، مجددا رسیدن به حالت ماندگار مشخص و قسمت های دیگر فعال می شود.

الگوریتم کاهش تلفات (LMA)

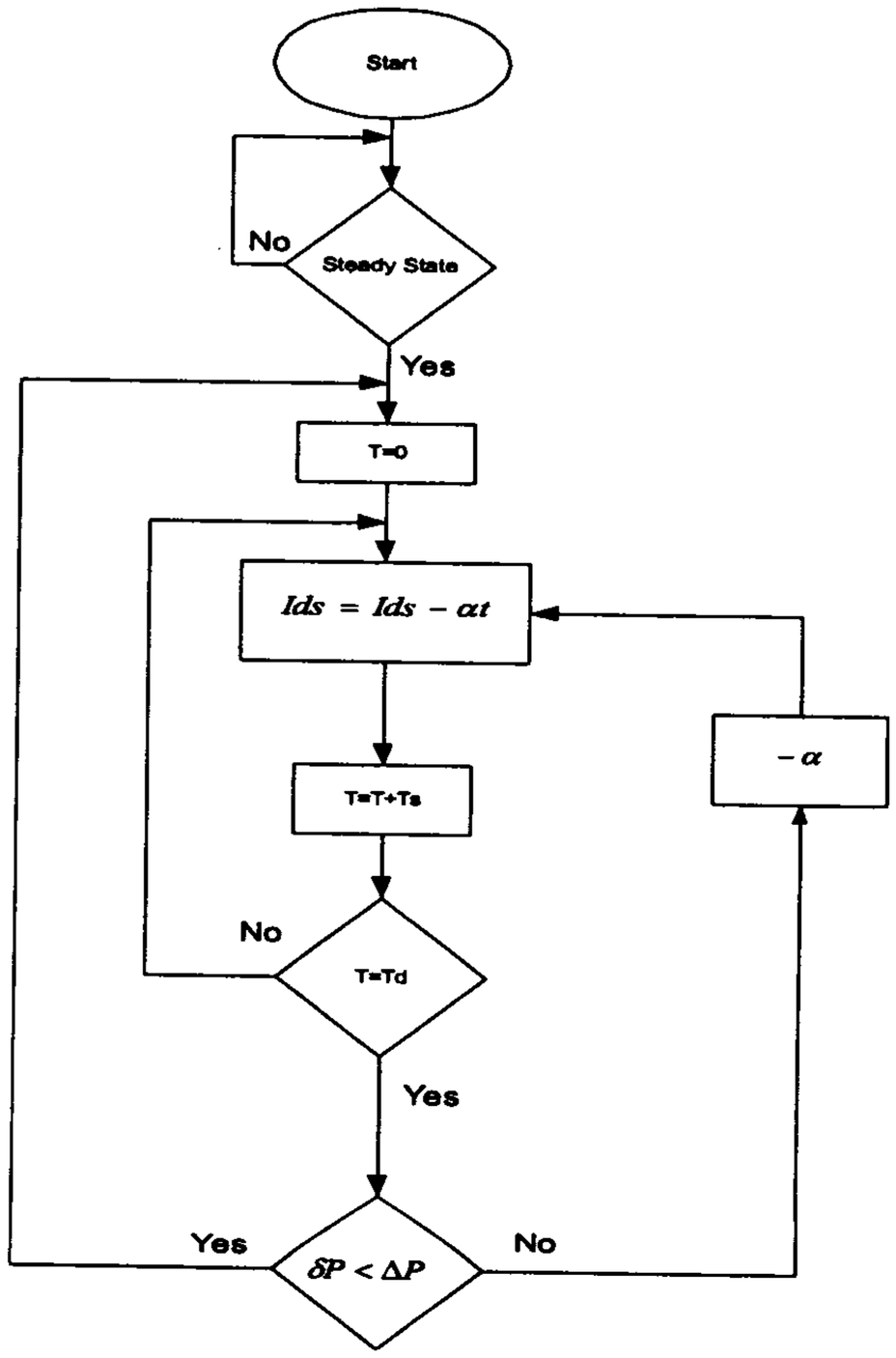
در حالت گذرا جریان i_{ds} ثابت می ماند تا موتور دینامیک سریعی داشته باشد. موتور حالت گذرا را تحت این جریان ثابت طی می کند و به سرعت فرمان داده شده می رسد. در این هنگام قسمت اول، حالت ماندگار را تشخیص می دهد و الگوریتم کاهش تلفات[1] (LMA) را فعال می کند. در نتیجه LMA ابتدا توان ورودی ماشین را اندازه می گیرد؛ پس از آن جریان i_{ds} را برای دوره زمانی معینی برابر Td به صورت پیوسته و خطی کم یا زیاد می نماید. به این صورت که در هر پریود نمونه برداری T، جریان خیلی کوچک αرا به i_{ds} اضافه یا از آن کم می کند.

پس از گذشت مدت زمان Td، توان ورودی را مجدداً اندازه گیری می نماید. از مقایسه این توان با توانی که قبلاً اندازه گیری شد، تغییرات توان ورودی بر اثر تغییر i_{ds} در طی مدت Td بدست می آید. این تغییر توان در شکل (۶) با δP نشان داده شده است. برای اطمینان یافتن از اینکه تغییر توان مقدار معنی داری است و ناشی از نویز و خطا نیست، δP با تو ان کوچک ΔP مقایسه میشود. اگر $\delta P<\Delta P$ باشد معلوم می شود جهت اولیه برای تغییر i_{ds} درست بوده است و منجر به کاهش توان ورودی شده است. لذا LMA جریان i_{ds} را برای یک دوره زمانی Td دیگر در همان جهت قبلی تغییر می دهد. لیکن اگر $\delta P<\Delta P$ نباشد معلوم می شود جهت اولیه برای تغییر i_{ds} درست نبوده است و این تغییر منجر به کاهش توان ورودی نشده است. لذا LMA جریان i_{ds} را برای یک دوره زمان Td در خلاف جهت قبلی تغییر می دهد تا توان ورودی کاهش یابد. در هر حال تا زمانی که توان ورودی به مقدار کمینه خود برسد i_{ds} در جهت درست تغییر می کند.

این زمان هنگامی فرا می رسد که تغییر i_{ds} در طی یک دوره Td منجر به کوچکتر شدن δP از ΔP نشود. به عبارت دیگر در روند تغییر i_{ds} بازده بهینه وقتی یافت می شود که توان ورودی حساسیت خود را نسبت به تغییر i_{ds} از دست بدهد. در این هنگام برای اطمینان از اینکه سیستم در یک کمینه محلی قرار ندارد، مقدار α با ($-\alpha$) در دوره های متناوب Td جایگزین می شود و تغییر i_{ds} بر روی مسیری مثلثی ادامه می یابد وسیستم در یک حالت جدید به کار خود ادامه می دهد که اصطلاحاً آن را، حالت مثلثی می نامیم [۷].

اگر موتور همچنان در شرایط بازده بهینه کار کند، تغییرات i_{ds} نمی تواند به کوچکتر شدن δP از ΔP منجرشود. موتور در حالت مثلثی به کار خود ادامه می دهد تا هنگامی که نقطه کار سیستم (گشتاور یا سرعت) تغییر نماید. در این لحظه تشخیص دهنده حالت ماندگار، الگوریتم کاهش تلفات و جبران ساز گشتاور را غیر فعال می سازد و i_{ds} را به مقدار اولیه اش باز می گرداند.

مقادیر پارامترهای Td، α و ΔP با توجه به مشخصات سیستم نظیر دقت حسگرها و میزان نویز سیگنال ها و نیز رفتار مورد انتظار از کنترل کننده بهینه بازده، توسط طراح سیستم تعیین میشود. کوچک بودن Td دقت دستیابی به مقدار بهینه i_{ds} را زیاد می کند. بدیهی است محدودیت دقت حسگرها و نویز موجود در سیگنال ها، انتخاب مقادیر بسیار کوچک برای Td را مشکل می سازد. بزرگ بودن α شیب تغییرات i_{ds} و در نتیجه سرعت رسیدن به مقدار بهینه آنرا افزایش میدهد. لذا زمان جستجو کمتر می شود که این بنوبه خود باعث صرفه جویی بیشتر در مصرف انرژی می گردد. البته همواره حد معینی برای افزایش این شیب وجود دارد. این حد بستگی به قابلیت حلقه جبران ساز گشتاور در دفع تغییرات گشتاور ناشی از تغییر i_{ds} دارد. به عبارت دیگر اگر α بیش از حد بزرگ شود، سیستم به حالت نوسانی رفته و نقطه کمینه یافت نمی شود. کوچک بودن ΔP نمایانگر دقت الگوریتم کاهش تلفات می باشد. با تنظیم مناسب پارامترهای مذکور می توان به نتایج سریع و دقیق در بهینه سازی بازده همراه با کمترین نوسانات در گشتاور موتور دست یافت.



شکل۶: روند نمای روش جدید کاهش تلفات.

روند انجام این مراحل در روندنمای شکل (۶) مشخص است.

جبران ساز گشتاور

کاهش جریان i_{ds} و در نتیجه شار موتورباعث کاهش توان ورودی می شود. در این حالت فقط اگر توان خروجی موتور ثابت نگهداشته شود، کاهش توان ورودی متناظر با کاهش تلفات موتور است. با توجه به این که الگوریتم کاهش تلفات در حالت کار ماندگار موتور فعال می شود، ثابت نگهداشتن توان خروجی با ثابت نگهداشتن گشتاور و سرعت قابل تأمین است. علیرغم وجود مجزا ساز در سیستم کنترل برداری موتور، کاهش جریان i_{ds} باعث تغییرات گشتاور و در نتیجه توان خروجی می شود. راه حل جلوگیری از این مسئله تغییر جریان i_{qs} به گونه ای است که گشتاور و در نتیجه سرعت موتور ثابت باقی بماند. در حقیقت در کنار سیستم مجزا ساز کنترل برداری، باید سیستم دیگری برای مجزا سازی سیگنال i_{ds} از [illegible]

تولیدی و سرعت، در مدت زمان جستجوی توان ورودی کمینه طراحی گردد. با کاهش جریان i_{ds}، شار موتور به صورت نمائی کاهش می یابد، رابطه زیر این موضوع را نشان می دهد:

$$\frac{d}{dt}\lambda_{dr} = \frac{L_m i_{ds} - \lambda_{dr}}{T_r} \qquad (۸)$$

که در آن $T_r = L_r / R_r$ ثابت زمانی روتور و L_m اندوکتانس مغناطیس کنندگی ماشین می باشد. کاهش شار باعث کاهش گشتاور می شود که در حالت عادی توسط حلقه سرعت جبران می گردد. لیکن جبران سازی حلقه سرعت بطیء است و موجب نوسانات فرکانس پایین گشتاور می شود که در بسیاری از کاربردها قابل تحمل نیست. برای جلوگیری از این موضوع یک جبران ساز پیشخور برای گشتاور طراحی می گردد. تحت کنترل برداری، گشتاور از رابطه زیر به دست می آید:

$$T_e = K_t i_{qs} \lambda_{dr} \qquad (۹)$$

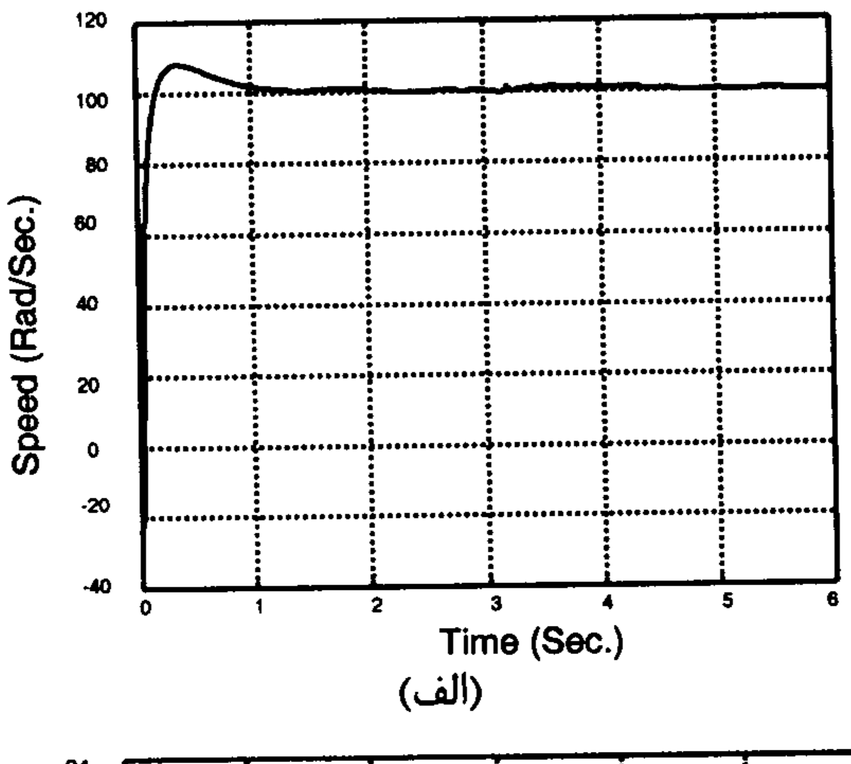
برای ثابت نگهداشتن گشتاور خروجی، باید جریان i_{qs} در جهت عکس تغییرات شار تغییر نماید. این موضوع با اضافه کردن سیگنال جبران کننده $\Delta i_{qs}(t)$ به سیگنال اصلی i_{qs} برای حذف اثر تغییر شار، $\Delta\lambda_{dr}(t)$، امکان پذیر است. زمان t در بازه پریود نمونه برداری کنترل بهینه تلفات می باشد. فرض کنید که $i_{qs}(0)$ و $\lambda_{dr}(0)$ مقادیر اولیه i_{qs} و λ_{dr} در ابتدای زمان نمونه گیری بهینه ساز بازده باشد. برای آنکه عملکرد سیستم کامل باشد، تغییرات گشتاور ماشین باید صفر باشد. برای تأمین این منظور تغییرات جریان i_{qs} باید عبارت باشد از:

$$\Delta i_{qs}(t) = \frac{-\Delta\lambda_{dr}(t) i_{qs}(0)}{\lambda_{dr}(0) + \Delta\lambda_{dr}(t)} \qquad (۱۰)$$

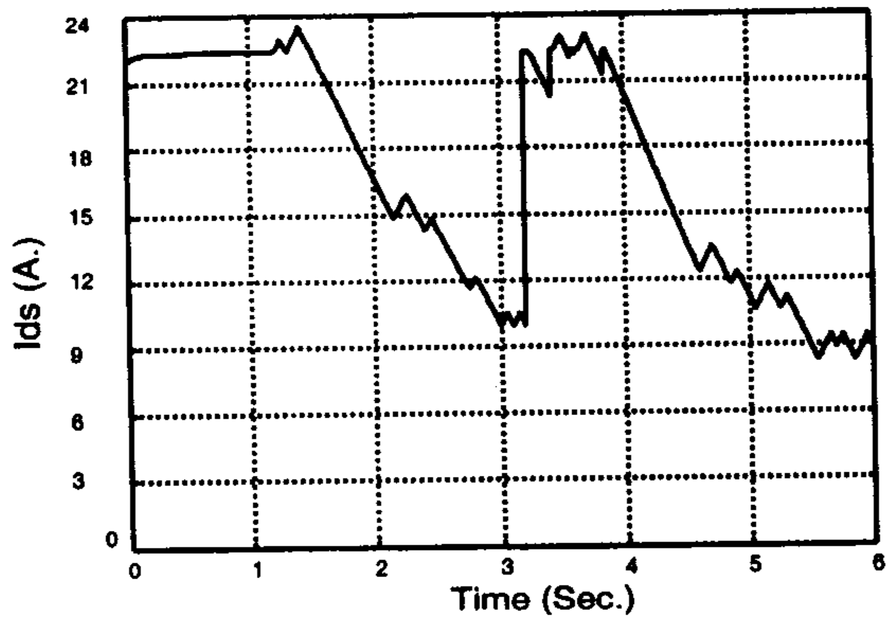
نتایج شبیه سازی

یک موتور القایی با مشخصاتی که در جدول (۱) مندرج است، تحت کنترل کننده سرعت و کنترل برداری و همراه با سیستم همزمان کنترل بهینه بازده شبیه سازی می شود. شکل (۷) نتایج شبیه سازی را نشان می دهد.

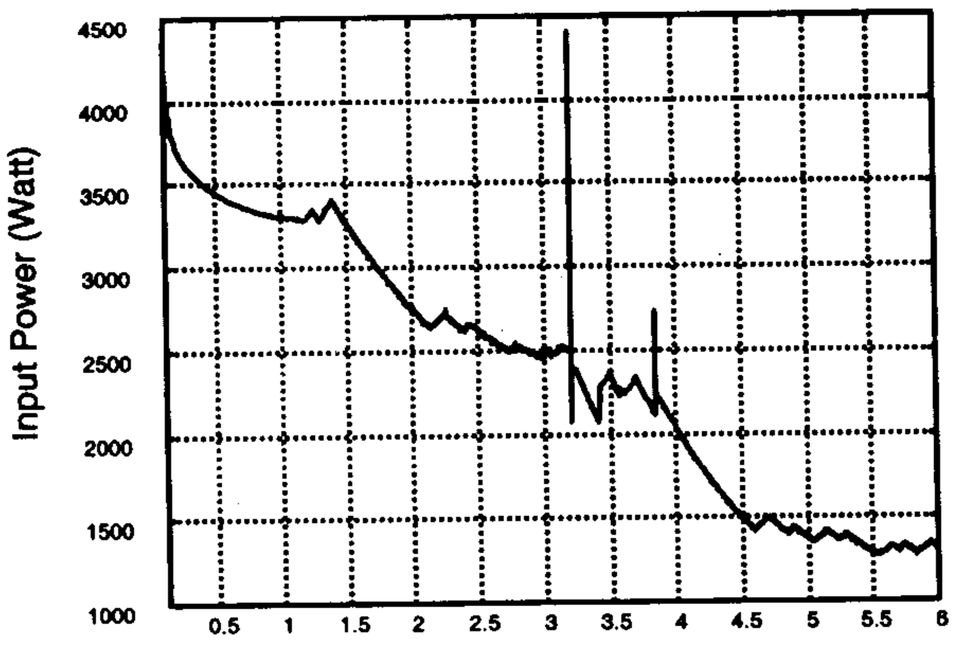
موتور تحت بار براه می افتد و مطابق شکل (۷- الف) پس از مدت کوتاهی به سرعت فرمان داده شده می رسد. در این لحظه حالت ماندگار تشخیص داده می شود و الگوریتم کاهش تلفات فعال می گردد. این الگوریتم مطابق شکل (۷- ب) جریان i_{ds} را به طور پیوسته کاهش می دهد. با کاهش تدریجی این جریان، توان ورودی ماشین مطابق شکل (۷- ج) کاهش می یابد تا در حدود لحظه ۳ ثانیه به کمترین مقدار خود می رسد. از این لحظه به بعد موتور در حالت مثلثی به کار خود ادامه می دهد. در این حالت i_{ds} در حدود مقدار بهینه اش به صورت مثلثی نوسانات اندکی دارد و توان ورودی در حدود مقدار کمینه اش باقی می ماند. شکل (۷- د) نشان می دهد که در تمام این مدت علیرغم تغییر i_{ds} ، گشتاور موتور تحت تأثیر جبران ساز گشتاور، ثابت می ماند. لذا ماشین تحت بازده بهینه کار می کند تا زمانیکه در لحظه ۳،۲ ثانیه بار موتور توسط کاربر کاهش داده می شود. با کم شدن بار، سرعت ماشین به طور طبیعی به مقدار اندکی زیاد می شود؛ لذا تشخیص دهنده حالت ماندگار خروج از این حالت را تشخیص می دهد و الگوریتم کاهش تلفات را غیر فعال می نماید. بلافاصله مقدار اولیه جریان i_{ds} احیاء و به عنوان فرمان به موتور اعمال می شود، شکل (۷- ب). این جریان، بر خلاف مقدار بهینه i_{ds}، کاهش گشتاور موتور را با دینامیک سریع میسر می سازد. در نتیجه گشتاور ماشین مطابق شکل (۷- د) در مقدار جدید تثبیت می شود. مجدداً حالت ماندگار تشخیص داده می شود و با تکرار مراحل مذکور در بالا، موتور در نقطه کار جدید و البته با بازده بهینه به کار خود ادامه می دهد. به منظور سنجش و ارزیابی بهبود حاصل در رفتار ماشین تحت سیستم کنترل بازده پیشنهادی، رفتار موتور تحت سیستم همزمان کنترل بهینه بازده به روش معمول نیز شبیه سازی می شود و نتایج آن با نمودار شکل (۷) مقایسه می گردد. شکل (۸- الف) تغییرات پله ای i_{ds} را تحت روش معمول نشان می دهد. در اثر این تغییرات، توان ورودی موتور نیز که در شکل (۸- ب) نمایش داده شده است به صورت پله ای و به طرف مقدار کمینه اش کاهش می یابد. ملاحظه می شود که تحت این روش حدود ۳ ثانیه طول می کشد تا مقدار بهینه i_{ds} متناظر با بازده بهینه ماشین فرا برسد؛ در حالیکه این زمان در سیستم کنترل بازده پیشنهادی حدود ۱،۵ ثانیه است. یعنی سرعت همگرایی سیستم پیشنهادی تقریباً دو برابر سیستم معمول است. شکل (۸-ج) گشتاور موتور را نمایش می دهد. در این شکل مشاهده می شود که گشتاور دارای ضربان زیادی نسبت به شکل (۷- د) است که ناشی از تغییرات پله ای i_{ds} می باشد. این مقایسه مبین رفتار نرم تر موتور تحت سیستم کنترل پیشنهادی است.



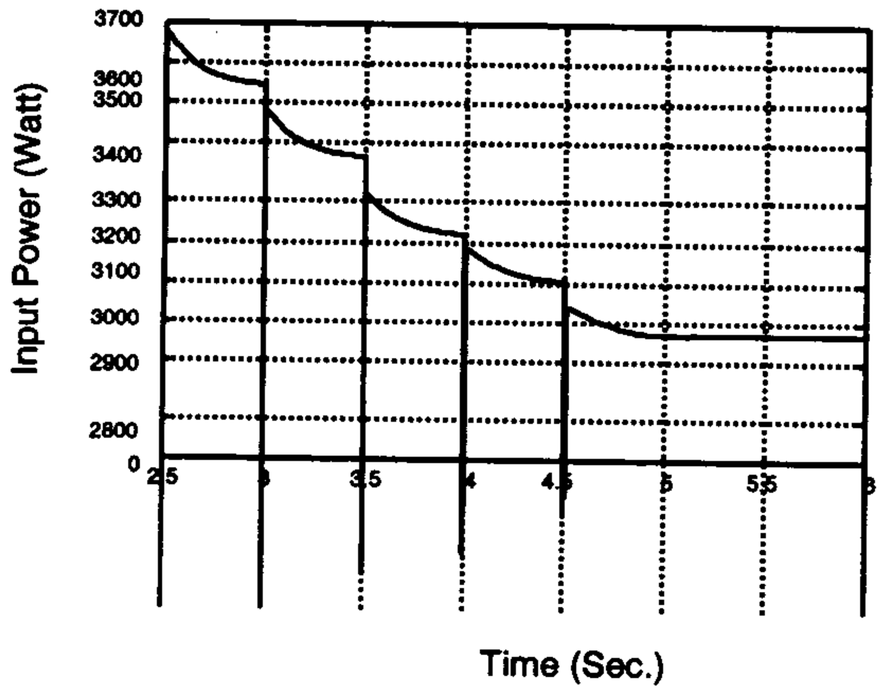
(الف)



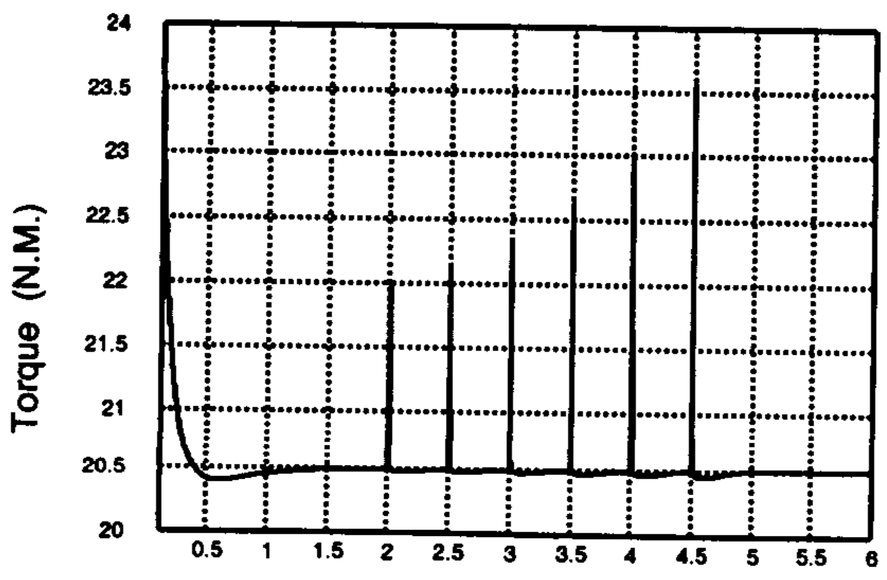
(ب)



(ج)



(ب)

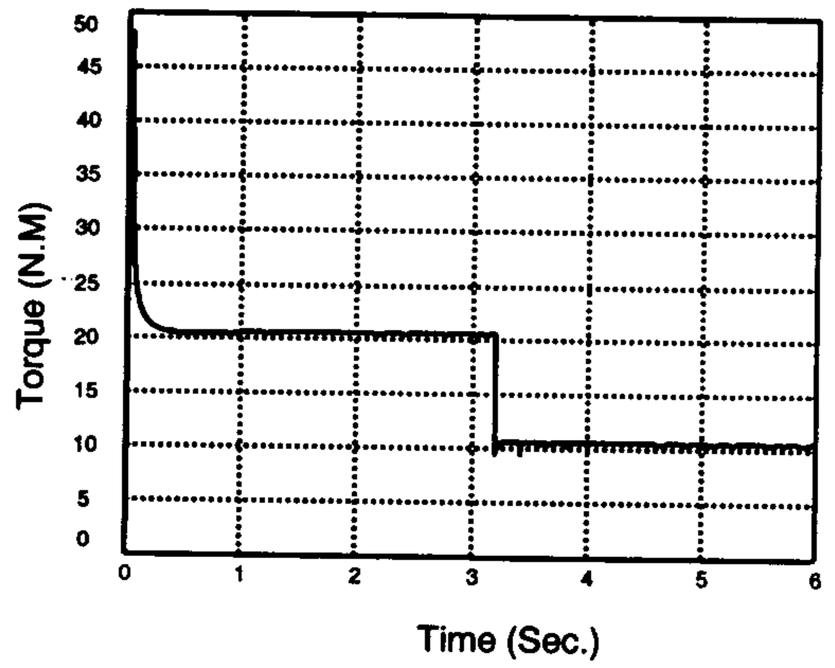


(ج)

شکل۸ : نتایج شبیه سازی تحت روش کنترل بازده معمول مبتنی بر تغییرات پله ای متغیر کنترلی؛ الف) متغیر کنترلی i_{ds} ، ب) توان ورودی، ج) گشتاور .

۱- با توجه به ماهیت پیوسته روش جدید، میزان نوسانات گشتاور ناشی از تغییر متغیر کنترلی موتور، بسیار کم بوده و موتور با گشتاوری پایدارکار می نماید. این مزیت موجب افزایش دقت در کنترل موتور و در نتیجه گسترش استفاده از کنترل بهینه بازده در کاربردهای با رفتار برتر[۲] می شود.

۲- سرعت رسیدن به بازده بهینه در این روش نسبت به روش معمول در حدود دو برابر بیشتر می باشد. این موضوع موجب قابلیت پیاده سازی این روش در مواردی که سرعت و گشتاور ماشین در فواصل کم تغییر می نماید (مانند خودروهای برقی) می شود.



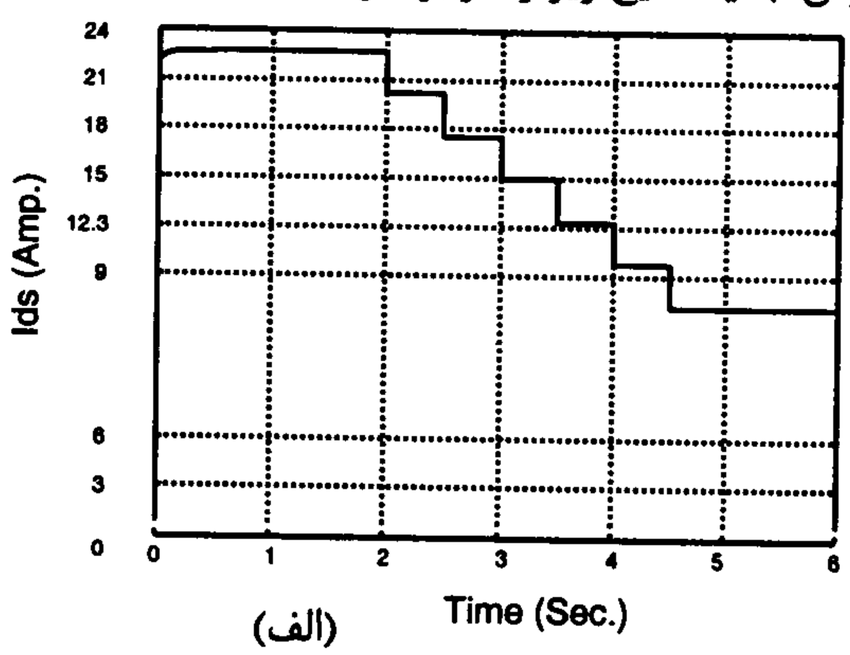
(د)

شکل۷: نتایج شبیه سازی تحت روش کنترل بازده پیشنهادی مبتنی بر تغییر پیوسته متغیر کنترلی؛ الف) سرعت، ب) متغیر کنترلی i_{ds}، ج) توان ورودی، د) گشتاور .

لازم به ذکر است که در کنترل بهینه بازده به روش معمول، با اعمال پله های بزرگتر به i_{ds} ممکن است بتوان سرعت همگرایی کنترل بازده را افزایش داد. لیکن این امر به افزایش دامنه ضربان گشتاور و ناپایداری احتمالی موتور منجر خواهد شد که بسیار نا مطلوب است.

نتیجه گیری

در این مقاله روشهای کاهش تلفات و بهینه سازی بازده در موتورهای القایی بررسی شد و روش کنترل جدیدی مبتنی بر تغییر پیوسته و خطی متغییر کنترلی پیشنهاد گردید. همچنین اجزای اصلی سیستم کنترل و روندنمای مربوط تشریح شد. پس از آن نتایج شبیه سازی برای حالتهای مختلف کار موتور تحت روش مذکور نمایش داده شد و با نتایج حاصل از روش معمول مبتنی بر تغییر گسسته و پله ای متغییر کنترلی مقایسه گردید. استفاده از روش جدید نتایج زیر را در بر دارد:



(الف)

۳- زمان جستجوی بازده بهینه در روش پیشنهادی حدود نصف زمان مربوط در روش معمول است. کوتاه بودن مدت زمان جستجو، باعث کم شدن تلفات حالت جستجو و در نتیجه صرفه جویی بیشتر در مصرف انرژی در موتور تحت کنترل می گردد.

۴- به دلیل لحاظ کردن تلفات آهنی در مدلسازی موتور، مقدار پارامترهای کنترل کننده ها در شبیه سازی به مقادیر واقعی نزدیکتر و همچنین نتایج شبیه سازی به جوابهای عملی نزدیکتر خواهد بود.

۵- سیستم به دلیل پیروی از الگوی مناسب تغییر و تنظیم شار، دارای دینامیک قابل قبولی در پاسخ به تغییرات سرعت و گشتاور می باشد.

موارد مذکور در بالا عمدتاً مبین برتری روش پیشنهادی نسبت به روش معمول کنترل بهینه بازده در موتورهای الکتریکی است.

سپاسگزاری

این پژوهش با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه تهران در قالب طرح تحقیقاتی کنترل پیشرفته موتورهای الکتریکی AC به شماره ۶۱۲/۱/۵۳۴ انجام شده است. مؤلفان بدینوسیله مراتب تشکر خود را از دانشگاه ابراز می دارند.

مراجع

1 – Kioskeridis, I. and Margaris; N. (1996). "Loss minimization in induction motor adjustable-speed drives." *IEEE Trans. Ind. Elec.,* Vol. 43, No. 1 ,PP. 226-231.

2 - Jung, J. and Nam, K. (1998). "A vector control scheme for EV induction motors with a series iron loss model." *IEEE Trans. Ind. Elec.,* Vol. 45, No. 4, PP. 617-624.

3 – Jinhwan, J. (1997). "A new vector control scheme considering iron loss for electric vehicle induction motors." *Proc. of IEEE IAS-97,* PP. 439-444.

4 - Kusko, A. and Galler, D. (1983). "Control means for minimization of losses in AC and DC motor drives." *IEEE Trans. Ind. App.,* Vol. IA-19, No. 4, PP. 561-570.

5 - Udayagiri, M. and Lipo, T. "Simulation of inverter fed induction motors including core losses." *Proc. of IEEE IECON-89,* PP. 232-237.

6 - Sousa, G., Bose, B. and Cleland, J. (1995). "Fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of an indirect vector-controlled induction motor drive." *IEEE Trans. Ind. Elec.,* Vol. 42, No. 2, PP. 192-198.

7 - Vaez-Zadeh, S. and John, I. (1999). "An on-line loss minimization controller for interior permanent magnet motor drives." *IEEE Trans. Energy Conv.,* PP. 1435-40.

8 - Levi, E. and Lazzari, M. (1995). "Performance deterioration in indirect vector controlled induction motor drives due to iron losses." *Proc. of IEEE PESC-95,* PP. 1312-18.

9 - Sokola, M. and Levi, E. (1996). "Combined impact of iron loss and main flux saturation on operation of vector controlled induction machines." *Power Elec Conf.,* PP. 36-41.

10 - Garcia, G.O., Mendes Luis, J., Stephan, R. and Watanabe, E. (1994). "An efficient controller for an adjustable speed induction motor drive." *IEEE Trans. Ind. Elec.,* Vol. 41, No. 5, PP. 533-539.

11 – Chang, J. and Kook, B. (1997). "Minimum-time minimum-loss speed control of induction motors under field-oriented control." *IEEE Trans. Ind. Elec.,* Vol. 44, No. 6, PP. 809-815.

۱۲ – هندی، س. ف. "تحلیل و طراحی سیستم کنترل بهینه بازده در موتورهای AC دور متغیر." پایان نامه کارشناسی ارشد. تابستان (۱۳۷۹).

13 - Sousa, D., Bose, B. and Cleland, J. (1992). "Loss modeling of converter induction machine system for variable speed drive." *Proc. Int. Conf. on Ind. Electron., Contr., Instrumentation and Automation ,IECON 92,* PP. 114-120.

14 - Vaez-Zadeh, S., John, V. I. and Rahman, M. A. (1997). "Adaptive loss minimization control of inverter –fed IPM motor drives." *Proc. of IEEE PESC-97,* PP. 861-868.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Loss Minimization Algorithm

2 - High Performance