

کنترل زاویه شار به منظور بهبود بازده موتورهای القایی

محمد رضا محبی^۱، دانشجوی دکتری؛ داود عرب خابوری^۲، استادیار؛ مهیار خسروی^۳، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران - ma_mohebbi@elec.iust.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران - khaburi@iust.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران - mkhosravi@elec.iust.ac.ir

چکیده: امروزه موتورهای القایی به طور گسترده‌ای در صنعت، به وسیله درایوهای الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از پرکاربردترین درایوهای الکتریکی، کنترل برداری است. کنترل برداری در بارهای سنگین عملکرد قابل قبولی دارد و مقدار شار روتور در بارهای سنگین همان مقدار نامی است. اما در بارهای سبک، استفاده از کنترل برداری منجر به کاهش بازده خواهد شد. در واقع، در بارهای سبک مقدار شار نامی روتور نیاز نیست. موتورها اغلب در باری غیر از بار نامی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از عواملی که موجب قرار گرفتن موتور در باری به غیر از بار نامی می‌شود، انتخاب بالادست موتور است. در این مقاله سعی خواهد شد با کنترل زاویه بین جریان استاتور و شار روتور که بر محور d قرار دارد (زاویه شار)، مقدار بازده موتور القایی، به خصوص در بارهای سبک، بهبود یابد. در روش پیشنهادی، مقدار زاویه شار در بارهای سبک در یک مقدار ثابت، که به برخی از پارامترهای موتور وابسته است؛ کنترل خواهد شد. روش پیشنهادی به سادگی قابل اجراست، حجم محاسباتی اندک دارد و بازده موتور القایی را در بارهای سبک به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد داد.

واژه‌های کلیدی: کنترل زاویه شار - کنترل برداری - موتور القایی - افزایش بازده.

Flux Angle Control to Improve the Efficiency of Induction Motors

Mohammad Reza Mohebbi¹, PhD student; Davood Arab Khaburi², Assistant professor; Mahyar Khosravi³, PhD student

1- Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: ma_mohebbi@elec.iust.ac.ir

2 - Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: khaburi@iust.ac.ir

3- Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: mkhosravi@elec.iust.ac.ir

Abstract: Today, induction motors are widely used in the industry by electric drives. Vector control is one of the commonly used electric drives. Vector control has a good performance in heavy loads and the amount of rotor flux in these loads is the same as the nominal value. But in light loads, using vector control will result in a reduction in efficiency. In fact, in the light loads, the value of the rotor rated flux is not required. Motors are often used at a load other than the rated value. One of the factors that causes the motor to be placed in a load other than the rated load, is the oversized selection. In this paper, it will be tried to improve the induction motor efficiency, especially in light loads, by controlling the angle between the stator current and the rotor flux which is located on the d-axis (flux angle). In the proposed method, the value of the flux angle in light loads is controlled at a constant value, which is dependent on some of the motor parameters. The proposed method could be simply implemented, has a low computational burden and will considerably increase the efficiency of the induction motor in light loads.

Keywords: Flux angle control, Vector control, Induction motor, Efficiency improvement.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۰۲

نام نویسنده مسئول: داود عرب خابوری

نشانی نویسنده مسئول: ایران- تهران- رسالت- خیابان هنگام- خیابان دانشگاه- دانشگاه علم و صنعت ایران- کد پستی ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶

۱- مقدمه

تنظیم می‌شود؛ درحالی‌که بازده موتور در این حالت بهینه نمی‌باشد. [۱۶-۱۹].

عوامل بیرونی نیز بر عملکرد کنترل برداری موتور القایی تأثیرگذار است. از جمله مهم‌ترین عوامل بیرونی می‌توان به تأثیر دمای محیط به مقاومت استاتور و روتور اشاره کرد. در [۲۰] به این مورد اشاره شده و به منظور برطرف کردن این مشکل، از الگوریتم آنلاین تغییر مقاومت بر اساس اندازه‌گیری دمای محیط استفاده شده است. در این مورد، اشاره‌ای به بهبود بازده موتور القایی نشده و صرفاً به منظور جبران تغییرات مقاومت موتور روشی پیشنهاد شده است.

مرجع [۲۱] به منظور بهبود بازده موتور القایی طرح کنترل ضریب توان ثابت را ارائه داده است. در این طرح با استفاده از منبع ولتاژ ثابت و خازن شناور، در ضریب توان ثابت بازده موتور القایی را نسبت به کنترل v/f بهبود بخشیده است. روش پیشنهادی در این مرجع نسبت به روش کنترل متداول v/f مورد مقایسه قرار گرفته ولی نسبت به کنترل برداری و کنترل مستقیم گشتاور مورد ارزیابی قرار نگرفته است. به علاوه، این روش به ضریب توان وابسته است.

یکی از دلایل افت بازده موتور القایی در بارهای سبک، عدم توازن در تلفات مسی و آهنی است. به منظور بهبود بازده در بارهای سبک سطح شار روتور باید کمتر از مقدار نامی باشد. با کنترل شار روتور در مقدار بهینه، جریان استاتور و روتور کاهش یافته و به تبع آن تلفات مسی موتور نیز کاهش و بازده افزایش خواهد یافت [۲۲].

مرجع [۲۳] به منظور بهبود بازده موتور القایی تابع تلفات را بر حسب شار فاصله هوایی بدست آورده و شار بهینه را برای تابع هزینه محاسبه کرده است. در این روش مدل تلفات آهنی به صورت رابطه‌ای بر حسب سرعت و شار بیان شده و تلفات آهنی وارد مدار معادل موتور نشده است.

در [۲۴] هدف بهبود بازده موتور القایی در حالت گذرا است. در این مرجع برای بهبود بازده موتور القایی در حالت ماندگار راه‌حلی ارائه شده و بر حالت گذرا تأکید دارد.

مرجع [۲۵] نیز به بررسی بهبود بازده موتور القایی در کنترل برداری پرداخته است. در روش پیشنهادی تابع تلفات بر حسب مؤلفه d جریان استاتور نوشته شده است و جریان بهینه به منظور بهبود بازده موتور القایی محاسبه شده است. در روش پیشنهادی از تلفات مکانیکی و تلفات سرگردان صرف نظر شده است.

شکل ۱ و ضعیف تلفات موتور القایی تحت بارهای مختلف در شار روتورهای گوناگون را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل واضح است که در گشتاور بار نامی (۱۰۰٪) تلفات موتور در شار نامی کمینه خواهد شد. در حالیکه در ۷۵٪ گشتاور بار نامی، تلفات در ۸۰٪ شار نامی کمینه شده و در بارهای سبک‌تر، مقدار شار روتوری که تلفات موتور را کاهش می‌دهد؛ بسیار کم‌تر از شار نامی موتور بوده، به طوری که در ۱۰٪ گشتاور بار نامی مقدار شاری که تلفات را بهینه می‌کند ۶۰٪ مقدار شار نامی روتور است [۲۶].

موتورهای الکتریکی بیش از ۵۰٪ انرژی صنعت را مصرف می‌کنند [۱]. موتورهای القایی به دلیل قابلیت اطمینان بالا، استحکام زیاد و قیمت مناسب مورد توجه صنعت قرار گرفته‌اند و بیش از ۶۰٪ موتورهای این بخش را به خود اختصاص داده‌اند [۲، ۳]. این نوع موتورها در گرم‌کن‌ها، کولرها، یخچال‌ها، پمپ‌ها، آسیاب‌ها، نوارهای نقاله و نظایر آن مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. امروزه در ساخت خودروهایی هیبریدی نیز از موتورهای القایی استفاده می‌شود. استفاده از دو موتور القایی در خودروهایی هیبریدی کنترل پذیری این خودروها را افزایش می‌دهد [۵].

از آن‌جا که بخش زیادی از انرژی مصرفی در صنعت مربوط به این نوع موتورها هست، بحث بهبود بازده موتورهای القایی و کاهش چشم‌گیر مصرف انرژی در صنعت مورد توجه محققین قرار گرفته است. بهبود بازده موتورهای الکتریکی را می‌توان در طراحی و کنترل آن‌ها مورد بررسی قرار داد. طراحی بهینه ساختار موتور القایی از قبیل طول استاتور، روتور و ... همچنین استفاده از موادی در هسته استاتور و روتور با تلفات آهنی کم‌تر منجر به بهبود بازده موتور القایی خواهد شد [۶].

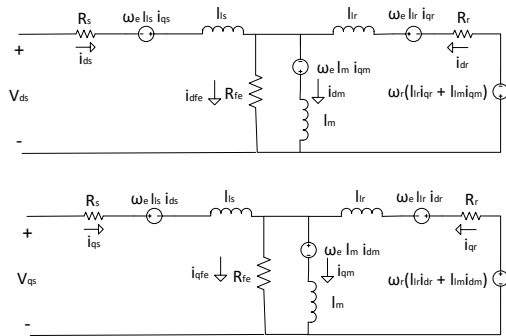
علاوه بر طراحی بهینه ساختار موتور القایی، یکی از عواملی که می‌تواند بازده موتور القایی را بهبود دهد، کنترل موتور القایی است. موتورهای القایی در سرعت و گشتاور نامی بازده قابل قبولی دارند اما از آن‌جا که در بارهای سبک تلفات موتور کاهش ناچیزی داشته و توان خروجی موتور کاهش می‌یابد، لذا بازده کاهش خواهد یافت.

هنگامی که موتور مستقیماً به شبکه متصل است، نمی‌توان تلفات موتور را در بارهای سبک کاهش داد. اما زمانی که موتور به وسیله اینورتر تغذیه می‌شود، می‌توان با کنترل مناسب مقدار تلفات را در بارهای سبک کاهش داده و بازده موتور را بهبود داد.

تلفات موتور القایی به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شود [۷، ۸]:
الف) تلفات اصلی شامل تلفات مسی استاتور و روتور و تلفات آهنی.
ب) تلفات اضافی شامل تلفات مکانیکی، تلفات بادخوری و ...
برخی از این تلفات مانند تلفات آهنی به نحوه ساخت موتور بستگی داشته، در حالی که برخی از آن‌ها مانند تلفات مسی و تلفات آهنی را می‌توان به وسیله کنترل موتور کاهش داد.

روش‌های کنترل سنتی نظیر v/f ثابت یا کنترل عددی در حالت‌های گذرا عملکرد مناسبی ندارند. به علاوه این روش‌ها امکان دسترسی به تمامی نقاط کار در صفحه گشتاور-سرعت ندارند [۹-۱۱]. به منظور افزایش بازده موتورهای القایی، طرح‌های حداقل‌سازی تلفات ارائه شده است. این طرح‌ها شامل دو دسته آنلاین و آفلاین می‌باشند. در این طرح‌ها با استفاده از مدل ماشین تلفات محاسبه شده و بهترین شار روتور به منظور حداقل کردن تلفات موتور انتخاب خواهد شد [۱۲-۱۵].

تابع هدف انتخابی در این طرح‌ها متفاوت است. در برخی موارد تابع هدف دستیابی به بیشترین نسبت گشتاور بر آمپر است. در این حالت مقدار شار روتور برای دستیابی به بیشترین مقدار گشتاور بر آمپر



شکل ۲: مدل موتور القایی با در نظر گرفتن تلفات آهنی در دستگاه dq

که در آن R_s ، R_r و R_{fe} به ترتیب مقاومت استاتور، روتور و مقاومت مدل کننده تلفات آهنی است. L_m و L_r ، L_s به ترتیب اندوکتانس پراکنده استاتور، روتور و مغناطیسی می‌باشد. ω_r و ω_e بیانگر سرعت الکتریکی و سرعت الکتریکی روتور است. v_{qs} ، v_{ds} ، i_{ds} ، i_{qs} ، i_{dr} ، i_{qr} مؤلفه‌های ولتاژ استاتور و جریان استاتور و مدار روتور صفر در نظر گرفته می‌شود. i_{dm} و i_{qm} مؤلفه‌های جریان مغناطیس‌کنندگی و i_{dfe} و i_{qfe} جریان شاخه تلفات آهنی است. معادلات ولتاژ جریان استاتور و روتور با توجه به مدل ارائه شده به صورت زیر بیان می‌شود.

$$v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_e \cdot \lambda_{qs} \quad (1)$$

$$v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_e \cdot \lambda_{ds} \quad (2)$$

$$0 = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - \omega_{sl} \cdot \lambda_{qr} \quad (3)$$

$$0 = R_r \cdot i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + \omega_{sl} \cdot \lambda_{dr} \quad (4)$$

که در آن ω_{sl} سرعت لغزش، L_s مجموع اندوکتانس مغناطیسی و اندوکتانس پراکنده استاتور و L_r مجموع اندوکتانس مغناطیسی و اندوکتانس پراکنده روتور است.

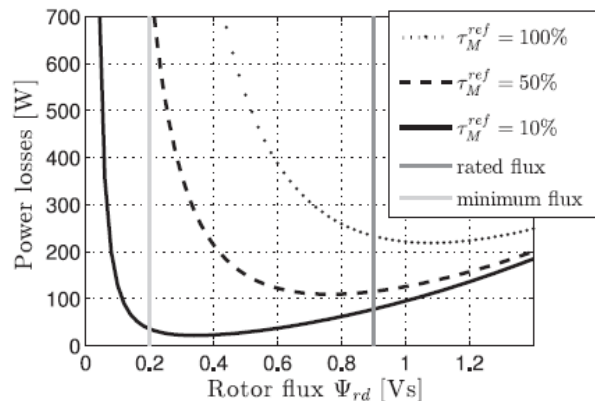
همچنین معادلات شار جریان استاتور و روتور به صورت معادلات ۵-۸ بیان می‌شود.

$$\lambda_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + l_m \cdot i_{dr} - l_m \cdot i_{dfe} \quad (5)$$

$$\lambda_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + l_m \cdot i_{qr} - l_m \cdot i_{qfe} \quad (6)$$

$$\lambda_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + l_m \cdot i_{ds} - l_m \cdot i_{dfe} \quad (7)$$

$$\lambda_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + l_m \cdot i_{qs} - l_m \cdot i_{qfe} \quad (8)$$



شکل ۱: تلفات موتور القایی بر حسب شار روتور در گشتاور بارهای متفاوت [۲۶]

در این مقاله، زاویه بین جریان استاتور و محور d (زاویه شار) مورد ارزیابی قرار گرفته و این زاویه معیار کنترل در نظر گرفته شده است. مؤلفه‌های جریان استاتور در هر راستا تولید شار می‌کنند که شار تولیدی و مؤلفه‌های به وجود آورنده آن هم فاز است. بنابراین جریان استاتور و شار استاتور دارای فاز یکسان می‌باشند. شار ایجاد شده در استاتور پس از عبور از فاصله هوایی در روتور امتداد می‌یابد. راستای شار روتور در موتورهای القایی مبنای محور d در دستگاه dq است. با توجه به این که محور d مبنای اندازه‌گیری زاویه انتخاب شده است، راستای شار استاتور و راستای شار در روتور، دارای زاویه‌ای است که کنترل این زاویه در گشتاور بارهای سبک می‌تواند تلفات موتور القایی را کاهش دهد. مقدار این زاویه در گشتاور بارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و سعی شده است مقدار بهینه این زاویه به منظور دستیابی به بیشترین بازده، معرفی شود.

بدین منظور، در این مقاله ابتدا مدل موتور القایی در حضور تلفات آهنی ارزیابی می‌شود. پس از آن معادلات موتور القایی در حضور تلفات آهنی در دستگاه dq بیان می‌گردد. سپس به بررسی کنترل زاویه شار در موتورهای القایی پرداخته خواهد شد و مدلی برای آن معرفی می‌شود. مدل بیان شده تحت تأثیر شرایط مختلف بار ارزیابی شده و نتایج شبیه‌سازی ارائه خواهد شد.

۲- مدل‌سازی موتور القایی و کنترل زاویه شار

۲-۱- مدل موتور القایی با در نظر گرفتن تلفات آهنی

تلفات آهنی در موتورهای القایی به روش‌های مختلفی در نظر گرفته می‌شود. یکی از این روش‌ها مدل کردن تلفات آهنی به صورت یک مقاومت سری با امپدانس استاتور و یا موازی با شاخه مغناطیس‌کنندگی است [۲۷-۲۹].

شکل ۲ مدل موتور القایی را در قاب مرجع سنکرون در دستگاه dq با حضور تلفات آهنی نشان می‌دهد که به صورت موازی با شاخه مغناطیس‌کنندگی در نظر گرفته شده است [۳۰].

که در آن k_h و k_e به ترتیب ثابت‌های جریان هیستریزس و گردابی، B چگالی شار بر حسب تسلا و m_s جرم آهن استاتور است [۳۱].

مطابق مدار معادل موتور القایی، توان تلفاتی در مقاومت R_{fe} که بیانگر تلفات آهنی موتور است، برابر است با:

$$\Delta P_{fe} = \frac{3}{2} R_{fe} (i_{qfe}^2 + i_{dfe}^2) \quad (۱۷)$$

به‌منظور محاسبه تلفات موتور از رابطه ۱۷ برای بدست آوردن تلفات آهنی استفاده خواهد شد.

تلفات مکانیکی موتور که شامل اصطکاک و بادخوری بوده و به سرعت روتور وابسته است؛ مطابق رابطه ۱۸ در نظر گرفته می‌شود.

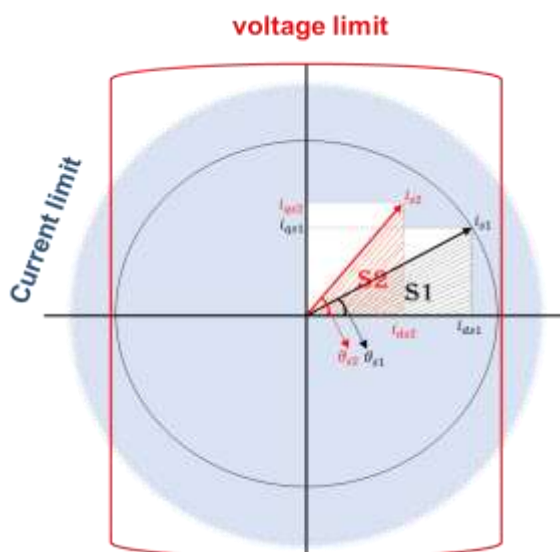
$$\Delta P_{mech} = C_f \Omega_r^2 + C_w \Omega_r^3 \quad (۱۸)$$

که در آن C_f ضریب اصطکاک و C_w ضریب بادخوری است. همچنین، ۱٪ توان ورودی نیز به عنوان تلفات سرگردان در نظر گرفته می‌شود.

۳-۲- کنترل زاویه شار

از آن‌جاکه بازده موتور القایی تحت بارهای سبک افت شدید دارد، نیاز به بهبود بازده موتور در این بارها ضروری به نظر می‌رسد.

مطابق شکل ۳ فرض شود موتور در نقطه ۱ با جریان استاتور i_{s1} در حال کارکرد می‌باشد. مساحت S_1 متناسب با انرژی داده شده به موتور است. حال اگر در این بار، جریان i_{s2} به گونه‌ای به موتور اعمال شود که سطح S_2 برابر با S_1 باشد؛ در حالی که بردار جریان i_{s2} کوچک‌تر از بردار جریان i_{s1} است، می‌توان بار موتور را تأمین کرد و به‌صورت همزمان، توان ورودی به موتور را کاهش داده و به تبع آن بازده موتور را افزایش داد.



شکل ۳: کنترل زاویه شار در موتورهای القایی

که در آن λ_{ds} ، λ_{qs} ، λ_{dr} و λ_{qr} به ترتیب مؤلفه شار استاتور و روتور در راستای محورهای d و q است.

همچنین شار مغناطیس‌کنندگی موتور در راستای محورهای d و q نیز به‌صورت معادلات ۹ و ۱۰ است.

$$\lambda_{dm} = l_m \cdot i_{dm} = l_m \cdot (i_{ds} + i_{dr} - i_{dfe}) \quad (۹)$$

$$\lambda_{qm} = l_m \cdot i_{qm} = l_m \cdot (i_{qs} + i_{qr} - i_{qfe}) \quad (۱۰)$$

مطابق با مدل موتور در دستگاه dq و با صرف‌نظر کردن از نیروی الکتروموتور تبدیلی، جریان مقاومت مدل‌کننده تلفات آهنی به‌صورت رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ بدست خواهد آمد.

$$i_{dfe} = -\frac{\omega_e \cdot l_m \cdot i_{qm}}{R_{fe}} \quad (۱۱)$$

$$i_{qfe} = \frac{\omega_e \cdot l_m \cdot i_{dm}}{R_{fe}} \quad (۱۲)$$

لازم به ذکر است روابط ۱۱ و ۱۲ در حالت کار پایدار و قاب مرجع سنکرون صادق بوده و از آنجاکه در این مقاله نیز حالت کار ماندگار موتور القایی مورد بررسی قرار خواهد گرفت، می‌توان از این معادلات استفاده کرد.

گشتاور الکترومغناطیسی موتور نیز از رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot (\lambda_{qr} \cdot i_{dr} - \lambda_{dr} \cdot i_{qr}) \quad (۱۳)$$

که در آن p تعداد قطب‌های موتور است.

۲-۲- تلفات موتور القایی

تلفات مسی موتور القایی شامل تلفات مسی استاتور و روتور است که به‌صورت رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ محاسبه می‌شوند.

$$\Delta P_{cus} = \frac{3}{2} R_s (i_{qs}^2 + i_{ds}^2) \quad (۱۴)$$

$$\Delta P_{cur} = \frac{3}{2} R_r (i_{qr}^2 + i_{dr}^2) \quad (۱۵)$$

تلفات آهنی در استاتور و روتور شامل دو قسمت تلفات هیستریزس و گردابی است. در شرایط کارکرد عادی موتور که لغزش بسیار کوچک است از تلفات آهنی روتور صرف‌نظر می‌شود.

تلفات آهنی موتور القایی را می‌توان به‌صورت رابطه ۱۶ بیان نمود.

$$\Delta P_{fe} = p_h + p_e = k_h B^\beta \omega_e m_s + k_e B^2 \omega_e^2 m_s \quad (۱۶)$$

به منظور دستیابی به زاویه شار بهینه باید از تابع هزینه نسبت به زاویه شار مشتق گرفته و مساوی صفر قرار داده شود. با توجه به پیچیدگی رابطه تلفات بر حسب زاویه شار، تلفات را بر حسب i_{dm} بازنویسی کرده و نسبت به آن مشتق گیری می شود. به منظور ساده شدن معادلات ابتدا قسمت های ثابت به صورت رابطه های ۲۶-۳۰ بازنویسی شده است.

$$\frac{\omega_e \cdot l_m}{R_{fe}} = a \quad (26)$$

$$1 + \frac{l_m}{l_r} = b \quad (27)$$

$$R_r \cdot \left(\frac{l_m}{l_r}\right)^2 + R_{fe} \cdot a^2 + R_s \cdot (a^2 + b^2) = c \quad (28)$$

$$R_s + a^2 \cdot (R_s + R_{fe}) = d \quad (29)$$

$$h = \frac{4 \cdot l_r \cdot T_e^{ref}}{3 \cdot p \cdot l_m^2} \quad (30)$$

$$\Delta P_{loss} = \frac{3}{2} \left\{ R_s \left[\left(\frac{b \cdot h}{i_{dm}} \right)^2 + 2 a \cdot b \cdot h + a^2 \cdot i_{dm}^2 \right] + \left[\left(\frac{a \cdot h}{i_{dm}} \right)^2 - 2 \cdot a \cdot h + i_{dm}^2 \right] + R_r \left(\frac{l_m \cdot h}{l_r \cdot i_{dm}} \right)^2 + R_{fe} \left(a^2 \cdot i_{dm}^2 + \left(\frac{a \cdot h}{i_{dm}} \right)^2 \right) \right\} \quad (31)$$

همچنین، تلفات مکانیکی و گردابی در مدل بار در نظر گرفته شده است.

با مشتق گیری از رابطه ۳۱ بر حسب i_{dm} و با توجه به رابطه بین i_{dm} و i_{qm} مقدار زاویه بهینه θ_m (زاویه جریان مغناطیس کنندگی نسبت به محور d) بدست خواهد آمد.

$$i_{dm}^* = \sqrt{h} \sqrt[4]{\frac{c}{d}} \quad (32)$$

با توجه به زاویه θ_m ، رابطه زاویه شار بهینه به منظور دستیابی به بازده حداکثر به صورت رابطه ۳۳ است.

$$(\theta_s)_{opt} = a \tan \left(\frac{b \cdot \sqrt{d} + a \cdot \sqrt{c}}{\sqrt{c} - a \cdot \sqrt{d}} \right) \quad (33)$$

رابطه ۳۳ نشان می دهد به منظور دستیابی به بازده بهینه موتور القایی، باید زاویه شار در مقداری ثابت کنترل شود که این مقدار به برخی از پارامترهای موتور مانند R_s ، R_r ، R_{fe} ، l_m ، l_r و ω_e وابسته است.

به عبارتی در نقطه کار ۱ جریان i_{ds1} شار نامی را در موتور بوجود می آورد و i_{qs1} گشتاور موتور را تولید خواهد کرد. حال با توجه به اینکه موتور در باری کمتر از بار نامی قرار دارد، مقدار مؤلفه d جریان استاتور کاهش و مقدار مؤلفه q جریان استاتور افزایش خواهد یافت. یعنی در حالیکه موتور با زاویه شار θ_{s1} در حال کارکرد می باشد، به منظور کاهش جریان استاتور این زاویه به مقدار θ_{s2} افزایش داده می شود به نحوی که گشتاور بار موتور تأمین شود و در عین حال توان تلفاتی موتور کاهش یابد.

مقدار زاویه شار به منظور دستیابی به بیشترین مقدار گشتاور بر آمپر ۴۵ درجه است [۳۲]. در زاویه ۴۵ درجه مؤلفه های جریان استاتور در راستای محور d و q برابر است.

در کنترل برداری، شار روتور در راستای محور d قرار می گیرد و جریان روتور در راستای محور d صفر است.

$$\lambda_r = \lambda_{dr} \quad (19)$$

$$\lambda_{qr} = 0 \quad (20)$$

با توجه به این نکته جریان استاتور در راستای محورهای dq به صورت روابط ۲۱ و ۲۲ بدست خواهد آمد.

$$i_{ds} = -\frac{\omega_e \cdot l_m \cdot i_{qm}}{R_{fe}} + \frac{\lambda_{dr}}{l_m} \quad (21)$$

$$i_{qs} = i_{qm} \cdot \left(1 + \frac{l_m}{l_r}\right) + \frac{\omega_e \cdot \lambda_{dr}}{R_{fe} \cdot l_m} \quad (22)$$

و گشتاور الکترومغناطیسی موتور از رابطه ۲۳ بدست می آید.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot \frac{l_m}{l_r} \cdot \lambda_{dr} \cdot i_{qm} \quad (23)$$

همچنین سرعت لغزش با استفاده از جریان مغناطیس کنندگی در راستای محورهای d و q به صورت رابطه ۲۴ محاسبه می شود.

$$\omega_{sl} = \frac{R_r}{l_r} \cdot \frac{i_{qm}}{i_{dm}} \quad (24)$$

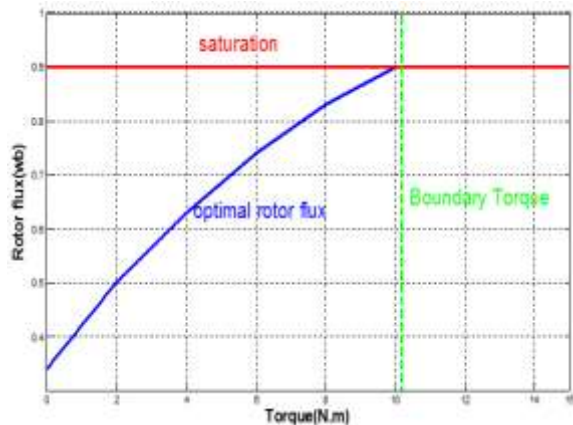
۲-۳-۱- تابع هزینه

تلفات موتور القایی به عنوان تابع هزینه مطابق با رابطه ۲۵ در نظر گرفته می شود. با حداقل شدن تابع هزینه بازده موتور القایی بیشترین مقدار را خواهد داشت.

$$J = \Delta P_{loss} = \Delta P_{cu} + \Delta P_{fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{stray} \quad (25)$$

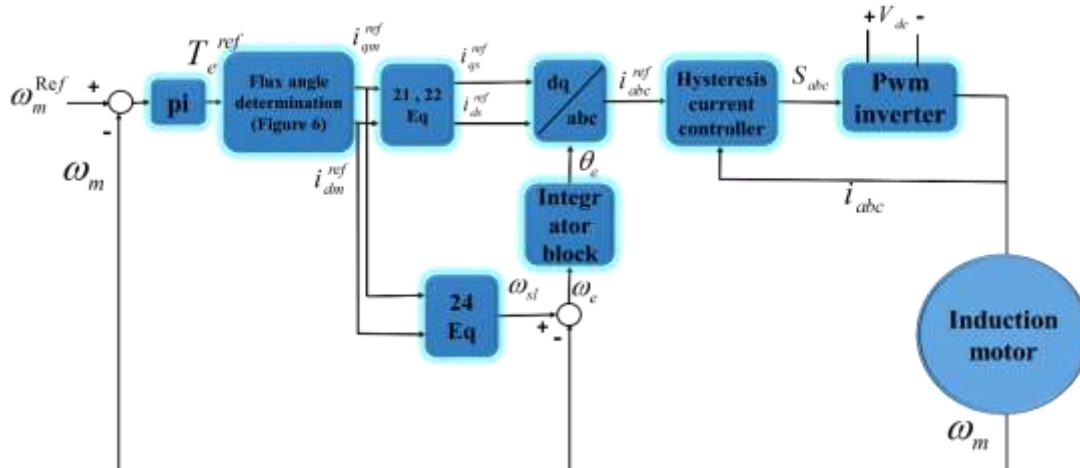
روابط تلفات موتور در معادلات ۱۴-۱۸ بیان شد. با جایگذاری این معادلات در معادله ۲۵، تابع هزینه بر حسب جریان های موتور به دست خواهد آمد.

گشتاور بار مرزی تا گشتاور بار نامی شار نامی موتور مورد نیاز است و در این بازه از گشتاور، خروجی کنترل زاویه شار و کنترل برداری یکسان است. این شکل بر اساس اندازه‌گیری شار روتور در گشتاور بارهای مختلف بدست آمده است.



شکل ۵: وضعیت شار روتور بهینه در کنترل زاویه شار

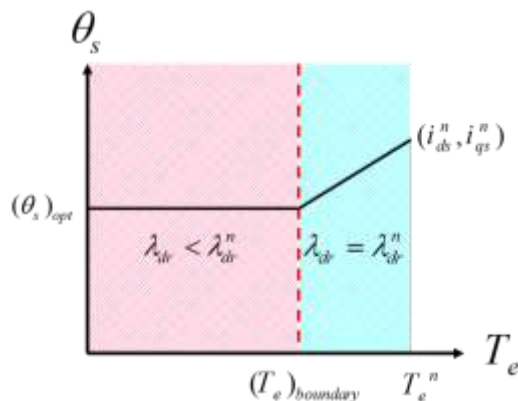
همچنین الگوریتم و بلوک دیاگرام کنترل زاویه شار در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. مطابق شکل ۷ اختلاف سرعت مرجع و سرعت موتور توسط کنترل کننده pi گشتاور مرجع را تولید می‌کند. گشتاور مرجع وارد بلوک محاسبه زاویه شار می‌شود و پس از محاسبه زاویه مرجع، مقادیر مرجع مؤلفه‌های جریان استاتور مشخص می‌شوند. مقادیر مرجع مؤلفه‌های جریان استاتور به همراه جریان استاتور اندازه‌گیری شده، توسط کنترل کننده هیستریزس جریان نحوه کلیدزنی موتور را مشخص می‌کند. استفاده از کنترل کننده هیستریزس جریان موجب حذف دو کنترل کننده PI شده اما فرکانس کلیدزنی را متغیر خواهد کرد [۳۳].



این زاویه (زاویه بهینه شار) از بی‌باری تا یک گشتاور خاص (گشتاور مرزی) که در رابطه ۳۳ محاسبه شده است، ثابت و پس از گشتاور مرزی تا گشتاور بار نامی شروع به افزایش می‌کند تا در گشتاور بار نامی به بیشترین مقدار خود که برابر با $\theta_s = a \tan\left(\frac{i_{qs}^n}{i_{ds}^n}\right)$ می‌رسد.

این موضوع در شکل ۴ نشان داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که در شکل ۴ زاویه شار بهینه که از رابطه ۳۳ بدست آمده است به گشتاور بار بستگی ندارد و ترسیم این شکل به منظور نشان دادن این موضوع است که زاویه بهینه شار در یک ناحیه از گشتاور بار، مطابق رابطه ۳۳ دارای مقداری ثابت و در ناحیه دیگر مقداری غیر ثابت دارد. با توجه به رابطه ۳۲ مقدار گشتاور مرزی را می‌توان به صورت رابطه زیر محاسبه کرد.

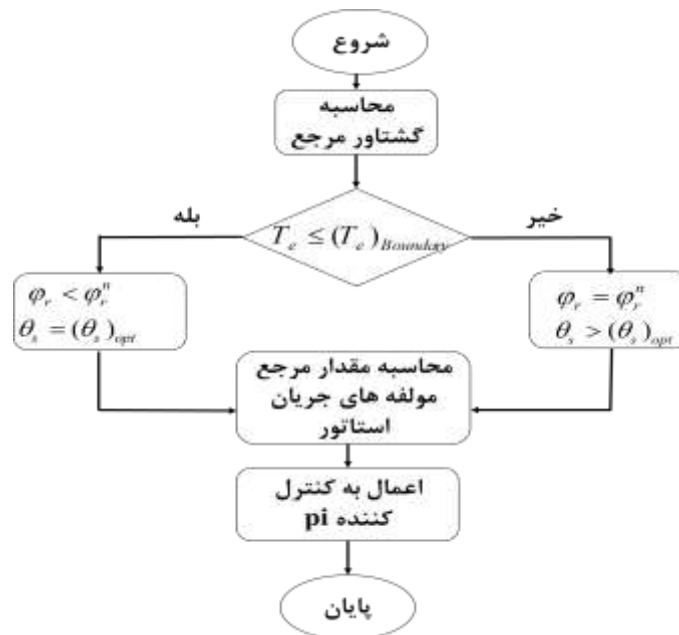
$$(T_e)_{boundary} = \frac{3 \cdot p \cdot (\lambda_{dr}^n)^2}{4 \cdot l_r} \sqrt{\frac{d}{c}} \quad (34)$$



شکل ۴: وضعیت زاویه شار بر حسب گشتاور بار در کنترل زاویه شار

شکل ۵ و وضعیت شار بهینه را در کنترل زاویه شار در موتورهای القایی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، در بازه بی‌باری تا گشتاور مرزی شار نامی موتور نیاز نیست و موتور با شاری کمتر از شار نامی موتور نیز گشتاور تولیدی بار را تأمین می‌کند. اما از

شکل ۶: الگوریتم و بلوک دیاگرام کنترل زاویه شار موتور القایی



شکل ۷: فلوجارت کنترل زاویه شار موتورهای القایی

۳- نتایج شبیه سازی

به منظور تصدیق عملکرد روش پیشنهادی، در این بخش موتور القایی با مشخصات جدول ۱، توسط کنترل زاویه شار در نرم افزار متلب شبیه سازی شده است. بار اعمالی به موتور دارای گشتاور بار ۴ نیوتن متر و سرعت مرجع ۱۰۰ رادیان بر ثانیه است.

جدول ۱: مشخصات موتور القایی

$R_s (\Omega)$	2.876	$R_r (\Omega)$	2.654
$L_s (mH)$	10.75	$L_r (mH)$	10.75
$R_m (\Omega)$	1092	$L_m (mH)$	319
$U_n (V)$	380	$P_n (kW)$	2.2
$f_s (Hz)$	50	$T_n (N.m)$	14.8
$n_n (r/min)$	1420	$\phi_n (Wb)$	0.897

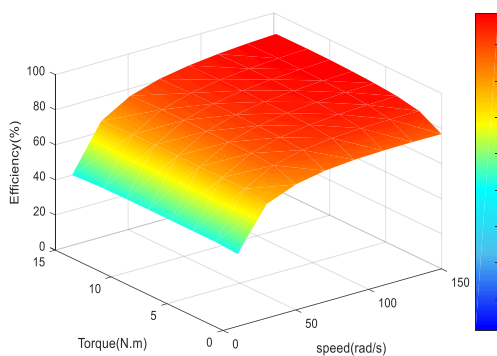
این حالت کوچک است. در حالی که در کنترل زاویه شار با انتخاب مقدار بهینه شار روتور مؤلفه d جریان استاتور کوچک تر از حالت قبل و مؤلفه q جریان استاتور بزرگ تر از کنترل برداری است و سبب خواهد شد زاویه شار روتور بیشتر از مقدار خود در کنترل برداری باشد. به عبارت دیگر علاوه بر تغییر دامنه شار، زاویه ای که امتداد شار استاتور با امتداد شار روتور (محور d) می سازد افزایش یافته است. این موضوع باعث خواهد شد مؤلفه های جریان استاتور متناسب با گشتاور بار، به نحوی تنظیم شوند که تلفات موتور کاهش یابد و به تبع آن بازده موتور در گشتاور بارهای سبک افزایش یابد. بازده موتور تحت بار مذکور در کنترل زاویه شار تقریباً ۷۷٪ و در طرح کنترل برداری ۷۰٪ است. شکل ۹ مقدار شار روتور را در دو طرح کنترل زاویه شار و کنترل برداری نشان می دهد. مقدار شار روتور در کنترل زاویه شار ۰٫۷۵ و بر و در کنترل برداری ۰٫۸۹۷ و بر است.

لازم به ذکر است دلیل جهش بوجود آمده در شکل ۹ مربوط به مقدار شار روتور در کنترل زاویه شار آن است که مقدار مرجع زاویه شار در لحظه راه اندازی برابر با مقدار بدست آمده از رابطه ۳۳ در نظر گرفته شده است. با توجه به این که در این مقاله حالت ماندگار موتور در نظر گرفته شده است، به برر سی مقدار مرجع این زاویه در حالت های گذرا اشاره نشده است.

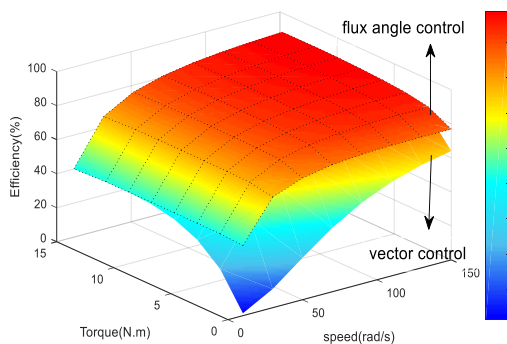
شکل ۸ وضعیت زاویه شار را در دو کنترل برداری و کنترل زاویه شار نشان می دهد. مطابق شکل مقدار زاویه شار در کنترل برداری تقریباً در مقدار ۳۵ درجه و در کنترل زاویه شار در مقدار ۵۸ درجه (رابطه ۳۱) قرار دارد. در واقع در کنترل برداری به دلیل ایجاد شار نامی مقدار مؤلفه جریان استاتور در راستای محور d بیشترین مقدار خود را دارد و مقدار مؤلفه جریان استاتور در راستای محور q متناسب با گشتاور بار انتخاب می شود که به موجب آن زاویه شار در

۲-۲- بررسی بازده موتور القایی

با ثابت نگه داشتن مقدار زاویه شار در گشتاورهای کمتر از گشتاور مرزی، مقدار شار روتور در این بارها کمتر از شار نامی است. از آنجا که تلفات آهنی موتور با توان ۲ شار روتور رابطه مستقیم دارد، تلفات آهنی موتور در روش کنترل زاویه شار در بارهای سبک کاهش خواهد یافت. همچنین ثابت نگه داشتن زاویه شار، منجر به کاهش مؤلفه d جریان استاتور و به تبع آن کاهش جریان استاتور خواهد شد. این موضوع تلفات مسی موتور را نیز کاهش خواهد داد. بنابراین در روش کنترل زاویه شار تلفات موتور نسبت به کنترل برداری کمتر خواهد شد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب وضعیت بازده موتور را در صفحه گشتاور سرعت را برای کنترل برداری و کنترل زاویه شار نشان می‌دهد.



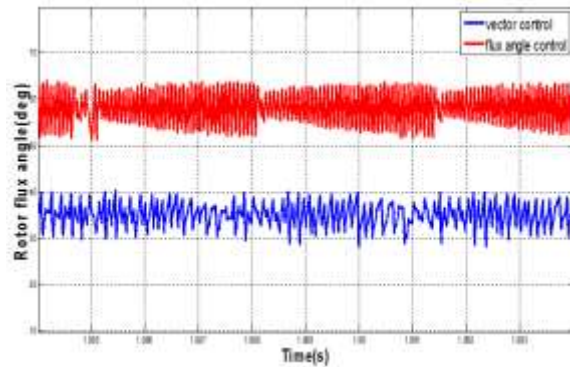
شکل ۱۱: بازده موتور القایی در صفحه گشتاور سرعت تحت کنترل زاویه شار



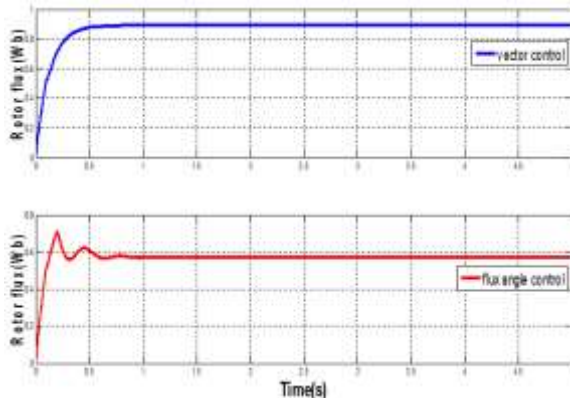
شکل ۱۲: مقایسه بازده موتور القایی در دو روش کنترل برداری و کنترل زاویه شار

مطابق شکل‌های ۱۱ و ۱۲ بازده موتور القایی در روش پیکرینگی به‌ویژه در بارهای سبک به مراتب بیشتر از روش کنترل برداری مرسوم است.

این شکل‌ها به خوبی نشان می‌دهد هرچه به سمت گشتاور بار نامی موتور نزدیک شویم بازده روش پیکرینگی و روش کنترل برداری به هم نزدیک می‌شود. در واقع از گشتاور بار مرزی تا گشتاور بار نامی شار موتور همان شار نامی است بنابراین مؤلفه‌های جریان استاتور نیز مقادیر نامی خود را خواهد داشت. در این حالت زاویه شار نیز شروع به افزایش می‌کند و در گشتاور بار نامی به بیشترین مقدار خود خواهد رسید.



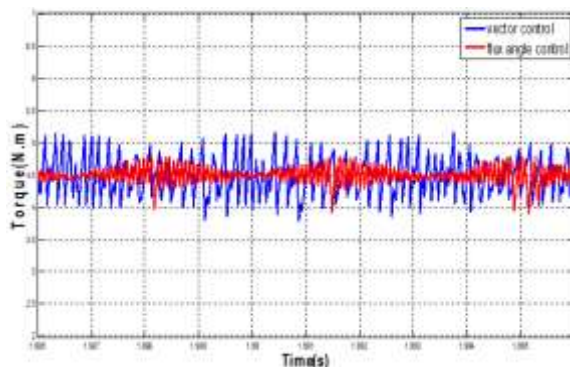
شکل ۸: مقدار زاویه شار در دو طرح کنترل برداری و کنترل زاویه شار



شکل ۹: مقدار شار روتور

۳-۱- بررسی ریپل گشتاور خروجی

شکل ۱۰ وضعیت گشتاور خروجی را در دو طرح کنترلی نشان می‌دهد. مطابق شکل ریپل گشتاور خروجی در طرح کنترل زاویه شار به مراتب کمتر از کنترل برداری است. دلیل آنکه ریپل گشتاور خروجی در روش پیکرینگی کمتر از روش مرسوم کنترل برداری است، مقدار شار روتور بهینه‌ای است که در هر نقطه کار در نظر گرفته می‌شود. در روش پیکرینگی به دلیل آن که مقادیر d و q ، در بارهای سبک مؤلفه‌های جریان استاتور در راستای محورهای d و q ، در بارهای سبک همان مقادیر موردنیاز برای تأمین بار هستند، ریپل گشتاور کمتر از حالتی است که مؤلفه‌های جریان استاتور بیشتر از حد موردنیاز انتخاب شده باشند.



شکل ۱۰: گشتاور خروجی موتور در دو طرح کنترل برداری و کنترل زاویه شار

شکل ۱۳: مقدار زاویه شار در کنترل برداری و کنترل زاویه شار

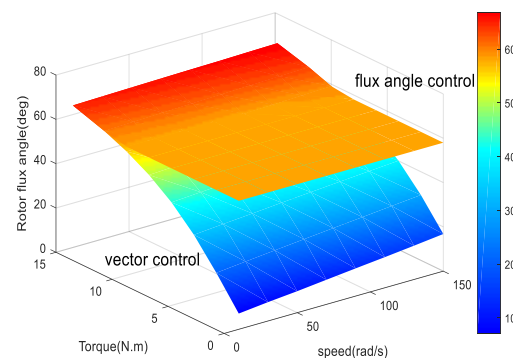
به منظور بررسی نتایج حاصل از روش پیشنهادی، نتایج شبیه سازی در گشتاور بارهای مختلف از بی باری تا بار کامل و سرعت مرجع ۱۴۰ رادیان بر ثانیه در جدول ۲ ارائه شده است. داده های جدول ۲ به خوبی نشان می دهد که چگونه با ثابت نگه داشتن مقدار زاویه شار در گشتاور بارهای سبک، بازده موتور القایی افزایش خواهد یافت.

روند کاهش مؤلفه های جریان استاتور در گشتاور بارهای سبک از گشتاور بار مرزی به سمت بی باری در جدول ۲ مشخص است. همان طور که گفته شد در این ناحیه از گشتاور بار هر دو مؤلفه جریان استاتور به نحوی کاهش داده می شوند که زاویه شار در این ناحیه ثابت کنترل شود. از آنجا که مؤلفه جریان استاتور در راستای محور d تولیدکننده شار و مؤلفه جریان استاتور در راستای محور q تولیدکننده گشتاور بار است در این روش با کاهش گشتاور بار علاوه بر کاهش جریان استاتور در راستای محور q جریان استاتور در راستای محور d به نحوی کاهش داده می شود که زاویه شار مقداری ثابت داشته باشد.

هرچه گشتاور بار از گشتاور مرزی به سمت بی باری برود، زاویه شار در یک مقدار ثابت (رابطه ۳۳) کنترل خواهد شد. در این حالت شار موتور از شار نامی کمتر خواهد بود. در کنترل برداری در گشتاور بارهای مختلف مقدار مؤلفه های جریان استاتور، همواره ثابت خواهد بود. در طرح کنترل زاویه شار هم زمان با کاهش گشتاور بار بجای آنکه فقط مؤلفه ی جریان استاتور در راستای محور q کم شود، مؤلفه محور d جریان استاتور نیز کاهش خواهد یافت. نحوه کاهش مؤلفه های جریان استاتور بگونه ای است که مقدار زاویه شار در این ناحیه از گشتاور ثابت است.

۳-۳- بررسی زاویه شار

شکل ۱۳ وضعیت زاویه شار را در صفحه گشتاور سرعت در دو طرح کنترلی نشان می دهد. مطابق شکل در کنترل زاویه شار، زاویه شار از بی باری تا گشتاور مرزی در یک مقدار ثابت نگه داشته می شود و پس از گشتاور مرزی این زاویه به دلیل افزایش گشتاور و نیاز موتور به شار نامی شروع به افزایش می کند تا در گشتاور بار نامی این زاویه به بیشترین مقدار خود خواهد رسید.



جدول ۲: مقایسه نتایج کنترل برداری و روش پیشنهادی در سرعت مرجع ۱۴۰ رادیان بر ثانیه

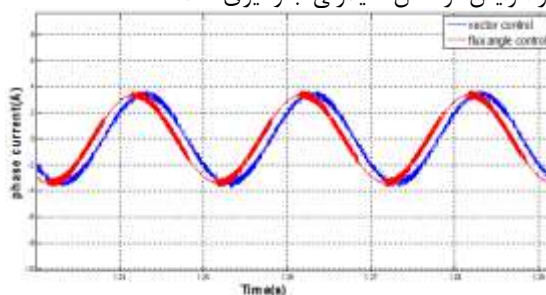
بازده (%)	زاویه شار(deg)		مؤلفه محور q جریان استاتور		مؤلفه محور d جریان استاتور		سرعت مرجع (rad/s)	گشتاور بار (N.m)	
	کنترل برداری	کنترل زاویه شار	کنترل برداری	کنترل زاویه شار	کنترل برداری	کنترل زاویه شار			
۷۴,۷	۳۷,۵	۵۸	۱۱	۱,۲	۰,۵۵	۰,۷۵	۲,۸	۱۴۰	۰
۸۰,۴	۶۸,۲	۵۸	۲۴,۵	۲,۲	۱,۲۸	۱,۴	۲,۸	۱۴۰	۲
۸۱,۵	۷۶,۹	۵۸	۳۶,۱۳	۲,۹	۲,۰۵	۱,۸	۲,۸	۱۴۰	۴
۸۲	۸۰,۴	۵۸	۴۵,۱۵	۳,۵	۲,۸۲	۲,۲	۲,۸	۱۴۰	۶
۸۲,۲	۸۱,۸	۵۸	۵۲	۴	۳,۶	۲,۵	۲,۸	۱۴۰	۸
۸۲,۴	۸۲,۳	۵۸	۵۷,۳	۴,۴	۴,۳۶	۲,۷۵	۲,۸	۱۴۰	۱۰
۸۲,۳	۸۲,۳	۶۱,۴	۶۱,۴	۵,۱۳	۵,۱۳	۲,۸	۲,۸	۱۴۰	۱۲
۸۱,۸	۸۱,۸	۶۵,۷	۶۵,۷	۶,۲	۶,۲	۲,۸	۲,۸	۱۴۰	۱۴

مراجع

۳-۴- بررسی فرکانس کلیدزنی

به منظور بررسی فرکانس کلیدزنی در دو روش کنترل برداری و کنترل زاویه شار از هیستریزس جریان استفاده شده است. پهنای باند هیستریزس ۰.۲ آمپر در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۴ جریان فاز استاتور موتور را در روش پیشنهادی و روش کنترل برداری مرسوم نشان می دهد. در این مقاله از کنترل کننده هیستریزس جریان استفاده شده است. هنگامی که جریان به مقدار مرزی باند هیستریزس تعیین شده از پیش، نزدیک شود کلیدزنی رخ خواهد داد. مطابق شکل ۱۴ در کنترل زاویه شار در برخی زمان ها جریان در باند هیستریزس بدون نزدیک شدن به مقدار مرزی باند مقدار مرجع خود را دنبال می کند. این موضوع باعث خواهد شد فرکانس کلیدزنی در کنترل زاویه شار نسبت به کنترل برداری مرسوم در برخی زمان ها کم تر شود. انتخاب بهینه مقادیر مرجع مؤلفه های جریان استاتور، سبب خواهد شد جریان استاتور به مقدار مطلوب نزدیک تر شود و از افزایش فرکانس کلیدزنی جلوگیری کند.



شکل ۱۴: جریان فاز استاتور به منظور بررسی فرکانس کلیدزنی

۴- نتیجه گیری

در این مقاله طرح کنترل زاویه شار در موتورهای القایی در حضور تلفات آهنی ارائه شد و به منظور صحت آن، روش پیشنهادی توسط نتایج شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفت. مطابق نتایج شبیه سازی در طرح ارائه شده نسبت به کنترل برداری مرسوم، بازده موتور القایی بخصوص در بارهای کم تر از بار نامی به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. افزایش بازده در گشتاور بار یکسان به سرعت موتور نیز وابسته است. به طوری که در کنترل زاویه شار، در بی باری و سرعت های کم بازده افزایش ۴۰ درصدی و در سرعت نامی افزایش ۱۲ درصدی دارد. همچنین از دیگر دستاوردهای کنترل زاویه شار کاهش ریبیل گشتاور خروجی است. در طرح کنترل زاویه شار به دلیل انتخاب درست مقادیر مرجع مؤلفه های جریان استاتور در دستگاه dq، ریبیل گشتاور خروجی به مراتب کمتر از کنترل برداری است. همچنین فرکانس کلیدزنی در روش پیشنهادی کمتر از روش کنترل برداری مرسوم است. همچنین حجم محاسباتی روش پیشنهادی نسبت به روش مرسوم برابر است و به سادگی قابل اجراست.

- [۴] م. اوجاقی، ن. یزدان دوست، ش. گل محمدزاده، شهریار، تشخیص عیب گردش روغن در یاتاقان لغزشی موتور القایی با استفاده از هارمونیک های توان لحظه ای، "مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، vol. 46, pp. 7-17, 2016.
- [۵] م. ولی زاده، م. فیضی، ا. بابائی، م. صباحی، مهران، "اینورتر امیدانسی دو خروجی برای درایو دو موتور القایی کنترل شده به روش DTC در خودرو هیبرید پیل سوختی"، "مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، vol. 44, pp. 51-66, 2014
- [6] P. Pecinka, S. Kocman, P. Orsag, and J. Otypka, "Solutions to increase the efficiency of induction motors," in Electric Power Engineering (EPE), 2017 18th International Scientific Conference on, 2017, pp. 1-6.
- [7] D. Mehdi and S. Lassaad, "Losses minimisation in an induction motor," in Signals, Circuits and Systems (SCS), 2009 3rd International Conference on, 2009, pp. 1-6.
- [8] S. Lim and K. Nam, "Loss-minimising control scheme for induction motors," IEE Proceedings-Electric Power Applications, vol. 151, pp. 385-397, 2004.
- [9] S. J. Plathottam and H. Salehfar, "Transient loss minimization in induction machine drives using optimal control theory," in Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2015 IEEE International, 2015, pp. 1774-1780.
- [10] R. P. d. F. Martins, D. M. Sousa, V. F. Pires, and A. Roque, "Reducing the power losses of a commercial electric vehicle: Analysis based on an asynchronous motor control," in Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on, 2013, pp. 1247-1252.
- [11] D. Hu, W. Xu, R. Dian, Y. Liu, and J. Zhu, "Dynamic loss minimization control of linear induction machine," in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017 IEEE, 2017, pp. 3598-3603.
- [12] M. N. Uddin and S. W. Nam, "New online loss-minimization-based control of an induction motor drive," IEEE transactions on Power Electronics, vol. 23, pp. 926-933, 2008.
- [13] J. Liu, F. Lin, H. Sun, and T. Q. Zheng, "Optimale efficiency control of linear induction motor for linear metro," in Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE, 2008, pp. 673-677.
- [14] A. Mannan, T. Murata, J. Tamura, and T. Tsuchiya, "Efficiency optimized speed control of field oriented induction motor including core loss," in Power Conversion Conference, 2002. PCC-Osaka 2002. Proceedings of the, 2002, pp. 1316-1321.
- [15] M. Cacciato, A. Consoli, G. Scarcella, G. Scelba, and A. Testa, "Efficiency optimization techniques via constant optimal slip control of induction motor drives," in Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium on, 2006, pp. 33-38.
- [16] S. Dymko, S. Peresada, and R. Leidhold, "Torque control of saturated induction motors with torque per ampere ratio maximization," in Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2014 IEEE International Conference on, 2014, pp. 251-256.
- [17] S. Bozhko, S. Dymko, S. Kovbasa, and S. M. Peresada, "Maximum Torque-per-Amp Control for Traction IM Drives: Theory and Experimental Results," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, pp. 181-193, 2017.

- motor drives," in Industrial Electronics Society, IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE, 2017, pp. 5178-5183.
- [26] J.-F. Stumper, A. Dötlinger, and R. Kennel, "Loss minimization of induction machines in dynamic operation," IEEE transactions on energy conversion, vol. 28, pp. 726-735, 2013.
- [27] T. Pham-Dinh and E. Levi, "Core loss in direct torque controlled induction motor drives: detuning and compensation," in Power Electronics Specialists Conference, 2001. PESC. 2001 IEEE 32nd Annual, 2001, pp. 1429-1434.
- [28] S. Moulahoum and O. Touhami, "A Saturated Induction Machine Model with Series Iron Losses Resistance," in Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2007. POWERENG 2007. International Conference on, 2007, pp. 156-161.
- [29] J. Jung and K. Nam, "A vector control scheme for EV induction motors with a series iron loss model," IEEE transactions on industrial electronics, vol. 45, pp. 617-624, 1998.
- [30] D.-G. Stanescu, P.-M. Nicolae, and I.-R. Bojoi, "Indirect vector control of induction motors drive systems considering the iron loss resistance," in Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2014 International Conference on, 2014, pp. 466-471.
- [31] M. Hrkel, J. Vittek, and Z. Biel, "Maximum torque per ampere control strategy of induction motor with iron losses," in ELEKTRO, 2012, 2012, pp. 185-190.
- [32] S. A. Davari, "Predictive direct angle control of induction motor," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, pp. 5276-5284, 2016.
- [33] M. Talib, S. M. Isa, H. Hamidon, Z. Ibrahim, and Z. Rasin, "Hysteresis current control of induction motor drives using dSPACE DSP controller," in Power and Energy (PECon), 2016 IEEE International Conference on, 2016, pp. 522-527.
- [18] C.-K. Kwon and D.-S. Kim, "Efficiency study at light load operation for AQDM based Adaptive MTPA Control for IM drive," in Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2017 IEEE, 2017, pp. 5-8.
- [19] X. Huihui, Z. Feng, C. Wei, P. Wei, and Z. Jian, "A novel MTPA control strategy of induction motor based on torque current compensation," in Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016 19th International Conference on, 2016, pp. 1-4.
- [20] W. Sung, J. Shin, and Y.-s. Jeong, "Energy-efficient and robust control for high-performance induction motor drive with an application in electric vehicles," IEEE transactions on vehicular technology, vol. 61, pp. 3394-3405, 2012.
- [21] I. J. Smith and J. Salmon, "High Efficiency Operation of an Open-Ended Winding Induction Motor using Constant Power Factor Control," IEEE Transactions on Power Electronics, 2018.
- [22] D. Hu, W. Xu, R. Dian, and C. Ye, "Optimal flux trajectory analysis of linear induction machine considering thrust transient," in Electromagnetic Field Computation (CEFC), 2016 IEEE Conference on, 2016, pp. 1-1.
- [23] E. Hussein and P. Mutschler, "Improving and Measuring the efficiency of the speed sensorless vector controlled induction motor," in Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010 12th International Conference on, 2010, pp. 681-688.
- [24] A. Wang and Z. Ling, "Improved efficiency optimization for vector controlled induction motor," in Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific, 2009, pp. 1-4.
- [25] J. Li, F.-F. Xiao, and S.-Q. Zhang, "Simplified loss model control efficiency optimization algorithm for vector control induction