مدل سازي و طراحي بهينه موتور پسماند نوع تخت

احمد دارابي[1]، حميد لساني[2*] و تيمور قنبري هاشم آبادي[3]
[1]استاديار دانشكده مهندسي برق و رباتيک - دانشگاه صنعتي شاهرود
[2]استاد قطب کنترل و سيستم هاي هوشمند- دانشکده برق و کامپيوتر- دانشگاه تهران
[3]دانشجوي کارشناسي ارشد مهندسي برق - دانشکده مهندسي برق و رباتيک - دانشگاه صنعتي شاهرود

(تاريخ دريافت ۸۵/۷/۲۹ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۶/۱۰/۱۵ ، تاريخ تصويب ۸۷/۹/۲۴)

چکيده

موتورهاي پسماند به عنوان موتورهاي سنكرون خود راه انداز بدون تحريك، با ساختار و عمل كرد خاص، كاربردهاي ويژه اي يافته اند. معمولاً بازده و ضريب توان پايين و مادة پسماند روتور، از موضوعات مهم طراحي انواع مختلف اين موتورها محسوب مي گردند. در اين مقاله اندازه گيريهاي خواص مادة پسماند روتور و نحوه محاسبه عناصر مدار معادل الكتريكي حالت دائمي ماشين پسماند تخت فركانس بالا، بر اساس مشخصه هاي طراحي با جزئيات ارائه مي شود. نشان داده مي شود كه بعضي از مشخصات مدار معادل در ولتاژ هاي ورودي و شرايط عمل كرد مختلف، تغييرات زيادي دارند و مدار معادل معمول با عناصر ثابت، نمي تواند عمل كرد دائمي ماشين پسماند تخت را در همه شرائط به دقت پيش بيني نمايد. با در نظر گرفتن اين واقعيت، يک ماشين پسماند تخت، به طور بهينه، طراحي و ساخته مي شود و حساسيت عمل كرد اين نوع ماشين ها، نسبت به مشخصه هاي مهم طراحي، مورد بررسي قرار مي گيرد..

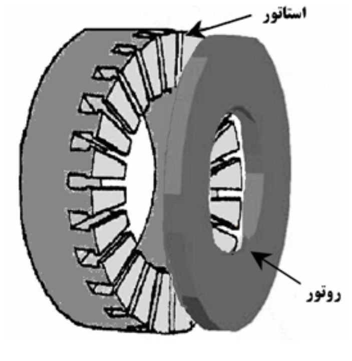
واژه هاي كليدي : مدل سازي - موتور پسماند - طراحي بهينه - موتور سنكرون - موتور پسماند تخت

مقدمه

موتورهاي پسماند نوع خاصي از موتورهاي سنکرون با ساختارهاي الکترومغناطيسي و مکانيکي متفاوت مي باشند که بر اساس پديده پسماند کار مي کنند. ساختار ساده و مستحکم روتور با فاصله هوايي تقريباً يک نواخت، جريان و گشتاور ثابت، کارکرد آرام و بدون لرزش و خود راه انداز بودن از ويژگي هاي ممتاز ماشين هاي پسماند مي باشند. اين موارد باعث به کار گيري بسيار اين موتورها، به خصوص در سرعت هاي بالا شده است. امروزه با پيشرفت مواد مغناطيسي, اين موتورها را در توان هاي بالا نيز مي توان به کار گرفت [۶-۱]. هم چنين موتورهاي پسماند در تجهيزات کنترل، آکوستيک، زمان سنجي، صنايع نساجي و شيميايي و به خصوص در صنايع نظامي و هوافضا مورد استفاده قرار مي گيرند. به هر حال ضريب توان، بازدهي و چگالي گشتاور نسبتاً پايين، از محدوديت هاي اين ماشين ها محسوب مي شوند [۷].

موتورهاي پسماند تخت که معمولاً در سرعت هاي بسيار بالا به کار گرفته مي شوند داراي يک ديسک از جنس مواد پسماندي به عنوان روتور مي باشند. به علت فرکانس زياد، استاتور اين ماشين ها از ورق هاي با کيفيت مغناطيسي بسيار خوب ساخته مي شود. چون ورق هاي استاتور بايد روي هم پيچيده شوند ايجاد شيار ها و ساخت استاتور اين ماشين ها پيچيده تر از انواع ديگر مي باشد.

ساختار استاتور و روتور يک نمونه از ماشين هاي پسماند نوع تخت در شکل (۱) نشان داده شده است. در اين ماشين فاصله هوايي بر خلاف ماشين معمولي که در راستاي شعاع است، در امتداد محور ماشين قرار مي گيرد. در اين ساختار نيز ماده پسماند روتور مي تواند با يک هادي خوب براي ايجاد گشتاور راه اندازي بالاتر پوشش داده شود. انتخـاب مــاده مغناطيسي مناسب در بهبود عملکرد موتور هاي پسماند بسيار مؤثر مي باشد [۸].



شکل ۱: استاتور و روتور ماشين پسماند تخت.

ماده پسماندي در اين ماشين ها، يك ماده متوسط از نظر سختي مغناطيسي، با سطح حلقة $B-H$ ، چگالي شار باقيمانده و نيروي خنثي كننده بين مواد مغناطيسي

* نويسنده مسئول : تلفن : ۶۱۱۱۴۳۶۴ , فاكس : ۸۸۰۲۷۷۵۶ , Email: lesani@ut.ac.ir

سخت، همانند آلنيكو[۱] و مواد مغناطيسي نرم مانند فروسيليس[۲] مي باشد. فولاد هاي پر كربن، فولاد كبالت و فولاد آلياژي P-6 با نيروي خنثي كننده بين ۵۰ تا ۲۵۰ اورستد از جمله مواد گران قيمت به كار رفته به عنوان ماده پسماند روتور مي باشند كه در مقالات به آنها اشاره شده است [۱۱-۹].

حلقه پسماند كاري روتور بسته به نقطه كار مغناطيسي آن روي حلقه هاي اصلي با سطوح مختلفي مي تواند قرار داشته باشد. در صورتي كه هارمونيك هاي شار نيز در نظر گرفته شوند علاوه بر مسير حلقه هاي اصلي، وضعيت مغناطيسي هر نقطه روتور در مسير حلقه هاي فرعي نيز قرار خواهند گرفت. مقالات [۶-۱ و ۱۵-۱۲] هر كدام روش هايي را براي مدل سازي اين نوع موتورها ارائه نموده اند. ميزان دقت در اين مدل ها به مدل سازي دقيق روتور مربوط مي شود. در بيشتر مقالات براي طراحي موتورهاي پسماند حلقه كاري روتور ثابت فرض مي گردد كه اين فرض براي كاربردهاي سرعت متغير نمي تواند دقت بالايي داشته باشد.

در اين مقاله با توجه به تجربيات چندين ساله در ساخت نمونه هاي متعدد از ماشين پسماند، فولاد خاصي به نام تجاري VCN با عمليات حرارتي سختي سازي ويژه، جهت امكان استفاده به عنوان ديسك روتور يك موتور پسماند تخت مورد آزمايش قرار مي گيرد. خواص مغناطيسي ماده روتور اندازه گيري شده و نحوه محاسبه عناصر مدار معادل حالت دائمي ماشين پسماند تخت بر اساس مشخصه هاي طراحي و با توجه به حلقه پسماند كاري روتور بر اساس اطلاعات حاصل از اندازه گيري تجربي منحني هاي مغناطيسي ماده روتور، با جزئيات ارائه مي شود. مدل سازي روتور مهم ترين بخش از مدل سازي موتور پسماند است كه در مقالاتي متعدد شيوه هاي گوناگوني براي آن ارائه شده است. با توجه به مبني بودن طراحي ماشين بر شرايط ماندگار آن در اين مقاله با يك روش تكرار و انجام يك تحليل الكترومغناطيسي در هر مرحله به حلقه پسماند كاري روتور براي پيش بيني رفتار موتور دست مي يابيم. معمولا مقالات، عناصر مدار معادل ماشين هاي الكتريكي از جمله ماشين پسماند را در يک ناحيه كار غير اشباع و حتي براي مدل سازي هاي ديناميكي گذرايي ثابت فرض مي كنند [۱۲]. اما به علت رفتار كاملا غير خطي ماده روتور چنين فرضي در يک محدوده كوچک تغييرات ولتاژ ماشين پسماند حتي در يک ناحيه خطي منحني مغناطيس شوندگي نيز چندان قابل اتكا نمي باشد كه در اين مقاله مورد بررسي قرار مي گيرد. توجه شود كه ماشين هاي پسماند تخت در بسياري از كاربردهاي ويژه با خروجي درايورهاي با رنج ولتاژ و فركانس متغير تغذيه مي شوند. در اين مقاله تغييرات عناصر مدار معادل حالت دائمي با تغييرات ولتاژ مورد بررسي قرار گرفته است. با چنين ملاحظاتي و با شروع از يك طرح اوليه و با استفاده از يك برنامه بهينه سازي، يک موتور پسماند تخت سه فاز نيز با مشخصات ولتاژ فاز ۲۰۰ ولت، توان خروجي ۳۰۰ وات، فركانس تغذيه۱۰۰۰ هرتز و دور نامي۶۰۰۰ دور در دقيقه به طور بهينه طراحي و ساخته مي شود. همچنين تغييرات مشخصه هاي عملكرد موتور نسبت به تغيير برخي مشخصه هاي طراحي مورد بررسي قرار مي گيرد. اين تحليل در هنگام طراحي و ساخت كمك مي كند تا توجه و دقت لازم در انتخاب مقادير مشخصه هاي مهم تر ماشين صورت گيرد.

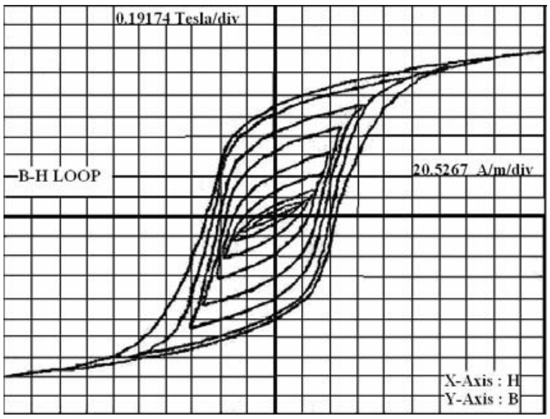
مشخصه هاي مغناطيسي ماده پسماند روتور

هنگامي كه يک ماده مغناطيسي تحت شدت ميدان سينوسي قرار گيرد، تغييرات چگالي شار B بر حسب زمان غير سينوسي و منحني چگالي شار B بر حسب شدت ميدان مغناطيسي H يک منحني دو مقداره حلقوي خواهد بود. در اين صورت هارمونيك اصلي چگالي شار نسبت به شدت ميدان سينوسي داراي تأخير فاز مي باشد. اين اختلاف فاز را كه زاويه تاخير پسماند ناميده مي شود كه مقدار آن وابسته به پيك شدت ميدان مي باشد. اگر مقدار پيک شدت ميدان مغناطيسي (H_p) تغيير نمايد، حلقه پسماند ديگري به وجود مي آيد و در صورتي كه H_p از يک مقدار مشخص زيادتر شود، هسته به اشباع رفته و سطح حلقه پسماند، كه متناسب با توان پسماند هسته است ثابت مي ماند.

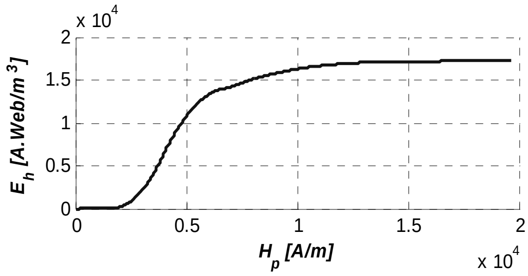
براي مدل سازي و طراحي هر ماشين پسماند اولين و مهم ترين اطلاعات لازم مشخصه هاي مغناطيسي ماده روتور مي باشد. در اين مقاله براي اندازه گيري مشخصه B-H ماده روتور يك هسته چنبره اي با سطح مقطع مستطيلي از جنس روتور با دو سيم پيچ قرار گرفته روي آن ساخته مي شود. يكي از سيم پيچي ها با ولتاژ هاي

سينوسي فركانس پايين و دامنه هاي مختلف تغذيه مي شود. با نمونه گيري ولتاژ و جريان سيم پيچي ها و انتقال اطلاعات به كامپيوتر و پردازش اين اطلاعات، تغييرات شدت ميدان مغناطيسي و چگالي شار مغناطيسي با زمان و شكل حلقه هاي پسماند ماده مغناطيسي مورد آزمايش به دست مي آيند. با چنين سيستم آزمايشگاهي فولادهاي مختلف مورد آزمايش قرار گرفته و ديسك هاي ساخته شده از هر يک از مواد آزمايش شده در موتور واقعي نيز مورد آزمايش و بررسي قرار گرفته است.

از بين فولادهاي در دسترس فولاد آلياژي VCN آبكاري شده، بهترين مشخصه عملكرد راه اندازي، گشتاور خروجي و راندمان را دارد. چند حلقه پسماند اندازه گيري شده اين ماده در شكل (۲) نمايش داده شده است. همچنين منحني سطح درون حلقه هاي پسماند (E_h) به عنوان مشخصه مهم ديگر ماده مغناطيسي بر حسب پيك شدت ميدان مغناطيسي (H_p) به دست آمده از منحني حلقه هاي پسماند ماده در شكل (۳) ارائه گرديده است؛ در حقيقت، توان خروجي ماكزيمم ماشين در حالت دائمي متناسب با E_h مي باشد.



شكل۲: حلقه هاي پسماند اندازه گيري شده فولاد VCN.



شكل۳: سطح حلقه پسماند بر حسب پيک شدت ميدان فولاد **VCN** .

با تغذيه سينوسي موتور پسماند و با فرض توزيع فضايي سينوسي شدت ميدان در مسير متوسط شار ديسك روتور به صورت $H = H_P \cos\theta$، به دليل پديده پسماند توزيع مولفه اصلي چگالي شار را مي توان به صورت زير بيان نمود:

$$B_1(\theta) = a_1 \cos\theta + b_1 \sin\theta = B_q \cos(\theta - \alpha) \qquad (۱)$$

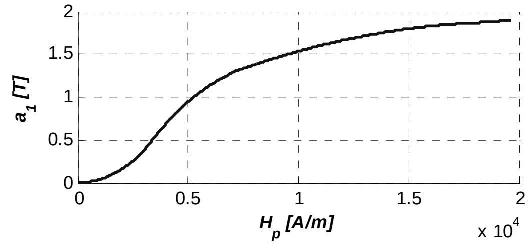
كه در آن B_q دامنه مؤلفه اصلي چگالي شار، α زاويه تأخير پسماند[۳] و θ زاويه الكتريكي موقعيت روتور نسبت به يك محور ساكن مي باشد.

در بسياري از گزارش ها مقدار α در يک رنج وسيع ثابت فرض مي شود، در صورتي كه اين كميت، براي ماده به كار رفته در روتور، حول زاويه حداكثر ۴۲ درجه، تغييرات زيادي دارد. بر اساس حلقه هاي پسماند شكل ۲ مي توان شكل واقعي چگالي شار، هارمونيك اول آن و مقادير B_q، a_1 و b_1 را براي هر مقدار پيك شدت ميدان به دست آورد. منحني a_1 بر حسب H_p در شكل (۴) نمايش داده شده است. با تعيين E_h در يك H_p خاص از شكل (۳) مقدار b_1 نيز مي تواند از رابطه زير به دست آيد.

$$b_1 = \frac{E_h}{\pi H_p} \qquad (۲)$$

گشتاور در موتورهاي پسماند با دو مكانيزم كاملا متفاوت يعني گشتاور سنكرون پسماند و گشتاور جريان فوكو ايجاد مي شود. پسماند مغناطيسي ماده روتور سبب ايجاد زاويه اي بين راستاي نيروي محركه مغناطيسي روتور و راستاي نيروي محركه مغناطيسي منتجه فاصله هوايي مي گردد. اين اختلاف راستاي ميدان ها، باعث ايجاد گشتاور پسماند مي شود كه مؤلفه غالب گشتاور در موتورهاي پسماند است. توان پسماند ورودي به روتور (P_h) ماشين پسماند در طول زمان راه اندازي تقريباً ثابت بوده و در حالت سكون كل توان پسماند در روتور به صورت اتلاف حرارتي و در لحظه ورود به سنكرونيسم، به صورت توان خروجي ماشين ظاهر مي شود.

گشتاور پسماند خروجي اين نوع ماشين ها از لحظه راه اندازي تا حالت ورود به سنكرون تقريباً ثابت مي باشد. مؤلفه ديگر گشتاور در ماشين هاي پسماند، گشتاور القايي ناشي از جريان فوكو در ماده پسماند روتور و پوشش مسي آن است. سهم اين مؤلفه از گشتاور در هنگام راه اندازي (سرعت هاي زير سرعت سنكرون) در كمک به شتاب گيري موتور مي تواند قابل ملاحظه باشد.

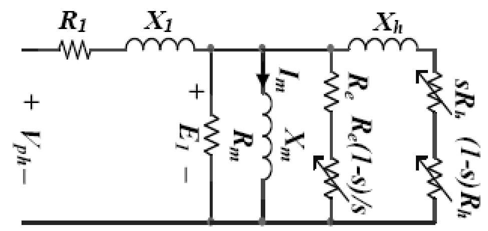


شكل۴: منحني a_1 بر حسب H_p.

مدل سازي

بنابر مشتركات موتور هاي پسماند و القايي مي توان از ايده هاي ماشين القايي در طرح و محاسبه عناصر مدار معادل موتور پسماند، با ملاحظاتي استفاده نمود. به عنوان مثال نشت زيگزاگ موتورهاي القايي، در موتورهاي پسماند مفهومي ندارد و در مقابل تلف اغتشاشي[4] موتورهاي پسماند، در موتورهاي القايي اهميت ندارد [۱۶].

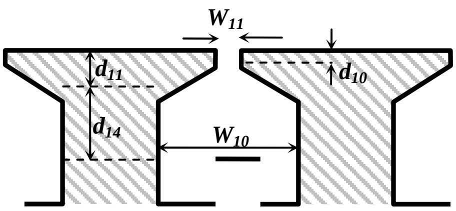
در موتورهاي پسماند قسمتي از جريان استاتور صرف توان پسماند مي گردد كه بخشي از آن به صورت گرما و بخشي ديگر به صورت توان خروجي ظاهر مي شود. قسمتي ديگر جريان استاتور صرف ايجاد جريان فوكو در روتور مي گردد. از توان حاصله در اين قسمت نيز بخشي به صورت گرما و بخشي به صورت توان خروجي ظاهر مي شود. دو مؤلفه ديگر جريان، يكي جريان مغناطيس كننده و ديگري جريان معادل تلفات آهن در استاتور مي باشد. براي چهار مؤلفه جريان فوق، چهار امپدانس به صورت موازي در مدار معادل منظور مي گردد. دو امپدانس نيز به منظور مدل نمودن تلف مسي و پراكندگي شار استاتور به صورت سري با اين مجموعه قرار مي گيرند. بنابراين مدار معادل بر فاز موتور پسماند سه فاز را مي توان به صورت شكل (۵) نمايش داد [۶].



شكل ۵: مدار معادل الكتريكي ماشين پسماند تخت چند فاز.

در اين مدار معادل، R_1 مقاومت هر فاز سيم پيچي استاتور، X_1 راكتانس پراكندگي بر فاز استاتور، R_c مقاومت مدل كننده تلفات آهن استاتور، X_m راكتانس مغناطيس كننده، R_e مقاومت مدل كننده گشتاور جريان ادي در روتور در رژيم آسنكرون، R_h مقاومت معادل روتور و مدل كننده گشتاور پسماند مختص موتورهاي پسماند و X_h راكتانس معادل روتور است. براي ماشين تحت بررسي، شيار هاي استاتور به صورت شكل (۶) انتخاب، و مشخصه هاي ساختاري ماشين پسماند تخت به صورت زير نام گذاري شده اند. با توجه به اين نام گذاري ها به محاسبه عناصر مدار معادل بر اساس مشخصه هاي ساختاري ماشين مي پردازيم.

در محاسبه عناصر مدار معادل از روابط غير خطي كه از تحليل عملكرد موتور پسماند مشابه با ساير موتورها به دست آمده اند استفاده مي شود. مقادير بعضي از اين مشخصه ها به حلقه پسماند كاري روتور وابسته بوده و به دليل محاسبه مشخصات اين حلقه از روابط كاملا غير خطي اين روابط از درجه بالايي از غير خطي بودن برخوردار مي باشند.



شكل۶: شكل شيار استاتور .

شعاع داخلي استاتور و روتور $[mm]$	R_i
شعاع خارجي استاتور و روتور $[mm]$	R_o
ضخامت ديسك روتور $[mm]$	tr
ضخامت يوغ استاتور $[mm]$	dy
فاصله هوايي محوري بين روتور و استاتور $[mm]$	g
تعداد شيارهاي استاتور	S
عرض دهانه شيار استاتور $[mm]$	W_{10}
عرض بخش مستطيلي شيار استاتور $[mm]$	W_{11}
قوس متوسط دندانه شيار استاتور $[mm]$	t
قطر سيم $[mm]$	d
ضخامت نوک دندانه شيار استاتور $[mm]$	d_{10}
طول محوري دندانه شيار $[mm]$	d_{11}
طول محوري بخش مستطيلي شيار استاتور $[mm]$	d_{14}
فركانس تغذيه موتور $[Hz]$	f
تعداد فازها	m
تعداد قطب ها	p
ولتاژ بر فاز تغذيه سيم پيچ هاي استاتور $[V]$	V_p
درجه حرارت كاري ماشين $[^oC]$	Tem
تعداد هادي هاي هر شيار استاتور	CSL
گام كلاف بر حسب تعداد شيارها	ACT

هدايت ويژه مس در دماي كاري $[\frac{m}{\Omega.mm^2}]$	σ
ضريب انباشتگي ورق هاي استاتور	K_{Sf}
گام پريونيت كلاف هاي سيم پيچي استاتور	K_{pp}

$\boldsymbol{R_1}$: براي محاسبه R_1 ابتدا تعداد دور سيم پيچي هر فاز از رابطه زير به دست مي آيد [۱۷] :

$$N_{ph} = \frac{S \times CSL}{2m} \qquad (۳)$$

سپس طول متوسط هر هادي (LMC) با توجه به رابطهٔ تجربي زير محاسبه مي شود:

$$LMC = R_o - R_i + \frac{2\pi R_{av}\gamma \times ACT}{S}\,[mm] \qquad (۴)$$

كه در آن $R_{av} = \frac{R_i + R_o}{2}$ و مقدار γ براي ماشين دو قطبي ۱/۳، براي ماشين چهار قطبي ۱/۵ و براي ماشين با تعداد قطب هاي بيشتر، ۱/۷ منظور مي شود. با تعيين N_{ph} و LMC طول متوسـط سيم پيچي هر فاز مي شود:

$$L_{ph} = 2N_{ph} \times LMC \ \ [mm] \qquad (۵)$$

سطح مقطع سيم نيز از رابطهٔ زير قابل محاسبه مي باشد:

$$q_1 = \pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 \ [mm^2] \qquad (۶)$$

و سر انجام مقاومت هر فاز از رابطه زير محاسبه مي گردد:

$$R_1 = \frac{0.001 L_{ph}}{\sigma q_1}\,[\Omega / ph] \qquad (۷)$$

به طوري كه مي توان σ هدايت ويژهٔ هادي هاي استاتور در دماي عمل كرد ماشين مي باشد. مقدار اين مشخصه براي هادي هاي مسي در دماي ۲۰ درجه سانتي گراد $m/\Omega.mm^2$ ۵۷ مي باشد.

$\boldsymbol{X_1}$: مقدار X_1 وابسته به نقطه كار ماشين بوده و داراي سه مؤلفهٔ عمده پراكندگي شيار X_{slot}، پراكندگي انتهايي كلاف ها X_{end} و پراكندگي ديفرانسيلي يا كمربندي X_{belt} مي باشد [۱۶، ۱۷]:

$$X_1 = X_{slot} + X_{end} + X_{belt} \ [\Omega / ph] \qquad (۸)$$

راكتانس پراكندگي شيار استاتور X_{slot} با رابطه زير تعيين مي گردد.

$$X_{slot} = \frac{0.001\mu_0 m(R_o - R_i)C_x K_x \lambda_s}{S} \ \ [\Omega / ph] \qquad (۹)$$

به طوري كه در آن λ_s ثابت شيار بوده و با توجه به شكل و ابعاد شيار مقدار آن تعيين مي شود. شكل شيار انتخاب شده براي ماشين مورد نظر در اين مقاله در شكل (۶) نشان داده شده است. براي اين چنين شياري λ_s از رابطه زير تعيين مي گردد.

$$\lambda_s = \phi\frac{d_{14}}{W_{11}} + \frac{2d_{11}}{W_{11} + d_{11}} + \frac{d_{10}}{W_{10}}\ [mm] \qquad (۱۰)$$

در رابطه (۹)، C_x ضريب توزيع هادي در شيار مي باشد كه مقدار آن از جدول (۱) استخراج مي گردد و ϕ ضريبي است وابسته به شكل شيار كه براي شيار در نظر گرفته شده مقدار آن ۰/۳۳ مي باشد. عامل K_{pp} نشان داده شده در جدول (۱) گام پريونيت سيم پيچي استاتور است كه از تقسيم گام كلاف بر گام قطب به دست مي آيد. ضريب K_x در رابطه (۹)، به صورت زير تعيين مي گردد:

$$K_x = 2\pi f(2N_{ph}K_w)^2 \qquad (۱۱)$$

كه در آن K_w ضريب سيم پيچي برابر است با:

$$K_w = \frac{\sin(\frac{q\alpha_s}{2})}{q\sin(\frac{\alpha_s}{2})}\sin(\frac{K_{pp}\pi}{2}) \qquad (۱۲)$$

و q تعداد شيار بر قطب بر فاز بوده و α_s زاويه الكتريكي هر شيار و برابر با $\frac{\pi}{mq}$ مي باشد.

جدول۱: تعيين $\boldsymbol{C_x}$ بر حسب گام پريونيت كلاف.

K_{pp}	C_x
$0.33 \le k_{PP} < 0.67$	$0.25(6k_{PP} - 1)$
$0.67 \le k_{PP} < 1$	$0.25(3K_{pp} + 1)$
$1 \le k_{PP} \le 1.33$	$0.25(7 - 3K_{pp})$

در رابطه (۸)، X_{end} راكتانس نشتي انتهايي كلاف ها است كه از رابطه زير تعيين مي گردد:

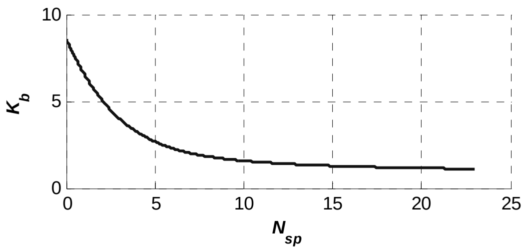
$$X_{end} = \frac{0.482k_x\mu_0 m(2R_{av})ACT}{1000pS} \ \ [\Omega / ph] \qquad (۱۳)$$

هم چنين X_{belt} راكتانس پراكندگي كمربندي (ديفرانسيلي) است كه ناشي از عدم تشابه نيروي محركه مغناطيسي استاتور و روتور بوده و مقدار آن به روش تكراري با استفاده از رابطه زير تعيين مي گردد:

$$X_{belt} = 0.4646mK_mK_bK_x \times 10^{-9}[\Omega / ph] \qquad (۱۴)$$

براي مشخص كردن X_{belt} بايد ضرايب Km و K_b تعيين شوند. K_b در رابطه (۱۴) ضريبي تجربي مي باشد كه تغييرات آن بر حسب تعداد شيارهاي بر قطب در نمودار شكل (۷) نشان داده شده است. براي محاسبه Km لازم است طول مؤثر فاصله هوايي $g_e = K_c g$ بر حسب ميلي متر تعيين شود. K_c ضريب كارتر مي باشد كه

مقدار آن را براي شيار شکل (۵) مي توان از رابطه زير به دست آورد:



شکل۷: ضريب k_b بر حسب تعداد شيارهاي بر قطب.

$$K_c = \frac{\frac{(2\pi R_{av})}{S}(5g+W_{10})}{(\frac{(2\pi R_{av})}{S}(5g+W_{10}) - W_{10}(0.5g+W_{10}))} \qquad (۱۵)$$

اکنون رابطه محاسبه Km به صورت زير بيان مي شود:

$$K_m = \frac{0.001A_g}{g_e\left(\frac{F_{ytg}}{F_g}\right)p} \qquad (۱۶)$$

که در آن A_g سطح فاصله هوايي زير يک قطب بر حسب ميلي متر مربع مي باشد و F_g آمپردور فاصله هوايي و F_{ytg} جمع آمپردور يوغ و دندانه (F_{yt}) و آمپر دور فاصله هوايي (F_g) است که با توجه به نقطه کار ماشين بايد مشخص شود.

در شرايط عملکرد دائمي با توجه به سطح ولتاژ استاتور، نقطه کار ديسك روتور روي حلقه پسماند خاصي خواهد بود. اين حلقه پسماند به روش تکراري قابل پيش بيني است. براي اين کار ابتدا يک حلقه پسماند با H_p مشخص، به عنوان حلقه پسماند اوليه نقطه کار ماشين انتخاب مي گردد و با استفاده از معادلات (۱و۲) و شکلهاي (۳) و (۴)، ضرايب a_1 و b_1 براي هارمونيک اول چگالي شار مشخص مي شوند. اکنون با توجه به ضرايب a_1 و b_1، مي توان، B_q و α را در معادله (۱) تعيين کرد. سپس شار بر قطب فاصله هوايي ϕ_g از رابطه زير محاسبه مي شود.

$$\phi_g = 2t_r K_{Sf}(R_o - R_i)B_q \times 10^{-6}\ \ [web] \qquad (۱۷)$$

آنگاه ولتاژ القايي در هر فاز سيم پيچي استاتور از رابطه زير به دست مي آيد.

$$E_1 = \sqrt{2}\pi f K_w N_{ph}\phi_g\ [V] \qquad (۱۸)$$

در مرحله بعد H_g شدت ميدان فاصله هوايي با رابطه زير محاسبه مي شود:

$$H_g = \frac{t_r B_q p}{2\mu_0 R_{av}}\ [A.t/m] \qquad (۱۹)$$

و آمپر دور بر قطب فاصله هوايي (F_g) به صورت زير به دست مي آيد:

$$F_g = 0.001 g_e H_g\ [A.t/Pole] \qquad (۲۰)$$

چگالي شار يوغ و دندانه به ترتيب از روابط زير محاسبه مي شوند:

$$B_y = \frac{\phi_g \times 10^6}{K_p A_y}\ \ [T] \qquad (۲۱)$$

$$B_t = \frac{\pi\phi_g \times 10^6}{2K_p A_t}\ \ [T] \qquad (۲۲)$$

A_y و A_t به ترتيب سطح يوغ و دندانه مي باشند و K_p ضريبي است که در تکرار اول حلقه داخلي برابر يک فرض مي شود ولي در تکرار هاي بعدي از رابطه زير تعيين مي گردد:

$$K_p = \frac{X_m}{X_m + X_1} \qquad (۲۳)$$

با مشخص شدن چگالي شار ها، آمپر دور بر متر يوغ و دندانه استاتور از منحني هاي اشباع هسته و نهايتا آمپر دور بر قطب يوغ و دندانه، به طور جداگانه به دست مي آيند. سپس ضريب K_m از رابطة (۱۶)، X_{belt} از رابطة (۱۴) و X_1 از رابطه (۸) حاصل مي گردد. جريان مغناطيس کننده نيز از رابطه زير مشخص مي شود.

$$I_m = \frac{\pi p \times F_{ytg}}{2\sqrt{2} m N_{ph} K_w}\ \ [A] \qquad (۲۴)$$

$\boldsymbol{X_m}$: مقدار X_m از رابطه زير محاسبه مي گردد.

$$X_m = \frac{E_1}{I_m}\ \ [\Omega] \qquad (۲۵)$$

علاوه بر اين با مشخص شدن X_m و X_1 با توجه به معادله (۲۳) مقدار جديدي براي K_p تعيين مي گردد و محاسبات از رابطه (۲۱) به بعد تکرار مي شود. اين حلقه تکرار داخلي تا زماني ادامه خواهد يافت که مقدار K_p به مقادير نهايي خود با يک تولرانس از پيش تعيين شده همگرا شود.

$\boldsymbol{R_c}$: مقدار R_c با معلوم بودن چگالي شار دندانه و يوغ استاتور، از منحني تلفات بر وزن ماده مغناطيسي قابل محاسبه است. با مشخص بودن چگالي جرمي آهن، حجم يوغ و دندانه ها، مي توان تلفات هسته کل و سپس تلف هسته بر فاز P_{ir} را در نقطه کار فرضي تعيين نمود و R_c را با رابطه زير محاسبه کرد [۱۷]:

$$R_c = \frac{E_1^2}{P_{ir}}\ \ [\Omega/ph] \qquad (۲۶)$$

R_h : R_h مدل كننده توان پسماند اين ماشين ها مي باشد. توان مصرف شده در مقاومت $(1-s)R_h$، قسمتي از توان خروجي موتور و توان تلف شده در مقاومت sR_h تلف در آهن روتور مي باشد. s لغزش ماشين مي باشد و مقدار R_h از رابطه زير محاسبه مي گردد [۶].

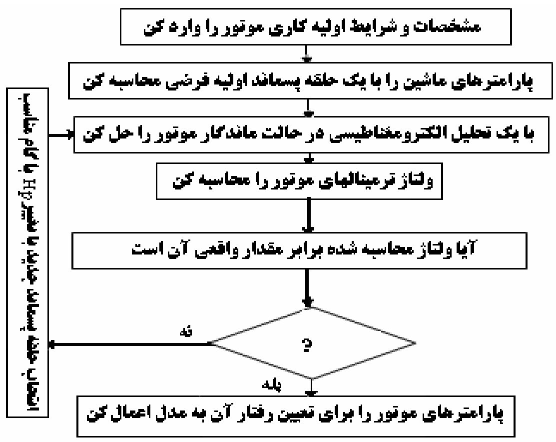
$$R_h = \frac{4mf(K_w N_{ph})^2 t_r (R_o - R_i) K_{sf} B_q \sin\alpha}{1000 R_{av} H_p} \ [\Omega] \qquad (۲۷)$$

X_h : مقدار X_h از رابطه زير محاسبه مي شود [۶].

$$X_h = \frac{R_h}{\tan\alpha} \ [\Omega] \qquad (۲۸)$$

R_e : اين مشخصه فقط در رژيم آسنكرون و راه اندازي ماشين اهميت دارد در مدار معادل ظاهر مي شود. چون اهداف مدل سازي و بهينه سازي اين مقاله رفتار حالت دائمي سنكرون مي باشد، لذا براي اختصار از محاسبه و بحث بيشتر از آن در اين مقاله چشم پوشي مي نمائيم.

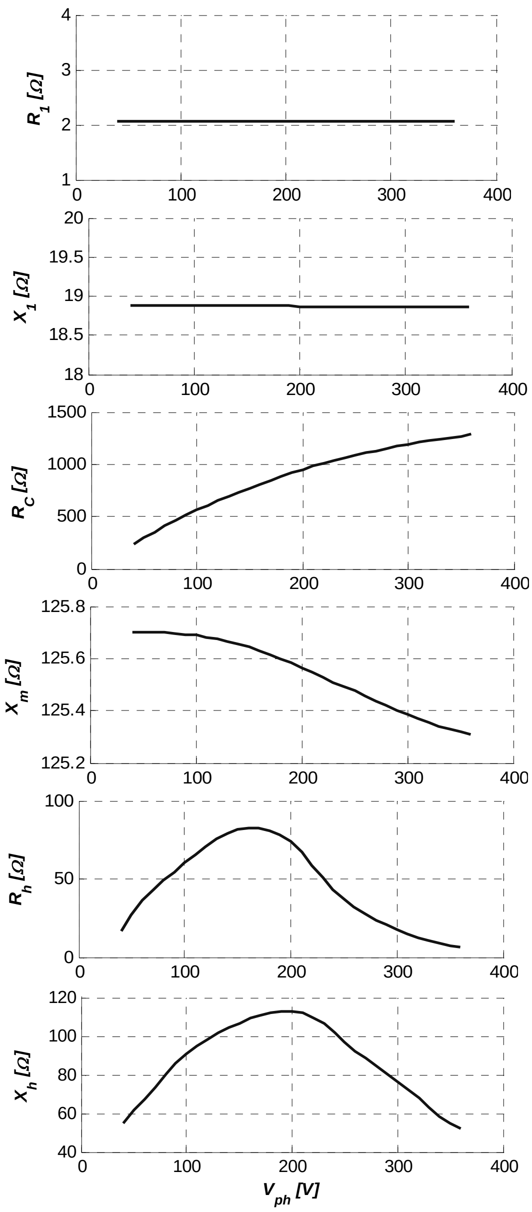
با استفاده از روابط ارائه شده و با يك حلقه پسماند فرض شده، عناصر مدار معادل، به طور كامل به دست مي آيد. به علت استفاده از منحني هاي مغناطيسي تجربي روتور، ملاحظاتي همانند اشباع و تغييرات مشخصه هاي مدار معادل با ولتاژ و فركانس در مدل سازي ماشين در نظر گرفته شده است. با مشخص شدن مشخصه هاي مدار معادل و E_1 مي توان فيزور جريان و ولتاژ ورودي را مشخص كرد. مقدار ولتاژ محاسبه شده بايد با يك دقت قابل قبول با ولتاژ ورودي برابر باشد. در غير اين صورت مقدار H_p با يک گام مناسب اصلاح شده و محاسبات با مقدار جديد H_p از مرحله تعيين X_1 به بعد تكرار مي شود. الگوريتم اين فرآيند در شكل (۸) نشان داده شده است.



شكل ۸: فلوچارت محاسبه عملكرد دائمي موتور پسماند .

تغييرات عناصر مدار معادل

نوع روابطي كه براي استنتاج عناصر مدار معادل به كار گرفته شد، دلالت ضمني بر وابستگي اين عناصر به شرايط عملكرد ماشين دارد. به ويژه براي موتورهايي كه بر آنها كنترل سرعت انجام مي گيرد اين تغييرات حتي در ناحيه خطي منحني مغناطيس شوندگي قابل ملاحظه است. بنابراين مي توان از یک مدار معادل با عناصر ثابت فقط براي یک نقطه كار مشخص استفاده كرد. به خصوص بعضي عناصر مدار معادل ماشين پسماند وابستگي شديد به سطح ولتاژ ورودي دارند. در شكل (۹) منحني هاي تغييرات عناصر مدار معادل به ازاي تغييرات ولتاژ حول نقطه كار ۲۰۰ ولت نشان داده شده است.



شكل ۹: تغييرات مقادير عناصر مدار معادل به ازاي تغييرات مقدار مؤثر ولتاژ ورودي.

همان طور كه مشاهده مي شود R_1 مستقل از ولتاژ ورودي بوده و X_1 و X_m را نيز در محدوده وسيعي حول نقطه كار، مي توان ثابت فرض كرد. اما مقادير R_h ، X_h و R_c با تغييرات ولتاژ، شديدا تغيير مي كنند. بنابراين در محدوده تغييرات وسيع ولتاژ ورودي مدار معادل با عناصر ثابت نمي تواند معتبر باشد. به شيوه اي كه گفته شد با لحاظ اين تغييرات در مدل هاي ساده شده مي توان به مدل هاي دقيق تري از موتور پسماند دست يافت.

بهينه سازي طراحي

تجربيات ما در طراحي و ساخت ماشين هاي پسماند تخت و تجربيات ديگران [۸-۶] نشان مي دهد كه R_i, R_o, g, t_r, W_{10} مهم ترين مشخصه هاي ساختاري مؤثر بر عمل كرد اين نوع ماشين ها مي باشند و مقادير بهينه ساير مشخصه ها در طراحي تقريبا مشخص مي باشد.

به دليل كاربرد ويژه ماشين مورد بررسي و محدوديت هاي موجود, مقادير R_i, R_o, g در اندازه هاي مربوط به طرح اوليه، ثابت فرض مي شوند و بازده ماشين نسبت به تغييرات دو مشخصه ديگر مورد مطالعه قرار مي گيرد. به علاوه شبيه سازي و بررسي ها نشان مي دهند كه بازده ماشين حساسيت كمتري به تغييرات عامل هاي R_i, R_o در مقايسه با دو عامل W_{10} و t_r دارد. طول فاصله هوايي g كوچك تر، راندمان ماشين را افزايش مي دهد ولذا با توجه به محدوديت هاي مكانيكي مقدار آن در حداقل ممكن ثابت فرض شده است.

با استفاده از يک الگوريتم بهينه سازي مبتني بر SQP[5]، بازده ماشين به عنوان تابع هدف تعيين مي گردد. با انتخاب W_{10} و t_r به عنوان متغير هاي ورودي، محدوده آنها را به عنوان قيود مسئله طوري انتخاب مي گردد كه ضمن برآوردن محدوديت هاي مكانيكي و عملي، امكان يک بررسي مناسب مبتني بر نمونه بهينه ساخته شده را محقق سازد. برنامه بهينه سازي هر بار، الگوريتم پيش بيني عملكرد ارائه شده در بخش مدل سازي را به ازاي مقادير مختلف W_{10} و t_r در بازه تعيين شده اجراء نموده و مقادير بازده، ضريب توان و مشخصه-هاي مدار معادل را بدست مي آورد. در جدول (۲) مقدار مشخصه ها، براي طرح اوليه نشان داده شده است. طراحي ماشين اوليه، طوري انجام گرفته است تا ديسك روتور روي حلقه پسماند بـا

$$H_p = 3924 \text{ ، } B_q = 0.83 \text{ و } \alpha = 36.65 \qquad (۲۹)$$

عمل نمايد.

در اين مقاله با استفاده از الگوريتم فوق، بهينه سازي در مورد يک نمونه موتور پسماند سه فاز تخت ۳۰۰ واتي صورت پذيرفته است. مقادير ضخامت محوري ديسک روتور و دهانه شيار استاتور موتور بهينه به ترتيب برابر با ۴/۳۱۶ و ۱/۱۱ ميلي متر مي باشند و بقيه ابعاد و مشخصه ها مطابق جدول (۲) مي باشند.

ديسک روتور طرح بهينه روي حلقه پسماند با

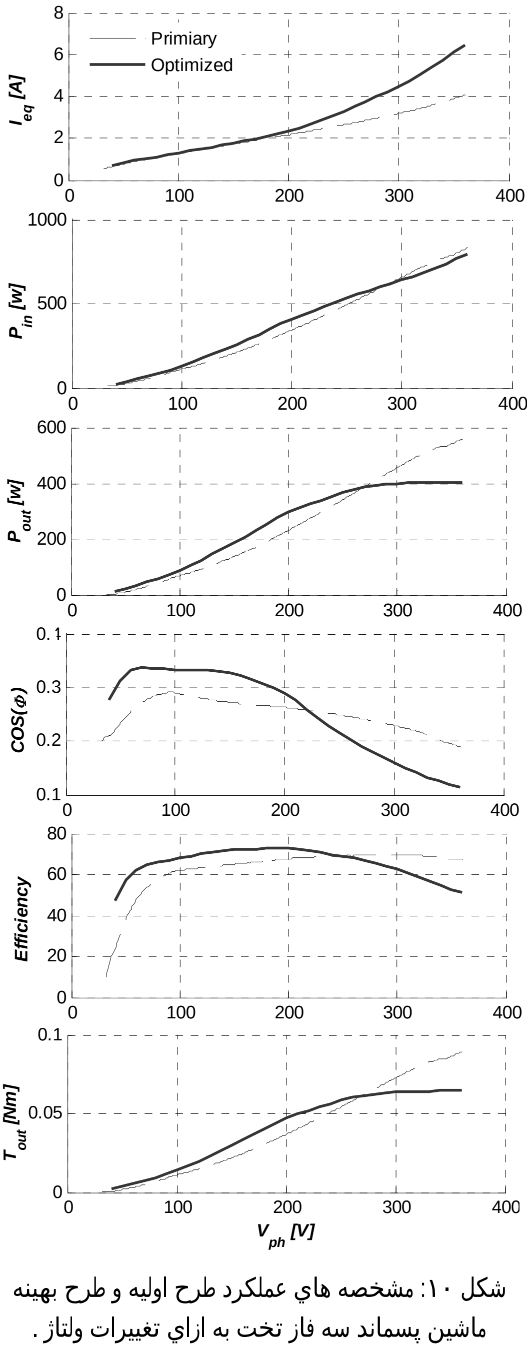
$$H_p = 5725 \text{ ، } B_q = 1.296 \text{ و } \alpha = 33 \qquad (۲۹)$$

كار مي كند. در منحني هاي شكل (۱۰)، مشخصه هاي عملكرد ماشين نمونه اوليه و طرح بهينه، بر حسب ولتاژ هاي مختلف، به دست آمده از شبيه سازي ها، براي مقايسه ارائه گرديده است. اين نمودارها به وضوح نشان مي دهند كه در ولتاژ نامي، توان خروجي، بازده، گشتاور خروجي و ضريب توان ماشين بهينه نسبت به طرح اوليه، بهبود يافته ضمن اين كه جريان فاز و توان ورودي آن تغييرقابل ملاحظه اي نيافته است.

بازده طرح بهينه ۷۲/۶۹% مي باشد كه نسبت به نمونه اوليه ۵/۵۷% بهبود يافته است. نتايج مذكور با اندازه گيري هاي انجام شده روي نمونه بهينه ساخته شده مورد تأييد قرار گرفته اند. اندازه گيري توان خروجي ماشين بسيار مشكل مي باشد اما مقادير ورودي از قبيل جريان و ضريب توان ماشين در شرايط نزديک و يا در آستانه ورود به شرايط سنكرون بدون توجه به مقدار بار روي محور تقريبا يكسان است. براي موتور ساخته شده در يک شرايط كار مشخص و با ولتاژ فاز تغذيه موتور ۲۰۰ ولت، مقادير اندازه گيري شده توان ورودي موتور در آستانه ورود به شرايط سنكرون ۳۴۲ وات، ضريب قدرت ۳۱/. و جريان فاز ورودي ۱/۹ آمپر مي باشد. بازده در اين شرايط در حدود ۷۲% است. اين مقادير با نتايج به دست آمده از مدل سازي تطابق بسيار نزديكي دارد و به عنوان يک مثال دقت مدل ارائه شده را در پيش بيني عمل كرد ماشين نشان مي دهد.

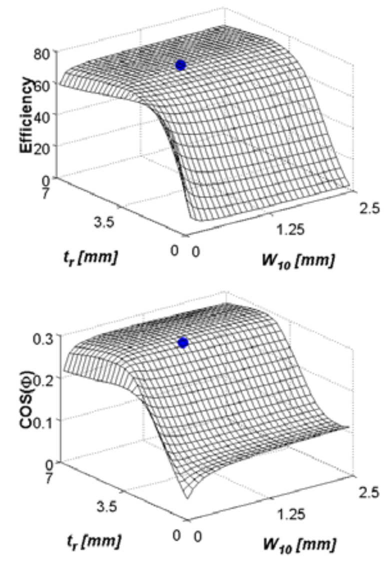
جدول ۲: مشخصات طرح اوليه.

R_i	26.9mm	W_{10}	3.5mm	d	0.71 mm
R_o	50mm	W_{11}	5mm	p	2
t_r	7mm	t	5.06mm	m	3
dy	25mm	d_{10}	1.5mm	V_p	$200V$
g	1.99mm	d_{11}	2mm	Tem	20^0C
S	10	d_{14}	6.73mm	CSL	38
K_{pp}	0.83	f	1000Hz	ACT	10



شکل ۱۰: مشخصه هاي عملکرد طرح اوليه و طرح بهينه ماشين پسماند سه فاز تخت به ازاي تغييرات ولتاژ .

شکل (۱۱)، نمودار بازده و ضريب توان را برحسب تغييرات W_{10} و t_r در اطراف مقادير بهينه اين مشخصه ها نشان مي دهد. همان طور که از شکل (۱۱) مشاهده مي شود، حساسيت بازده نسبت به تغييرات t_r در مقايسه با W_{10} بيشتر مي باشد و همين نتيجه، در مورد حساسيت ضريب توان نسبت به تغييرات اين مشخصه ها، نيز مشاهده مي گردد. براي نمايش نقطة بهينه روي همه گراف هاي از علامت ● استفاده شده است.



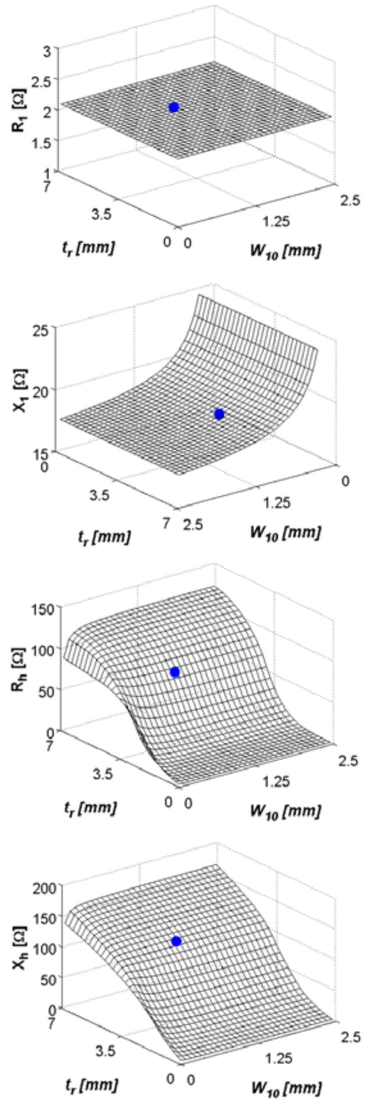
شکل ۱۱: تغييرات بازده و ضريب توان برحسب W_{10} و t_r .

در شکل (۱۲) حساسيت عناصر مدار معادل نيز نسبت به W_{10} و t_r نشان داده شده است. در نمودار R_1 شاهده مي شود که مقدار مقاومت R_1 مستقل از تغييرات W_{10} و t_r است.

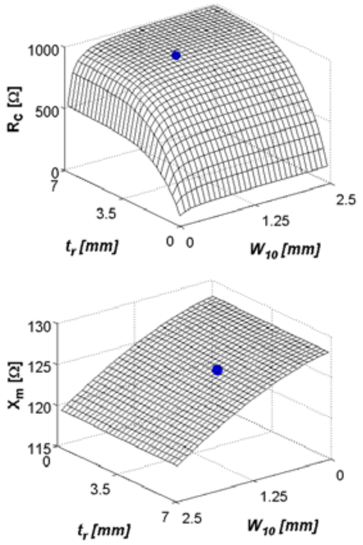
نمودار X_1 نيز نشان مي دهد که با کم شدن دهانه شيار و ثابت بودن بقيه مشخصه هاي ساختاري، راکتانس پراکندگي به شدت افزايش مي يابد، در حالي که تأثير ضخامت ديسک روتور بر آن، ناچيز است.

در نمودار R_h مشاهده مي شود، که با زياد شدن ضخامت روتور، توان هيسترزيس روتور و به تبع آن R_h افزايش مي يابد. تغييرات X_h نسبت به تغيير اين دو مشخصه، همان طور که از نمودار سه بعدي مربوطه مشاهده مي شود، مشابه با تغييرات R_h، البته با حساسيت هاي متفاوت نسبت به مشخصه ها، مي باشد.

نمودار تغييرات R_c و X_m نسبت به تغييرات t_r و W_{10} نيز در شکل (۱۲) نشان داده شده اند. همان طور که از اين شکل ها مشاهده مي شود، R_c نسبت به تغييرات t_r و X_m نسبت به تغييرات W_{10} حساس تر مي باشد.



شکل۱۲: تغييرات عناصر مدار معادل بر حسب W_{10} و t_r .



ادامه شکل۱۲: تغييرات عناصر مدار معادل بر حسب W_{10} و t_r .

نتيجه گيري

موتورهاي پسماند، علي رغم خصوصيات ويژه اي كه دارند، داراي محدوديت هايي نظير بازده و ضريب توان پايين مي باشند. در اين مقاله، مدل سازي با جزئيات كامل ارائه گرديده و اثبات شد كه یک مدار معادل با مشخصه هاي ثابت همه شرائط عملكرد ماشين را نمي تواند پوشش دهد. بخصوص تغييرات بعضي از عناصر مدار معادل با تغييرات ولتاژ، غير قابل چشم پوشي است. چنين موضوعي در ماشين هاي ديگر از اهميت كمتري نسبت به ماشين پسماند برخوردار مي باشد. هم چنين با یک برنامه بهينه سازي و شروع از نمونه اوليه، طرح بهينه یک ماشين پسماند تخت سه فاز به دست آمد و حساسيت شاخصه هاي عملكرد ماشين، نسبت به عامل هاي ضخامت ديسک روتور (t_r) و عرض دهانه شيار (W_{10})، بررسي گرديد.

مراجع

1 - Copeland, M. A. and Slemon G. R. (1963). “An analysis of the hysteresis motor—Part I: Analysis of the idealized machine.” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, Vol. PAS-82, PP. 34-42.

2 - Copeland, M. A. and Slemon, G. R. (1964). “Analysis of the hysteresis Motor—Part II: The circumferential-flux machine.” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, Vol. PAS-83, PP. 619-625.

3 - Rahman, M. A. (1973). “Analytical models for poly phase hysteresis motor.” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, Vol. PAS-92, No. 1, PP. 237-242.

4 - Rahman, M. A., Copeland, M. A., and Slemon, G. R. (1969). “An analysis of the hysteresis motor—Part III: Parasitic losses.” *IEEE Trans. Power App. Syst*, Vol. PAS-88, PP. 954–960.

5 - Miyari, S. and Kataoka, T. (1965). “A basic equivalent circuit of the hysteresis motor.” *J. Inst. Elect. Eng. Japan*, Vol. 85, No. l0, PP. 1740-1748.

6 - Ishikawa, T. and Kataoka, T. (1981). “Basic analysis of disc-type hysteresis motors.” *J. Inst. Elect. Eng. Japan*, Vol.101, No 6, PP. 659-666.

7 - Rajagopal, K. R. (2003). “Design of a compact hysteresis motor used in a gyroscope.” *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 39, No. 5, PP. 3013-3015.

8 - Wakui, G. (1966). “Optimum conditions in design of hysteresis motor.” *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 86, Part 11, PP. 95-105.

9 - Kubota, T., Watui, G. and Itagati, M. (1998). “Hysteresis motor using magnetically anisotropic Fe-Cr-CO magnet.” *IEEE Trans. on Magnetics*, Vo1.34, No. 6, PP. 3888-3896.

10 - Mendelsohn, L. I. (1973). “Heat treating P6 alloy for special properties for a four element gyro system.” *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. Mag-9, No. 3, PP. 356-359.

11 - Rahman, M. A., Osheiba, A. M., Little, T. A., and Slemon, G. R. (1984). “Effects of samarium cobalt permanent magnet on the performance of polyphase hysteresis-reluctance motors.” *IEEE Trans. Magnetics.*, Vol. MAG-20, pt. 2, PP. 1765-1767.

12 - Rahman, M. A. and Osheiba, A M. (1990). “Dynamic performance prediction of polyphase hysteresis motors.” *IEEE Trans. On INDUSTRY App*, Vol. 26, no. 6, PP. 1026-1033.

13 - Hong, S. K., Kim, H. K., and Jung, H. K. (2000). “Torque Calculation of Hysteresis Motor Using Vector Hysteresis Model.” *IEEE Trans. On Magnetics*, vol. 36, No. 4, PP. 1932-1935.

14 - Adly, A. (1995). “Performance simulation of hysteresis motors using accurate rotor media models.” *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 31, No. 6, PP. 1932-1935.

15 - Selemon, G.R., Jackson, R.D., and Rahman, M.A. (1977). ”Performance Predictions for Large Hysteresis Motor.” *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-96, No. 6, PP. 1915-1919.

16 - Sawhney, AK. (1977). *A course in electrical machines design*. Dhanpat Rai, 4th edition.

17 - Veinott, C. G. (1986). *Theory and design of small induction motors.* 1th edition, PP.200-270.

واژه هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1 - Alnico
2 - Ferrosilicon
3 - Hysteresis Delay Angle
4 - Parasitic Loss
5 - Sequential Quadratic Programming