

تحلیل ماشین رلوکتانس سنکرون به نرم افزار ANSYS

مجید اسمی جهرمی هاشم اورعی

دانشگاه صنعتی شریف

تهران - ایران

کلمات کلیدی: ماشین رلوکتانسی، مدل حرارتی، تحلیل حرارتی

1- مقدمه:

هر نوع جابجائی در مقدار گرما مستلزم سپری شدن میزانی از زمان است. این موضوع در بحث ترمودینامیک و انتقال حرارت، معمولاً با جریانهای الکتریکی قابل مقایسه است. هنگام طراحی ماشین، درجه حرارت نقاط خیلی گرم آن محاسبه و مورد رسیدگی قرار می گیرند [1] از آنجائیکه این نقاط در درون ماشین قرار گرفته اند، توجه به یک الگو (مدل) بعنوان پخش فضائی درجه حرارت در داخل ماشین امری ضروری است [2] بدلیل ساختمان نامتجانس در ماشینهای الکتریکی و شکل فیزیکی خاص عناصر متشکله آن، محاسبه تغییرات درجه حرارت در آنها کار بسیار دشواری است. امروزه در محاسبات، از روشهای شبیه سازی استفاده می شود و مطابق با سیستمهای مکانیکی دست به طرح سیستمهای الکتریکی می زنند و مدار معادلی برای حالت پیچیده ترسیم می گردد که از مقاومت ها و منابع الکتریکی تشکیل شده است. علاوه بر این، از روشهای محاسباتی مانند روش

المان محدود و سایر روشهای محاسباتی نیز استفاده می‌گردد. این روشها در تحلیل ساختار پیچیده ماشین کمک بسیار قدرتمندی بوده و نتایج مهمی را ارائه می‌نمایند. در این مقاله، سعی در تشکیل یک مدل حرارتی برای یک ماشین رلوکتانسی سنکرون آزمایشگاهی می‌شود همچنین چگونگی انجام تحلیل حرارتی با استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار ANSYS نیز ارائه شده است.

2- انواع روشهای انتقال حرارت

انتقال انرژی از یک جسم به جسم دیگر در اثر اختلاف درجه حرارت، امری بدیهی است. به عبارت بهتر اختلاف درجه حرارت نیروی محرکه‌ای است برای جابجائی انرژی است. انتقال حرارت به سه صورت هدایت [1]، جابجائی (همرفت) [2] و تابش [3] انجام می‌گیرد. در ماشین‌های الکتریکی، حرارت ابتدا بصورت هدایت و سپس به دو روش دیگر منتقل می‌شود. در ادامه بصورت خیلی مختصر انواع روشهای انتقال حرارت ذکر شده و ارتباط هر یک با مدل حرارتی نیز ذکر خواهند شد [1,3].

2-1- انتقال حرارت به شکل هدایت

در این شکل از انتقال حرارت، جرم جابجا نمی‌شود، بلکه جریان حرارت بر اثر جنبش و ارتعاش مولکولها منتقل می‌گردد.

$$Q_{\text{Cond}} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_{\text{Cond}}} \quad (1)$$

که در آن:

QCond: میزان حرارت منتقل شده به صورت هدایت،

θ_1 و θ_2 : درجه حرارت نقاط (مرزها)،

R: مقاومت حرارتی با واحد $[^{\circ}C/Watt]$.

بدین ترتیب اختلاف درجه حرارت مشابه اختلاف پتانسیل بوده و برای مقاومت حرارتی هدایتی [4]iv می توان نوشت:

$$R_{cond} = \frac{L}{\lambda A} \quad (2)$$

که در آن:

L: طول متوسط بر حسب [m]،

λ : هدایت ویژه حرارتی [5]v بر حسب $[Watt^{\circ}C/m^3]$

A: سطح مقطع بر حسب [m²]

2.2 انتقال حرارت به شکل جابجائی

در این روش، انتقال حرارت بر اثر حرکت سیال ایجاد می گردد و بدین ترتیب با انتقال حرارت به سیال سرد، حرارت به بیرون منتقل می شود. اگر حرکت سیال طبیعی باشد، انتقال حرارت را جابجائی طبیعی و اگر حرکت سیال اجباری باشد، انتقال حرارت جابجائی، مصنوعی نامیده می شود. روابط (3) و (4) را می توان برای انتقال حرارت جابجائی نوشت:

$$Q_{conv} = \lambda'_{conv} \theta . A \quad (3)$$

$$\lambda'_{conv} = \lambda_{conv} (1 + k_1 \sqrt{V}) \quad (4)$$

که در آن:

λ_{Conv} : ضریب حرارتی مخصوص برحسب $[Watt^{\circ}C / m^3]$

θ : اختلاف درجه حرارت برحسب $[^{\circ}C]$

KV: یک ثابت که بستگی به سیال دارد (اگر سیال یکنواخت باشد برابر 1/3 و اگر غیر یکنواخت باشد تا مقدار 0/5 کاهش می یابد).

V: سرعت سیال بر حسب $[m/s]$.

3-2 انتقال حرارت تابشی

در این شکل از انتقال حرارت، نیازی به محیط و یا ماده حامل انرژی نمی باشد و حرارت نه تنها از ناحیه خلاء مطلق عبور می کند بلکه بطور مستقیم از منبع ساطع انرژی تابشی به جسم دریافت کننده انرژی منتقل می شود. انرژی تابشی همانند نور مرئی است و بر طبق نظریه الکترومغناطیس ماکسول از نوسان میدان الکتریکی توام با نوسان میدان مغناطیسی حاصل می گردد. رابطه (5) را برای انتقال حرارت تابشی می توان نوشت [1]:

$$q_{rad.} = 5.7 \times 10^{-8} e \times (T_1^4 - T_0^4) \quad (5)$$

که در آن:

T0 و T1: دمای مطلق محیط و دمای جسم انتشار دهنده حرارت برحسب کلوین،

e: ضریب انتشار (برای جسم سیاه برابر یک و برای سایر اجسام کمتر از یک است).

از آنجائیکه میزان انتقال حرارت بصورت تابشی، معمولاً بسیار کم است، اثر آنرا در مقاومتی حرارتی جابجائی لحاظ کرده و مقاومتی حرارتی معادل این دو نوع انتقال حرارت با رابطه (6) بیان می گردد. [4]:

$$R = \frac{l}{12.4(1 + \sqrt{V})} \quad (6)$$

که در آن:

A: سطح هم جوار یا سیال بر حسب $[m^2]$,

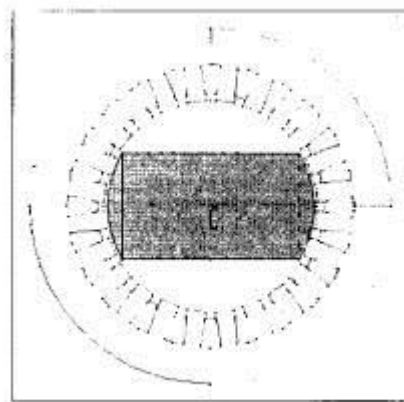
V: سرعت سیال بر حسب $[m/s]$.

3- تحلیل حرارتی موتور رلوکتانسی سه فاز

قبل از بررسی مدل حرارتی، چگونگی عملکرد ماشین رلوکتانسی به صورت خلاصه، معرفی و مشخصات آن ارائه می گردد.

3-1- معرفی ماشین رلوکتانسی سنکرون و مشخصات نمونه آزمایشگاهی مورد بحث

موتور رلوکتانسی سنکرون، یک ماشین سنکرون قطب بر جسته است که هیچ سیم پیچی روی روتور قطب برجسته آن وجود ندارد. از طرف دیگر این ماشین خاص توانائی تحویل و یا جذب توان مفید در سرعت سنکرون را دارد. بنابراین عملکرد موثر و مفید ماشین در دور سنکرون صورت می پذیرد [5]. این ماشین خود راه انداز نبوده و برای داشتن عملکرد دائم بایستی ماشین را به کمک یک وسیله گرداننده به دور سنکرون و حتی بالاتر از آن رساند تا اینکه ماشین سنکرون شده و قادر به عملکرد مفید و موثر باشد. از طرف دیگر اغلب، موتورهای رلوکتانسی مجهز به درایو فرکانس متغیر می باشند. این درایو فرکانس تغذیه را پائین می آورد، بدین ترتیب سرعت سنکرون پائین آمده و امکان خود راه اندازی ماشین نیز پدید می آید. ماشین مورد مطالعه یک ماشین رلوکتانسی سنکرون بصورت 4 قطب در استاتور و 2 قطب برجسته در روتور می باشد. دیاگرامی از این ماشین در شکل (1) نشان داده شده است.



شکل (1) - طرحی از ماشین رلوکتانسی مورد مطالعه

مشخصات ماشین بصورت زیر می باشد:

ولتاژ نامی: $V = 380 \text{ V(Y)}$

قدرت: $P = 200 \text{ W}$

جریان نامی: $I = 0,5 \text{ A}$

طول استاتور: $LS = 3,25 \text{ Cm}$

شعاع بیرونی استاتور: $ROS = 5,5 \text{ Cm}$

شعاع داخلی: $RIS = 3,2 \text{ Cm}$

تعداد شیار: $Z = 24$

عمق دهانه: $h_{slot} = 11 \text{ mm}$

دهانه باز شیار: $W1 = 3 \text{ mm}$

عرض ته شیار: $W2 = 6 \text{ mm}$

3-2. معرفی مسئله انتقال حرارت در ماشین رلوکتانسی

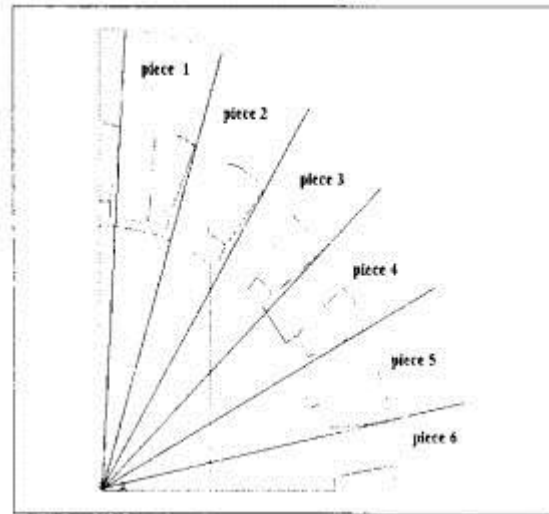
در اثر اتصال ماشین به منبع تغذیه، به دلیل وجود خواص الکترومغناطیسی و تلفات ناشی از این خواص، چشمه‌های حرارتی ایجاد خواهند شد که باعث تولید گرما و بالا رفتن دمای داخلی ماشین می‌شوند. چشمه‌های اصلی حرارتی در اغلب ماشین‌ها و از جمله ماشین رلوکتانسی تقریباً مشخص بوده که شامل تلفات اهمی در سیم‌بندی ماشین، تلفات جریانهای گردابی و تلفات هیستریزیس در هسته، تلفات باد و تهویه، تلفات مکانیکی و اصطکاک در یاتاقانها و غیره می‌باشند. حرارت تولید شده در چشمه‌های حرارتی ابتدا بصورت هدایتی به مرزهای بیرونی می‌رسند، سپس بصورت جابجائی و تشعشع به بیرون انتقال خواهند یافت. از فرآیند ذکر شده در رسم مدل حرارتی ماشین استفاده می‌شود.

3-3. چگونگی تشکیل مدل حرارتی برای ماشین رلوکتانسی و مشکلات آن

با توجه به مشخصات ارائه شده برای ماشین رلوکتانسی مورد بحث، ماشین از لحاظ تقارن هندسی برای تحلیل حرارتی دارای تقارن 90 درجه است. این مطلب بدین مفهوم است که برای تحلیل و مدل‌سازی حرارتی ماشین، نیازی به تحلیل کل ساختمان ماشین و یا مدل کردن کل ماشین نمی‌باشد و تنها کافی است که تحلیل خود را برای 90 درجه (یک ربع از ساختمان هندسی ماشین) انجام دهیم. بدین ترتیب ماشین از 4 بخش تشکیل می‌شود که بین این 4 بخش به دلیل تقارن و تشابه، هیچ انرژی حرارتی مبادله نمی‌شود. انجام این کار باعث پائین آوردن میزان حساسیت مورد نیاز و صرفه‌جویی در وقت و حافظه مورد نیاز جهت ذخیره سازی و تحلیل خواهد شد.

طرح ارائه شده برای تشکیل مدل حرارتی ماشین بر مبنای تقارن استاتور است. دلیل این تقسیم‌بندی این است که همواره در استاتور با تقارن هندسی روبرو هستیم ولی در اکثر ماشین‌های مخصوص، رتور دارای تقارن

هندسی با زاویه کوچک نمی‌باشد و اغلب در زوایای بزرگ دارای تقارن هندسی است. از آنجائیکه در قاچ 90 درجه‌ای در نظر گرفته شده، 6 شیار و 6 دندانه داریم، ماشین را از مرکز رتور و بصورت شعاعی به 6 قسمت تقسیم می‌کنیم. این تقسیم‌بندی در شکل (2) نشان داده شده است.



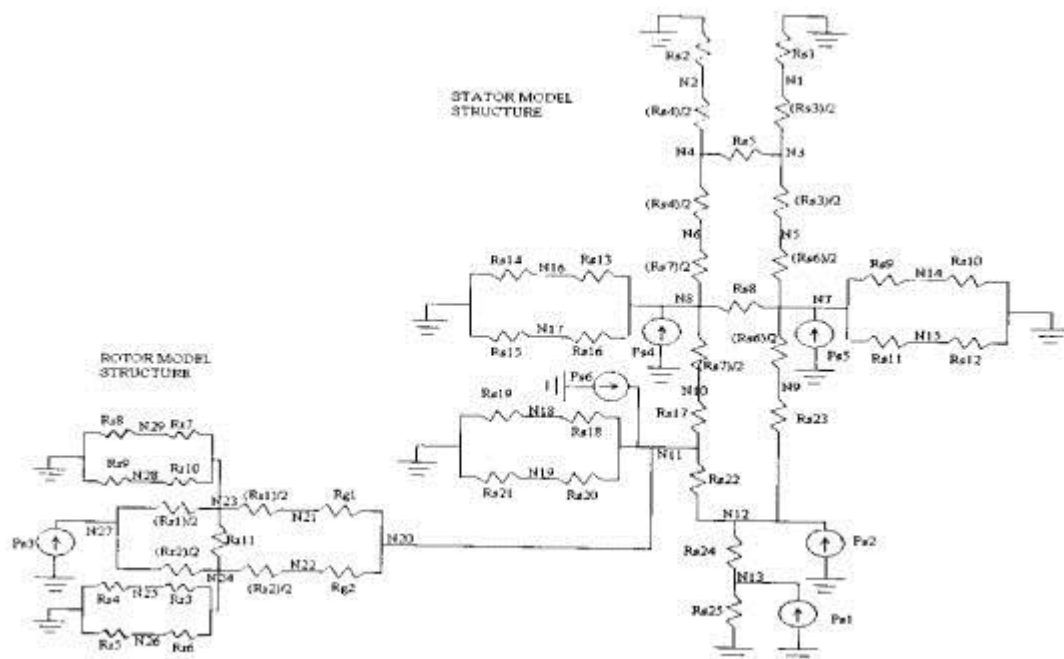
شکل (2) - تقسیم‌بندی یک ربع ماشین به 6 قاچ 15 درجه‌ای

به دلیل عدم تقارن هندسی بین 6 بخش موجود در قاچ 90 درجه‌ای لحاظ شده، بین مرزها تبادل حرارتی وجود خواهد داشت. از طرف دیگر در این 6 بخش، وضعیت تقسیم بندی استاتور کاملاً مشابه یکدیگر می‌باشند. بنابراین شبکه حرارتی در نظر گرفته شده برای استاتور در این 6 بخش کاملاً مشابه بوده و مقادیر المان‌ها در یک بخش مشابه سایر بخش‌ها خواهد بود. ولی این مطلب در مورد فاصله هوایی و رتور صادق نمی‌باشد که این امر به دلیل عدم تشابه هندسی بخش‌های مختلف است. جهت جلوگیری از پیچیدگی بیش از حد مدل، برای تمامی بخش‌ها، مدل مشابه و یکسانی از لحاظ ساختار در نظر گرفته شده و تفاوت در مقادیر اجزای مدل لحاظ می‌شود.

4-3- شبکه مقاومتی معادل و مقادیر اجزای آن برای تحلیل حرارتی ماشین

با توجه به تشابه مسئله جریان حرارتی و جریان الکتریکی، می توان شبکه معادلی را برای تحلیل حرارتی ماشین در نظر گرفت. این شبکه، تنها از مقاومت های حرارتی، منابع جریان حرارتی و ظرفیتهای حرارتی تشکیل می شود. در این مقاله، از ظرفیتهای حرارتی صرف نظر شده است و هر چه میزان مقاومت حرارتی بالاتر باشد، بدین مفهوم است که آن بخش از جسم، توانائی کمتری برای انتقال حرارت داشته و میزان افت حرارتی بالائی را نتیجه خواهد داد. منابع حرارتی نیز عملکردی همانند منابع جریان در مدارهای الکتریکی دارند و بدون وجود آنها، هیچ حرارتی در ماشین وجود نداشته و توزیع حرارتی نیز نخواهیم داشت. در مورد ماشین رلوکتانسی مورد بحث، مقاومت ها را به دو دسته "هدایتی" و "جابجائی + تابشی" تقسیم می کنیم که روابط آنها در بخش (2) آورده شد. با توجه به توضیحات ارائه شده در قبل، برای قاج 90 درجه ای یک شبکه معادل خواهیم داشت. این قاج، 6 شیار و 6 دندانه استاتور را دربر دارد. بدین ترتیب با تقسیم قاج 90 درجه ای به 6 بخش 15 درجه ای شبکه معادل، خود از 6 شبکه تشکیل شده که از لحاظ ساختار کاملاً مشابه اند ولی از لحاظ مقادیر پارامترهای پارامترهای مداری با هم متفاوتند. با اتصال این 6 شبکه معادل به هم، شبکه معادل کلی ایجاد می گردد و بین 6 شبکه معادل جزئی، تبادل حرارت وجود خواهد داشت. ساختار شبکه معادل برای هر یک از این 6 جزء 15 درجه ای مطابق شکل (3) می باشد. لازم به ذکر است که در ساختار مدار معادل ارائه شده، پتانسیل زمین بعنوان دمای محیط می باشد.

مقادیر مقاومت ها و چشمه های حرارتی در جداول 1، 2 و 3 ضمیمه آورده شده اند.



شکل (3): شکل شبکه حرارتی برای یک بخش 15 درجه‌ای ماشین رلوکتانسی شامل یک شیار و یک دندانۀ

استاتور

4- شبیه‌سازی مدل حرارتی

پس از مشخص شدن و محاسبه کلیه چشمه‌ها و مقاومتهای حرارتی و تشکیل ساختار مدل حرارتی دما در کلیه

گره‌های مدل حرارتی قابل محاسبه می‌گردد. جهت تحلیل مدل از رابطه ماتریسی (7) استفاده می‌گردد [6,7]:

$$[G][V] = [I] \quad (7)$$

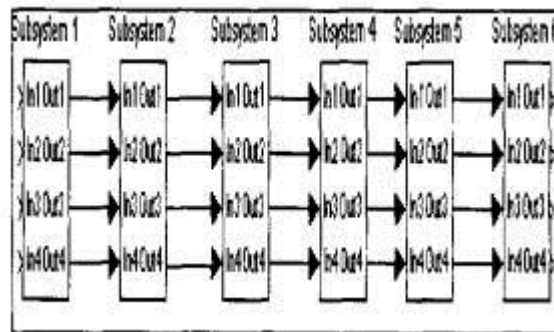
که در آن:

[G]: ماتریس هدایت حرارتی،

[V]: دمای گره‌ها،

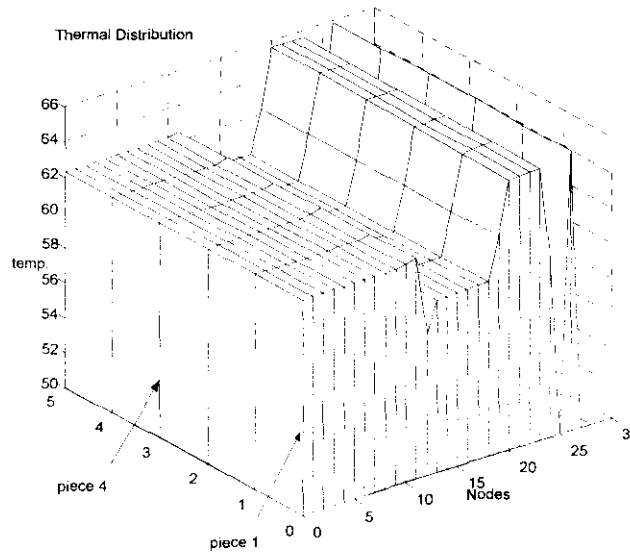
[I]: چشمه‌های حرارتی،

در این مقاله، شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و محیط شبیه‌سازی SIMULINK انجام شده است. ساختار مدل شبیه‌سازی شده به صورت شکل (4) می‌باشد که هر یک از شش بلوک نشان داده شده، ساختاری همانند شکل (3) دارند.



شکل (4): وضعیت ساختار شبکه حرارتی مدل‌سازی شده برای قاچ 90 درجه‌ای

یک از شبکه‌ها دارای 29 گره می‌باشند که در شکل (3) با N1 تا N29 نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که حرارت در اکثر گره‌ها دور از واقعیت نمی‌باشند. این نتایج که وضعیت دمای نقاط مختلف ماشین را نشان می‌دهند، در شکل (5) نشان داده شده‌اند. بدین ترتیب با تشکیل مدل حرارتی و تحلیل آن می‌توان وضعیت حرارتی نقاط مختلف ماشین را به صورت تقریبی تخمین زد. از آنجاییکه در این مدل از ظرفیت‌های حرارتی کاملاً صرف‌نظر گردیده است، نمی‌توان از این مدل در تحلیل حرارتی ماشین در حالات گذرا استفاده کرد.



شکل (5): نتایج شبیه‌سازی مدل حرارتی ماشین (توزیع حرارتی بخش 90 درجه‌ای)

5- تحلیل حرارتی ماشین رلوتانسی با روش المان محدود و استفاده از نرم‌افزار ANSYS

به دلیل پیچیدگی ساختار ماشین روش المان محدود، یک روش محاسباتی بسیار قوی برای تحلیل حرارتی ماشین می‌باشد. رابطه کلی (8) بیانگر مسئله انتقال حرارت و اساس این روش در تحلیل حرارتی می‌باشد

[10]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q_B \quad (8)$$

که در آن:

q_B : نرخ تولید حرارت در واحد سطح،

K_x : ضریب هدایت حرارتی در جهت x ،

K_y : ضریب هدایت حرارتی در جهت y ،

برای حل معادله بالا، باید در تمامی نقاط مرزی سیستم شرایط مرزی مشخص باشند. این شرایط مرزی به دو دسته شرایط مرزی نیومن و دیریشله تقسیم می‌شوند. شرط مرزی نیومن بصورت میزان انتشار فلوی حرارتی در نقاط مرزی بوده و به صورت رابطه (9) بیان می‌شود. همچنین شرط مرزی دیریشله به صورت میزان دما در نقاط مرزی و به صورت رابطه (10) تعریف می‌گردد.

$$K_n \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{s_q} = q_s \quad (9)$$

$$\theta \Big|_{s_s} = \theta_s \quad (10)$$

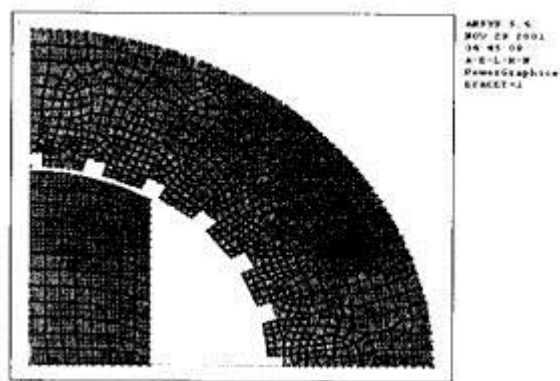
S_q و S_θ در حقیقت مرز سیستم هستند بطوریکه رابطه (11) را می‌توان برای آنها نوشت:

$$\begin{cases} S_A \cap S_q = \emptyset \\ S_Z \cup S_q = S_{Total} \end{cases} \quad (11)$$

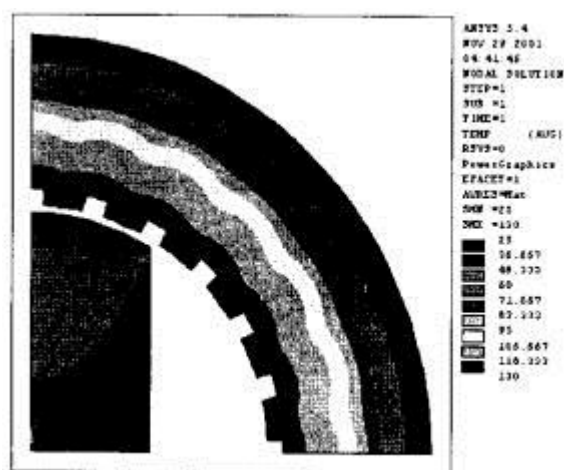
علاوه بر دو شرط بالا در صورت وجود نقاط تولید حرارتی، آن نقاط نیز بایستی مقداردهی شوند. در مورد ماشین رلوکتانس مورد بحث، در قاچ 90 درجه‌ای مورد تحلیل، به دلیل تقارن هندسی، در زوایای صفر و 90 درجه میزان انتشار فلوی حرارتی برابر صفر می‌باشد که این امر به دلیل تقارن هندسی ماشین است. جهت انجام تحلیل با استفاده از نرم‌افزار ANSYS از یک سری اطلاعات آزمایشگاهی استفاده شده است. دما در کلیه نقاط مرزی بیرونی برابر با 25 درجه، نقاط مرزی قوس رتور، 70 درجه، دمای قسمت عمودی (صاف) رتور، 40 درجه، دمای نقاط مرزی دندان، 120 درجه و دمای مرزی عایق 130 درجه در نظر گرفته شد. همچنین مقادیر چشمه‌های حرارتی محاسبه شده در قبل نیز اعمال شدند. نتایج در شکل‌های (6) و (9) نشان داده شده‌اند.

شکل (6) وضعیت مش‌بندی، شکل (7) توزیع حرارتی، شکل (8) چگونگی انتشار حرارت به نقاط مختلف ماشین و شکل (9) نیز وضعیت گرادیان حرارتی را مشخص می‌نماید. همانطوریکه از این اشکال پیداست حادثترین نقاط ماشین از لحاظ حرارتی و وضعیت گرادیان حرارتی، شیارها می‌باشند، و از آنجائیکه

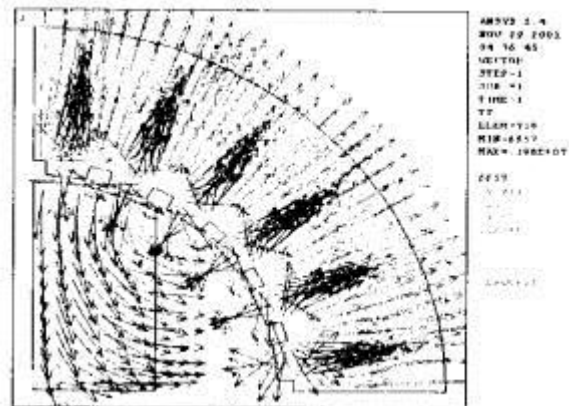
حساس‌ترین المان‌های موجود در شیار عایق‌ها هستند، بایستی، سیستم‌های عایقی لحاظ شده برای ماشین، توانایی تحمل گرادیان حرارتی محاسبه شده را دارا باشند.



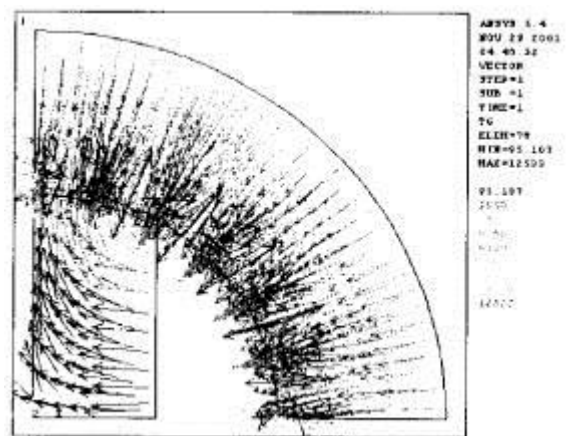
شکل (6): وضعیت مش‌بندی



شکل (7): توزیع حرارتی



شکل (8): چگونگی انتشار حرارت به نقاط مختلف ماشین



شکل (9): وضعیت گرادیان حرارتی

6- نتیجه گیری

در این مقاله، دو روش جهت تحلیل حرارتی ماشین رلوکتانسی سنکرون ارائه شد که یکی بر اساس تشکیل مدل حرارتی و دیگری استفاده از روش المان محدود و نرم افزار ANSYS می باشد. تشکیل مدل حرارتی با توجه به ساختار پیچیده ماشین و تقارن هندسی ماشین در زاویه بزرگ مشکلات بسیار زیادی چه از لحاظ تشکیل ساختار و چه از لحاظ محاسباتی در پی دارد. استفاده از روش المان محدود و نرم افزار ANSYS یک روش قدرتمند و با قابلیت بالا، جهت تحلیل حرارتی را ارائه نموده و در تحلیل حرارتی ماشینهای با فیزیک پیچیده، یک روش قدرتمند با ضریب اطمینان بالا می باشد که این امر از نتایج ارایه شده کاملاً مشهود است. لازم به ذکر است که این دو روش تفاوت های اساسی در تحلیل حرارتی ماشین دارند. بدین ترتیب که با تشکیل مدل حرارتی می توان دمای نقاط مختلف ماشین را پیش بینی نمود، که این امر در طراحی ماشین اهمیت اساسی دارد. در مقابل در روش تحلیل المان محدود، با داشتن دمای مرزها در ماشین ساخته شده از چگونگی توزیع حرارت در بخش های مختلف ماشین اطلاع حاصل می شود.

فهرست مراجع:

- [1] A.K.Sawhney, "A Course in Electrical Machine Design" , Dhanpot Rai & Sons, Dehli, 1991.
- [2] R.De Doncker, B. Brijs, W.Geysen. "Thermal modles of Inverter Fed Asynchronous Machines Studied for an Adaptive Control of the Feed Forward Circuits of the inverter ; Theory and Simulation "IMACS, Transactions on Computer Simulation, 1985, Vol.3, P.311-315.
- [3] S.Emami, "Electrical Machine Test" , Iran, 1999.
- [4] F.G. De Buck , " A Simple But Reliable Loss Model For Inverter Supplied Induction Motors " , IEEE Trans. , 1984.
- [5] A.E. Emanuel , " Estimating The Effect of Harmonic Voltage Flactuations on the Temprature Rise of Squirrel -Cage Motors " , IEEE Trans. , 1968.
- [6] R.De Doncker, W.Geysen "The Double Cage Induction Motor Model for the Simulation of Inverter

Fed Machines" Proceeding of IMACS , 1984, Belgium.

[7] R.De Doncker , A.Vandenput, W.Geysen , "Thermal Models of Inverter fed Asynchronous Machines Studied for Adaptive Temperature Compensation of Field Oriented Controllers" , IEEE Trans. 1986.

[8] S.Sakabe, S.Oosugi, M.Musseyuki, "Iron Loss and Characteristics of Induction Motors Driven by High Frequency Source " , IPEC, Tokyo, 1983.

[9] Laperre, Viaene, "Study of an Thermal Models of Small Synchronous Machines" , Master Thesis K.U.Leuven, Belgium, 1973.

[10] K.J. Bathe , "Finite Element Procedures" , Prentice-Hall Inc., 1996.

ضمایم:

جدول (1): توضیحات و مقادیر مربوط به مقاومت‌های حرارتی استاتور در هر یک از 6 بخش 15 درجه‌ای

مقاومت حرارتی (°C/Watt)	R _{S1}	R _{S2}	R _{S3}	R _{S4}	R _{S5}
توضیح	مقاومت جانبی Case روبروی دندانه (Conv.+Rad.)	مقاومت جانبی Case روبروی شیار (Conv.+Rad.)	مقاومت شعاعی مربوط به Case روبروی دندانه (Cond.)	مقاومت شعاعی مربوط به شیار Case روبروی (Cond.)	مقاومت متعادل کننده مربوط به شیار Case روبروی (Cond.)
مقدار	۶۱۹۵٫۸	۵۵۲۳٫۸	۰٫۱۵۲	۰٫۱۳۵	۱٫۸۱۶
مقاومت حرارتی (°C/Watt)	R _{S6}	R _{S7}	R _{S8}	R _{S9}	R _{S10}
توضیح	مقاومت شعاعی یوغ در مقابل شیار (Cond.)	مقاومت شعاعی یوغ در مقابل دندانه (Cond.)	مقاومت متعادل کننده مربوط به یوغ (Cond.)	مقاومت جانبی هدایتی یوغ در برابر شیار (Cond.)	مقاومت یوغ در برابر شیار (Conv.+Rad.)
مقدار	۱٫۰۰۸۸	۱٫۱۲۲	۰٫۳۵۵	۹۱٫۶۷	۵۶۴٫۱
مقاومت حرارتی (°C/Watt)	R _{S11}	R _{S12}	R _{S13}	R _{S14}	R _{S15}
توضیح	مقاومت جانبی هدایتی یوغ در برابر شیار (Cond.)	مقاومت جانبی یوغ در برابر شیار (Conv.+Rad.)	مقاومت جانبی یوغ در برابر دندانه (Cond.)	مقاومت جانبی یوغ در برابر دندانه (Conv.+Rad.)	مقاومت جانبی هدایتی یوغ در برابر دندانه (Cond.)
مقدار	۹۱٫۶۷	۵۶۴٫۱	۱۰۲٫۸۳	۶۳۲٫۸	۱۰۲٫۸۳
مقاومت حرارتی (°C/Watt)	R _{S16}	R _{S17}	R _{S18}	R _{S19}	R _{S20}
توضیح	مقاومت جانبی یوغ در برابر دندانه (Conv.+Rad.)	مقاومت حرارتی هدایتی دندانه (Cond.)	مقاومت جانبی هدایتی دندانه (Cond.)	مقاومت جانبی دندانه (Conv.+Rad.)	مقاومت جانبی هدایتی دندانه (Cond.)
مقدار	۶۳۲٫۸	۱٫۳۶۷	۱۱۸٫۵۷	۷۲۹٫۷	۱۱۸٫۵۷
مقاومت حرارتی (°C/Watt)	R _{S21}	R _{S22}	R _{S23}	R _{S24}	R _{S25}
توضیح	مقاومت جانبی دندانه (Conv.+Rad.)	مقاومت حرارتی شعاعی هدایتی عایق بندی کنارهای شیار (Cond.)	مقاومت حرارتی شعاعی هدایتی عایق بندی انتهایی شیار (Cond.)	مقاومت حرارتی مربوط به مسیم بندی انتهایی استاتور (Cond.)	مقاومت حرارتی مربوط به مسیم بندی انتهایی استاتور (Conv.+Rad.)
مقدار	۷۲۹٫۷	۴٫۲۷۳	۱۲٫۸۲	۱۱۳٫۴	۸۳٫۳۳

جدول (2): مقاومت‌های حرارتی مربوط به قطعات مختلف روتور

مقاومت حرارتی بر حسب (°C/Watt)	توضیح	قطعه ۱	قطعه ۲	قطعه ۳	قطعه ۴	قطعه ۵	قطعه ۶
Rg1	مقاومت حرارتی هدایتی هدایتی فاصله هوایی	۱۵۲,۹	۱۵۲,۹	۱۵۲,۹	۶۶۳,۶	۱۱۲۹,۲	۱۴۹۱,۵
Rg2	مقاومت حرارتی هدایتی هدایتی فاصله هوایی	۱۳۶,۳	۱۳۶,۳	۲۷۶,۳	۷۹۳,۲۲	۱۱۹۷,۶	۱۴۲۴,۶
Rr1	مقاومت حرارتی هدایتی روتور روبروی فن‌خانه استاتور (Cond.)	۹,۸۶	۹,۸۶	۹,۸۶	۹,۳۶	۷,۶۴	۶,۴۷
Rr2	مقاومت حرارتی هدایتی روتور روبروی شیار استاتور (Cond.)	۸,۷۹۶	۸,۷۹۶	۹,۷۱۲	۷,۵۷۷	۶,۲	۵,۵
Rr3	مقاومت حرارتی هدایتی روتور روبروی شیار استاتور (Cond.)	۱۱۴,۰۱	۱۱۴,۰۱	۱۲۳,۸	۱۷۱,۰۱	۲۱۲,۲۵	۲۷۰,۴
Rr4	مقاومت هدایتی روتور روبروی شیار استاتور (Conv + Rad)	۳۵۰,۸	۳۵۰,۸	۳۸۱,۰۴	۵۲۶,۲	۶۵۰	۸۳۲,۱
Rr5	مقاومت هدایتی روتور روتور روبروی شیار استاتور (Cond.)	۱۱۴,۰۱	۱۱۴,۰۱	۱۲۳,۸	۱۷۱,۰۱	۲۱۲,۲۵	۲۷۰,۴
Rr6	مقاومت هدایتی روتور روتور روبروی شیار استاتور (Conv + Rad)	۳۵۰,۸	۳۵۰,۸	۳۸۱,۰۴	۵۲۶,۲	۶۵۰	۸۳۲,۱
Rr7	مقاومت هدایتی روتور روتور روبروی فن‌خانه استاتور (Cond.)	۱۰۱,۶۵	۱۰۱,۶۵	۱۱۰,۴	۱۵۲,۵	۱۸۸,۳	۲۴۱,۱
Rr8	مقاومت هدایتی روتور روبروی فن‌خانه استاتور (Conv + Rad)	۳۱۲,۸	۳۱۲,۸	۳۳۹,۷	۴۶۹,۱	۵۷۹,۵	۷۴۱,۸۵
Rr9	مقاومت هدایتی روتور روتور روبروی فن‌خانه استاتور (Cond.)	۱۰۱,۶۵	۱۰۱,۶۵	۱۱۰,۴	۱۵۲,۵	۱۸۸,۳	۲۴۱,۱
Rr10	مقاومت هدایتی روتور روبروی فن‌خانه استاتور (Conv + Rad)	۳۱۲,۸	۳۱۲,۸	۳۳۹,۷	۴۶۹,۱	۵۷۹,۵	۷۴۱,۸۵
Rr11	مقاومت متداول شده روتور (Cond.)	۰,۰۴	۰,۰۴	۰,۰۹۴	۰,۱۷۵	۰,۲۱۶	۰,۲۵

جدول (3): منابع جریان حرارتی موجود در مدل حرارتی

منبع	P _{S1}	P _{S2}	P _{S3}	P _{S4}	P _{S5}	P _{S6}
توضیح	تلفات مس استاتور روبروی شیار	تلفات مس استاتور روبروی فن‌خانه	تلفات آهن در فن‌خانه	تلفات آهن بروج در برابر فن‌خانه	تلفات آهن بروج در شیار	تلفات مکانیکی و اضافی
مقدار بر حسب (W)	۰,۱۰۴	۰,۱۲	۰,۰۱۱	۰,۰۲۳	۰,۰۲۵	۰,۱۶۵

پی نوشت:

-
- i[1] - Conduction
 - ii[2] - Convection
 - iii[3] - Radiation
 - iv[4] - Thermal Conduction Resistance
 - v[5] - Thermal conductivity

مهندس یار
WWW.MOHANDESYAR.COM

