



Alınış tarihi (Received): 01.03.2022
Kabul tarihi (Accepted): 26.04.2022

Eksenel Akılı Senkron Relüktans Motorun Termal Analizi

Mehmet AKAR¹, Harun Serhat GERÇEKÇİOĞLU^{2, *}

¹*Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, 60150 Tokat, Türkiye*

²*Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği, 60150 Tokat, Türkiye*

*Sorumlu yazar: harunserhatgercekcioğlu@gmail.com

ÖZET: Elektrik motoru tasarım sürecinde manyetik tasarıma ek olarak doğru mekanik ve termal tasarımın da yapılması oldukça önemlidir. Bu çalışmanın amacı manyetik ve mekanik tasarımı Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile optimize edilmiş ve deneysel olarak doğrulanmış Eksenel Akılı Senkron Relüktans Motorun (EA-SynRM) farklı yüklerde termal davranışın ortaya çıkarılması ve deneysel olarak doğrulanmasıdır. Bu kapsamda 2.2 kW, 1500 d/d EA-SynRM termal modeli oluşturulmuş ve 3D SEY analizi ile motorun termal davranışı ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında yüksek oranda tutarlılık elde edilmiştir. Yenilikçi rotor yapısına sahip EA-SynRM'nin farklı uygulamalarda kullanılabilirliği manyetik, yapısal ve termal olarak hem SEY hem de deneysel olarak doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler – *Senkron Relüktans, Eksenel Akılı Motor*

Thermal Analysis of Novel Rotor Axial Flux Synchronous Reluctance Motor

ABSTRACT: In addition to the magnetic design, it is very important to make the right mechanical and thermal design in the electric motor design process. The aim of this study is to reveal and experimentally verify the thermal behavior of the Axial Flux Synchronous Reluctance Motor (AF-SynRM), whose magnetic and mechanical design has been optimized with the Finite Element Method (FEM) and experimentally verified. In this context, a 2.2 kW, 1500 rpm AF-SynRM thermal model was created and the thermal behavior of the motor was revealed by 3D FEM analysis. A high degree of consistency was obtained when the obtained results were compared with the experimental results. Magnetic, structural and thermal analysis of AF-SynRM with its innovative rotor structure has been validated both FEM and experimentally.

Keywords – *Synchronous Reluctance, Axial Flux Motor*

1. Giriş

İçten yanmalı motorların olumsuz ekolojik ayak izi, küresel ısınma ve CO2 emisyonunun yanı sıra fosil yakıt kıtlığı, elektrik motor tasarımcılarını daha verimli ve çevre dostu motor tasarımına mecbur bırakmaktadır. Elektrik makinesinin tasarımı elektromanyetik, mekanik, termal ve malzeme bilimi bilgisi gerektiren çok disiplinli bir süreçtir (Ghahfarokhi ve ark., 2018). Termal analiz motorun hız tork performansı, güç yoğunluğu,

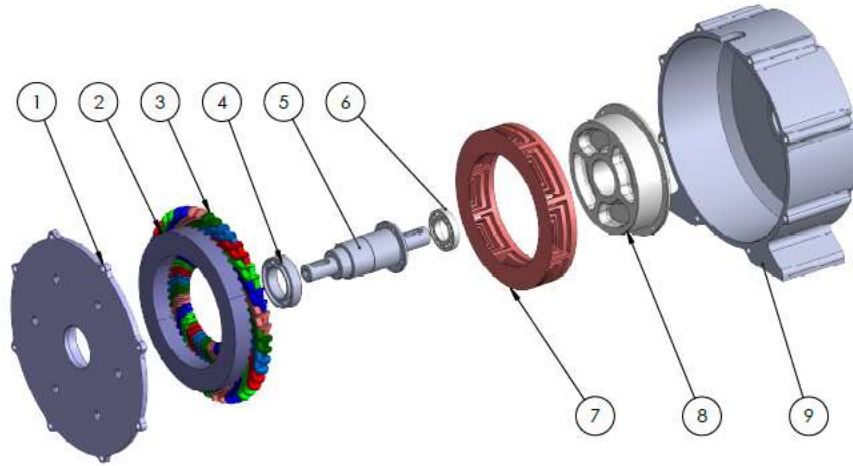
ürettiği tork ve enerji verimliliği açısından tasarım sürecinde en önemli kısımlardan biridir. Termal analiz yöntemleri incelendiğinde Termal Ağ Toplu Parametresi (LPTN) ve SEY tabanlı yöntemlerin ön plana çıktığı görülmektedir. Elektrik motorlarında kritik parçaların termal davranışlarının ortaya çıkarılmasında kullanılan LPTN yöntemi termal eşdeğer devrenin çıkarılması ve analizi prensibine dayanmakta, hızlı çözüm süreci ve kabullenebilir doğrulukta sonuç üretmektedir. Bununla birlikte özellikle aksenal akılı topolojisine sahip ve sıra dışı rotor içeren motor geometrilerinde LPTN tabanlı yazılımlar modellemede yeterince destek verememektedir. SEY tabanlı termal analiz çözümleri ise daha uzun çözüm zamanı ve işlemci gereksinimi duysa da yüksek doğrulukta sonuç üretmesi, motor parçalarında meydana gelen ısı artışı ve termal yüklenmelerin daha net ortaya çıkmasından ötürü sıklıkla tercih edilmektedir (Mellor ve ark., 1991; Lindström, 1999; Boglietti ve ark., 2002; Elhomdy ve ark., 2019). Endüstriyel uygulamalarda birçok motor topolojisi başarılı şekilde kullanılmaktadır. Bu motorlardan biri olan Senkron Relüktans Motorların; rotor tasarımında mıknatıs ya da kafes olmadığı için rotor bakır kaybı bulunmamakta, standart asenkron motorlara göre daha fazla termal yüklenebilme sayesinde daha soğuk çalışmakta, standart asenkron motorlar ile benzer stator yapısı sayesinde kullanımı ve bakımı kolay olmakta ve özel kontrol yazılımları ile encodersiz çalışabilmektedirler. Bununla birlikte rotorunda mıknatıs içermemesi, güç faktörünün düşük olması sebebiyle tork ve güç üretimi için daha fazla akım çekmektedir. Kaynaktan çekilen fazla akım stator sargılarındaki kayıpları artırırken, manyetik devredeki meydana gelen saturasyonlar da SynRM 'de manyetik kayıpları artırmaktadır. Aynı zamanda motorda sıcaklık artışına da sebep olmaktadır. Bu sıcaklık artışı motor sargı direncini artırıp verimi düşürürken motor sargı izolasyon ömrünün de kısılmasına sebebiyet vermektedir. Bu sebeple motorun hayati parçalarında sıcaklık artışının hızlı bir şekilde tespiti oldukça önemlidir (Rehman ve Seong, 2018). Boglietti ve ark., iki farklı güçteki asenkron ve SynRM performansları LPTN yöntemi ile incelenmiş, SynRM'nin aynı güçteki asenkron motora göre rotor kayıplarının ihmal edilebileceği ve %10-20 aralığında daha fazla tork ürettiği sonucuna ulaşılmıştır. SynRM'lerin sıklıkla kullanıldığı yerlerin başında otomotiv uygulamaları gelmektedir. Bu uygulamalarda genellikle dar alanlarda ve yüksek ortam sıcaklığında çalıştırılırlar. Bu SynRM lerin sargı ve yalıtım malzemelerinin çok çabuk deforme olmasına ve sonrasında da sargı ve gövde kısa devre arızalarına sebebiyet vermektedir (Boglietti ve ark., 2006). Adouni ve Cardoso tarafından yapılan bir başka çalışmada termal yönetim sistemi 3D problem olarak ele alınmıştır (Adouni ve Cardoso, 2019). İlk etapta ısı çıkarma kaynağı ortaya konulmuş, daha sonra parçalar arasında ısı düşümleri tespit edilmiş ve son olarakta motor kapakları arasında meydana gelen kompleks türbülans akışları incelenmiştir. Radyal akılı SynRM'ler için manyetik tasarım ve deneysel doğrulamaya ait çalışma oldukça fazla iken radyal akılı SynRM'lerin termal analizlerine yönelik yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Bununla birlikte bu çalışmada önerilen EA-SynRM için manyetik analiz, tasarım ve doğrulamaya yönelik yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Gerçekcioglu ve Akar (2021), yapmış oldukları çalışmada 2.2 kW, 1500 d/d EA-SynRM'nin tasarımını yapmış, gerçekleştirdikleri optimizasyon ile en düşük tork dalgalanmasını üreten rotor bariyer yapısını ortaya koymuşlardır. Manyetik analiz sonuçları ve performans eğrileri deneysel olarak doğrulanmıştır (Gerçekcioglu ve Akar, 2021). Mahmoudi ve ark. (2020), SEY yöntem ile tasarladıkları EA-SynRM nin performansını ve üretilebilirliği üzerine çalışmalar yapmışlardır (Mahmoudi ve ark., 2020). Mıknatıs içermeyen rotor yapısı ve aksenal akılı motor topolojisi göz önünde tutulduğunda EA-SynRM için termal analiz çalışması içeren bir çalışma literatürde ilk defa bu çalışma ile yapılacaktır.

Bu çalışmada daha önce manyetik analizleri ve optimizasyonu tamamlanmış EA-SynRM'nin termal davranışı farklı yük durumları için ortaya konulmuştur. Elde edilen optimal motorun manyetik ve diğer kayıpları belirlenerek 3D SEY Termal analiz

yöntemiyle motorun her noktasında sıcaklık değişimi ve en sıcak noktalar orta çıkarılmıştır. Bu amaçla Ansys Workbench platformu kullanılmıştır. Motorda en yüksek sıcaklık değerinin elde edildiği yer olan sargılara yerleştirilen sıcaklık sensörü ile elde edilen SEY sonuçları üretilen prototip motordan toplanan veriler ile karşılaştırılmış ve SEY sonuçları doğrulanmıştır. Bu makale EA-SynRM'nin termal davranışını daha iyi anlamak için katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

EA-SynRM'nin termal davranışının belirlenmesinde doğru modelin oluşturulması, malzeme seçimi ve kayıpların doğru belirlenmesi oldukça önemlidir. Modelleme esnasında bazı varsayımlar yapılmaktadır. Bunlar; izolasyon malzemesinin sargıları tamamen kapladığı, stator ve rotor demir kayıplarının homojen ısı üretiminde sabit kaldığı ve motor malzemelerinin ısı iletkenlikleri izotropik olduğudur (Elhomdy ve ark., 2019). Bu varsayımlar altında analizi yapılan 2.2 kW, 1500 d/d EA-SynRM'nin yapısı Şekil 1'de görülmektedir (Gercekcioglu, 2021).



Şekil 1. 8 kutuplu EA-SynRM'nin yapısal görüntüsü (1-Şase kapağı, 2-Stator, 3-Sargılar, 4 ve 6-Rulmanlar, 5-Şaft, 7-Rotor, 8-Rotor kaplini, 9-Şase)

Figure 1. The structure view of the 8 poles AF-SynRM. (1-Cover, 2-Stator, 3-Windings, 4 and 6-Bearing, 5-Shaft, 7-Rotor, 8-Rotor coupling, 9-Housing)

Modellemede kullanılan geometrik ölçüler ve motor parçalarına ait özellikler sırasıyla Tablo 1 ve 2' de verilmiştir.

Tablo 1. Simülasyonlarda kullanılan motor parçalarının malzeme özellikleri
Table 1. Material properties of motor parts used in the simulations

Bileşenler	Materyaller	Yoğunluk [kg/m ³]	Özısı [J/kg/°C]	Termal İletkenlik [W/m.°C]	Young Modülü [GPa]	Poisson Oranı
Kapak ve Şase	Alüminyum alaşımı	2790	833	168	69	0.33
Stator	JFE_Steel_35JN300 Çelik	7650	460	28	200	0.29
Rotor	Steel 1010	7872	460	30	205	0.28
Sargılar	Bakır	8933	385	401	116	0.35
Yalıtım Katmanı	Kompozit malzeme	1400	1000	0.21	3.5	0.3

Tablo 2. EA-SynRM'nin geometrik boyutları
Table 2. The geometrical dimensions of the AF-SynRM

Parametre	Değer	Birim	Parametre	Değer	Birim
Dış çap	210	mm	Paket boyu	87.3	mm
İç çap	150	mm	Hava aralığı	0.3	mm
Kutup sayısı	8		Rotor boyu	39	mm
Stator oluk derinliği	18.75	mm	Akı bariyeri sayısı	4	
Stator boyunduruk kalınlığı	23	mm	Rotor boyunduruk kalınlığı	9.5	mm
Her oluktaki iletken sayısı	58	turns	Sargı faktörü	0.96	

Elektrik motorlarında kullanılan malzemelerin büyük bir kısmının ısıya duyarlı olması sebebiyle termal analizin önemini artırmaktadır. Isı iletiminde kullanılan üç ana metot vardır. Bunlardan ilki olan iletim yönteminde ısı transferi doğrudan materyallerin birbiriyle teması ile sağlanırken, konveksiyon yönteminde ise ısı transferi sıvı veya gaz vasıtasıyla sağlanır. Son yöntem olan radyasyon da ise ısı enerjisi ısı dalgaları şeklinde transfer edilir. İzotropik ortam için, kararlı hal ısı transferini yöneten denklemler ve sınır koşulları Denklem 1'deki gibi tanımlanabilir (Elhomdy ve ark., 2019).

$$k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + h_{cv}(T - T_{amb}) = Q \quad (1)$$

Denklem 1'de verilen k termal iletkenlik, T_{amb} ve T sırasıyla ortam sıcaklığını ve bilinmeyen sıcaklığı, Q ise ısı kaynağını temsil etmektedir. Isı kaynağı motorda ısı artışını sağlayan kaynak olup elektrik motorlarında meydana gelen kayıplar tarafından beslenmektedir. Genel itibarıyla elektrik motor kayıpları; bakır kayıpları, nüve kayıpları ve mekanik kayıplar olarak sınıflandırılır. Nüve kayıpları ferromanyetik malzeme olan stator ve rotorda gerçekleşir. Manyetik malzemedeki akı yoğunluğu, besleme voltajı,

frekans ve makinanın geometrisine bağlı olarak değişir (Jokinen ve ark., 2013). Nüve kayıpları elektrik makinalarında ısı artışı ve verimde düşmeye sebep olmasından ötürü tasarımcılar tarafından dikkatle üzerinde durulan hususlardandır. Nüve kayıpları detaylıca incelenmiş olup, Nüve kayıpları P_{Fe} ile temsil edilir ve W/m^3 cinsinden Denklem 2’de verildiği gibi tanımlanır (Bertotti, 1988).

$$P_{Fe} = P_h + P_e + P_{ex} = k_h f B^\alpha + \frac{\sigma(\pi d)^2}{6\rho} f^2 B^2 + k_{ex} f^{1.5} B^{1.5} \quad (2)$$

Denklem 2’de verilen P_h , P_e ve P_{ex} sırasıyla histerisiz, eddy ve ilave kayıpları. B ve f ise manyetik akı yoğunluğu ve frekansı temsil eder. k_h , k_{ex} ve α ise ilgili kayıplara ait katsayılarıdır. Senkron relüktans motorlarda nüve kayıpları birçok araştırmacı tarafından da detaylıca incelenmiştir (Xu ve Yao, 1991; Kim ve ark., 1998; Fernandez-Bernal ve ark., 1999; Fasquelle, 2007; Yamazaki ve Fukushima, 2010). Elektrik motorlarında meydana gelen ve en büyük ısı kaynağı olan kayıp ise Joule kaybı olarak bilinen bakır kayıplarıdır. SynRM’nin topolojisinden kaynaklı olarak sadece statorunda meydana gelen bakır kayıpları motor tüm kayıplarının yaklaşık %96’sı civarındadır (Wu ve ark., 2017). Bakır kayıplarının hesaplanmasında kullanılan eşitlikler aşağıda verilmiştir (Adouni ve Cardoso, 2019).

$$P_{cop} = 3R_s I_{RMS}^2 \quad (3)$$

Denklem 3’te verilen R_s stator sargılarının iç direncini, I_{RMS} ise stator akımın RMS değerini temsil etmektedir. Sargı iç direncinin sıcaklığa bağlı değişimi Denklem 4’te ve bakır kayıplarının yeni hali ise Denklem 5’te verilmiştir (Adouni ve Cardoso, 2019).

$$R_s(T) = [1 + \alpha_{cop} (T - T_0)] R_s(T_0) \quad (4)$$

$$P_{cop}(T) = 3R_s(T_0) [1 + \alpha_{cop} (T - T_0)] I_{RMS}^2 \quad (5)$$

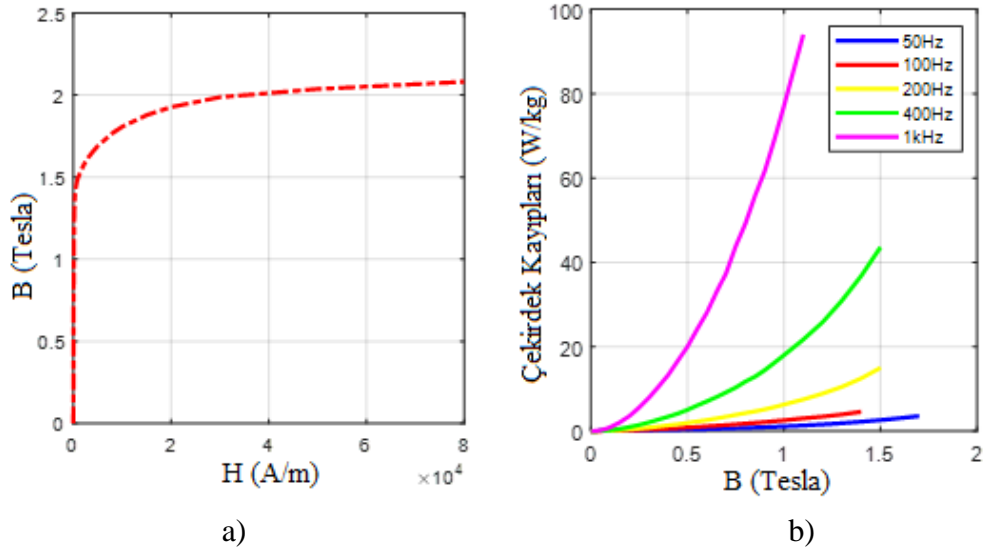
Denklem 5’ten görüleceği üzere stator sargılarında meydana gelen sıcaklık artışı sargı direncini artırmaktadır. Bu durum motorun en verimli çalıştığı hız-moment bölgesini değiştirirken, sargılarda meydana gelecek izolasyon arızaları ise çalışma esnasında ani duruşlara sebebiyet verecektir.

3. Bulgular

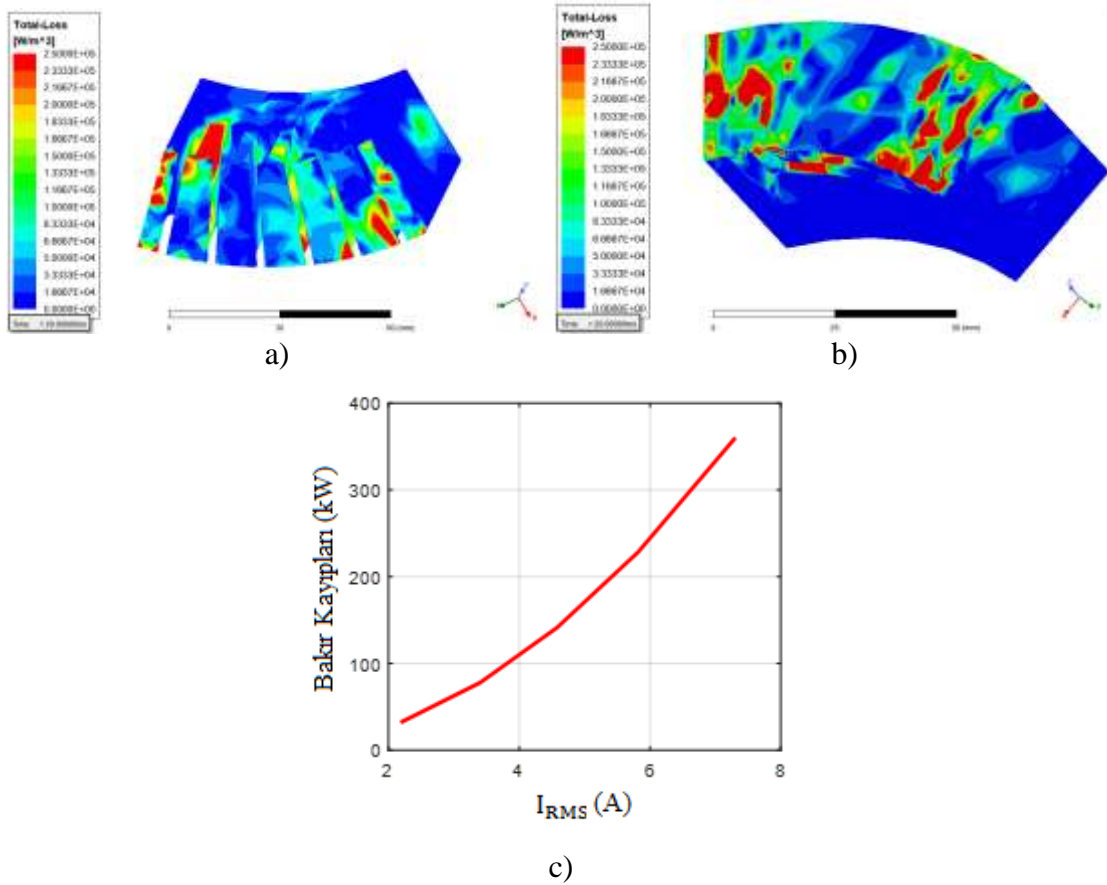
3D termal analiz ve deneysel çalışmalara ait bulgular alt bölümlerde detaylıca belirtilmiştir.

3.1. 3D Termal Analiz Sonuçları

Termal analiz sonuçlarının doğru sonuç verebilmesi için manyetik taraftaki kayıpların doğru şekilde termal analiz programına aktarılması gerekmektedir. Seçilen topolojinin manyetik tasarım, analiz ve kayıpların belirlenmesinde Ansys Maxwell programı kullanılmıştır (Gerçekcioglu ve Akar, 2021). Sabit akım kaynağı altında MTPA yöntemine göre sürülen motorun ferromanyetik malzemesinde kullanılan sacın manyetik özellikleri Şekil 2’de verilmiştir. Eğrilerden görüleceği üzere doyum noktasına yakın ve yüksek frekansta çalışacak olan motorda kayıplarda artmaktadır.



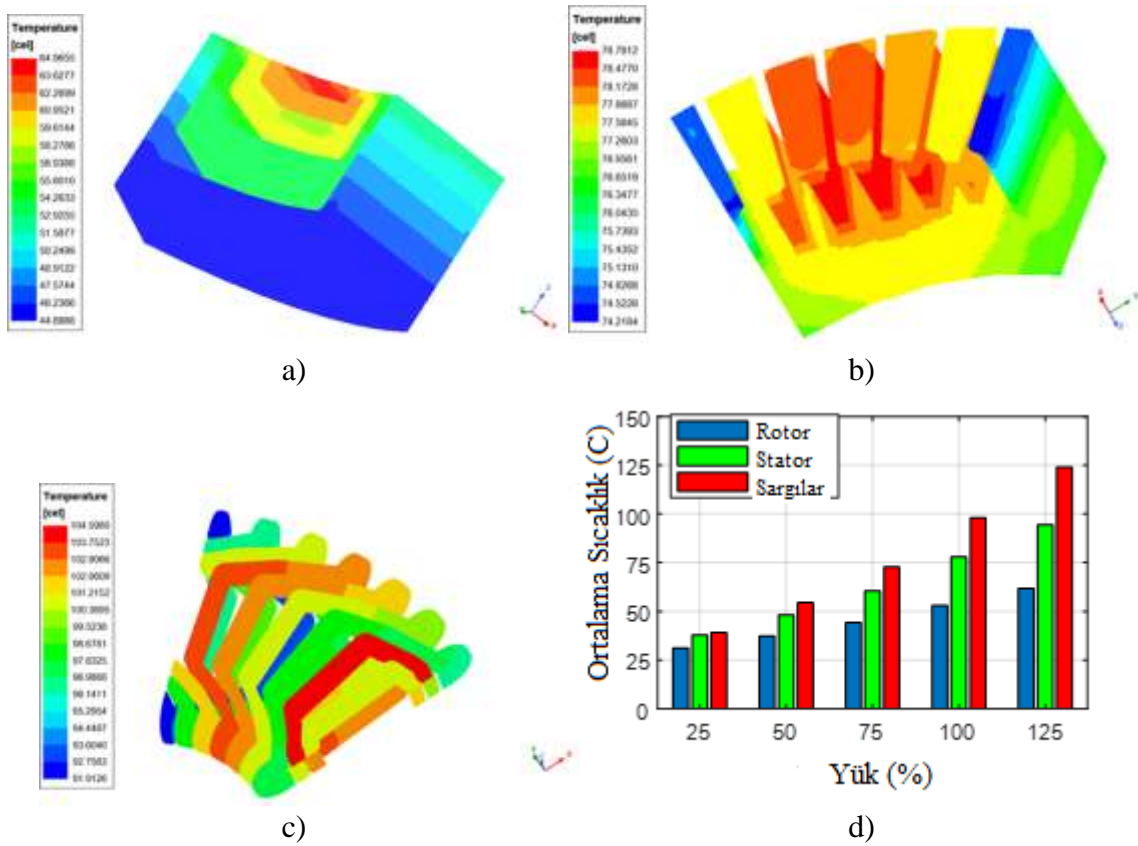
Şekil 2. 35JN300 Manyetik özellikleri a) B-H eğrisi b) Çekirdek kayıpları
 Figure 2. The Magnetic properties of 35JN300 gauge a) B-H curve b) The core loss density(W/kg)



Şekil 3. EA-SynRM kayıpları a) Stator kayıpları b) Rotor kayıpları c) Bakır kayıpları-
 Stator akımı (RMS)

Figure 3. The loss of the AF-SynRM a) The density of stator loss b) The density of rotor
 loss, c) The copper loss versus stator RMS current

Stator ve rotor kayıpları grafikleri incelendiğinde; Stator dişlerinin iç çapına yakın bölgelerinde daha yoğun kayıplar meydana gelirken, rotorda ise hava aralığına en yakın ve en ince bariyerlerde en fazla kayıp yaşandığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak bu bölgelerde meydana gelen manyetik doyumlar gösterilebilir. Aynı şekilde Denklem 5'te gösterildiği üzere, stator sargılarında meydana gelen bakır kayıpları yük ve buna bağlı olarak akım artışına sebep olmaktadır. Bu çalışmada, geometrik modelin aktarımı Ansys Maxwell programından yapılmıştır. EA-SynRM'nin kompleks yapısından ötürü termal analizde yapısal ağ kullanılmıştır. Motor termal modelinde 2926085 düğüm, 649589 yüzey ve 2773928 hücre yapısı kullanılmıştır. Ortam sıcaklığı 25 C° olarak belirlenmiştir. Sargının ısıtma gücü 206.98 Watt, stator ve rotorun toplam ısıtma gücü 30.4 Watt ve toplam EM kaybı 237.38 Watt'tır. Bu durumda yapılan analizlerde stator, rotor ve sargılarda meydana gelen sıcaklık dağılımı Şekil 4'te verilmiştir. İlgili grafiklerin daha net ve anlaşılır olması amacı ile gösterimde 1/8 motor modeli kullanılmıştır.



Şekil 4. EA-SynRM'nin 3D sıcaklık profilleri a) Rotor b) Stator c) Sargılar d) Ortalama sıcaklıkların yük ile değişimleri

Figure 4. The 3D models temperature profile of the AF-SynRM a) Rotor b) Stator c) Windings d) Average temperatures versus load levels

EA-SynRM'nin rotorunda herhangi bir sargı, kafes veya mıknatıs bulunmamaktadır. Şekil 4a'dan da görüleceği üzere tam yük altında en sıcak noktası, hava aralığına en yakın nokta olan bariyer olup 64.9 C° dir. Alt bariyerlere ve boyunduruğa doğru ilerledikçe rotor daha soğuk olup tam yük altında ortalama sıcaklığı 53 C° dir. Aynı şekilde statorunda en sıcak noktalar iç çapta kalan dişler olup tam yük altında en sıcak noktası 78.8 C° , ortalama sıcaklık ise yaklaşık 77.9 C° dir. EA-SynRM için asıl ısı kaynağı olan sargılarda ise sargı

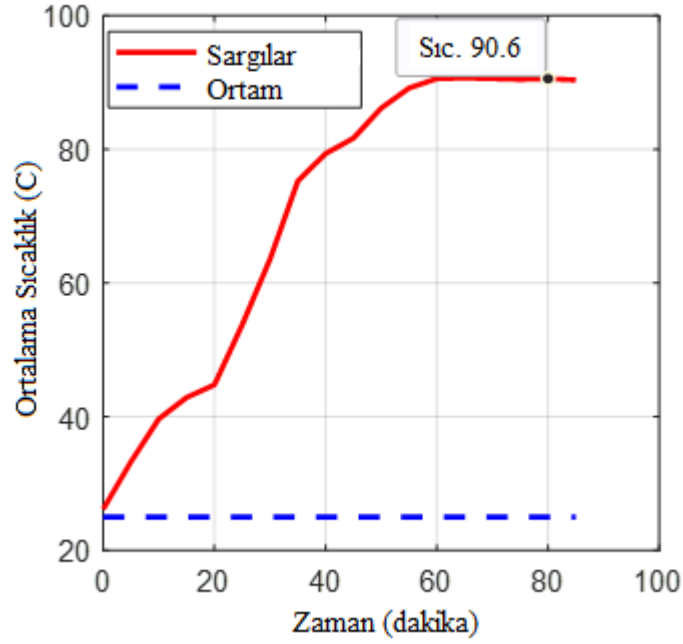
sonu kısımları daha sıcak olup tam yük altında maksimum sargı sıcaklığı 104.59 C° iken ortalama sargı sıcaklığı 98 C° dir. Şekil 4d’de yük durumuna göre ortalama sıcaklıklar görülmektedir. Görüleceği üzere yük seviyesinin artışı ile ortalama sıcaklıklar ve parçalar arasındaki sıcaklık farkı da artmaktadır.

3.2. Deneysel Çalışma

Deney düzeneği üzerinde yapılan ısınma deneyi IEC 60034-1 standartına uygun olarak yapılmıştır. Motor sıcaklığının izin verilen maksimum sıcaklık değerlerini aşması durumunda motor sargılarının motor gövdesiyle olan yalıtımını sağlayan yalıtkan malzeme zarar görebilir ve motor sargıları arasında kısa devrelere neden olabilir. EA-SynRM’ler için sıcaklıktan büyük ölçüde etkilenen kısımlar sargılardır. Sıcaklığın yükselmesiyle birlikte sargı direnci artmaktadır. Doğal soğutmalı olarak imal edilen EA-SynRM için ısı analizlerinden çıkarılan sonuçlara göre nominal çalışma sıcaklığının 96 C° civarı olması tahmin edilmektedir. IEC 60034-1 standardına göre yapılan ısınma deneyinde motorun belirli bir mil gücü ile yüklenmesi ve belirli aralıklarda sargı direncinin ölçülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Isınma deneyinde başlangıç koşulu motor iç sıcaklığının ortam sıcaklığı olarak kabul edilmesidir. Şekil 5’te test sistemi verilmiştir (Gerçekcioglu, 2021). Motor sargı sıcaklığının ölçümünde marka TS-6801A modeli sıcaklık ölçüm cihazı ve probu kullanılmıştır. Test sistemi ile ilgili detaylı bilgi önceki çalışmalardan bulunabilir (Gerçekcioglu ve Akar, 2021). Şekil 6 incelendiğinde deneysel ve SEY sonuçları arasında yaklaşık %10’luk bir sapma olduğu görülmektedir (Gerçekcioglu, 2021). Bu sapmanın nedeni SEY ortamında yapılan modellemede kabul edilen çözücü ayarları, ağ yapısı ile deneysel çalışmada tek bir sargıdan ölçüm almak gösterilebilir.



Şekil 5. Deneysel test düzeneği
Figure 5. The experimental test bench



Şekil 6. EA-SynRM'nin seçilen parçasının sıcaklık artışının deneysel sonuçları
Figure 6. The experimental results of the temperature rising of the selected part of the AF-SynRM

4. Sonuç

Bu çalışmada yapısal ve manyetik olarak optimize edilmiş ve deneysel olarak doğrulanmış yeni bir rotor topolojisi içeren EA-SynRM'nin termal analizi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan 3D SEY modeli ile farklı yük durumlarında motorda meydana gelen bakır, çekirdek ve aşırı kayıplar 3D termal modele aktarılmıştır. Bu kayıpların motor sargı, stator ve rotor üzerinde meydana getirdiği ısı dağılımları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek sıcaklık noktası sargı sonlarında olmuştur. Prototip üzerinden yapılan deneysel çalışmada ise tam yük altında alınan sıcaklık değerleri ile SEY analiz sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. EA-SynRM için ilk defa yapılan bu çalışma araştırmacı ve tasarımcılara yol gösterici olacaktır.

5. Teşekkür

Bu çalışma, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından proje numarası 2020/41 ile desteklenmiştir.

6. Kaynaklar

- Adouni, A., Cardoso, A. J. M., 2019. Thermal analysis of synchronous reluctance machines—A review. *Electric Power Components and Systems*, 47(6-7), 471-485.
- Bertotti, G., 1988. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, 24, 621-630.
- Boglietti, A., Cavagnino, A., Lazzari, M., Pastorelli, A., 2002. A simplified thermal model for variable speed self cooled industrial induction motor. In *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No. 02CH37344)*. 2,723-730.

- Boglietti, A., Cavagnino, A., Pastorelli, M., Staton, D., Vagati, A., 2006. Thermal analysis of induction and synchronous reluctance motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(3), 675-680.
- Elhomdy, E., Liu, Z., Li, G., 2019. Thermal and mechanical analysis of a 72/48 switched reluctance motor for low-speed direct-drive mining applications. *Applied Sciences*, 9(13), 2722.
- Fasquelle, A., 2007. Contribution to multi-physics modeling: electro-vibro-acoustic and aerothermal traction machines. Ph.D. dissertation, Doctoral school SPI 072 (Lille I, Lille III, Artois, ULCO, UVHC, EC Lille), France.
- Fernández-Bernal, F., García-Cerrada, A., Faure, R., 1999. Model-based loss minimization for DC and AC vector controlled motors including core saturation. *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370)*, 3, 1608-1615 vol.3.
- Gerçekcioglu, H. S., 2021. Eksenel Akıllı Senkron Relüktans Motor Tasarımı, Prototip Üretimi ve Testleri. Doktora Tezi, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tokat.
- Gerçekcioglu, H. S., Akar, M., 2021. Optimal rotor design of novel axial flux synchronous reluctance motor and validation. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(5), e12866.
- Ghahfarokhi, P.S., Kallaste, A., Belahcen, A., Vaimann, T., Rassõlkin, A., 2018. Hybrid thermal model of a synchronous reluctance machine. *Case Studies in Thermal Engineering*, 12, 381-389.
- Jokinen, T., Hrabovcova, V., Pyrhonen, J., 2013. Design of rotating electrical machines. John Wiley & Sons. ISBN 978-1-118-58157-5.
- Kim, J.C., Lee, J., Jung, I., Hyun, D., 1998. Vector control scheme of synchronous reluctance motor considering iron core loss. *IEEE Transactions on Magnetics*, 34, 3522-3527.
- Lindström, J., 1999. Thermal Model of a Permanent-Magnet Motor for a Hybrid Electric Vehicle. Chalmers University of Technology, Internal report, Goteborg.
- Mahmoudi, A., Kahourzade, S., Roshandel, E., Soong, W. L., 2020. Axial-flux synchronous reluctance motors: Introduction of a new machine. In *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 1-6.
- Mellor, P. H., Roberts, D., Turner, D. R., 1991. Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design. In *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*. IET Digital Library. 138(5), 205-218.
- Rehman, Z., Seong, K., 2018. Three-D numerical thermal analysis of electric motor with cooling jacket. *Energies*, 11(1), 92.
- Wu, H., Depernet, D., Lanfranchi, V., 2017. Comparison of Torque Ripple Reductions and Copper Losses of Three Synchronous Reluctance Machines. *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 1-6.
- Xu, L., Yao, J., 1991. A compensated vector control scheme of a synchronous reluctance motor including saturation and iron losses. *Conference Record of the 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1, 298-304.
- Yamazaki, K., Fukushima, N., 2010. Iron-Loss Modeling for Rotating Machines: Comparison Between Bertotti's Three-Term Expression and 3-D Eddy-Current Analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46, 3121-3124.