



Hibrit Yapılı Rotor Sargısının Asenkron Motor Verimliliği ve Performansı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Cemil Ocak^{1*}, Burak Yenipınar²

^{1*} Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0001-6542-6350), cemilocak@gazi.edu.tr

² OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0002-5997-944X), burak.yenipinar@ostimteknik.edu.tr

(3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications June 11-13, 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.949133)

ATIF/REFERENCE: Ocak, C. & Yenipınar, B. (2021). Hibrit Yapılı Rotor Sargısının Asenkron Motor Verimliliği ve Performansı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (26), 242-246.

Öz

Alüminyum kısa devre kafesli rotora sahip asenkron motorlar, basit yapıları ve düşük maliyetleri (bakır enjeksiyona karşılık alüminyum enjeksiyon prosesi) sebebiyle endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte artan verimlilik ihtiyacını karşılamak için alınacak diğer tedbirlerle birlikte rotor sargı kayıplarının azaltılması üzerinde önemle durulması gerek bir konudur. Fakat rotor sargısının iletkenliği ve geometrisi motorun şebekeden kalkış performansını önemli ölçüde değiştirmekte, anma verimliliği arttırmak adına sadece rotor sargı direncinin azaltılması çoğu zaman kabul edilemeyecek derecede yüksek kalkış akımlarına sebep olmaktadır. İfade edilen gerekçeler doğrultusunda bu çalışmada alüminyum ve bakır iletkenleri içeren hibrit yapılı yeni bir rotor sargısının motor verimliliğine ve performansına etkileri incelenmiştir. Hibrit yapılı rotor sargısı toplam rotor oluk kesit alanının %75'i alüminyum, %25'i ise bakır iletkenle meydana gelecek biçimde tasarlanmıştır. Çalışmadaki hibrit yapılı rotor sargısında, bakır enjeksiyonun yüksek maliyeti sebebi ile, rotor oluklarına konumlandırılan bakır baralar üzerine alüminyum enjeksiyon gerçekleştirilmesi öngörülmüştür. Çalışmada incelenen hibrit yapılı rotor sargısına sahip asenkron motor aynı zamanda tamamen alüminyum ve bakır rotor sargısına sahip tasarımlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada üç farklı rotor yapısının motor verimi, güç faktörü, anma hızlarına ulaşma profilleri ve kalkış momentleri sonlu eleman analizleri (SEA) yardımıyla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre alüminyum, bakır ve hibrit yapılı rotor iletkenlerine sahip motorların verimlilikleri sırasıyla %93,6, %94,6 ve %94,2 olarak elde edilmiştir. Anma geriliminde kalkış momentleri ise sırasıyla 179,03Nm, 154,94Nm ve 186,75Nm olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron Motor, Enerji Verimliliği, Alüminyum Kafes, Bakır Kafes, Hibrit Rotor Sargısı.

Investigation of the Effects of Hybrid-Structured Rotor Windings on Efficiency and Performance of Induction Motor

Abstract

Induction motors with aluminum squirrel cage rotors are widely preferred in the industry due to their simple structure and low cost (copper injection versus aluminum injection process). However, it is an issue that should be emphasized on reducing the rotor winding losses together with other measures to be taken to meet the increasing efficiency need. However, the conductivity and geometry of the rotor winding significantly changes starting performance of the motor fed from the mains, and the reduction of the rotor winding resistance in order to increase the rated efficiency often causes unacceptably high starting currents. In line with the stated reasons, in this study, the effects of a new hybrid rotor winding containing aluminum and copper conductors on motor efficiency and performance have been investigated. Hybrid structured rotor winding is designed to consist of 75% aluminum and 25% copper conductor of the total rotor slot cross section area. In the hybrid rotor winding in the study, due to the high cost of copper injection, aluminum injection was performed on the copper bar that positioned in the rotor slots. Induction motor with hybrid structure rotor winding examined in the study was also compared with designs with completely aluminum and copper rotor windings. In the study, motor efficiency, power factor, profiles of reaching rated speeds and starting torques of three different rotor structures are presented comparatively with the help of finite element analysis (SEA). According to the analysis results, the efficiency of motors with aluminum, copper and hybrid rotor conductors was 93.6%, 94.6% and 94.2%, respectively. The starting torques at rated voltage were obtained as 179.03Nm, 154.94Nm and 186.75Nm, respectively.

Keywords: Induction Motor, Energy Efficiency, Aluminum Cage, Copper Cage, Hybrid Rotor Winding.

* Sorumlu Yazar: Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Ankara, Türkiye, ORCID: 0000-0001-6542-6350, cemilocak@gazi.edu.tr

1. Giriş

Elektrik motorlarının elektrik tükemimindeki payı dikkate alındığında, toplam tüketim içerisinde enerji verimliliği arttırmanın başlıca yollarından biri de elektrik motorlarının verimliliğini arttırmaktır [1,2]. Avrupa Birliği Enerji Komisyonu tarafından yayınlanan regülasyonlara göre elektrik motorlarının verimlilik seviyeleri gün geçtikçe arttırılmaktadır. Daha önce yayınlanan 640/2009 nolu regülasyon [3] tariflerine uyan asenkron motorlarda minimum verimlilik seviyesi IE3 olarak belirtilmiş ve IE2 verimliliğe sahip asenkron motorların sadece değişken hızlı motor sürücülerini ile kullanılabilmesi ifade edilmiştir. 1 Temmuz 2021 tarihi itibarıyla mevcut regülasyon yerine 2019/1781 nolu regülasyon [4] yürürlüğe girecektir. Bu tarihten itibaren Avrupa Birliği ülkeleri içerisinde regülasyon kapsamına giren motorlar genişletilmekte ve IE2 verimlilik sınıfına ve regülasyon tanımına giren asenkron elektrik motoru üretimi ve satışı tamamen yasaklanmış olacaktır. Aynı regülasyona göre Temmuz 2023 itibarıyla kapsam daha da genişletilerek 75kW ve 200kW aralığındaki tarife uyan asenkron motorların minimum IE4 verimlilik sınıfına sahip olması gerekecektir. Türkiye'nin de ilgili regülasyonları benzer takvimlerde uygulamaya başlayacağı değerlendirilmektedir. Regülasyonlarla birlikte artan verimlilik sınıfına uyum için asenkron motor üreticileri mevcut tasarımlarını revize ederek veya yeni tasarımlar gerçekleştirerek kayıpları azaltmaya dolayısı ile verimlilik sınıflarını yükseltmeye çalışmaktadırlar.

Asenkron motorlara alternatif olarak yüksek verimleri sebebiyle Sürekli Miknatıslı Senkron Motor (SMSM) ve Senkron Relüktans Motorların (SRM) popüleritesi son yıllarda artmaktadır [5-7]. Fakat her iki motor türünün de sadece motor sürücü ile birlikte çalışabilmesi, maliyet açısından en büyük problemdir. Bu sebeple sabit hız ve doğrudan şebekeden çalışan motor uygulamalarında kullanımları sınırlıdır. Asenkron motorları uluslararası standartlara ve Avrupa Birliği Direktiflerinin gerektirdiği verimlilik seviyesine çıkartmak için literatürde önemli çalışmalara [1, 2, 8-12] yer verilmiştir. Çalışmalar temel olarak motorun paket boyunu uzatarak kayıpların azaltılmasına yoğunlaşmış olsa da, bu durum genellikle IE2 verim seviyesinden IE3 verim seviyesine ulaşmak için tercih edilir. Artan verimlilik sınıfı için ihtiyaç duyulan tasarım değişiklikleri önemli ölçüde maliyet yükünü de beraberinde getirdiğinden alternatif tasarım çalışmalarına duyulan ilgi her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmalar çoğunlukla, optimum sarım konfigürasyonu [10], motorun aktif hacminin arttırılması [1], daha düşük kayıplı fan kullanılması [12], düşük kayıplı nüve malzemesi kullanılması [13], geometrik optimizasyon [14,15] ve rotor iletken malzemesi olarak alüminyum yerine bakır kullanımı [9, 11] olarak öne çıkmaktadır. Bakır rotorlu asenkron motorların sunduğu azaltılmış rotor sargı kayıpları sayesinde, alüminyum rotorlu asenkron motorlara göre verimlerinin genellikle %1-%2 daha yüksek olduğu bilinmektedir [11]. Alüminyum kısa devre kafesli rotora sahip asenkron motorlar, basit yapıları ve düşük maliyetleri (bakır enjeksiyona karşılık alüminyum enjeksiyon prosesi) sebebiyle endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir [2]. Bununla birlikte artan verimlilik ihtiyacını karşılamak için alınacak diğer tedbirlerle birlikte rotor sargı kayıplarının azaltılması üzerinde önemle durulması gerek bir konudur. Fakat rotor sargısının iletkenliği ve geometrisi motorun şebekeden kalkış performansını önemli ölçüde değiştirmekte, anma verimliliği arttırmak adına sadece rotor sargı direncinin

azaltılması çoğu zaman kabul edilemeyecek derecede yüksek kalkış akımlarına sebep olmaktadır.

İfade edilen gerekçeler doğrultusunda bu çalışmada alüminyum ve bakır iletkenleri içeren hibrit yapılı yeni bir rotor sargısının motor verimliliğine ve performansına etkileri incelenmiştir. Hibrit yapılı rotor sargısı toplam kesit alanının %75'i alüminyum, %25'i ise bakır iletken meydana gelmektedir. Çalışmadaki hibrit yapılı rotor sargısında, bakır enjeksiyonun yüksek maliyeti sebebi ile, rotor oluklarına konumlandırılan bakır baralar üzerine alüminyum enjeksiyon gerçekleştirilmesi öngörülmüştür. Çalışmada incelenen hibrit yapılı rotor sargısına sahip asenkron motor aynı zamanda tamamen alüminyum ve bakır rotor sargısına sahip tasarımlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada üç farklı rotor yapısının motor verimi, güç faktörü, anma hızlarına ulaşma profilleri ve kalkış momentleri sonlu eleman analizleri (SEA) yardımıyla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1. Referans Asenkron Motor Modeli ve Özellikleri

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan tipik bir asenkron motorun kayıpları [1] aşağıdaki Tablo 1' de verildiği gibi ayrıştırılabilir.

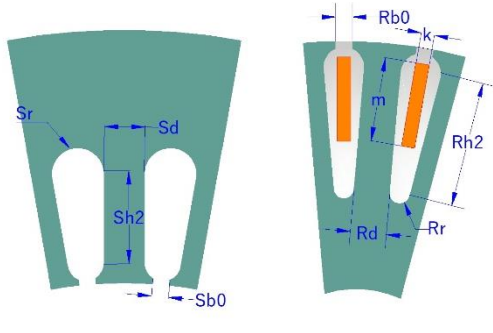
Tablo 1. Tipik Bir Asenkron Motorun Kayıpları

Kayıp Türü	Toplam Kayıp İçindeki Oranı	Kayıp Türü	Toplam Kayıp İçindeki Oranı
Stator Sargı Kayıpları	%25-%45	Rüzgâr ve Sürtünme Kayıpları	%5-%15
Rotor Sargı Kayıpları	%15-%25	Ek Kayıplar	%5-%20
Nüve Kayıpları	%20-%35		

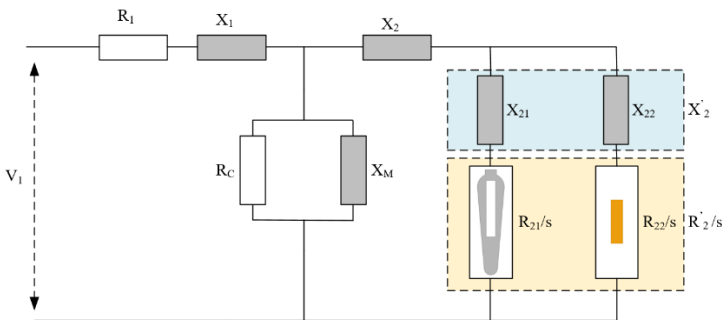
Tablo 1'de verildiği üzere endüstriyel uygulamalarda kullanılan tipik bir asenkron motorun rotor kayıplarının toplam motor kayıplarının %15-%25'ini oluşturduğu görülmektedir. Alınacak diğer tedbirlere ek olarak rotor sargı kayıplarını azaltarak motor verimi yükseltmek için üç farklı rotor yapısı üzerinde sonlu eleman analiz çalışması gerçekleştirilmiş ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bunlar sırasıyla, alüminyum rotor, bakır rotor ve bakır-alüminyum hibrit rotor yapısıdır. Asenkron motorların rotorunda alüminyum kullanılması bakır rotor kullanılmasına göre daha erişilebilir bir proses olmakla birlikte daha ekonomik bir çözümdür. Bakır enjeksiyon yönteminin zor olması [16] sebebiyle içerisinde bakır bara barandıran ve alüminyum enjeksiyon uygulanan alüminyum-bakır hibrit rotor sargı yapısının motor performansı üzerine etkisi incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tasarımda kullanılan asenkron motor 160 gövde büyüklüğünde olup, 15kW gücünde 4 kutuplu standart bir asenkron motordur. Tasarlanan referans asenkron motorun temel özellikleri ve sarım bilgileri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Asenkron motorun özellikleri

Temel Motor Özellikleri		Stator ve Rotor Oluk Ölçüleri	
Stator Dış Çap (mm)	240	Sb0 (mm)	2.1
Stator İç Çap (mm)	140	Sd (mm)	5
Rotor Dış Çap (mm)	139	Sr (mm)	3.9
Rotor İç Çap (mm)	50	Sh2 (mm)	23
Nüve Uzunluğu (mm)	200	Rb0 (mm)	2.5
Stator Oluk Sayısı	48	Rd (mm)	5.5
Rotor Oluk Sayısı	36	Rh2 (mm)	18
Anma Gerilimi (V)	400	Rr (mm)	1.5
Anma Frekansı (Hz)	50	k (mm)	2
Anma Gücü (kW)	15	m (mm)	12.5
Kutup Sayısı	4	Kayk (°)	10
Stator Sarmı Bilgisi			
Sargı Tipi	Tam Kalıp		
Sipir Sayısı	42		
Paralel Kol Sayısı	2		
Bağlantı Tipi	Üçgen		
Adım Sayısı	10		
Stator ve Rotor Geometrisi			



Asenkron motorun analizleri gerçekleştirilirken, rotor parametrelerinin statora aktarıldığı tek faz eşdeğer devresi kullanılır. Hibrit yapıdaki asenkron motorun tek faz eşdeğer devresi Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Hibrit yapıdaki asenkron motorun tek faz eşdeğer devresi

Şekil 1’de verilen tek faz eşdeğer devrede, V_1 faz gerilimini, s kaymayı, R_1 ve X_1 stator direnci ve kaçak reaktansını, R_c nüve kayıplarını, X_m mıknatıslanma reaktansını, R_{21} ve X_{21} alüminyum bara ait direnç ve kaçak reaktansın stator aktarılmış değerini, R_{22} ve X_{22} bakır bara ait direnç ve kaçak reaktansın stator aktarılmış değerini ifade etmektedir.

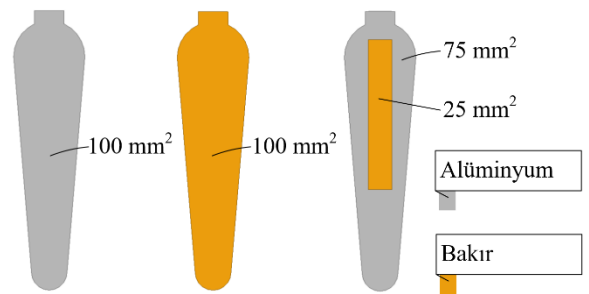
Asenkron motorlar yük altında kalkış yapabilme kabiliyetleri sebebiyle birçok uygulamada tercih edilmektedir. Bu sebeple kalkış momenti asenkron motorlar için önemli bir performans parametresidir. Asenkron motorun kalkış momenti ifadesi Denklem (1) yardımı ile bulunur [17]:

$$M_{kalkış} = \frac{3V_1^2 R_2'}{\omega_0 s \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (1)$$

Verilen Denklem (1)’de R_1 ve R_2' stator ve toplam rotor faz direncini, X_2 ve X_2' stator ve toplam rotor kaçak reaktansını, ω_0 senkron motor hızını ifade etmektedir. Eşitlikte görüldüğü üzere asenkron motorun kalkış momenti rotor direnci ve reaktansı ile ilişkilidir. Bununla birlikte, rotor direnci kullanılan rotor sargısının iletkenliğine ve toplan kesit alanına, rotor kaçak reaktansı ise rotor oluk geometrisine ve oluk derinliğine bağlı olarak değişmektedir. Yüksek rotor direnci iyi bir kalkış momenti sunsa dahi, kayma değerini artırarak motorun anma verimliliğini düşürmektedir. Diğer taraftan düşük rotor direnci kaymayı azaltıp yüksek anma verimliliği sunarken, düşük kalkış momenti sağlamaktadır. Sonuç olarak, kayma, anma verimliliği ve kalkış momenti arasında optimal bir denge yakalanmalıdır. İncelenen hibrit yapı ile rotor iletkenliğinin artırılarak anma verimin artırılması, bununla birlikte kalkış momentinin ise düşmemesi amaçlanmıştır.

2.2. Farklı Rotor Sargı Yapılarının İncelenmesi

Yapılan çalışmada üç farklı rotor sargı yapısının motor performansına etkisi incelenmiştir. Hibrit yapıdaki rotor sargısı toplam kesit alanının %75’i alüminyum, %25’i ise bakır iletkenlerden meydana gelmektedir. Çalışmadaki hibrit yapıdaki rotor sargısında, bakır enjeksiyonun yüksek maliyeti sebebi ile, rotor oluklarına konumlandırılan bakır baralar üzerine alüminyum enjeksiyon gerçekleştirilmesi öngörülmüştür. Kullanılan rotor sargı yapılarının ilkinde kısa devre kafesi tamamen alüminyum iletkenlerden oluşurken, ikincisinde kısa devre kafesi tamamen bakır iletkenlerden oluşmaktadır. Üçüncü rotor yapısı ise bakır ve alüminyum malzemelerin birlikte kullanıldığı hibrit yapıdır. Hibrit yapıda rotor barının toplam kesit alanının %25’i Şekil 2’deki gibi konumlandırılan dikdörtgen bakır baradan oluşmakta, kafesi oluşturan diğer kısımlar ise alüminyumdan oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan rotor geometrileri Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Kullanılan rotor geometrileri, alüminyum (solda), bakır(ortada) ve hibrit(sağda)

Rotorda kullanılan iletken malzemelerinin özellikleri Tablo 3’de sunulmuştur.

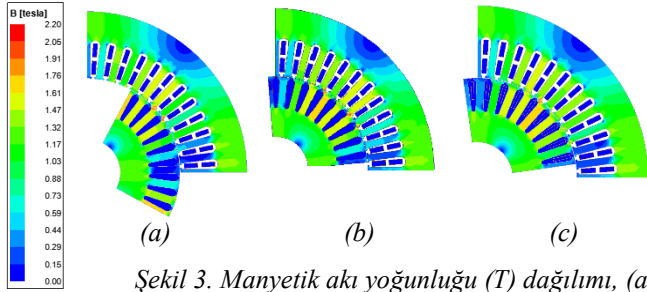
Tablo 3. Alüminyum ve bakır sargı malzemelerine ait özellikler

	Alüminyum	Bakır
İletkenlik (S/m)	33000000	58000000
Erime Noktası (°C)	660	1084
Termal İletkenlik (W.m ⁻¹ /°C)	205	401
Yoğunluk (kg.m ⁻³)	2712	8940

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

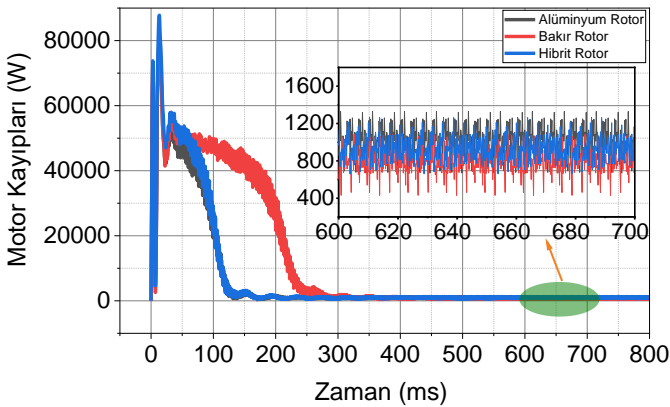
3.1. Sonlu Eleman Analizleri

Bu bölümde alüminyum, bakır ve hibrit rotorlu asenkron motorun geçici durum SEA sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yapılan üç farklı analizde de motorun yalnızca rotoru değiştirilmiştir. Her üç tasarımda rotor sargılarına ait direnç değerlerinin farklı oluşu, farklı kayma değerlerinin elde edilmesine sebep olmaktadır. Bununla birlikte özellikle rotor akı yoğunlukları arasındaki olası farklılıklar incelenmiştir. Farklı rotor yapılarına ait motorların manyetik akı yoğunluğu dağılımları Şekil 3’de sunulmuştur.



Şekil 3. Manyetik akı yoğunluğu (T) dağılımı, (a) Alüminyum rotor, (b) Bakır rotor, (c) Hibrit rotor

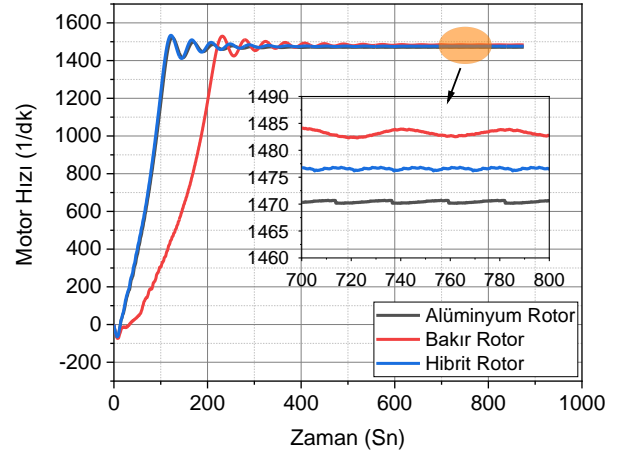
Oluk ağızlarındaki kısmi doyum noktaları dışında üç motorda en yüksek manyetik akı yoğunluğu değerinin 1,6T seviyelerinde olduğu görülmektedir. Rotor pozisyonları arasındaki fark, her motorun farklı kayma değerlerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Üç motorun kalkış anından 800 ms’ye kadar gerçekleştirilen geçici durum analizi sonucunda toplam motor kayıplarının değişimi Şekil 4’de verilmiştir.



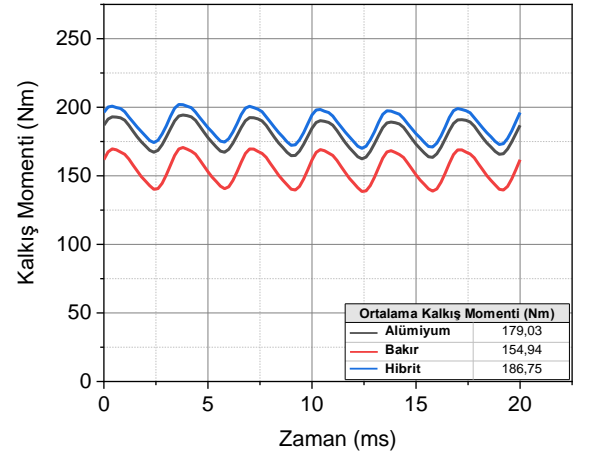
Şekil 4. Anma şartlarında motorun toplam kayıplarının değişimi

600-700 ms arasındaki kayıpların ortalama değeri karşılaştırıldığında, alüminyum rotorlu motor 1025 W, bakır rotorlu motorun 856 W ve hibrit rotorlu motor ise 923 W toplam kayba sahiptir. Aradaki fark rotor sargı kayıpları arasındaki fark olarak ifade edilir. Rotor direncinin ve rotor geometrisine dayalı rotor kaçak reaktansının asenkron motorun anma yükündeki kaymasına ve kalkış momenti üretme kabiliyetine etkisi

incelenmiş ve Şekil 5’de analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 5. SEA sonuçları, (a) Anma yükünde rotor hızları, (b) Kalkış momenti analizi (Kilitli Rotor)

Analizleri gerçekleştirilen üç farklı asenkron motorun SEA sonuçları aşağıdaki Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. SEA sonuçları

Malzeme	Alüminyum	Bakır	Hibrit
Motor Hızı (1/dk)	1470	1483	1476
Verim (%)	93,6	94,6	94,2
Güç Faktörü	0.89	0.88	0.89
Kalkış Momenti (Nm)	179,03	154,94	186,75

Yapılan analizler sonucunda asenkron motorun rotorunda alüminyum kullanıldığında kalkış momentinin bakır rotorlu asenkron motordan 24,09 Nm daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı zamanda alüminyum rotorlu motorun anma şartlarındaki kaymasının bakır rotorlu motorun kaymasından 13 devir daha fazladır. Alüminyum ve bakırdan meydana gelen hibrit rotorlu motorun sonuçları incelendiğinde ise, kalkış momentinin alüminyum rotorlu asenkron motordan daha yüksek olarak elde edilmiştir. Denklem (1)’de verildiği gibi asenkron motorun kalkış momenti rotor direnci ve reaktansı ile ilişkilidir ve kalkış momentini arttırmak için rotor direncini arttırmak ve derin rotor olukları kullanmak yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ancak hibrit rotora sahip motorda, rotor direncinin alüminyum rotorlu

motora göre daha düşük olmasına rağmen deri etkisiyle kaçak reaktansı olumlu yönde etkilemiş ve kalkış momentinin daha yüksek olmasını sağlamıştır. Böylelikle hibrit rotorlu yapıda sargı direncinin azaltılması kaymanın azalması ile sonuçlanırken, motorun kalkış performansı olumsuz etkilenmemiştir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, 400V 50 Hz şebeke geriliminde çalışan 4 kutuplu 15 kW anma gücünde bir asenkron motorun üç farklı rotor oluk yapısında analizleri gerçekleştirilmiştir. Alüminyum, bakır ve %25'i bakır %75'i alüminyum olmak üzere hibrit rotora sargısına sahip üç farklı motorun anma noktalarındaki ve kalkış anındaki analiz sonuçları sunulmuştur. Anma şartlarındaki yapılan SEA analizleri sonucunda alüminyum, bakır ve hibrit rotora sahip motorun verimi sırasıyla %93.6, %94.6 ve %94.2 olarak elde edilmiştir. Rotor direnci ile orantılı olarak alüminyum, hibrit ve bakır rotora sahip motorun kaymaları ise sırasıyla 30 devir, 24 devir ve 17 devir olduğu görülmüştür. Yapılan analiz çalışmasının sonucunda anma noktasındaki kayma değerinin rotor direnci ile orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Motorun kalkış performansını gözlemlemek için yapılan analiz sonuçları incelendiğinde hibrit rotora sahip motorun en yüksek kalkış momentini üretmektedir. Hibrit rotorun direncinin alüminyum rotorun direncinden daha yüksek olmasına rağmen, hibrit rotorun geometrisinden kaynaklı olarak rotor kaçak reaktansını değiştirmesi sonucunda motorun kalkış momentinde iyileşme meydana getirmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, asenkron motorun verimliliğini arttırmak için yeni bir hibrit rotor yapısı ile rotor kayıpları azaltılarak motor verimi alüminyum sargılı motora kıyasla %0,6 oranında artırılmıştır. Önerilen yöntem ile bakır enjeksiyon gibi yüksek maliyetli proseslere ihtiyaç olmaksızın asenkron motorların verimliliğinin artırılabilirliği ve kalkış performansının ise olumsuz etkilenmeyeceği değerlendirilmektedir.

Kaynakça

[1] Agamloh, E. B., & Cavagnino, A. (2013, March). High efficiency design of induction machines for industrial applications. In 2013 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD) (pp. 33-46). IEEE.

[2] Jia, S., Zhang, P., Liang, D., Dai, M., & Liu, J. (2019, August). Design and Comparison of Three Different Types of IE4 Efficiency Machines. In 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (pp. 1-4). IEEE.

[3] Commission Regulation (EC) No 640/2009. (22 July 2009). Implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for electric motors.

[4] Commission Regulation (EC) No 1781/2019 (2019). Laying down ecodesign requirements for electric motors and variable speed drives pursuant to Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council, amending Regulation (EC) No 641/2009 with regard to ecodesign requirements for glandless standalone circulators and glandless circulators integrated in products and repealing Commission Regulation (EC) No 640/2009.

[5] Heidari, H., Rassölkin, A., Kallaste, A., Vaimann, T., Andriushchenko, E., Belahcen, A., & Lukichev, D. V. (2021). A Review of Synchronous Reluctance Motor-Drive Advancements. *Sustainability*, 13(2), 729.

[6] Liu, Z., Hu, Y., Wu, J., Zhang, B., & Feng, G. (2021). A Novel Modular Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor. *IEEE Access*, 9, 19947-19959.

[7] Jurca, F. N., Inte, R., & Martis, C. (2020). Optimal rotor design of novel outer rotor reluctance synchronous machine. *Electrical Engineering*, 102(1), 107-116.

[8] Seo, U. J., Kim, D. J., Chun, Y. D., & Han, P. W. (2020). Mechanical Cutting Effect of Electrical Steel on the Performance of Induction Motors. *Energies*, 13(23), 6314.

[9] Liu, Y., Han, P., & Bazzi, A. M. (2015, September). A comparison of rotor bar material of squirrel-cage induction machines for efficiency enhancement purposes. In 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe) (pp. 1-7). IEEE.

[10] Zhang, L., Huang, Y., Dong, J., Guo, B., & Zhou, T. (2014, October). Stator winding design of induction motors for high efficiency. In 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (pp. 130-134). IEEE.

[11] Malinowski, J., McCormick, J., & Dunn, K. (2004). Advances in construction techniques of AC induction motors: Preparation for super-premium efficiency levels. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(6), 1665-1670.

[12] Roffi, M., Ferreira, F. J., & De Almeida, A. T. (2017, May). Comparison of different cooling fan designs for electric motors. In 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC) (pp. 1-7). IEEE.

[13] Kartigeyan, J., & Ramaswamy, M. (2017). Effect of material properties on core loss in switched reluctance motor using non-oriented electrical steels. *Journal of Magnetism*, 22(1), 93-99.

[14] Lee, G., Min, S., & Hong, J. P. (2013). Optimal shape design of rotor slot in squirrel-cage induction motor considering torque characteristics. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(5), 2197-2200.

[15] Tutelea, L., & Boldea, I. (2010, May). Induction motor electromagnetic design optimization: Hooke Jeeves method versus genetic algorithms. In 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (pp. 485-492). IEEE.

[16] Mechler, G. C. (2010). Manufacturing and cost analysis for aluminum and copper die cast induction motors for GM's powertrain and R&D divisions. Massachusetts Institute of Technology: Cambridge, MA, USA.

[17] Pejovski, D., & Velkovski, B. (2016). Calculation of induction motor starting parameters using MATLAB. *Infoteh Jahorina*, 15, 879-884.