

Endüstriyel Uygulamalarda Kullanılan Asenkron Motorlarda IE2 Verim Sınıfından IE4 Verim Sınıfına Geçiş Amaçlı Bir Çalışma

Çağlar ACAR¹, Osman Can SOYGENÇ², Lale T. ERGENE²

¹Elektrik Motorları İşletmesi, Arçelik A.Ş. Tekirdağ, Türkiye
acarcağlar@arcelik.com

²Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Elektronik Fakültesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
soygenç@itu.edu.tr ergenel@itu.edu.tr

(Geliş/Received: 23.03.2018; Kabul/Accepted: 03.09.2018)

Özet

Dünya üzerinde artan nüfus büyüme oranları, insan ihtiyaçlarında artışa neden olmaktadır. Büyüyen ihtiyaçlar ile beraber, sanayiden beklentiler de artmaktadır. Tüm bu artışlar ile beraber insanoğlu gün geçtikçe daha fazla enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Artan enerji talebi ise petrol, doğal gaz, kömür vb. fosil yakıt tüketimlerinin artmasıyla karşılanabilmektedir. Endüstriyel ortamda enerji tüketimi incelendiğinde ise bu tüketimin azımsanmayacak bir kısmının elektrik motorları ve motor sistemleri tarafından tüketildiği görülmektedir. Bu motorlar içerisinde ise asenkron motorlar büyük yer kaplamaktadır. IEC, NEMA, TSE standartları ve yönetmelikleri ile, asenkron motor verimlilikleri üzerine birçok düzenleme getirilmektedir. Avrupa birliği ve Türkiye standartları; 01.01.2017'den itibaren üretilen 0,75 kW ve üzeri motorlarda minimum IE3 verim sınıfını zorunlu tutmaktadır. Bu çalışma içerisinde asenkron motor verimini artırmak üzerine kullanılacak tasarımsal yöntemler incelenmiş ve seçilen bazı yöntemler referans motora uygulanarak performansa dair sonuçlar ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Asenkron Motorlar, Verim, Kayıp Analizi, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Verim Sınıfları

A Study on passing from IE2 to IE4 Efficiency Class in Induction Motors Used in Industrial Applications

Abstract

Increasing human population results in increasing human needs and energy demand. The expectations from industry are growing as a consequence. More energy consumption cause increase in the usage of coal, oil, natural gas. Higher consumption of fossil fuels unfortunately supports global warming and its negative impacts. Electrical motors and their applications have high amount of consumption ratios in industrial consumption of energy and induction motors have a crucial impact out of all. Hence, institutions like IEC, NEMA and TSE have many regulations to justify efficiency classes. All motors rated more than 0,75 kW in Turkey must satisfy minimum IE3 efficiency class since the date of January, 2017 due to IEC regulations. In this study; the methods that can be used to improve motor efficiency have been investigated and some methods are applied to the reference motor. The performance analyses for the motors are presented.

Keywords: Induction motors, Efficiency, Loss Analysis, Finite Element Method, Efficiency Classes

1. Giriş

Günümüzde artan kullanıcı taleplerine bağlı olarak endüstriyel kullanımlar hızlı bir şekilde artmaktadır. Artan endüstriyel kullanımlar ile beraber elektrik enerjisinin üretiminden iletimine, tüketimine kadar oluşan kayıpların önemi de paralel olarak artmaktadır. Verimsiz kullanılan sistemler ve üretim yüzünden artan

tüketim karşısında, çevreye büyük ölçüde zarar verilmekte ve ekonomik olarak önemli kayıplara sebep olmaktadır. Dolayısıyla enerjinin daha fazla üretilmesi yanında daha verimli kullanılması önem kazanmaktadır. Elektrik motorları; fan, pompa, kompresör, vinç ısıtma, taşıma vb. birçok uygulamada sıklıkla tercih edilmektedir. Yapılan araştırmaya göre dünya üzerinde elektrik enerjisinin %53'ü elektrik

motorları tarafından harcanmaktadır [1]. Türkiye’de ise harcanan enerjinin %36’sı elektrikli motorlar ve motor sistemleri tarafından tüketilmektedir [2]. Bu sebeple elektrik motorlarının verimliliği büyük ölçüde önem arz etmektedir. Uluslararası enerji ajansı (IEA) araştırmalarına göre, enerji verimliliği gerekli değerlere gelmezse 2030 yılı içerisinde elektrikli motor ve sistemlerinin enerji tüketimi 13,360 TWh’e yükselecek ve elektriğe ödenen ücret bu oranla doğru orantılı olarak çok büyük miktarlarda artacaktır [3]. Elektrik motorlarında yapılacak verim iyileştirmesinin, tüm sistemlere büyük katkısı olacaktır. Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının verimlilik üzerine yaptığı çalışmaya göre; basınçlı hava sistemlerinde %33, fan sistemlerinde %22, pompa uygulamalarında ise %22 potansiyel iyileştirme imkânı vardır [2].

Çalışmada endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan 5,5 kW gücünde üç fazlı sincap kafesli bir asenkron motor için verimi artırmaya yönelik yöntemler incelenmiş, örnek bir uygulama üzerinden verim artışı sağlanmıştır.

2. Verim Artırma Yöntemleri

Asenkron motor yapısı incelendiğinde, verim hesabı çıkış gücü ve giriş gücü arasındaki orandan hesaplanabilir. Enerji kaynağından gerekli mekanik ve elektriksel prensiplerin sağlanması adına çekilen güç giriş gücü, bu gücün motor içerisinde mekanik harekete aktarılması için kullanılan kısmı ise çıkış gücü olarak ifade edilir. İki büyüklük arasındaki fark ise motor çalışması esnasında oluşan kayıplardır. Kayıplar basitçe, stator sargıları ve rotor çubuklarında akan akım etkisiyle dirençler üzerinde oluşan bakır kayıpları, stator ve rotor çekirdeklerinde manyetik yapıya bağlı olarak oluşan demir kayıpları, rulman, mil, fan vb. mekanik parçaların sebep olduğu sürtünme ve havalandırma kayıpları ve motor yapısından kaynaklanan ek kayıplar olarak alt başlıklara ayrılabilir.

Belirtilen kayıpların hesaplanması adına, standartlarda belirtilen yöntemlere uygun olarak, anma yükünde, farklı yük kademelerinde ve boşta olmak üzere IEC 60034-2-1 standardına göre ölçümler yapılır. Yapılan testler sonrasında standarda uygun olarak motor kayıpları, verim değerleri ve verim eğrisi elde edilir. 60034-30-1

standardında belirtilen değerlere göre ise elde edilen değerlerin uluslararası verim sınıfı karşılığı olan IE sınıflarındaki yeri belirlenerek motorun verimlilik sınıfı ortaya çıkartılır [10].

Bu çalışmada verimliliği artırmak adına, kayıplara sebep olan çeşitli etkenler incelenmiş ve referans motor üzerinde yapılan değişikliklerle verim sınıfının nasıl değiştiği analiz edilmiştir.

2.1 Stator Kayıpları

2.1.1 Stator Sargıları Oluk Doluluk Oranı

Stator sargılarında kullanılan iletkenin kesit alanı değiştirilerek direnç azaltılabilir. Aynı şekilde kesit alanı değişimi ile daha düşük akım yoğunlukları sağlanabilmektedir. Yuvarlak kesitli iletken kullanıldığında yalıtım da dikkate alındığında oluk doluluk oranı 0,65... 0,75 arasında değişmektedir. Doluluk oranı düşük olan oluklarda doluluğun maksimuma ulaşabileceği değere kadar sargı ilavesi yapılabilir [4].

2.1.2 İletken Yalıtımı

Motor hareketi sırasında sargılardan geçen akım ve mekanik hareket sebebiyle sıcaklık, sürekli hal rejimine ulaşana kadar artmaktadır. Bu yüzden yalıtkan özellikleri önem taşımaktadır. Daha iyi yalıtım motorun aşırı ısınmasını önleyerek, ısınmayla gelen direnç artışını engelleyecektir. Böylece düşük sıcaklık ile beraber motor daha soğuk kalabilecek ve daha düşük kayıplar meydana gelecektir [4].

2.1.3 Sargı Başlarının (Uç Sargı) Uzunluğu

Bir sargının sarımı tamamlaması esnasında stator çekirdeğinin dışarısında kalan kısımlar sargı başı olarak adlandırılmaktadır. Sargı başlarının uzunluğu, bulunduğu konum sebebiyle kaçak akılara ve kayıplara sebep olmaktadır. Sargı başlarının yerleşimine ve yapısına dikkat edilerek bu kayıplar azaltılabilir [4].

2.2 Rotor Kayıpları

2.2.1 Rotor Çubuk Malzemesi

Endüstriyel üretimde çoğunlukla çubuklar alüminyum ile doldurularak rotor çubuk iletkenleri elde edilir. Alüminyum dışında bakır veya farklı alaşım malzemelerinin kullanıldığı uygulamalar da mevcuttur. Örnek olarak alüminyum yerine bakır malzemesi kullanıldığında, bakırın iletkenlik ve direnç özelliklerinden faydalanılarak, direnç kayıplarında değişim, akım yoğunluğunda azalma gibi kazanımlar sağlanabilir. Buna bağlı olarak ise motor bakır kayıplarında azalma elde edilebilir [4].

Yapılan çalışmalar göstermektedir ki bakır ve bakır alaşımlı rotor kullanımı ile %1..3 arasında verim kazanımı sağlanabilmektedir [8].

Tablo 1. Bakır ve Alüminyum Elektriksel Özellikleri

Malzeme	Elektriksel Direnç (Ohm.m)	Elektriksel İletkenlik (Siemens/m)
Bakır	$1,7 \times 10^{-8}$	58×10^6
Alüminyum	$2,7 \times 10^{-8}$	37×10^6

Ancak bakırın erime sıcaklığının yüksek olması gibi etkenler üretim aşamasında sorunlara sebep olmaktadır. Bunun yerine uygun elektriksel özelliklerin elde edilebileceği alüminyum-bakır veya başka malzemelerin karışımıyla elde edilecek malzemeler rotor çubukları için kullanılabilir.

2.3 Motor Çekirdeği Kaynaklı Kayıplar

2.3.1 Laminasyon Malzemesi

Laminasyon malzemesi içerisindeki indüksiyonun dağılımı, malzeme karakteristiğine bağlı histerizis kayıplarına doğrudan etki etmektedir [5]. Asenkron motorlarda laminasyon malzemesi olarak kullanılan manyetik çeliğin (silisli sac) özellikleri farklılık göstermektedir. Bu farklılık ise demir kayıplarında farklı W/Kg oranları olarak daha verimli tasarımlar sağlamaktadır. Aynı zamanda kullanılan malzemenin kalınlığı da akı dolaşımını değiştirerek motor verimine doğrudan etki etmektedir.

Daha ince sac kullanımı girdap (Foucault) akımlarının azalmasını sağlayarak demir kayıplarının düşmesini sağlayacaktır. Ancak daha ince sac kullanıldığı takdirde aynı paket boyunu sağlamak adına daha çok sac miktarı gerekeceği için maliyet konusunda değişim gözlenebilir.

2.3.2 Dış Çap Büyüklüğü

Daha büyük laminasyon çapı kullanıldığında, artan çap sebebiyle akı yoğunlukları iyileşmesi tasarımı daha ileri bir noktaya taşıyabilir [4]. Çap değişimine bağlı olarak makinenin anma güç değeri artacağı için, mevcut güçte verim artışı sağlanabilir. Ancak tüm üretim ve araç gereçlerinde değişime sebebiyet vereceği ve malzeme kullanımını artıracığı için maliyet artışı ortaya çıkabilir.

2.3.3 Çekirdek Paket Boyu Artırılması

Çekirdek paket boyu artırıldığında, motorun çalışma konumuna göre tasarımı daha ileri bir güç noktasına taşımak mümkündür [4]. Paket boyu oluşan manyetik alan ve akı dağılımı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Azalan akı yoğunluğu sayesinde aynı çalışma noktasında daha az kayıpla çalışan bir motor tasarımı elde etmek mümkündür, uygulanabilirliği en kolay yöntemlerden biri olmasına rağmen malzeme maliyetlerinde artışa neden olabilmektedir [11].

2.3.4 Amorf Malzeme Kullanımı

Amorf malzemeler normal saclara göre daha ince bir yapı ve farklı bir tanecik yapısına sahiptir. Bu sebeple motorda laminasyon malzemesi olarak kullanıldığında girdap akımlarını azaltarak kayıpların azalmasını sağlayabilirler.

2.3.5 Isıl Şoklama Uygulaması

Motor çekirdeğine ısıl işlem uygulandığında, malzeme özelliklerinde iyileşme sağlanabilir. Isıl işlem malzemenin yüksek sıcaklıklara ısıtılıp daha sonra su veya farklı bir sıvı içerisinde ani şekilde soğutulmasıyla gerçekleştirilir. Bu işlem sonrasında malzeme

özellikleri ve enerji karakteristiğinde farklılıklar elde edilir. Örneğin rotor çekirdeklerinde çubukların direnci artar ve paralel çubuklar arasında akıya gösterilen direnç artarak, kaçak akı miktarında azalma elde edilir. [5]. Bunun sonucunda motorda oluşan kayıplarda azalma meydana gelebilir.

2.3.6 İletken ve Çekirdek Arasındaki Yalıtım

Asenkron motor gerek rotor gerek stator yapısında alüminyum çubuklar ve sargı malzemesi çekirdek içerisine yerleştirilmektedir. Akım iletimi sırasında rotor çubuklarının ve sargıların birbirine en çok yaklaştığı kısımlarda bir bölümdeki akı diğer tarafa geçmeye çalışır ve akı yolunda kaçaklara sebebiyet verir. Bunun sonucunda, kaçak akılar kayıpların artmasına neden olur. Bunu önlemek adına stator oluk ağzlarında yalıtım için kama, rotor çubuklarında ise alüminyum uygulanmadan önce yalıtım uygulayarak manyetik prensiplerin daha düzgün işlenmesi için daha verimli bir yapı elde edilebilir. [5].

2.4 Mekanik Kayıplar

Asenkron motor içerisinde dönme hareketinin düzgün sağlanması ve güç aktarımının yapılabilmesi için rulman, fan gibi mekanik parçalar kullanılmaktadır. Mekanik yapıları, hava direnci ve sürtünme gibi etkiler nedeniyle bu parçalarda mekanik kayıplar meydana gelmektedir. Özellikle kullanılan rulmanın kayıplar üzerinde büyük bir etkisi bulunmaktadır. Firmalar tarafından yapılan testlerde verimli olarak nitelendirilen rulmanlar ile yapılan testlerde kullanılmayan duruma göre kayıplarda %30...50 oranında iyileşme meydana geldiği tespit edilmiştir [6]. Aynı şekilde kullanılan soğutma fanının da hava direnci sebebiyle fazladan kayıplara neden olabilir, mekanik tasarımı iyileştirilmiş fanlar sayesinde hava sürtünmesi kaynaklı kayıplarda azalma sağlanabilir [9].

3. Uygulama

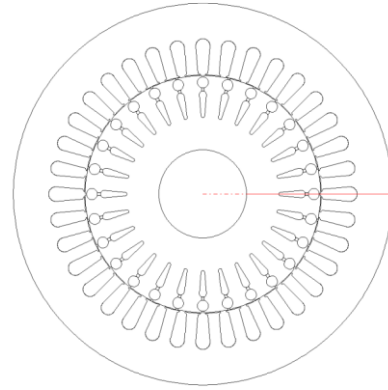
3.1 Referans Motor

Yöntemlerden bazılarının uygulamada incelenmesi adına bu çalışmada; 5,5 kW gücünde 4 kutuplu, verimi %88,6 olan hâlihazırda üretimde olan IE2 sınıfı, üç fazlı, sincap kafesli asenkron kullanılmıştır. Referans motor iki boyut görünümü Şekil 1 de verilmiştir.

Referans motorun analitik analizi için SPEED tasarım programı, sonlu elemanlar yöntemi ile manyetik analizi içinse Maxwell 2D ticari programlar kullanılmıştır. Yapılan analizin sonucu test verileri ile kıyaslanarak, iyileştirme yapılacak yöntemler referans motora tasarımsal olarak uygulanmıştır.

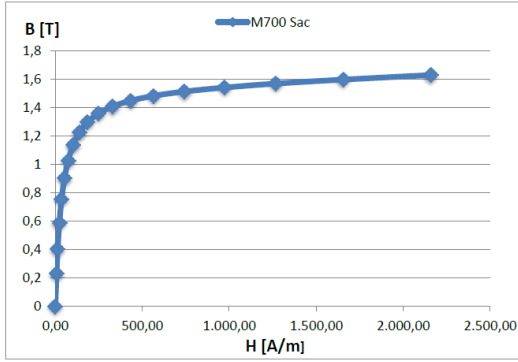
Tablo 2. Referans Modelin Anma Değerleri

Parametre	Değer
Güç	5.5 kW
Gerilim	400 V/690 V
Akım	11,5 A/6,6 A
Frekans	50 Hz
Kutup Sayısı	4
Devir Sayısı	1459 min ⁻¹



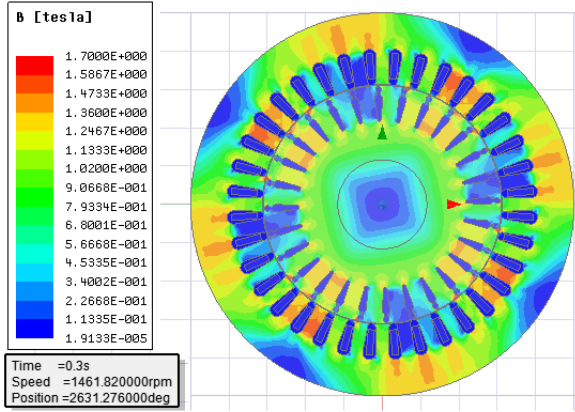
Şekil 1. Referans Motor Analiz Tasarımı

Analiz esnasında mevcut motorun birebir ölçüleri, malzemesi, sargı şeması gibi tasarım özellikleri program içerisinde oluşturularak, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Rotorda ve statorda kullanılan malzeme M700 silisli sac olup mıknatıslanma eğrisi Şekil 2 de verilmiştir.



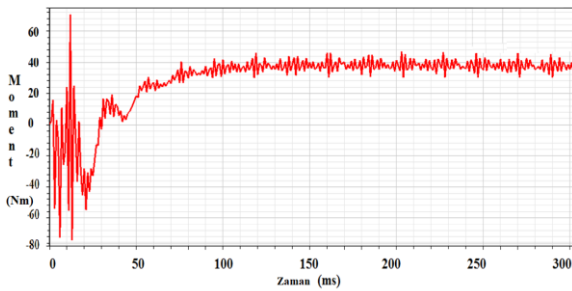
Şekil 2. M700 Sac B-H Eğrisi

Yapılan analiz ile test sonuçları karşılaştırılarak çalışmanın tutarlılığı doğrulanmıştır. Kayıpların ve verimin hesaplanmasında IEC 60034-2-1 [7] standardı kullanılarak küresel standartlara uyumlu hale getirilmiştir. Karşılaştırma Tablo 3’de sunulmuştur. Motorun manyetik akı dağılımı Şekil 3 te verilmiştir.

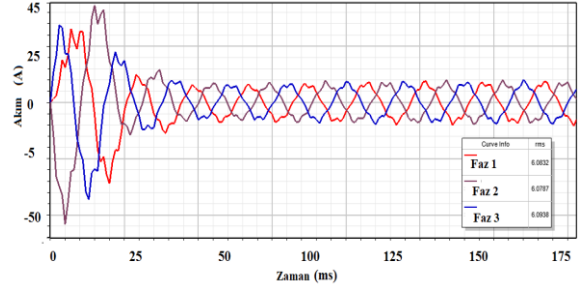


Şekil 3. Referans Motor Akı Yoğunluğu

Şekil 4 te motora ait moment zaman değişimi, Şekil 5 te ise stator üç faz akımları analiz sonucu olarak sunulmuştur.



Şekil 4. Referans Motor Moment-Zaman Grafiği



Şekil 5. Referans Motor Akım-Zaman Grafiği

Analiz sonuçları ve test sonuçları kıyaslandığında aradaki farkların kabul edilebilir seviyelerde olduğu görülmektedir. Analizin doğrulanması sağlandıktan sonra çalışmaya çeşitli geliştirmeler uygulanarak iyileştirilmiş tasarımla devam edilmiştir.

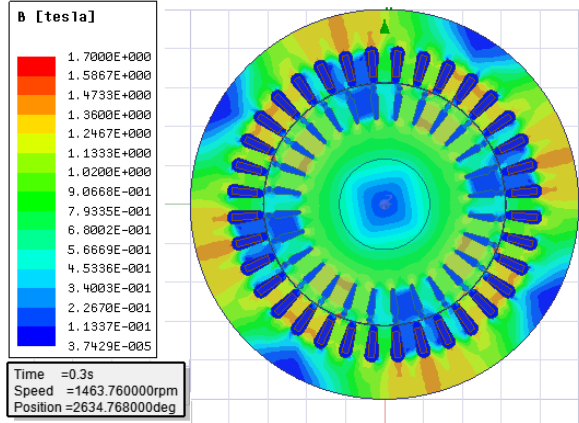
Tablo 3. Referans Motor Analiz-Test Karşılaştırması

Parametre	SEY	Test
Devir (devir/dakika)	1460	1459
Anma Momenti (N.m)	35,9	36,1
Anma Akımı (A)	10,4	11,5
Stator bakır kayıpları (W)	220	282
Rotor bakır kayıpları (W)	152	157
Demir kayıpları (W)	192	183
Sürtünme ve rüzgâr kayıpları (W)	43	42
Ek kayıplar (W)	73	49
Toplam kayıplar (W)	682	713
Verim (%)	89,1	88,6

3.2. İyileştirilmiş Motor

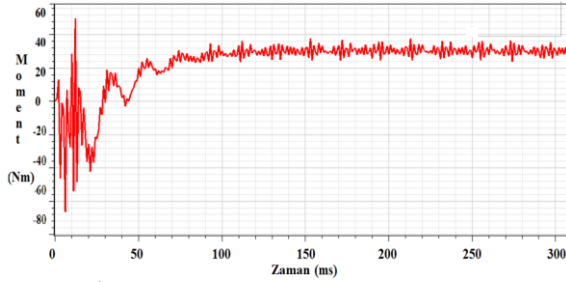
İyileştirilmiş motor modeli oluşturulurken test sonuçlarına göre geliştirilecek kısımlara karar verilmiştir. Mevcut motorun test sonuçlarına bakıldığında demir kayıpları büyük bir yüzdeye sahiptir, geliştirilmiş tasarımda manyetik malzeme kaynaklı bu kayıpları azaltmak adına, kayıp oranı W/kg olarak daha iyi olan M270 modeli silisli sac kullanılmıştır.

Bakır kayıplarına etki etmek adına ise stator tarafında sargı doluluk oranı artırılarak 1.0 pu olan doluluk 1.3 pu’ye çıkarılmış ve motorun elektriksel iletkenliği iyileştirilmiştir. Tasarımsal faktörler dışında mekanik kayıpları azaltmak adına verimli rulmanlar kullanılarak motorun mekanik tasarımı değiştirilmiştir.

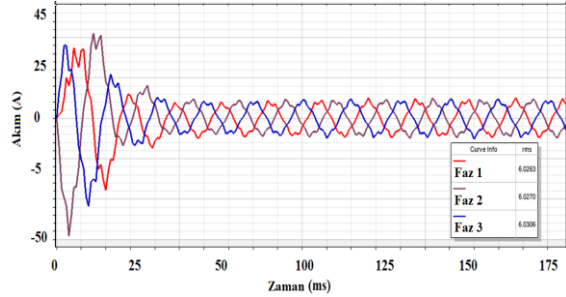


Şekil 6. İyileştirilmiş Motorun Akı Yoğunluğu

İyileştirilmiş motora ait moment zaman grafiği Şekil 7 de akım-zaman grafiği ise Şekil 8 de verilmektedir.



Şekil 7. İyileştirilmiş Motor Moment-Zaman Grafiği



Şekil 8. İyileştirilmiş Motor Akım-Zaman Grafiği

Analiz ile elde edilen sonuçlara göre motorun ortalama momenti 37.09 Nm, kararlı durumda akımın etkin değeri ise 6.02 A'dir. Oluşturulan tasarım endüstriyel olarak üretilip, motor küresel standartlara uygun olarak test edilmiş, kayıplar ve verim sonuçları elde edilmiştir.

4. Sonuçlar

İyileştirilmiş ve referans motorun test sonuçları sonuçlar kısmında karşılaştırmalı

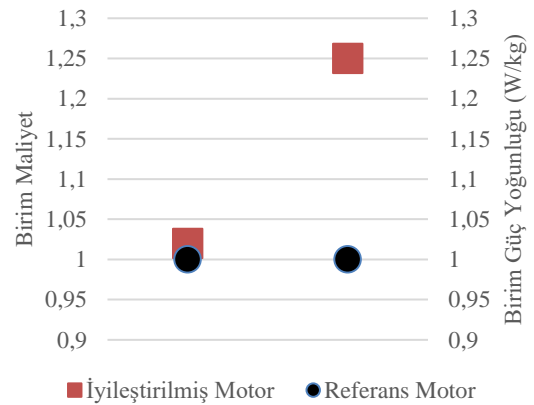
olarak Tablo 4 te sunulmuştur. Yeni tasarımda, verimli sac kullanılması ile demir kayıpları 183 W'tan 139 W değerine, sürtünme kayıpları 42 W değerinden 20 W'a düşmüştür.

Tablo 4. Referans Motor-İyileştirilmiş Motor Test Sonuçları Karşılaştırması

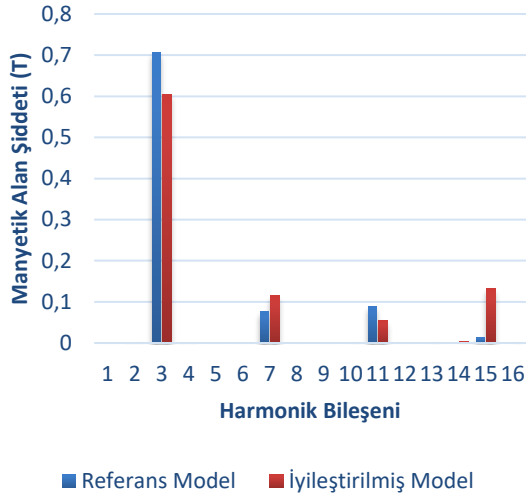
Parametre	Referans Tasarım	Yeni Tasarım
Devir Sayısı ($s-1$)	1459	1462
Anma Momenti (N.m)	36,1	36,0
Kalkış Akımı (A)	93,2	97,4
Stator Bakır Kayıpları (W)	281	213
Rotor Bakır Kayıpları (W)	158,0	144
Demir kayıpları (W)	183	139
Sürtünme ve rüzgâr kayıpları (W)	42,2	20,6
Ek kayıplar (W)	49,3	37,4
Toplam kayıplar (W)	713	555
Verim (%)	88,6	90,85

Sonuçlara göre toplam kayıp; referans motorda 713 W iken yeni iyileştirilmiş motorda 555 W değerine düşürülmüştür. Tüm bu azalmaların sonucunda %88,6 verim değeri ile IE2 verim sınıfında yer alan referans motor, iyileştirilmiş tasarımla %90,85 verim değerine çıkarak IE4 sınıfı içine girmiştir.

Yapılan tüm değişikliklerin sonucunda maliyet açısından 1 birim olan referans motor fiyatının 1,25 birime çıktığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, moment ve güç sonuçları incelendiğinde 1 birim olan güç oranı yeni modelde 1,02 birim olarak elde edilmiştir.



Şekil 9. Motorların Maliyet ve Güç Yoğunluğu Kıyaslaması (pu)



Şekil 10. Motor Harmonik Değerleri

Analiz sonuçları göre motorda uygulanan tasarımsal değişiklikler, harmonik bileşenlerin değerlerinde azalmaya neden olarak harmonik kaynaklı kayıpların azalmasını sağlamıştır. Yapılan çalışma göstermektedir ki, bahsedilen ve açıklaması yapılan yöntemler uygulanarak ve güç ve maliyet düzenlemeleri yapıldığında, mevcut gereksinimler için kullanılan motor ve sistemler daha verimli ve işlevsel hale getirilebilir. Bu şekilde enerji ve iş ihtiyacına daha çevreci ve verimli şekilde cevap vermek mümkündür. Tek bir motorda belirtilen yöntemler sayesinde 2% oranında iyileştirme elde edilmiştir. Motorların kullanım alanının genişliği ve işlevselliğine dayanarak, bu kapsamda elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde motorların ve motorlara bağımlı sistemlerin gerek endüstriyel gerek evsel uygulamalarda, yapılacak iyileştirmeler sayesinde küresel çapta sağlayabileceği kazançlar açık bir şekilde ortaya konulmuştur. Verimliliği artırmaya yönelik ortaya konulan çeşitli yöntemler kullanılarak enerji kullanımını ve enerji ihtiyacının karşılanmasını daha sürdürülebilir ve verimli şekillerde gerçekleştirmek mümkündür.

5. Teşekkür

Bu çalışma T.C. Kalkınma Bakanlığı ve İTÜ tarafından yürütülen Araştırmacı İnsan Yetiştirme programı kapsamında, ITU-AYP-2015-12 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

6. Kaynakça

1. International Energy Agency (iea), (2016). *World Energy Outlook 2016*
2. Turkish Republic Ministry of Information, Industry and Technology General Directorate of Productivity (2015), *Elektrik Motorlarında Enerji Verimliliği*
3. International Energy Agency (iea),(2011). *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*
4. A. R. Gallego, (2014). *Design and Optimization of an IE4, 4-pole, 7.5 kW Induction Motor*. (Master Thesis). Royal Institute of Technology. Stockholm.
5. Ioan Peter, (2012) “*Induction motors with squirrel cage rotor, with IE2 efficiency level, up to 18.5 kW. methods for increasing the efficiency IEEE.*”
6. M. Janssens “SKF Energy Efficient deep Groove ball bearings for higher driveline efficiency”, SKF France technical report.
7. “Rotating Electrical Machines - Part 2-1: Standard Methods for Determining Losses and Efficiency from Tests (Excluding Machines for Traction Vehicles)”, International Electrotechnical Commission (IEC), International Standard 60034-2-1, Ed. 1, September 2007.
8. S.Manoharan, N. Devarajan, S. M. Deivasahayam, G. Ranganathan (2009), *Review On Efficiency Improvement In Squirrel Cage Induction Motor By Using DCR Technology*, Journal of Electrical Engineering, Vol 60.
9. J. Pyrhönen, Tapani Jokinen, Val'eria Hrabovcov'a, (2008). *Design Of Rotating Electrical Machines*.
10. Rotating electrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors, International Electrotechnical Commission (IEC), International Standard 60034-30-1:2014
11. Alberti L., Bianchi N., Boglietti A., Cavagnino A., (2011). Core Axial Lengthening as Effective Solution to Improve the Induction Motor Efficiency Classes, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.