



Akı bariyerli TLA tipi senkron relüktans motor tasarımı ve optimizasyonu

Metin Ersöz¹, Yusuf Öner^{2*}, Okan Bingöl³

¹Pamukkale Üniversitesi Teknokenti, Senkron Ar-Ge Mühendislik, Denizli, Türkiye

²Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

³Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Senkron relüktans motor
- Sonlu elemanlar metodu
- Akı bariyerli rotor parametrik analizi

Makale Bilgileri

Geliş: 04.08.2015

Kabul: 24.07.2016

DOI:

10.17341/gummfd.65383

Anahtar Kelimeler:

Senkron relüktans motor,
sonlu elemanlar metodu

ÖZET

Bu çalışmada, 15 kw lık bir asenkron motor ile aynı stator yapısını kullanan ve yeni tasarlanacak olan Senkron Relüktans Motor (SynRM) karşılaştırılmıştır. SynRM'lar soğuk rotorlu motorlar olarak bilinmektedir. Asenkron motorlarda olduğu gibi rotorlarında bakır (alüminyum) çubuklar bulunmadığı için rotor bakır kayıpları sıfıra indirilmiş ve rotor kayıpları minimize edilmiştir. Bu şekilde kayıplar azaltılarak motor veriminde iyileştirmeler sağlanmıştır. Aynı asenkron motor statoru kullanılarak rotor geometrisi SynRM rotor geometrisinde tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım gerçekleştirilirken L_d/L_q oranı göz önünde bulundurularak akı bariyerlerinin tasarımı yapılmıştır. Rotor laminasyon sacları üzerindeki hava/demir oranı motor performansı için önemli olduğu için tasarlanan laminasyon sacı üzerinde parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu parametrik analizler sonucunda laminasyon sacının 4 bariyerli olmasına karar verilmiştir. Asenkron motor ve SynRM analizleri karşılaştırılmıştır. Alınan değerlere göre SynRM'nin verim değerinde %3'lük bir yükselme meydana gelmiştir. Böylece verimi IE1 sınıfında olan asenkron motor rotoru değiştirilerek IE3 sınıfına yükseltilmiştir. Moment dalgalanmalarında yaklaşık % 8'lik bir iyileşme sağlanmıştır.

Flux barrier TLA-type synchronous reluctance motor design and optimization

H I G H L I G H T S

- Synchronous reluctance motor
- Finite element method
- Flux barrier rotor parametric analysis

Article Info

Received: 04.08.2015

Accepted: 24.07.2016

DOI:

10.17341/gummfd.65383

Keywords:

Synchronous reluctance
motor,
finite element method

ABSTRACT

In this study, with 15 kW induction motor is to be designed using the same stator structure and the new synchronous reluctance motor (synrm) were compared. SynRM are known as cold rotor motors. As with copper rotor induction motor (aluminum) rotor copper losses are minimized since no rods reduced to zero and the rotor losses. In this way it is achieved improvements in motor efficiency by reducing losses. Design of the rotor geometry SynRM rotor induction motor stator were performed using the same geometry. Design performing L_d / L_q rate design is made taking into consideration current barriers. The rotor lamination sheet on the air / iron ratio of parametric analysis on the lamination steel designed to be important for motor performance has been realized. This parametric analysis of lamination steel as a result it was decided to have 4 barrier. Asynchronous motors and SynRM analysis were compared. SynRM'n efficiency value according to the received value has occurred to a rise of 3%. Thus efficiency by changing the motor rotor induction class, which was raised to the IE1 IE3 class. The torque ripple is provided an improvement of approximately 8%.

* Sorumlu Yazar/Corresponding author: yoner@pau.edu.tr / Tel: +90 258 296 3322

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Senkron Relüktans Motorlar (SynRM), asenkron motor ile yapısal benzerlikleri olan bir motordur. Bu benzerlikten yola çıkılarak asenkron motor kayıplarının en aza indirilmesi ve verimlerinin iyileştirilmesi çalışmanın temel konusunu oluşturmaktadır. Bu bağlamda her iki motorun aynı stator sargılarını kullandığını düşünürsek sadece rotor geometrisinde yapılacak bir iyileştirmenin motor performansına etkileri 1923'den günümüze kadar araştırma konusu olagelmıştır. Çağımızda hızla gelişen bilgisayar teknolojileri ve simülasyon teknikleri ile rotor geometrisi optimizasyonu üzerinde çalışılmıştır. Literatürde relüktans kavramı 1800'lü yıllarda ortaya atılmasına rağmen [1] SynRM kavramı ilk olarak 1923 yılında Kostko tarafından kullanılmış ve Kostko çalışmasında çok bariyerli ve parçalı rotor geometrisinin temellerini oluşturmuştur. Kostko bu çalışmasını pratik olarak gerçekleştirememiştir [2]. Farklı bir rotor türünde Lawrenson ve Agu tarafından 1964 yılında geliştirilmiştir. Lawrenson ve Agu bu çalışmalarında büyük çıkıntı oranına sahip bir rotor tasarımı gerçekleştirerek geleneksel tasarımlara göre daha iyi bir performans sağladığını göstermiştir. Ancak rotor tasarımının karmaşık ve maliyetli olması dezavantajdır [3]. Kosko'nun rotor tasarım çalışmasına benzer ilk prototip Cruickshank ve Anderson tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada eksenel lamine edilmiş rotor, tanecikleri yönlendirilmiş çelik (grain oriented steel) laminasyonu kullanarak uygulanmıştır. Sincap kafesli rotor tipi ilk olarak 1966 yılında Cruickshank ve arkadaşları tarafından uygulanmıştır [4]. Honsinger iki akı bariyerli radyal lamine edilmiş yeni bir rotor tasarlamıştır. Bu tasarımda kutup başına iki akı bariyeri bulunmaktadır ve yol alabilmesi için sincap kafesi yerleştirmiştir. Bu çalışmada motor vektör kontrolü ile sürülmüştür [5]. Birçok çalışmada makinelerin yol almasını sağlamak için sincap kafes kullanılmıştır. Sincap kafes kullanılması çıkıntı oranını etkilediği için bu rotor tipinin önemi giderek azalmıştır. Kafesli rotor tasarımlarının azalmasının bir diğer sebebi kafesiz rotor tasarımlarının geliştirilmesi olmuştur. Modern kafesiz rotor tasarımları 80'li yılların sonlarında gelişmeye başlamış ve uygulama olarak 90'lı yılların başında çalışmalar yapılmıştır [6-10]. Marongiu ve Vagati eksenel lamine edilmiş rotor tasarım çalışmasında yüksek L_d , düşük L_q değerleri ile rotor demir kayıplarının minimum değerini elde etmişlerdir [11]. Fratta ve Vagati asenkron motor ve SynRM kıyaslamışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda iki makinenin momentleri karşılaştırılmış ve SynRM'nin asenkron motora göre daha yüksek bir moment değerine sahip olduğunu belirtmişlerdir [12]. Boldea vd. eksenel lamine edilmiş yönlendirilmiş saç paketleri kullanılan rotor tasarımı gerçekleştirmişlerdir [13]. Platt eksenel lamine edilmiş rotor tasarımı yapmıştır. Bu tasarımda Platt hava aralığı yüzeyinin tam olarak kullanılmasını sağlayan bir çalışma gerçekleştirmiş ve dört kutuplu rotor tasarımında manyetik malzemeler eksenel lamine edilmiş, manyetik olmayan malzemelerde rotor mili boyunca kullanılarak q ekseninde düşük

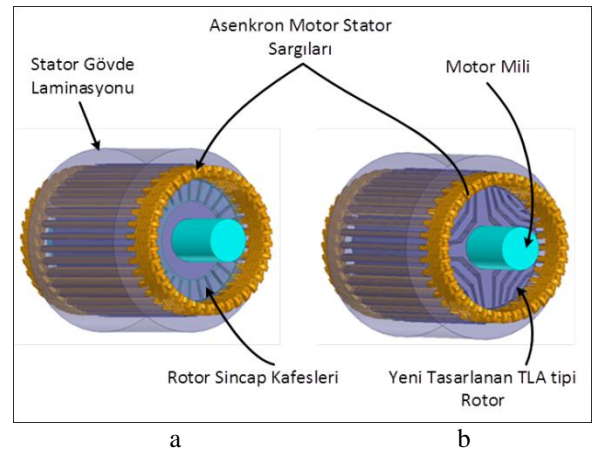
relüktans, d ekseninde yüksek relüktans oluşturulmuştur [9]. Staton vd. altı farklı yapıda, ideal stator ve rotor tasarımlarını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak hesaplamalarını gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar rotor L_d/L_q oranı ile stator oluk sayısını ilişkilendirerek doyuma gitmesini önlemek için çalışmalar yapmışlardır. Staton ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışmalar arasında çoklu bariyer ve eksenel laminasyonlu rotor tasarımına da yer vermişlerdir. Çoklu bariyer çalışmalarında 6-11 kW, 36 oluklu asenkron motor ile SynRM tasarımını kıyaslamışlar ve SynRM'de 5 ve 12'lik akı bariyeri (NL) seçerek asenkron motorda verim değerini %88 iken SynRM'de %90 değerlerine ulaştırmışlardır [6]. Matsuo ve Lipo tarafından, SynRM'nin rotor tasarımının çok önemli parametrelerle iyileştirilebileceği kanıtlanmıştır. Örneğin maksimum momentin elde edilebilmesi için rotor izolasyon genişliğinin rotor demir genişliğine oranı en önemli parametredir. Çıkıklık oranına dayanarak maksimum motor güç faktörünü veren eşitlik elde edilmiş ve 0,8 güç faktörünün optimal rotor dizaynı ile gerçekleştirilebilecek bir değer olduğu görülmüştür [7]. Karnper ve Volschenk kafesiz akı bariyerli enine laminasyonlu rotor tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarında en iyi L_d/L_q oranı ve güç faktörü için sonlu elemanlar yöntemiyle bariyer optimizasyonu yapmışlardır. Yazarlar çalışmada bariyer optimizasyonu ve makinenin boyutlarını değiştirerek indüktans değişimini incelemişlerdir [14]. Parasiliti ve Villani akı bariyerli SynRM iki farklı rotor tasarımı ve optimizasyon çalışması gerçekleştirdiler. Bu çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemi ve fonksiyon akışı ile moment optimizasyonu yapmışlardır. Bu fonksiyon, manyetik devrenin minimum ve maksimum relüktans değerlerine karşılık gelen anma akımındaki iki farklı rotor pozisyonunda ki hesaplamaları kapsamaktadır. Sonuç olarak standart tasarımla optimize edilmiş tasarım arasında güç faktörü %11, moment %33 artış göstermiştir [15]. Kinyama vd. yüksek performanslı SynRM için çok bariyerli rotor tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Aynı hava boşluğuna sahip yeni rotor tasarımı asenkron motorun rotoru yerine yerleştirmişlerdir. Analiz ve uygulama sonuçlarına bakıldığında maksimum moment 1,13 Nm, akım 1,1 A ve 3000 devirde verimlilik %70,9'dan %733 değerine ulaşmıştır [16]. Vagati vd. enine laminasyonlu(TLA) SynRM'nin doyuma gitme noktası hakkında inceleme yaparak, deneysel ve teorik olarak çalışma yapmışlardır. SynRM'nin nominal akımını on kat yukarı çekerek motorun doyum ve diğer beklenmedik performans etkilerinin incelemişlerdir [11]. Bomela ve Kamper çok bariyerli (enine laminasyonlu) SynRM tasarımının performansını incelemiştir. Bomela çalışmasında stator sargı kırılganlığı, rotor açısı (skew) gibi motor tasarım parametrelerinin moment dalgalanması, ortalama moment ve güç üzerindeki etkilerini incelenmiştir [17]. Tsuchiya vd. SynRM'nin tork dalgalanmasının azaltılması konusunda çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında stator dış genişliğinin moment dalgalanmasına etkisini incelemişlerdir. Sonlu elemanlar metodu kullanarak iki tür rotor tasarımı yapmışlar ve sadece dış genişliği değiştirip moment

dalgalanmalarını karşılaştırmışlardır [18]. Hatajaa tarafından değişken hız sürücülerıyla SynRM ve 4 kutuplu asenkron makinelerin performans kıyaslanması yapılmıştır. Asenkron makineden elde edilen TLA tipindeki SynRM, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Asenkron ve SynRM'nin güç faktörü, verim yönlerinden kıyaslanması yapılmıştır [19]. Boglietti vd. asenkron motor ile enine laminasyonlu SynRM(TLSynRM)'nin moment, güç faktörü ve verimlilik değerlerini karşılaştırmışlardır [20]. Boglietti ve Pastorelli asenkron motor ve enine lamine edilmiş SynRM'yi iki farklı 2,2 kW ve 4 kW'lık (380 V, 50 Hz, 4 kutup) performanslarını kıyaslamışlardır. Her bir asenkron motor benzer laminasyonu ve sargılara sahip olan fakat rotorları farklı olan bir TLSynRM ile karşılaştırılmıştır. Analizlerde hem analitik hem de deneysel yaklaşım esas alınarak sonuçlar indüksiyon motoruna kıyasla senkron relüktans motorun belirli bir çerçevede yaklaşık %10 ila %15 daha büyük moment oranı elde edildiğini göstermiştir [21]. SynRM'ler yeni tasarım programlarının gelişmesi ile son yıllarda büyük popülerlik kazanmıştır. Tasarım vurgusunda daima geliştirilmiş performans için SynRM'de çıkıntı oranı arttırılmış tasarımlar yapılmaktadır. Günümüzdeki çalışmalarda SynRM için çoklu akı bariyerli rotor tasarımları yapılmaktadır [22]. Ferrari vd. hibrit elektrikli araçlar için SynRM tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Moment dalgalanmasını azaltma amacı ile akı bariyerlerinin uygun açılarını seçmek için iki farklı rotor tasarımı yapmışlardır. Rotor tasarımı seçimi için kutup başına bir, iki ve üç akı bariyerli tasarımları karşılaştırmışlardır. Düşük moment dalgalanması ve yüksek ortalama moment değerlerini bulmak için akı bariyer uçlarının en iyi açılarını sonlu elemanlar analizi ile doğrulamışlardır. Ayrıca iki farklı rotor tasarımını tek bir rotorda birleştirerek yani her kutupta farklı geometriye sahip bariyer tasarımı gerçekleştirmişlerdir [23]. Park vd. 15kW'lık akı çoklu akı bariyerli SynRM rotor tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada bariyer sayısı, stator oluk sayısına göre moment, verimlilik ve güç faktörü karşılaştırması yapmışlardır [24]. Moghaddam ve Gyllensten yüksek performanslı SynRM tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada SynRM'nin karmaşık rotor yapısı sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmiştir. SynRM için sistematik, hızlı, basit ve yeni tasarım prosedürü sunmuşlardır [25]. Lange vd. SynRM'de moment dalgalanmasının azaltılması için rotor tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında moment dalgalanmasının azalması için bariyerlerin uygun açılarda yerleştirilmesi yöntemi önermişlerdir. Bu uygun açı ve bariyer sayısı sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilerek bulunmuştur. Sonuçta 4 bariyerli rotor tasarımında 24-36 oluklu stator karşılaştırması yapmışlardır. En az moment dalgalanmasının olduğu 36 oluklu stator tasarımını uygun bulmuşlardır [26]. Hong vd. SynRM'de moment dalgalanmasının azaltıldığı bir rotor tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada 15 kW'lık beş bariyerli rotor tasarımını optimize etmişler ve uygun tasarım sonuçlarına bakıldığında 1800 devirde 85,4Nm moment, %95,4 verim, %24,7'lik bir moment dalgalanması

gözlemişlerdir [27]. Pellegrino vd. SynRM için bariyer şekillerine odaklanan bir tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarında üç farklı bariyer geometrisi tasarlayıp incelemişler ve karşılaştırmışlardır. Deney sonuçları SynRM'lerin karşılaştırılabilir bir moment yoğunluğu, düşük moment dalgalanmasına sahip olduğu ve yeterli bir süre içinde tasarımının yapılabilir olduğunu göstermişlerdir [28]. Literatür taramasında görüldüğü üzere SynRM alanında oldukça çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmamızda ise literatür verileri dikkate alınarak gelişen manyetik analiz programlarının yardımı ile daha hassas bir hava/demir oranını ve aynı zamanda daha az moment dalgalanmasının elde edileceği bir tasarım üzerinde durulmaya çalışılmıştır. SynRM motorlarda bilindiği üzere hava/demir oranı performansını direkt etkilemektedir. Bu nedenle uygun bariyer seçimi, uygun kılçık yapısı ve kalınlığı bu makalenin temelini oluşturmaktadır. Ayrıca bu çalışmada hava/demir oranının motor performansı için en uygun optimum değerlerin seçilmesi amaçlanmıştır.

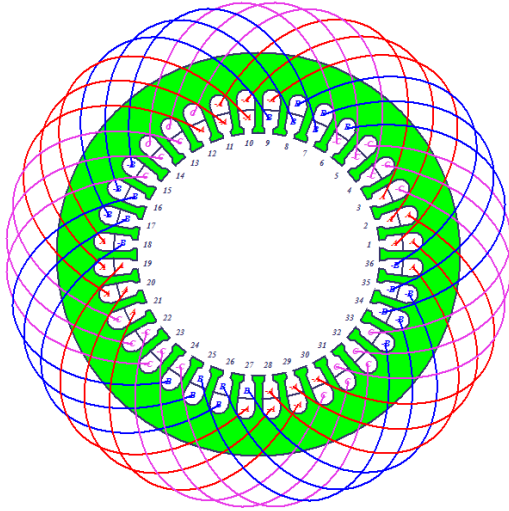
2. TLA TİPİ SynRM'UN YAPISI (TLA TYPE SynRM STRUCTURE)

Enine akı bariyerli enine laminasyon rotorlu (TLA) Senkron relüktans motor (SynRM) yapısı asenkron motor yapısına çok benzerlik göstermektedir. SynRM'un stator yapısı ve sargıları asenkron motor ile aynıdır. Yani değiştirilmeden bu çalışmada kullanılacaktır. Asenkron motorların kayıplarının yaklaşık %30-40'ını oluşturan sincap kafesli rotor yerine aynı ölçülerde akı bariyerli yeni bir rotor tasarlanmıştır [29]. Şekil 1'de aynı güç ve ölçülerdeki asenkron motor ve tasarlanan TLA-SynRM'un yapısı gösterilmiştir. Bu çalışmada öncelikle 15kW'lık bir asenkron motor statorunun içine bir rotor tasarımı ve optimizasyonu yapılmıştır. Asenkron motorun stator laminasyonu ve stator sargıları aynen kullanılacağı için Ansys Rmxprt programında modeli oluşturulmuştur. Şekil 2'de çalışmada kullanılacak olan SrmRM stator laminasyonu ve sarım şekli verilmiştir.



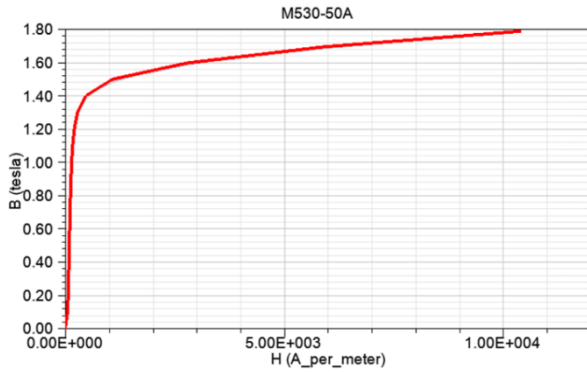
Şekil 1. a) Geleneksel asenkron motor yapısı b) TLA SynRM yapısı

(a) Traditional induction motor structure b) The structure of the TLA-SynRM)



Şekil 2. SynRM stator laminasyonu ve sarım şekli
(SynRM stator lamination and windings form)

SynRM'un stator laminasyon sacı olarak piyasada en fazla kullanılan ve kW başına güç kayıpları az olan M530-50 laminasyon sacı kullanılmıştır. M530-50 laminasyon sacının BH eğrisi şekil 3'de verilmiştir.



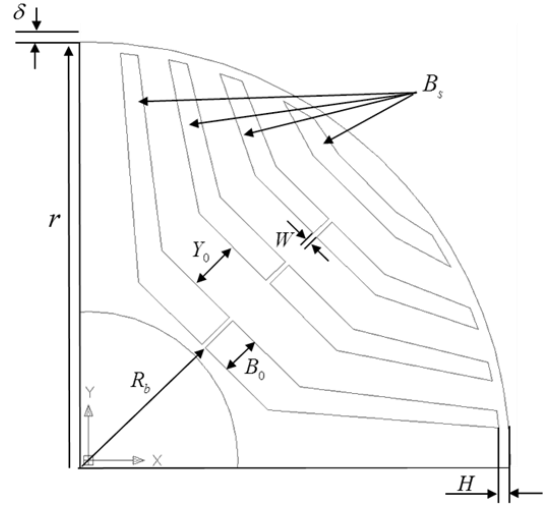
Şekil 3. M530-50A laminasyon sacı BH eğrisi
(M530-50A lamination sheet BH curve)

Yapılan çalışmada daha önce de bahsedildiği gibi 15 kW'lık bir asenkron motor statoru kullanılacağından çalışma sonundaki karşılaştırmada aynı statorun hem asenkron çalıştırılmasında ve hemde SynRM çalıştırmada kullanılacağı göz önünde bulundurularak SynRM rotor geometrisi tasarlanmış ve optimizasyonu gerçekleştirilmiştir [29].

2.1. SynRM Rotor Geometrisinin Tasarımı ve Optimizasyonu (SynRM Rotor Geometry of Design and Optimization)

SynRM'un performansını etkileyen iki önemli parametre vardır. Bunlar L_d , L_q indüktansları ve çıkıntı oranı (L_d/L_q)'dır. Bu nedenle rotor tasarımında en önemli ölçüt çıkıntı oranının olabildiğince yüksek olmasıdır. Bu şartı yerine getirmek için maksimum L_d ve minimum L_q için uygun tasarım yapılmalıdır. Rotor tasarımında istenilen hedefe ulaşmak için analitik yaklaşım yerine bilgisayar destekli tasarım yaklaşımı tercih edilmiştir. SynRM rotor tasarımında temel amaç akı bariyerlerinin geometrisi, hava

demir oranı, bariyer sayısı vd. parametrelere göre bir optimizasyon işlemi bulmaktır. Bu işlemler yapılırken önemli olan SynRM'nin en iyi performans değerlerini elde etmek için moment, güç faktörü, moment dalgalanması ve verimlilik değerlerini uygun olarak veren rotor tasarımına ulaşmaktır. SynRM rotor tasarım optimizasyonu için bazı değişkenlerin belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 4'de optimizasyonu yapılacak değişkenler gösterilmiştir. Tablo 1'de değişkenlerin açıklaması verilmiştir.



Şekil 4. SynRM rotor tasarım parametreleri
(SynRM rotor design parameters)

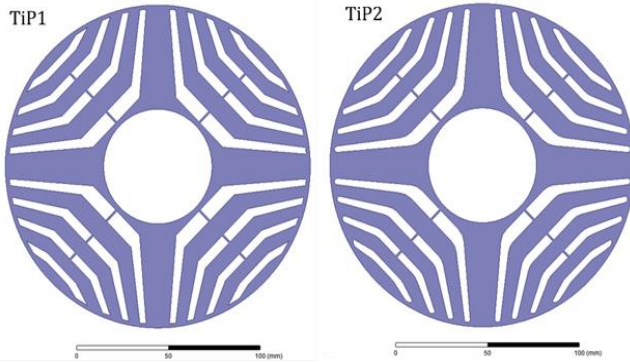
SynRM'nin rotor tasarımında H, W, R_b değişkenlerin ölçüleri üretimi yapılabilecek değerlere dikkat edilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Eksenel laminasyonlu rotor tasarımında q eksen indüktansının düşük olması için kılçık (rib) genişlikleri ince olmalıdır [19]. Bu parametreler motor performansı üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Rotor tasarımının geometrisinde Ansys Maxwell program parametreleri kullanılmıştır [30]. İki farklı tipte rotor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlar Şekil 5'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Rotor tasarımında kullanılan değişkenlerin tanımı
(The definition of the variables used in rotor design)

Değişkenler	Açıklaması
B_s	Bariyer sayısı
B_0	Akı bariyeri hava genişliği
Y_0	Akı bariyeri demir genişliği
R_b	Akı bariyeri başlama çapı
W	Kılçık genişliği(radial rib width)
H	Akı bariyeri ile rotor çapı arasında kalan genişlik(tangential rib width)
δ	Hava aralığı
r	Rotor yarıçapı
β	Hava demir oranı (B_0/Y_0)

Optimizasyonda, Tip1 tasarımı için tek bariyerliden 5 bariyerli rotor tasarımına kadar bütün parametrelerin değişimleri yapılarak, maksimum moment değerine ulaşılan akı bariyeri sayısında Tip 2 tasarımının parametre değişimleri gerçekleştirildi. Sonuçlar iki tip arasında

karşılaştırılıp en uygun moment ve moment dalgalanmasını veren tasarım üzerinde yoğunlaşmıştır. Analizlerin hepsinde akım açısının değeri sıfır olarak alınmıştır farklı alınan değerler belirtilmiştir.



Şekil 5. Tasarımı yapılan iki farklı tipteki SynRM rotoru (SynRM rotor design with two different types)

Rotor optimizasyonunda bariyer sayısına göre sırayla optimizasyon yapılmış ve her bariyer için uygun ölçüler tespit edilmiştir. Optimizasyon sırasında belirli sınır şartları göz önüne alınmıştır. Tablo 2’de verilen değişim aralıklarında analiz programı 1000 farklı çözüm yapmış ve bu çözümler içerisinde en uygun değer seçilmiştir. Bu ölçüler motorun uygun moment değerine ve moment dalgalanmalarına göre seçilmiştir. Optimizasyon 1-2-3-4-5 bariyer için ayrı ayrı yapılmış ve en uygun bariyer sayısının seçilmesi amaçlanmıştır. Bariyer optimizasyonu için değişkenler uygun aralıklarda ve uygun uzunluklarda hassas bir şekilde optimizasyon yapılmıştır. Örnek olarak 1 bariyerli tipin rotor parametrelerinin değişimi verilmiştir. Diğer bariyerlerin optimizasyonunda da aynı yöntem kullanılmıştır.

Tablo 2. Tek bariyerli rotor parametreleri değişimi (One barrier rotor parameters change)

Değişken	Değişim Aralığı	UDU
B_0	5-35mm	15mm
R_b	45-55mm	53,1mm
W	0-5mm	1,8mm
H	0,4-5mm	1,6mm

Tek bariyerli tasarımda diğer değişkenlerin parametrik analizleri yapıldığında maksimum moment ve moment dalgalanması için en uygun değer uzunluğu(UDU) Tablo 2’deki gibi elde edilmiştir. Şekil 6’da Akım açılarının değişimi ve bariyer sayılarına göre rotor momenti ve moment dalgalanmaları grafikleri verilmiştir. Eğriler incelendiğinde 45° akım açısında motorun en yüksek moment değerini verdiği rahatlıkla görülebilmekte ve 5 bariyerli sistemde en düşük moment dalgalanması elde edilmesine rağmen buradaki moment değerinin 90,55 Nm olduğu görülmektedir. Bu moment değeri 15 Kw’lık bir motor moment değerinden küçüktür. Dolayısıyla bu moment değerini yakalayan fakat moment dalgalanması az olan bir değer olan 4 bariyerli Tip 2 uygun rotor geometrisi olarak seçilmiştir. Aynı zamanda bu bariyer sayısı seçiminde

hava/demir oranını parametrik analizine bakılması gerekir. Şekil 7’de 4 bariyerli sistemde hava/demir oranı değerleri gösterilmiştir. Şekil 7 a ve b şekilleri incelendiğinde hava/demir oranının değişimi β değerinin en küçük olduğu değer seçilir. Bu değer $7,8/10,5=0,74$ olan değerdir. Burada 7,8 mm B_0 , 10,5 mm Y_0 değerlerini ifade etmektedir. B_0 ve Y_0 değerleri rotor üzerindeki demir ve hava oranını belirleyen sınır şartları içerisinde değişimin optimizasyonu yapılmış ve Şekil 7 a ve b de bu değer değişimleri ayrıntılı olarak verilmiştir. Burada bulunan her bir nokta B_0 ve Y_0 değerlerinin değişimine göre elde edilen noktalardır. Tablo 3’de bu seçilen değerde moment dalgalanması ve elde edilen moment değerleri gösterilmiştir.

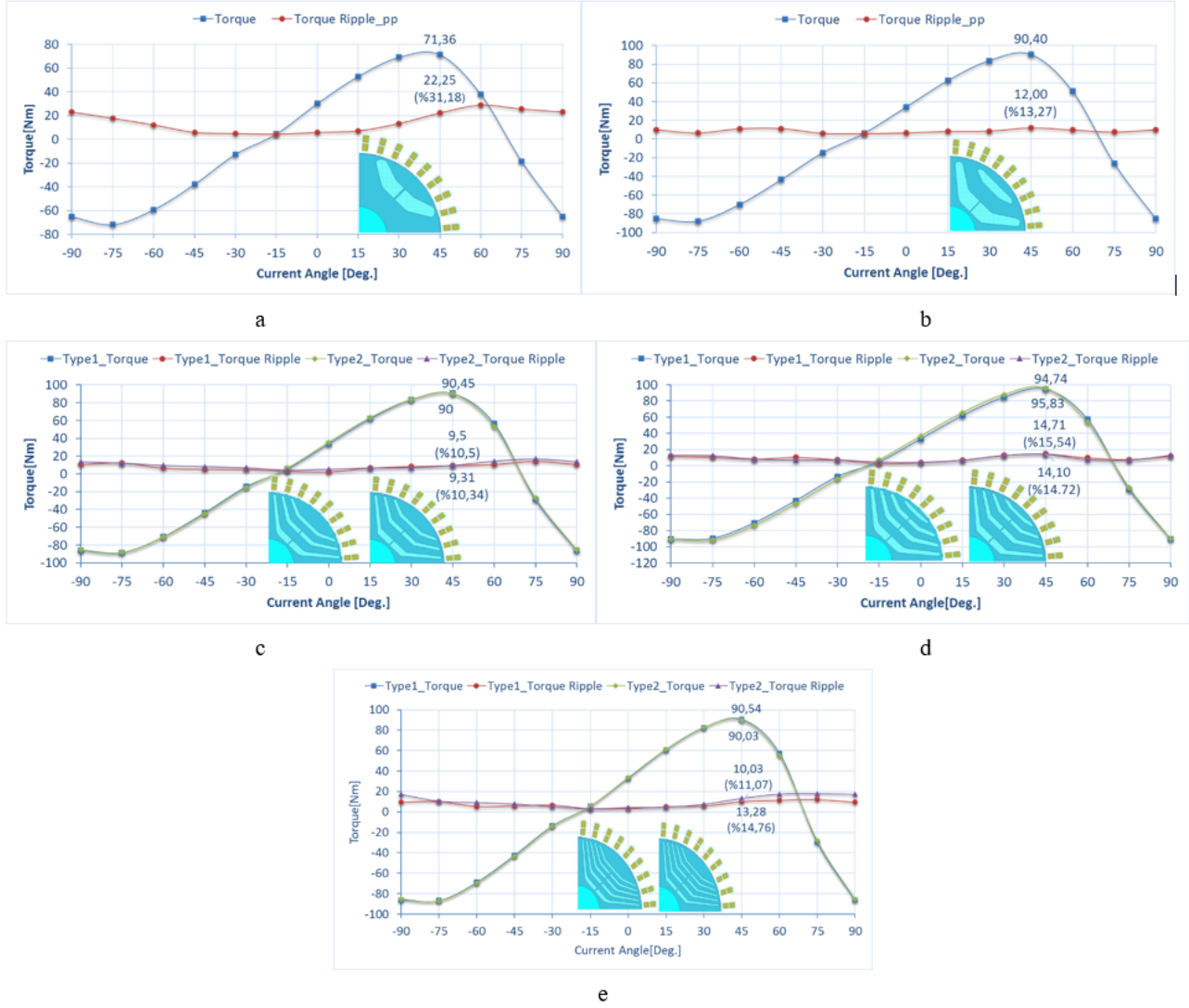
Tablo 3. Tip2 dört bariyerli parametre değişimleri (Type2 four barrier parameter changes)

B_0	Y_0	β	Akım açısı (0°)		Akım açısı (45°)		
			TD(Nm)	T(Nm)	TD(Nm)	T(Nm)	
7,2	10,3	0,70	3,98	33,09	14,72	94,7	Tip 1
7,8	10,5	0,74	4,32	37,08	14,11	95,83	Tip 2

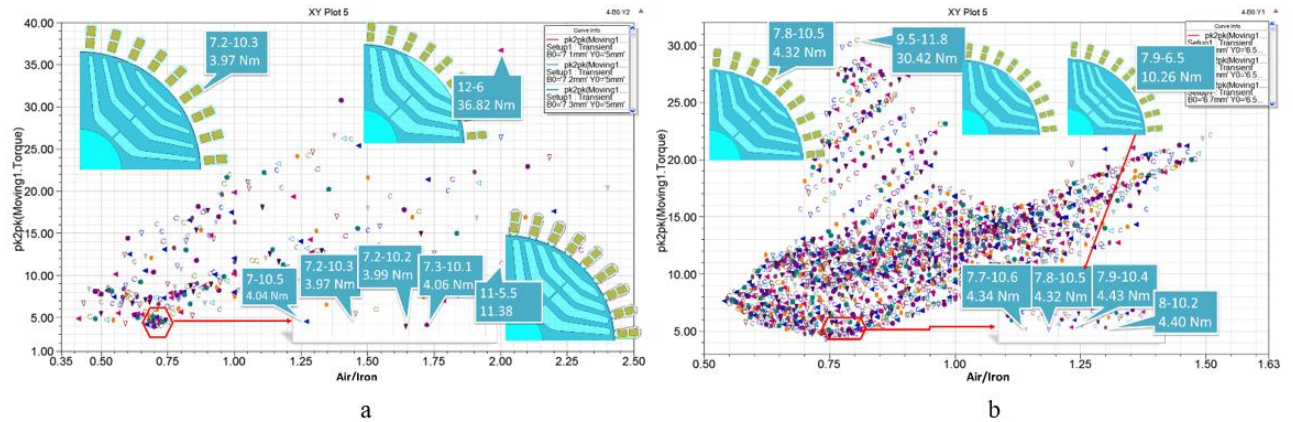
Her iki tip için yapılan parametrik analizler sonucunda uygun minimum moment dalgalanmasındaki moment değeri Tip 2’de 95,83 Nm olarak bulunmuştur. Dört bariyerli rotor tasarımında istenilen moment değerinin (95,5Nm) elde edilmiş olması indüktans oranının (L_d/L_q) yeterli ve uygun bir tasarım olmasından kaynaklanmaktadır. Bu tasarımda hava demir oranı 0,73-0,78 aralığında değişim göstermektedir (Eş. 1).

$$\cos\phi = \frac{k-1}{\sqrt{k^2 \frac{1}{\sin^2\phi} + \frac{1}{\cos^2\phi}}} \quad (1)$$

Şekil 7 a ve b incelendiğinde değeri 0,75’i geçtiğinde moment dalgalanmasının maksimum noktalara çıktığı gözlenmiştir. Dört bariyerli rotor tasarımında Tip1 rotoru 94,7 Nm değerinde kalırken Tip 2 rotoru 95,8 Nm moment değerine ulaşmıştır. moment dalgalanmaları kıyaslandığında Tip 2 tasarımı Tip1’e göre daha az dalgalanmaya sahiptir. Şekil 8’de bariyer sayılarına göre moment dalgalanmalarının grafiği verilmiştir. Bariyer sayısının arttıkça d eksenli indüktansı belirli aralıkta değişirken q indüktansı azalmaktadır. İndüktansın azalması L_d/L_q oranını arttırmakta dolayısıyla moment ve güç faktörünü γ ’ü arttırmaktadır. Şekil 8 a ve b’de elde edilen sonuçlara göre yapılan tasarımda 15 kW’lık motor çalışmasında moment değeri 95,5 Nm olması gerektiğinde bariyer sayısına göre elde edilen sonuçlar neticesinde dört bariyerli tasarım uygun görülmüştür. SynRM’nin 15kW için en uygun değeri dört bariyerli rotor tasarımında elde edilmiş olup, moment dalgalanmasının haricinde rotor tiplerinin karşılaştırılması için indüktans değerlerinin hesaplanması yapılmıştır. Bariyer sayısına göre indüktans değerleri Şekil 9’da verilmiştir. SynRM’nin Tip1 ve Tip 2 rotor tasarımının indüktans karşılaştırması yapılacak olursa, burada L_d/L_q oranının en yüksek olduğu değer en iyi sonucu verecektir. Tip 2 dört bariyerli rotor tasarımında L_d/L_q oranı 6,13 mH olarak hesaplanmıştır.

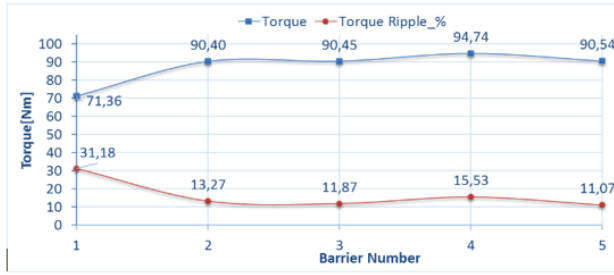


Şekil 6. a) 1 bariyerli rotorun moment ve moment dalgalanması b) 2 bariyerli rotorun moment ve moment dalgalanması c) 3 bariyerli rotorun moment ve moment dalgalanması d) 4 bariyerli rotorun moment ve moment dalgalanması e) 5 bariyerli rotorun moment ve moment dalgalanması
 (a) 1barrier rotor torque and torque ripple b) 2 barrier rotor torque and torque ripple c) 3 barrier rotor torque and torque ripple d) 4 barrier rotor torque and torque ripple e) 5 barrier rotor torque and torque ripple

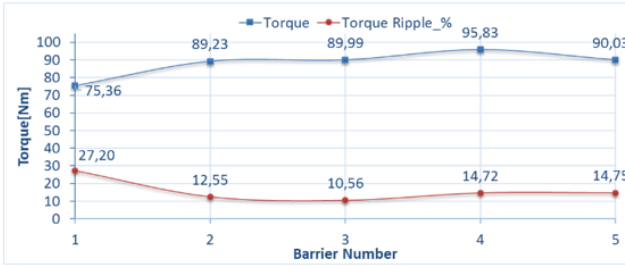


Şekil 7. 5 Bariyerli rotor hava/demir oranı optimizasyonu a) Tip1 b) Tip 2 (Barrier rotor air / iron ratio optimization a) Type 1 b) Type 2)

Çıkıntı oranının yüksek olması güç faktörünü ve maksimum moment değerinin etkilediğinden bütün SynRM tasarım çalışmalarında en yüksek çıkıntı oranı elde edilmeye çalışılmıştır.



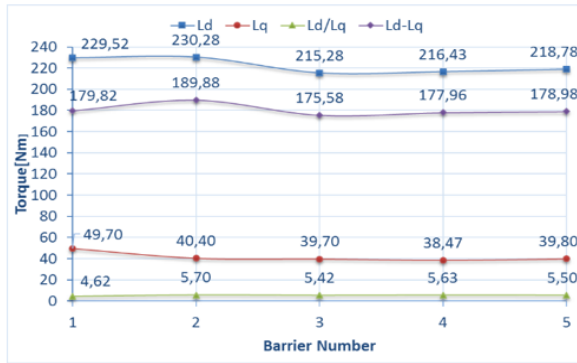
a



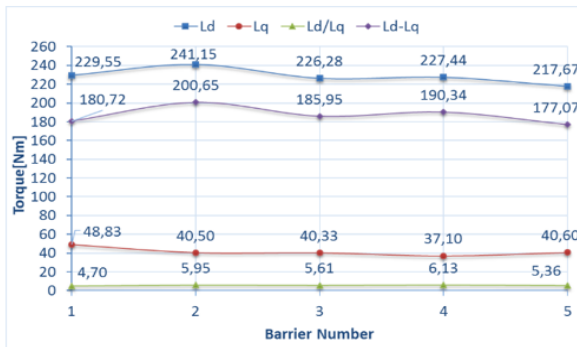
b

Şekil 8. Bariyer sayısına göre moment ve moment dalgalanması a) Tip1 b)Tip2

(Torque and torque ripple by the number of barrier a) Type 1 b) Type 2)



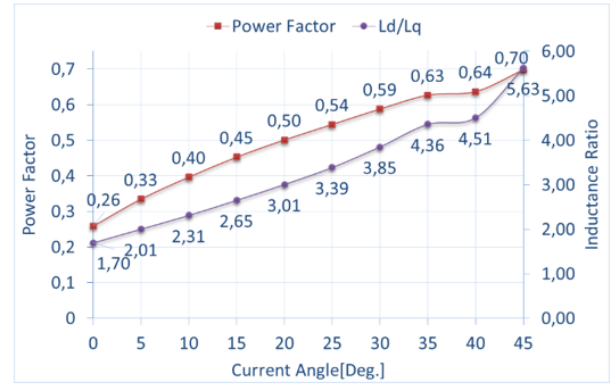
a



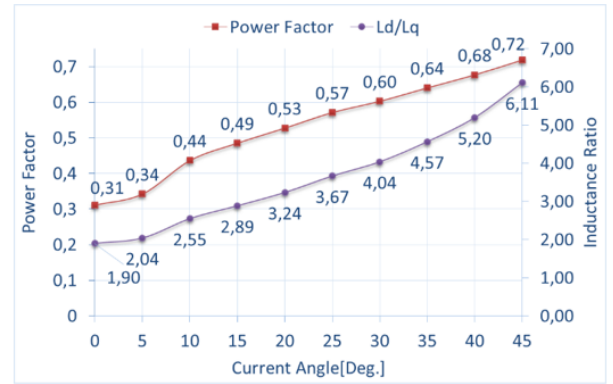
b

Şekil 9. Bariyer sayısına göre dq eksenli indüktans değerleri, çıkıntı oranı, indüktans farkı(45° derece) a)Tip1 b)Tip2 (Dq axis inductance values by the number of barriers, projecting ratio, inductance difference (45° degrees) a) Type 1 b) Type 2)

Yine aynı şekilde ideal rotor geometrisinin bulunması için L_d/L_q oranına göre güç faktörünün değişimi incelenmiştir. Güç faktörü, akım açısına göre analiz sonuçlarından elde edilen L_d ve L_q indüktans değerleri kullanılarak Denklem 1 ile hesaplanmıştır. Elde edilen çıkıntı oranı ve güç faktörü Şekil 10'da bu değişim gösterilmiştir. Her iki rotor tasarımında güç faktörü incelendiğinde Tip 2'ye ait güç faktörünün (0,719) daha yüksek bir değere sahip olduğu gözlenmiştir. Maksimum momentin elde edilebilmesi için rotor izolasyon genişliğinin rotor demir genişliğine oranı en önemli parametredir. Çıkıklık oranına dayanarak maksimum motor güç faktörünü veren eşitlik elde edilmiş ve 0,7 güç faktörünün optimal rotor dizaynı ile gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen parametrik analizler sonucunda SynRM'nin rotor geometrisinin tasarımı için kullanılan Tip1 ve Tip 2 rotorları karşılaştırılmıştır. Karşılaştıran sonuçlar, Bariyer sayısı, Hava demir oranı, Moment değeri, Moment dalgalanması, İndüktans değişimi, İndüktans oranı (çıkıntı oranı), Güç faktörü, Nüve (demir) kayıpları.



a

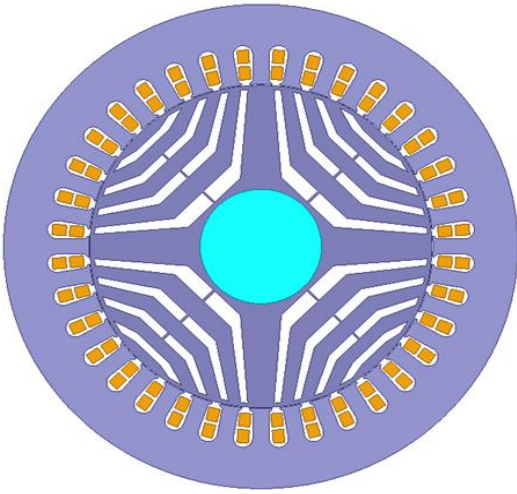


b

Şekil 10. Dört bariyer dq eksenli indüktans değerleri a)Tip1 b)Tip2

(Four barrier dq-axis inductance values, a) Type 1 b) Type 2)

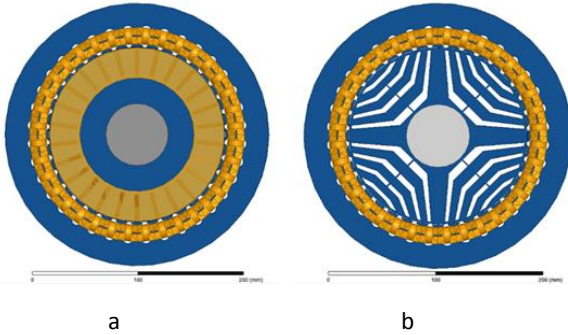
Karşılaştırılan bu sonuçlar doğrultusunda en uygun değerlerin elde edildiği rotor geometrisi Tip 2 dört bariyerli SynRM uygun görülmüştür. Bir sonraki bölümde Tip2 dört bariyerli rotor geometrisinin bütün analiz sonuçları verilerek asenkron motor ile karşılaştırılmıştır. Şekil 11'de en uygun akı bariyeri tipi ve geometrisi verilmiştir.



Şekil 11. SynRM akı bariyerlerinin en uygun rotor geometrisi
(Optimal geometry of the rotor flux barrier SynRM)

3. ASENKRON MOTOR İLE SynRM KARŞILAŞTIRILMASI (SynRM COMPARISON WITH INDUCTION MOTOR)

Simülasyonlar sonucunda uygun geometride tasarlanan SynRM ile aynı güçte ve boyutta asenkron motor geometrisi Şekil 12’de verilmiştir [29]. Tablo 4’de bu çalışmada kullanılan piyasada hali hazırda bulunan asenkron motorun etiket değerleri verilmiştir.



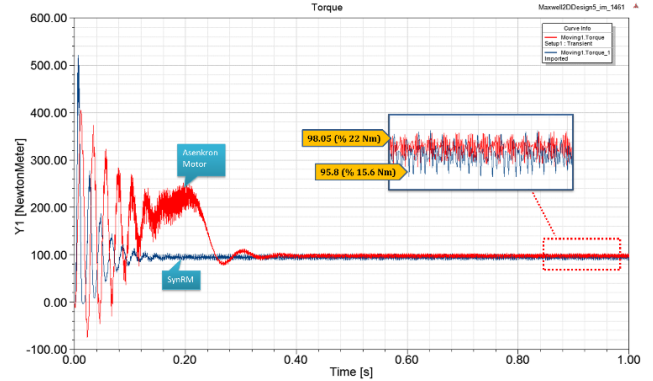
Şekil 12. a) Asenkron motor b) SynRM geometrileri
(a) Induction motor b) geometries SynRM)

Tablo 4. Asenkron motor etiket değerleri
(Asynchronous motor nameplate values)

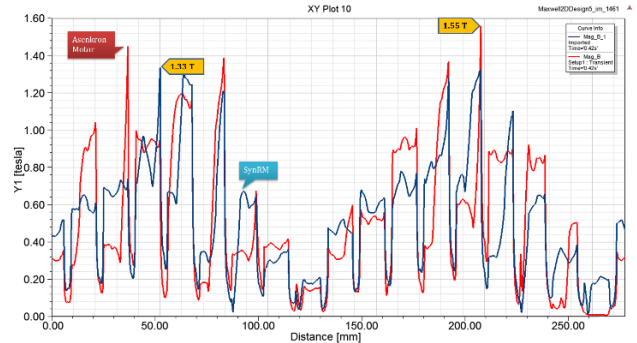
Ürün Modeli	SDU_160L - 4	Güç	15 kW
Gerilim	380V	Faz	3
Frekans	50Hz	Bağlantı tipi	Δ
Hız	1460 min ⁻¹	Sac Tipi	M19_24G

Şekil 13’de asenkron motor ve SynRM’nin moment değerleri karşılaştırılmıştır. Bu moment eğrisinde asenkron motora nominal yükte direk yol verilerek 0,38s’de 1461 dev/d’de uygun moment değerine ulaştığı görülmektedir. SynRM nominal yükte ve 1500 min⁻¹’de gerilim modlu analiz sonuçları alınmıştır. Eğride moment değerleri ve % moment dalgalanmaları verilmiştir. Şekil 14’de asenkron motor ve senkron relüktans motorun hava aralığındaki manyetik akı değişimi karşılaştırılmıştır. Şekil 14 akı dağılımları

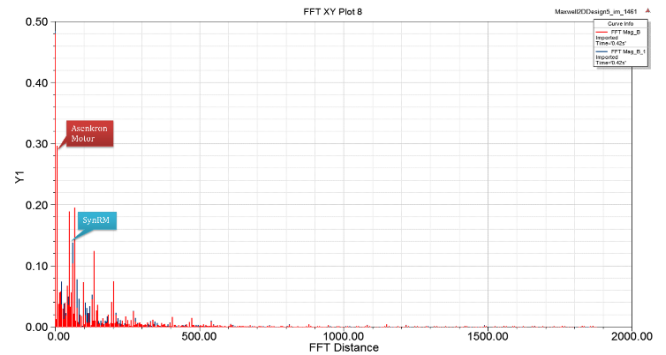
incelendiğinde akı dağılımı rotor, hava aralığı ve stator üzerinden düzgün bir şekilde (hava aralığında kırılmaya uğramadan) devresini tamamlar. Yine Şekil 15’de hava aralığı harmonik analizi grafiksel olarak verilmiştir. Bunun anlamı tasarlanan motorların hava boşluğunun uygun değerde olmasıdır. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun sinüzoidal dağılımının bozulması moment dalgalanmasını arttırmaktadır [30]. Asenkron motor ve SynRM’nin akı yoğunluklarının sinüzoidal dağılımlarını karşılaştırdığımızda asenkron motorun manyetik akı yoğunluğunun dağılımı SynRM’ye göre daha bozuktur. Bu yüzden moment dalgalanması SynRM’ye göre fazladır.



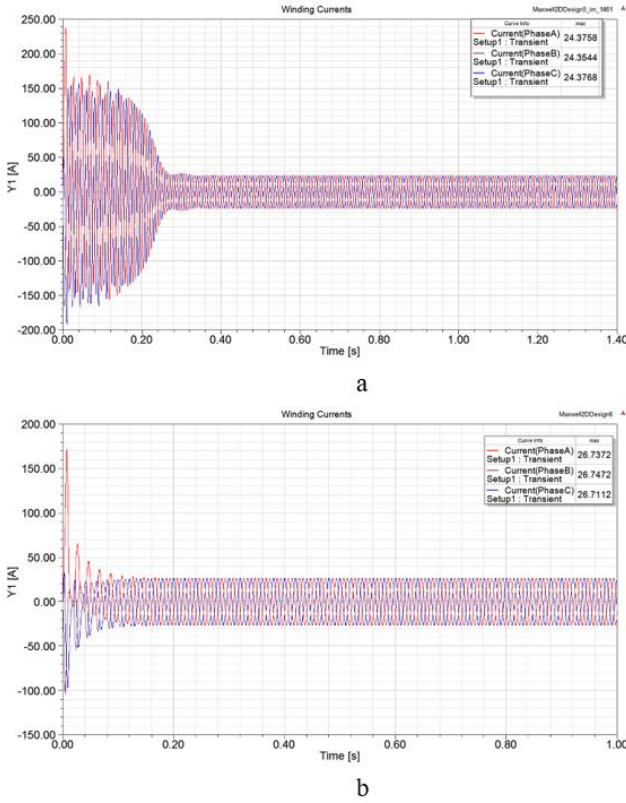
Şekil 13. Asenkron motor ve SynRM moment eğrileri
(Induction motors and torque curves SynRM)



Şekil 14. Asenkron motor ve SynRM’nin hava aralığı manyetik akı yoğunluğu değişimi
(SynRM'n and asynchronous motor the air gap magnetic flux density change)



Şekil 15. Asenkron motor ve SynRM’nin hava aralığı manyetik akı yoğunluğu harmonik analizi
(Asynchronous motor and SynRM the air gap magnetic flux density harmonic analysis)



Şekil 16. a) Asenkron motor akım eğrisi b) SynRM akım eğrisi (a) Induction motor current curve b) SynRM current curve)

Şekil 16 a ve b'de asenkron motor ve SynRM'un nominal yükte çektiği akım grafikleri gösterilmiştir. Görüldüğü üzere senkron relüktans motor çok daha çabuk nominal akımına oturmaktadır. Tablo 5'de asenkron motor ve SynRM'ye ait bütün veriler karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar, aynı stator yapısına sahip her iki motor aynı gücü vermektedir. Motorların verimleri incelendiğinde IE1 (%89,6) sınıfında olan asenkron motor rotoru değiştirilerek SynRM haline geldiğinde veriminin IE3 (92,6) sınıfına yükseldiği gözlenmiştir.

Tablo 5. Asenkron motor ve SynRM karşılaştırılması (Comparison of asynchronous motors and synrm)

Motor Tipi	Asenkron Motor	SynRM-M530_50A
Hız[rpm]	1460	1500
Frekans[Hz]	50	50
Kayma[%]	2,69	0
V_{fz} [rms]	380	380
I_{fz} [rms]	17,26	19,36
Stator Bakır Kaybı[W]	746,2	785
Rotor Bakır Kaybı[W]	430,55	0
Diğer Kayıplar[W]	548,4	469,6
Toplam Kayıp[W]	1725,15	1219,3
Moment[Nm]	98,05	95,57
Moment Dalgalanma[%]	22	10,3
Giriş Gücü[kW]	16,72	16,21
Çıkış Gücü[kW]	14,99	15
Güç Faktörü	0,86	0,75
Verim[%]	89,6	92,5

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Günümüzde senkron relüktans motorların tasarım ve uygulamasına yönelik birçok araştırma ve çalışma gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde akademik düzeydeki bu çalışmaların motorun yapısal tasarımı ve kontrol devresi tasarımı üzerine yapıldığı sonucuna varılabilir. Bu çalışmanın ana hedefi SynRM tasarımı ve asenkron motor ile karşılaştırılabilecek bir yapıya ve özelliklere sahip olan SynRM'nin verimini artırılmasıdır. Bu çalışma için stator tasarımı nümerik olarak gerçekleştirilmiş ve hem asenkron motor hemde SynRM için aynı yapı üzerinde analizleri yapılmıştır. SynRM'nin veriminin yanı sıra moment dalgalanmasının minimum düzeye indirilmesi için yapılan iki farklı rotor geometrisinin optimizasyonu ile en uygun moment yoğunluğu ve dalgalanmasının elde edildiği rotor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu kapsamlı çalışmada, günlük hayatımızda ve endüstride birçok alanda kullanılan asenkron motorların yerini alabilecek düşük ataletli ve yüksek momentli sistemlerde kullanılması uygun görülen dört kutuplu senkron relüktans motor tasarlanmıştır. Öncelikle motor tasarımında kullanılan parametreler ortaya konularak analitik hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Geometrik parametrelerin SynRM üzerindeki etkileri adım adım incelenerek motorun performansını arttırmak için uygun değerlerin seçilmesi sağlanmıştır. Yapılan çalışmada analitik değerlerin doğruluğunu kanıtlamak için sonlu elemanlar yöntemi kullanan paket program kullanılmıştır. Motorun iki boyutlu analizleri için Maxwell V16 paket programı tercih edilmiştir. Tasarlanan motorun rotor yapısına karar vermek için parametrik analizler gerçekleştirilerek en uygun değerde yani en düşük moment dalgalanmasına sahip ve en yüksek moment yoğunluğunu veren tasarım tercih edilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları doğrultusunda asenkron motor ile SynRM karşılaştırıldığında aynı yapıya sahip SynRM'nin verimi asenkrona göre artırılmıştır. Alınan değerlere göre SynRM'nin verim değeri %3'lük bir yükselme meydana gelmiştir. Böylece verimi IE1 sınıfında olan asenkron motor rotoru değiştirilerek IE3 sınıfına yükseltilmiştir. Moment dalgalanmalarında yaklaşık %8'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Asenkron motorun statoru kayıpsız özel tasarım rotor yapısı ile birleştirildiğinde akı bariyerli senkron relüktans motor elde edilerek yüksek verimli ve uzun ömürlü bir yapı elde edilmiştir. SynRM'yi uzun ömürlü yapan rotor kayma kaybının olmamasıdır. Böylelikle asenkron motora göre daha soğuk bir çalışma performansı elde edilmiştir. Soğuk çalışma senkron relüktans motorun ısı sınıfını da yükseltmektedir. Bu durum sargıların izolasyonu ve rulmanlar için daha uzun bir kullanım ömrü ve bakım periyodu sunmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Öner Y., Öztürk M., The Magnetic Analysis and Design of New Type Axial Flux Switched Reluctance Motor Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 30 (3) 461-474, 2015.
- Kostko J.K., Polyphase reaction synchronous motors, Journal Amer. Inst. Elect. Engrs, 42, 1162-1168, 1923.

3. Lawrenson P.J., Agu L.A., Theory and performance of polyphase reluctance machines, IEE Proceedings, 111, 1435-1445, 1964.
4. Cruickshank A.J.O., Menzies R.W., Anderson A.F., Axially laminated anisotropic rotors for reluctance motors, Proc.IEE, 13, 2058-2060, 1966.
5. Honsinger V.B., The inductances L_d and L_q of reluctance machines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 90, 298-304, 1971.
6. Staton D.A., Miller T.J.E., Wood S.E., Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor, IEE Proceedings-B, 140, 249-259, 1993.
7. Matsuo T., Lipo T.L., Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine, IEEE Transactions On Energy Conversion , 9, 359-365, 1994.
8. Boldea I., Fu Z.X., Nasar S.A., Torque Vector Control (TVC) of Axially-Laminated Anisotropic (ALA) Rotor Reluctance Synchronous Motors, EMPS Journal, 19, 381-398, 1991.
9. Platt D., Reluctance motor with strong anisotropy, IEEE Transactions on Industry Applications, 28, 652-658, 1992.
10. Soong W.L., Staton D.A., Miller T.J.E., Design of a new axially-laminated interior permanent magnet motor, IEEE Transactions on Industry Applications, 31, 358-367, 1995.
11. Vagati A., Pastorelli M., Scapino F., Franceschini G., Impact of cross saturation in synchronous reluctance motors of the transverse-laminated type, IEEE Trans. Ind. Applicat., 36, 1039-1046, 2000.
12. Fratta A., Vagati A., A reluctance motor drive for high dynamic performance applications, IEEE Transactions on Industry Applications, 28, 873-879, 1992.
13. Boldea I., Fu Z.X., Nasar S.A., High-performance reluctance generator, IEE Proceedings, 140, 124-130, 1993.
14. Karnper M.J., Volschenk A.F., Effect of Rotor Dimensions and Cross Magnetisation on L_d and L_q Inductances of Reluctance Synchronous Machine with Cageless Flux Barrier Rotor, IEE Proceedings Electric Power Applications, 141, 213-220, 1994.
15. Parasiliti F., Villani M., Optimisation analysis of synchronous reluctance motor design, Electrical Machines and Drives, Seventh International Conference on 412, 276-280, 1995.
16. Kinyama H., Kawano S., Hond Y., Higaki T., Morimoto S., Takeda Y., High Performance Synchronous Reluctance Motor with Multi-flux Barrier for the Appliance Industry, Industry Applications Conference, 1, 111-117, 1998.
17. Bomela X.B., Kamper M.J., Effect of machine design on performance of reluctance synchronous machine, Industry Applications Conference, Conference Record of the IEEE, 1, 515-522, 2000.
18. Tsuchiya J., Mishima K., Kimura G., A Study On Torque Ripple Reduction Of Synchronous Reluctance Motor, Power Electronics and Drive Systems, IEEE International Conference, 2, 452-455, 2001.
19. Hatajaa J., A Comparative Performance Study Of Four-Pole Induction Motors And Synchronous Reluctance Motors In Vanable Speed Drives, Lappeenranta University of Technology, Phd. Thesis, 138, Finland, 2003.
20. Boglietti A., Cavagnino A., Pastorelli M., Vagati A., Experimental comparison of induction and synchronous reluctance motors performance, Industry Applications Conference, Fourtieth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2005, 1, 474-479, 2005.
21. Boglietti A., Pastorelli M., Induction and synchronous reluctance motors comparison, Industrial Electronics, IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE, 2041-2044, 2008.
22. Agrawal A., Srivastava A., Trivedi A., Performance investigation of three phase synchronous reluctance motor using finite element analysis, in Power India Conference, 2012 IEEE Fifth, 1-5, 2012.
23. Ferrari M., Bianchi N., Doria A., Fornasiero E., Design of synchronous reluctance motor for hybrid electric vehicles, Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International, 1058-1065, 2013.
24. Park J.H., Seo J.H., Cha C.H., Lee J., Characteristics analysis of 15kW industrial machine using Synchronous Reluctance Motor for high efficiency, Electrical Machines and Systems (ICEMS), International Conference, 139-142, 2013.
25. Moghaddam R.R., Gyllensten F., Novel High-Performance SynRM Design Method: An Easy Approach for A Complicated Rotor Topology Industrial Electronics, IEEE Transactions, 61, 5058-5065, 2014.
26. Lange T., Kerdsup B., Weiss C., De Doncker R. W., Torque ripple reduction in Reluctance Synchronous Machines using an asymmetric rotor structure, in Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 7th IET International Conference on, 1-5, 2014.
27. Hong C.H., Liu H.C., Seol H.S., Jun H.W., Lee J., Decrease torque ripple for SynRM using barrier arrangement design, Electrical Machines and Systems (ICEMS) International Conference, 1834-1837, 2014.
28. Pellegrino G., Cupertino F., Gerada C., Automatic Design of Synchronous Reluctance Motors Focusing on Barrier Shape Optimization, Industry Applications IEEE Transactions on, 51, 1465-1474, 2015.
29. Ersöz M., Akı Bariyerli Senkron Relüktans Motor Tasarımı ve Uygulaması Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2015.
30. Ansoft Corporation, Maxwell 3D-Technical Notes, 656-718, 2002.
31. Han S., Jahns T., Soong W., Güven M., Torque Ripple Reduction in Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Using Stator With Odd Number of Slot Per Pole Pair, Energy Conversion IEEE Transactions, 25, 118-127, 2010.