Yüksek Hızlı Asenkron Motorların Farklı Rotor Yapıları için Analizi
Analysis of High-Speed Induction Motors for Different Rotor Designs

Anıl YILMAZ, Abdullah POLAT, Lale T. ERGENE

Elektrik Mühendisliği
İstanbul Teknik Üniversitesi
yilmazani@itu.edu.tr, polata@itu.edu.tr, ergenel@itu.edu.tr

Özet

Son yıllarda artan enerji ihtiyacı sebebiyle endüstride kullanılan motorların güç yoğunlukları büyük önem kazanmıştır. Yüksek hızlı asenkron motorlar; yüksek güç yoğunluğuna sahip olmaları, küçük kurulum alanı kaplamaları ve dişli çarklara olan ihtiyacı ortadan kaldırmaları sebebiyle bu ihtiyaca uygun bir şekilde yanıt vermektedirler. Asenkron motorlar basit bir yapıya sahip olmaları, maliyetlerinin ucuz olması ve bakım masraflarının az olması sebebiyle piyasada büyük ölçüde tercih edilmektedir. Kütlesel rotor yapısı ise yüksek hız uygulamalarında artan merkezkaç kuvvetine dayanıklı olmaları sebebiyle yüksek hızlı asenkron motor uygulamalarında özellikle tercih edilmektedir. Bu çalışmada farklı rotor yapılarına sahip yüksek hızlı asenkron motorların, Sonlu Elemanlar Yöntemi yardımıyla, V/f kontrol yöntemi ile moment-kayma ve frekans-moment karakteristikleri analiz edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yüksek Hızlı Asenkron Motor, Kafesli Asenkron Motor, Kütlesel Rotor, Sonlu Elemanlar Yöntemi, V/f Kontrol

Abstract

In recent years, power density becomes more important due to increasing demand of the energy. High-speed induction motors are convenient to response this demand because they have high power density, small installation field and absence of gearboxes. Asynchronous motors which have simple construction, low manufacture cost and low maintenance costs are very popular in the market. In high-speed applications, centrifugal forces are increasing. Solid rotors have high resistance to centrifugal forces and these type rotors are convenient for high-speed applications. In this research, high-speed induction motors with different rotor types are analyzed by using Finite Element Method. The results are analyzed in terms of the torque-slip and frequency-torque characteristics with using V/f control.

Keywords: High-Speed Induction Motor, Squirrel Cage Induction Motor, Solid Rotor, Finite Element Method, V/f Control

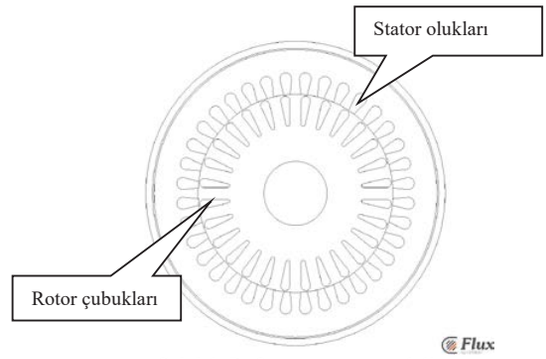
1. Giriş

Asenkron motorlar 1800'lerin sonlarında icat edilmelerinden günümüze kadar sanayinin her alanında sürekli kullanılmaktadır. Asenkron motorlar basit bir yapıya sahip olması, ucuz maliyete sahip olması, kolay kontrol edilebilme özellikleri sebebiyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. 1960'larda analiz yöntemlerindeki gelişmeler ve 1980'lerde güç elektroniğindeki önemli gelişmeler; asenkron motor sürücü devrelerinin geliştirilmesinde ve analiz edilmesinde önemli bir rol oynamıştır. Bu gelişmeler eşliğinde farklı sürücü devreleri kullanılarak asenkron motorların hız ayarı kolaylıkla yapılabilir hale gelmiştir [1]. Kütlesel rotor kullanılarak yapılan ilk tasarımlar 1950'lerde olmasına rağmen, güç elektroniğindeki gelişmelere bağlı olarak 1990'larda tekrar yüksek hız uygulamalarında popüler hale gelmiştir. Kütlesel rotorların performanslarını arttırmaya yönelik çeşitli malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemelerin dirençleri ve doyma akı yoğunluğu değerleri farklılık göstermektedir. Kullanılan bu malzemelerin rotorda sebep olduğu kayıplar malzeme türüne göre değişmektedir. Bu doğrultuda farklı malzemeler ile yapılan tasarımlara ait performans analizleri hakkında çalışmalar yapılmıştır [2]. Bir diğer yandan rotorda kullanılan geometrik yapının değiştirilmesiyle motorun manyetik performansını arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, bu değişiklikler kütlesel rotorda yarıklı yapı, kısa devre bilezikli yapı ve kaplamalı yapılar şeklinde çeşitli kombinasyonlar denenerek uygulanmıştır [3].

Bu çalışmada, asenkron motorların farklı rotor yapıları modellenerek; yüksek dönme hızlarına V/f kontrolü yapılarak erişilmiştir.

2. Referans Asenkron Motor Modeli

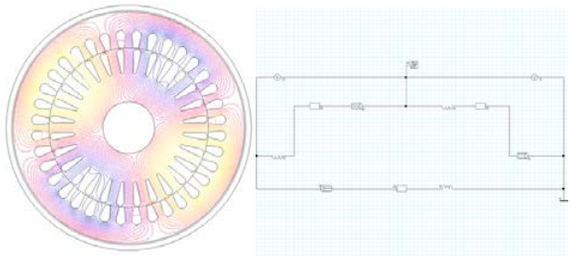
Referans motor; 3 fazlı, 4 kutuplu, 50 Hz, 4 kW anma çıkış gücüne sahip kafesli bir asenkron motordur. Motorun statoru *Şekil 1*' de gösterildiği gibi 36 oluğa, rotor ise 28 rotor çubuğuna sahiptir.



Şekil 1: Referans motor modeli

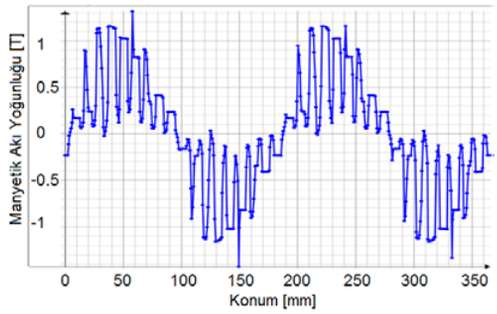
Makale Türü: 1. Ulusal Elektrik Enerjisi Dönüşümü Kongresi Bilimsel Makalesi
Gönderim Tarihi: 06-03-2018 **Kabul Tarihi:** 07-06-2018

Referans motor; elektrik makinalarının analizinde tasarımcılar tarafından çoğunlukla tercih edilen Sonlu Elemanlar Yöntemi tabanlı Flux2D isimli iki boyutlu analiz yapabilen bir yazılımla modellenmiştir. Bu modellemeyle elde edilen analiz sonuçları detaylı olarak incelenmiştir. *Şekil 2* de referans motora ait dört kutup yapısının belirgin bir biçimde görüldüğü manyetik eş akı çizgileri ve elektriksel eşdeğer devre bulunmaktadır.



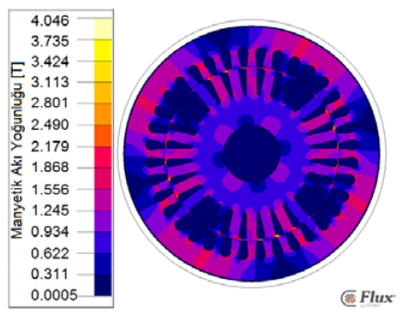
Şekil 2: Referans motorun manyetik eş akı çizgileri ve elektriksel eşdeğer devre

Referans motora ait manyetik akı yoğunluğunun normal bileşeni; herhangi bir an için hava aralığı çevresi boyunca *Şekil 3*'te görüldüğü gibi elde edilmiştir. Kutup sayısı ve manyetik relüktans değişiminin oluşturduğu stator oluk girintileri *Şekil 3'* te açıkça görülmektedir.



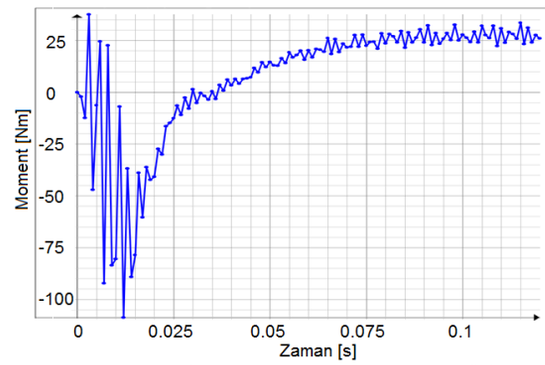
Şekil 3: Referans motorun hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunun normal bileşeni

Referans motorun manyetik akı yoğunluğu *Şekil 4*'teki gibi elde edilmektedir. Bu doğrultuda, motorun farklı bölgelerindeki manyetik akı yoğunlukları değerleri incelenmiş ve farklı tasarımlardaki değişimleri gözlemlemek adına referans olarak belirlenmiştir.



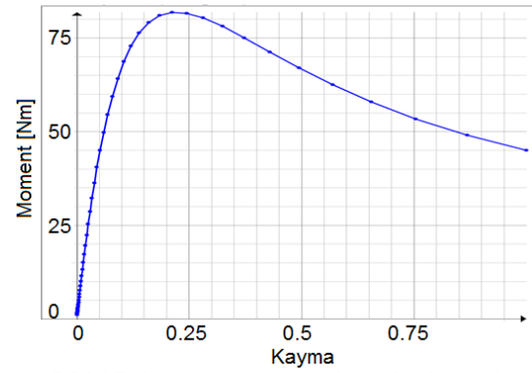
Şekil 4: Referans motorun manyetik akı yoğunluğu

Referans motorun moment-zaman karakteristiğinde motorun yaklaşık olarak 0,1 saniye sürede kararlı hale geçtiği *Şekil 5*'teki gibi gözlenmektedir.



Şekil 5: Referans motorun moment-zaman grafiği

Referans motorun farklı kayma değerlerinde elde edilen çıkış moment değeri *Şekil 6*'da gösterilmiştir.



Şekil 6: Referans motorun moment-kayma karakteristiği

Referans motor maksimum 81.79 [Nm] moment değerine ulaşırken, anma çıkış momenti değeri 26.8 [Nm] şeklinde elde edilmiştir. Farklı kayma değerlerinde elde edilen çıkış momenti değerleri *Tablo 1*'deki gibi gösterilebilir. Anma çıkış momenti plaka değerinde 26 Nm olarak tariflenmiş olup analiz sonucunda elde edilen değerle %3 göre hataya sahiptir. Bu fark; sürtünme ve vantilasyon kayıplarının sonlu elemanlar analizi içine dahil edilememesinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 1: Farklı kayma değerlerindeki çıkış moment değerleri

Kayma	Moment [Nm]
0.001	1.099
0.0273	26.80
0.04533	40.73
0.22267	81.83
0.766	52.85
1	44.96

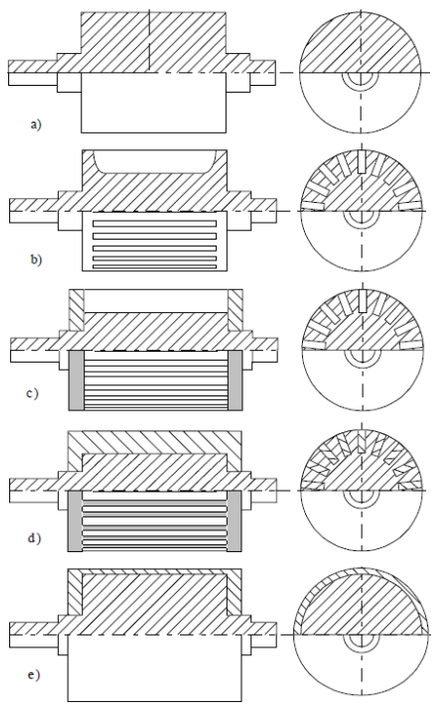
3. Kütlesel Rotorlu Asenkron Motorlar

Kütlesel rotorlar, asenkron motorların yüksek hızlı uygulamalarına uygun yapıdaki rotor yapılarıdır. Kütlesel rotorlar basit bir geometrik yapıya sahip olup; yüzeyleri pürüzsüzdür. Ayrıca, mekanik olarak yüksek hızlarda meydana gelen yüksek merkezkaç kuvvetlerine dayanıklıdır. Yüksek hızlara erişildikçe kütlesel rotorlardaki güç yoğunluğu artmaktadır. Bunlara karşın kütlesel rotorlar elektromanyetik olarak zayıf özelliklere sahiplerdir. Girdap akımlarının rotor üzerinde etkili olması rotordaki kayıp artışına ve dolayısıyla verimin düşmesine neden olmaktadır [4]. Manyetik akı

geçirgenliği kütlesel rotorların performansını önemli derecede etkileyen faktörlerden birisidir. Manyetik akı rotor derinliklerine indikçe çıkış momentinde artış olur. Bu yüzden rotorda kullanılan malzemenin iletkenliği büyük önem kazanır. Ayrıca, kütlesel rotor geometrilerinde performans arttırmaya yönelik değişiklikler yapılmaktadır.
Kütlesel rotorların yüksek hızlara erişebilmesi için hız kontrolü yapılması gerekmektedir. Motorlarda hız kontrolü farklı şekillerde sağlanabilir. Bu çalışmada kütlesel rotorlu motorların, yüksek besleme frekansları ile yüksek hızlara erişimi sağlanmıştır. Kütlesel rotorlu asenkron motorların yüksek hızlara erişmesinde V/f kontrolü uygulanmıştır. V/f kontrol alternatif akım ile beslenen motorlarda hız kontrolü yapmak amacıyla kullanılmaktadır. V/f kontrolü için gerekli olan güç elektroniği devresinde temel olarak üç eleman yer almaktadır. Bunlar doğrultucu, doğru akım filtresi ve evirici olarak sıralanabilir. Motorlar anma frekansından yüksek frekanslarla beslendiği için V/f kontrolü sabit güç bölgesinde gerçekleştirilmiştir.

3.1. Farklı kütlesel rotor asenkron motor yapıları

Kütlesel rotorların birçok rotor geometri yapısı vardır. Bunlar rotordaki geometrik yapının ve malzeme çeşidinin değiştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu değişiklikler rotor performansını arttırmaya yöneliktir. Kütlesel rotor çeşitleri *Şekil 7*'deki gibi gösterilmektedir:

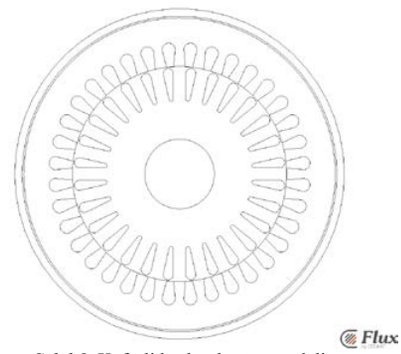


Şekil 7: Farklı kütlesel rotor yapıları a) kafessiz kütlesel rotor, b) yarıklı kütlesel rotor, c) kısa devre bilezikli yarıklı kütlesel rotor, d) kafesli kütlesel rotor, e) kaplamalı kütlesel rotor [5]

Bu çalışmada, silisli sac yerine kullanılan dökme demir sebebiyle girdap akımının moment üretimine katkısı ve bakır kaplamanın moment performansına etkisini araştırma amacıyla; kafesli kütlesel rotor, kafessiz kütlesel rotor ve bakır kaplamalı kütlesel rotor yapıları üzerinde durulmuştur.

3.1.1. Kafesli kütlesel rotor modeli

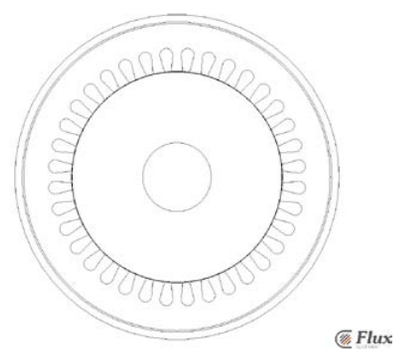
Kafesli kütlesel asenkron rotor, kafesli asenkron motor ile aynı geometriye sahiptir ancak kafesli asenkron motordaki rotor malzemesi olan silisli sac (lamine sac) yerine dökme demir kullanılmıştır. Girdap akımı kayıplarını azaltmada kullanılan silisli sac yerine dökme demir kullanmak bu akımların artmasına sebep olacaktır. Bu kayıpları doğru modelleyebilmek için rotorun elektriksel direnç değeri tanımlanmalıdır. Rotor malzemesi hariç diğer tüm diğer malzeme özellikleri referans motor ile aynı alınmıştır.



Şekil 8: Kafesli kütlesel rotor modeli

3.1.2. Kafessiz kütlesel rotor modeli

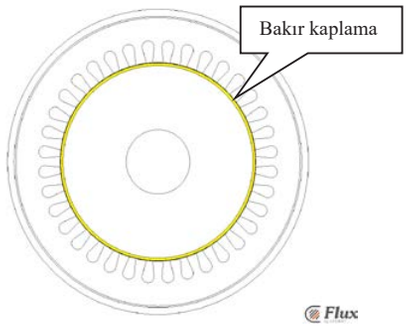
Kafessiz kütlesel rotor, rotor çubuksuz kütlesel bir rotorun asenkron motorda kullanılması ile gerçekleştirilir. Tüm kütlesel rotor yapılarında olduğu gibi bu rotor yapısında da malzeme olarak dökme demir kullanılmıştır. Rotor yapısında kafesli yapılardan farklı olarak alüminyum iletken çubuklar yer almamaktadır. Statora ait geometri ve malzeme özellikleri referans motor ile aynı tutulmuştur.



Şekil 9: Kafessiz kütlesel rotor modeli

3.1.1. Bakır kaplamalı kütlesel rotor modeli

Bakır kaplamalı kütlesel rotor yapısı, kafessiz kütlesel rotorun yüzeyinde et kalınlığı çok ince ve iletkenliği yüksek malzeme kullanılarak oluşturulmaktadır. İletken malzeme olarak bakırın işlenirliğinin kolaylığı ve manyetik geçirgenliğinin hava boşluğundaki değere yakın olması sebebiyle kullanılmaya uygun görülmüştür [6]. Rotor yapısında gene kafesli yapılardan farklı olarak alüminyum iletken çubuklar yer almamaktadır. Statora ait geometri ve malzeme özellikleri referans motor ile aynı tutulmuştur.

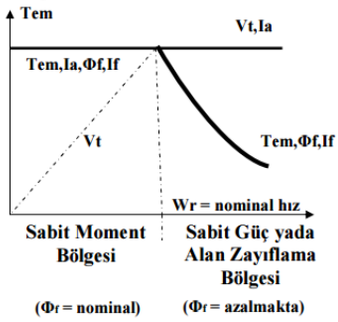


Şekil 10: Bakır kaplamalı kütlesel rotor

3.2. V/f Kontrol

Referans motor üzerinde yüksek hızlı uygulamalar için uygun olan kütlesel rotor modellemesi yapıldıktan sonra modeller farklı frekans değerlerinde beslenerek motorların yüksek hızlara erişmesi sağlanmıştır.

V/f kontrolü *Şekil 11'* de görüldüğü gibi motorlarda anma frekansından yüksek frekans değerlerinde sabit güç bölgesinde çalışmasıyla gerçekleştirilebilmektedir. Bu bölgede motor sabit anma gerilimiyle beslenirken, frekans değeri yüksek değerlere çıkmaktadır. Bu durum motorda alan zayıflatmaya neden olup motor üzerindeki akı değerinin azalmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda yüksek hızlara erişen motordaki anma moment değeri frekans ile orantılı olarak azalmaktadır.



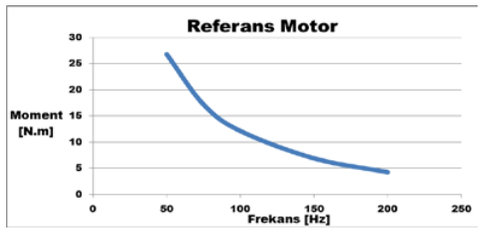
Şekil 11: V/f kontroldeki gerilim-akım ve moment-akı değişimi [7]

4. Analiz Sonuçları ve Karşılaştırma

Yüksek hızlı asenkron motorların analiz sonuçları farklı frekans değerleri için ve farklı motor tipleri için elde edilmiştir.

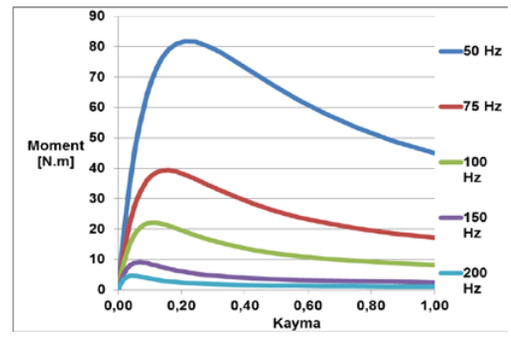
4.1. Farklı frekans değerleri için sonuçlar

Referans motor yüksek frekanslarda beslendikçe çıkış moment değeri azalmaktadır. Bu durum sabit bir kayma değerinde (0.0273'de) *Şekil 12*'te açıkça görülmektedir.



Şekil 12: Referans motorun yüksek hızlardaki moment eğrisi

Kafesli asenkron motorun yüksek hız karakteristiği anma frekansı ve sırasıyla 75 Hz, 100 Hz, 150 Hz ve 200 Hz beslemesi ile gözlenmiş ve sonuçlar Şekil 13 te sunulmuştur.

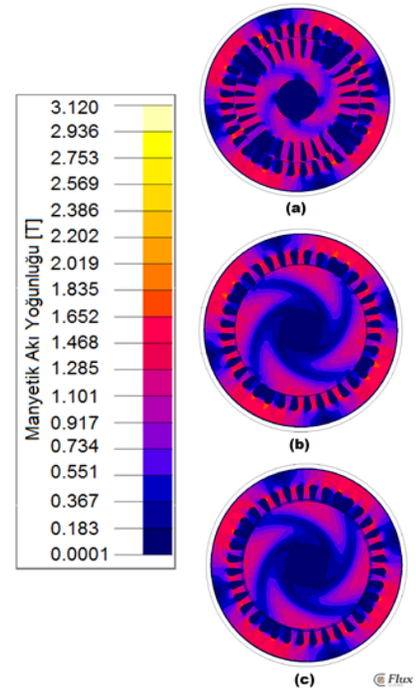


Şekil 13: Referans motorun farklı frekanslardaki moment-kayma karakteristiği

V/f kontrolünde anma frekansından daha düşük frekanslar sabit moment bölgesinde çalışır. Bu bölgede gerilim ile frekansın birbirlerine olan oranı sabit tutulur. Bu yüzden anma gerilimine kadar gerilim aynı oranda arttırılır. Anma frekansından sonraki bölgelerde ise motor artık alan zayıflatma bölgesine girmektedir.

4.2. Farklı rotor yapılarının sonuçları

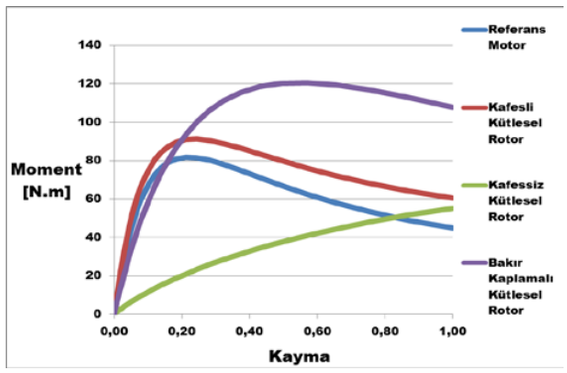
Kütlesel rotorların farklı geometrik yapılara sahip olması sebebiyle farklı manyetik akı yoğunluğu elde edilmektedir.Bu durum *Şekil 14*'de gözlenebilmektedir.



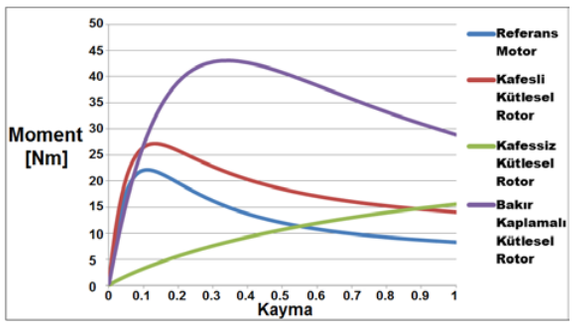
Şekil 14: Farklı rotor yapıları için manyetik akı yoğunluğu değişimleri: (a) kafesli kütlesel rotor, (b) kafessiz kütlesel rotor, (c) bakır kaplamalı kütlesel rotor

Şekil 14' de görüldüğü gibi kütlesel rotorlu yapılara geçildiğinde, rotor yapısında manyetik akı yoğunluğu dönel bir yapıya sahip olmaktadır. Bunun sebebi rotor derinliklerine indikçe artan endüktans değeri rotorda oluşan manyetik akıda bir faz farkı yaratarak bu faz farkına göre manyetik akı oluşmaktadır. Bu faz farkının bir diğer sebebi de girdap akımlarıdır.

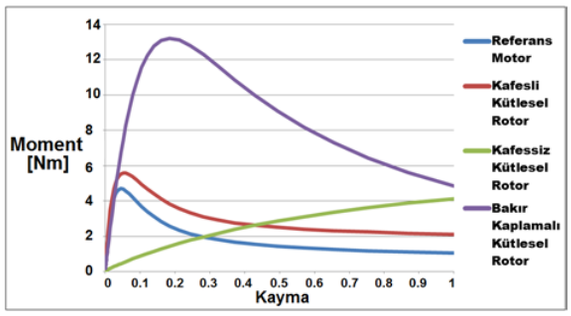
Farklı motor tiplerinin 50,100 ve 200 Hz'deki moment-kayma grafikleri sırasıyla *Şekil 15,16 ve 17*'de gösterilmiştir.



Şekil 15: Farklı motor modellerinin moment-kayma karakteristikleri (50 Hz)



Şekil 16: Farklı motor modellerinin moment-kayma karakteristikleri (100 Hz)



Şekil 17: Farklı motor modellerinin moment-kayma karakteristikleri (200 Hz)

5. Sonuç

Yüksek hızlı uygulamalar için analiz sonuçları alınan farklı rotor tipleri için; kafesli yapının rotor ve rotor çubuklarına sahip olması bir diğer deyişle farklı iki yapı içermesi sebebiyle yüksek hızlarda mekanik anlamda zorlanmalara yol açabilmektedir. Rotor geometrisinde yapılan değişiklikler eşliğinde, kafesli asenkron motorun rotor malzemesi olan silisli sac malzemesinin yerini dökme demirin almasıyla girdap akımları da moment üretimine katkıda bulunmuştur. Bunun sonucunda çıkış momenti referans motora göre artmıştır. Performans olarak iyi bir sonuç verse de mekanik zorlamaların etkisi devam etmektedir. Bir diğer rotor yapısı olarak rotor çubuklarının çıkarılması ile sade kütlesel rotor yapısının karakteristiği gözlemlenmiştir. Rotordaki empedans değerinin yüksek olması ve girdap akımlarının moment üretiminde yeteri kadar etkili olamaması sebebiyle çıkış moment değeri referans motora göre oldukça düşüş göstermektedir. Moment performansını arttırmak amacıyla rotor manyetik akı geçirgenliğinin arttırılması gerekmektedir. Bu amaçla manyetik geçirgenliği hemen hemen hava ile aynı olan bakır malzemesinin ince bir tabaka olarak kütlesel rotora uygulanması sonrasında moment değerinde ciddi bir artış gözlenmiştir. Bakır kaplama rotorda rotor çubuk etkisi oluşturup girdap akımlarının bu tabakada toplanıp moment üretiminde etkisini arttırmıştır. Bu sonuçlar eşliğinde rotorda kullanılan malzemenin iletkenlik değerine ve manyetik geçirgenliğine bağlı olarak, performans durumları, farklı kütlesel rotorlu asenkron motor tipleri açısından incelenmiştir.

6. Kaynaklar

[1] Mikami, H., Shimizu, Y., Seki, H., Kazumasa, I., Senoo, M., Historical Evolution of Motor Technology, Hitachi Review Vol. 60 No.1, 2011.

[2] Aho, T., Sihvo, V., Nerg, J., Pyrhönen, J., Rotor Materials for Medium-Speed Solid-Rotor Induction Motors, Proceedings of IEEE International Electric Machines & Drives Conference 2007. IEMDC'07, 2007

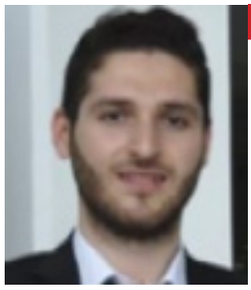
[3] Klima, J., Mach, M. & Vitek, O., Analysis of High Speed Squirrel Cage Induction Motors, Proceedings of IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, pp. 1302-1305, 2015.

[4] Mekuria, Y., G., Development of a High Speed Solid Rotor Asynchronous Drive fed by a Frequency Converter System, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 01.02.2013 (in German).

[5] Huppunen, J., High-speed solid rotor induction machine – electromagnetic calculation and design, Lappeenranta: Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, 2004.

[6] Ergene, L.T., Salon, S.J., Determining the Equivalent Circuit Parameters of Canned Solid-Rotor Induction Motors, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.41, No.7, pp.2281-2286, 2005.

[7] Sobczynski, D., Review of Solutions used in High-Speed Induction Motor Drives operating in Household Appliances, Journal of Power Electronics and Drives, Vol.1 (36), pp.27-39, 2016.



Anıl YILMAZ

1993 yılında Antakya'da doğdu. Hatay Osman Ötken Anadolu Lisesi'ni bitirdikten sonra 2012 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2017 yılında lisans eğitimini tamamlayıp aynı yıl Star Rafineri A.Ş. bünyesinde elektrik bakım mühendisi olarak çalışmaya başlamıştır ve halen aynı şirkette çalışmaya devam etmektedir.



Abdullah POLAT

1987 yılında İstanbul'da doğdu. 2004 yılında Bahçelievler Lisesi'ni ikincilik ile bitirdikten sonra 2005 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 2010 yılında lisans eğitimini tamamlayıp, aynı yıl kendi bölümünde yüksek lisans eğitimine ve araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır. Elektrik makineleri tasarımı, modellenmesi, analizi konularında çalışan Polat yüksek lisans tezini elektrik makineleri arıza tanısı alanında yaparak 2013 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. 2014 yılında başladığı doktora eğitimi şu anda tez aşamasındadır. Doktora esnasında, elektrik makineleri hakkındaki çalışmalarına, kontrol ve güç elektroniği konularını da dahil ederek rüzgar enerjisi üzerine tez çalışmalarına devam etmektedir.



Lale T. ERGENE

İTÜ Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği lisans programını 1992 yılında bitirerek Elektrik Mühendisi, yüksek lisans programını 1995 yılında bitirerek Elektrik Yüksek Mühendisi ünvanlarını almıştır. Doktorasını 2003 yılında Rensselaer Polytechnic Institute (RPI), NY, USA da Elektrik Güç Sistemleri Bölümünde tamamlamıştır. 1999-2004 yılları arasında MAGSOFT Corporation da elektrik makinaları konusunda danışman mühendis olarak çalışmıştır. RPI da 2004 yılında yarı zamanlı yardımcı docent olarak ders vermiştir. 2004-2009 yılları arasında İTÜ Bilişim Enstitüsü Hesaplamalı Bilim ve Mühendislik Anabilim Dalında, 2009-2012 yılları arasında İTÜ EEF Elektrik Mühendisliği Bölümünde yardımcı doçent olarak görev almıştır. Halen İTÜ EEF Elektrik Mühendisliği Bölümünde Doçent olarak görevine devam etmektedir. Uzmanlık alanları; elektrik makinalarının, tasarımı, modellenmesi ve kontrolü, yenilenebilir enerji sistemleri, superiletkenler ve sayısal yöntemler olarak sayılabilir.