

# Üç Fazlı Asenkron Motor Tasarımı ve FFT Analizi

## Three Phase Induction Motor Design and FFT Analysis

Murat TEZCAN<sup>1</sup>, A. Gökhan YETGİN<sup>2</sup>, A. İhsan ÇANAKOĞLU<sup>3</sup>, Mustafa TURAN<sup>4</sup>

<sup>1,3</sup>Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Dumlupınar Üniversitesi

<sup>1</sup>tezcan@dumlupinar.edu.tr, <sup>3</sup>acanakoglu@dumlupinar.edu.tr

<sup>2,4</sup>Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Sakarya Üniversitesi

<sup>2</sup>agyetgin@sakarya.edu.tr, <sup>4</sup>turan@sakarya.edu.tr

### Özet

*Bu çalışmada, üç fazlı sincap kafesli bir asenkron motorun tasarımını, eşdeğer devre parametrelerinin değerlerini ve performans analizlerini yapan bir algoritma verilmiştir. Bu algoritma kullanılarak, motorun etiket değerleri ve akı yoğunluklarının programa girilmesiyle, istenilen tipte stator ve rotor oluk geometrik şekillerinin boyutları bulunmuştur. Bu boyutlar kullanılarak motorun eşdeğer devre parametreleri elde edilmiş ve bu sonuçlar boşa çalışma ve kısa devre çalışma deneyleri yapıp, hesaplanan parametrelerle karşılaştırılarak performans analizi yapılmıştır. Ayrıca tasarımı yapılan motorun değerleri kullanılarak Matlab/Simulink ortamında hazırlanan model ile elde edilen stator akım değerlerinin FFT sonuçları verilmiştir. Ayrıca boşa ve yarı yük çalışma durumlarında rotor akımları ve indüklenen momentteki harmonikler incelenmiştir. Çalışmada üç fazlı, 3 kW'lık sincap kafesli bir asenkron motor kullanılmıştır.*

### Abstract

*In this paper, an algorithm for three-phase induction motor's design and calculation of equivalent circuit parameters and performance characteristics was introduced. Using this algorithm, an induction motor can be designed for various rotor and stator slot geometries giving nameplate data and magnetic flux densities for used materials. For obtained geometries, equivalent circuit parameters was calculated and compared with open and short-circuit tests results and operating characteristics was obtained. On the other hand, the FFT of stator currents and variation of torque and rotor currents of the analyzed motor were calculated using with Matlab/Simulink.*

### 1. Giriş

Üç fazlı düşük gerilimli sincap kafesli asenkron motorlar, endüstride en yaygın olarak kullanılan elektrik motorlarıdır. Bugün birkaç yüz wattan başlayıp birkaç megawatt'a kadar imal edilebilirler [1]. Burada dikkat edilmesi gereken nokta istenilen güçteki bir motor için maksimum verimi sağlayacak şekilde tasarım yapılmasıdır. Asenkron motorun kullanıcı tarafından istenilen güç, moment ve verimi sağlayacak olan

çalışma noktalarının elde edilebilmesi için ise; motor tasarlanırken motorun stator ve rotor oluk geometrileri, stator ve rotor iç-dış çap uzunlukları, hava aralığı uzunluğu, kullanılan malzemelerin özellikleri vb. değerlerin dikkatli bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bu değerlerin düzgün seçilmesi durumunda istenilen motor parametreleri ve performans özellikleri elde edilebilir [2].

Genel olarak asenkron motor parametrelerinin hesaplanmasında beş farklı yöntem kullanılmaktadır [3]. Bu yöntemlerin kısa tanımları [4] nolu referansta verilmiştir.

1. Motor konstrüksiyon verilerinden parametre hesaplamak
2. Kararlı hal motor modeline bağlı olarak parametre hesaplamak
3. Frekans domeninde parametre hesaplamak
4. Zaman domeninde parametre hesaplamak
5. Gerçek zamanda parametre hesaplamak

Harmonikler genel olarak doğrusal olmayan elemanlar ile sinüsoidal olmayan kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması sinüsoidal dalganın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar sinüsoidal olmayan dalga olarak adlandırılır. Bu dalgalar, Fourier analizi yardımıyla temel bileşen ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinden ifade edilebilir. Bu analiz ile sinüsoidal olmayan dalgalar, frekansları farklı sinüs dalgaların toplamı şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Bu sayede harmoniklerin analizi kolaylıkla yapılabilir. Harmonikler güç sistemlerinde; ek kayıplar, ek gerilim düşümleri, rezonans olayları, güç faktörünün değişmesi v.b. teknik ve ekonomik problemlere yol açar [5].

Harmonikler, elektriksel hatalar söz konusu olduğunda en çok kullanılan kavramlardan biridir. Ünlü matematikçi Joseph Fourier, belirli bir frekanstaki tüm periyodik fonksiyonların, kendi frekansı ve daha yüksek frekanslardaki sinüs fonksiyonlarının toplamı olarak ifade edilebileceğini göstermiştir [6].

Noktasal simetriye sahip dalga şekillerinin harmonik analizleri yapıldığında çift katsayılı harmoniklere rastlanmaz. Elektrik şebekelerinde karşılaşılan dalga şekillerinin hemen hepsi noktasal simetriye sahiptir [6].

Harmonikler sebebi ile bozulmaya uğramış sinyalin (akım ya da gerilim) normal sinyale göre bozulma yüzdesine Toplam Harmonik Bozulma denir. Toplam Harmonik Bozulma, harmonik içeren sinyallerin RMS değerlerinin karelerinin toplamlarının karekökünün, sinyalin temel frekans değerindeki RMS değerine bölünmesi ile elde edilir. Aşağıdaki eşitliklerde akımın THD' sinin (Toplam Harmonik Distorsiyon) bulunmasına örnek verilmiştir [7].

$$I_H = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (1)$$

$$THD = \frac{I_H}{I_T} \quad (2)$$

Burada;  $I_n$  n. akım harmoniğini,  $I_T$  ise temel frekans bileşenindeki akımın RMS değerini ifade etmektedir.

Asenkron makinalarda, akımın veya akımın birinci harmoniğinden dolayı temel veya ana momentin yanında, belirli şartlarda motorun çalışmasını bozan ve hatta çalışmasını imkansız kılan ilave veya parazit momentler görülür. Parazit momentler aşağıdaki gibi bölümlere ayrılır [8].

- Dış harmoniklerini ihtiva eden, yüksek mertebeli uzay harmoniklerinden dolayı oluşan asenkron momentler
- $Q_1$  stator ve  $Q_2$  rotor oluk sayıları arasındaki bazı ilişkilerde ve bazı hızlarda oluşan senkron momentler
- $Q_1$  ve  $Q_2$  oluk sayılarının uygun olmamasından dolayı oluşan salınım momentleri

Bunlardan başka, yüksek mertebeli (geçici) gerilim harmonikleri motorun çalışmasında belirli bir etkiye sahiptir. Fakat bu harmonik etkiler ekseriyetle küçük olduklarından göz önüne alınmazlar [6]. Parazit momentlerin varlığı, özellikle sincap kafesli asenkron motorların çalışmasında etkilidir [9-10].

Bu çalışmada, gerekli motor verilerinin tamamı mevcut olduğu için bir numaralı yöntem kullanılarak asenkron motor tasarımı ve eşdeğer devre parametrelerinin hesaplamaları yapılmıştır. Tasarımı yapılan motorun verileri kullanılarak Matlab ortamında simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve stator akım değerlerinin FFT analiz sonuçları ile boşa ve yarı yük durumunda rotor akımları ve indüklenen momentte oluşan harmonikler incelenmiştir.

## 2. Motor tasarımında kullanılan algoritma

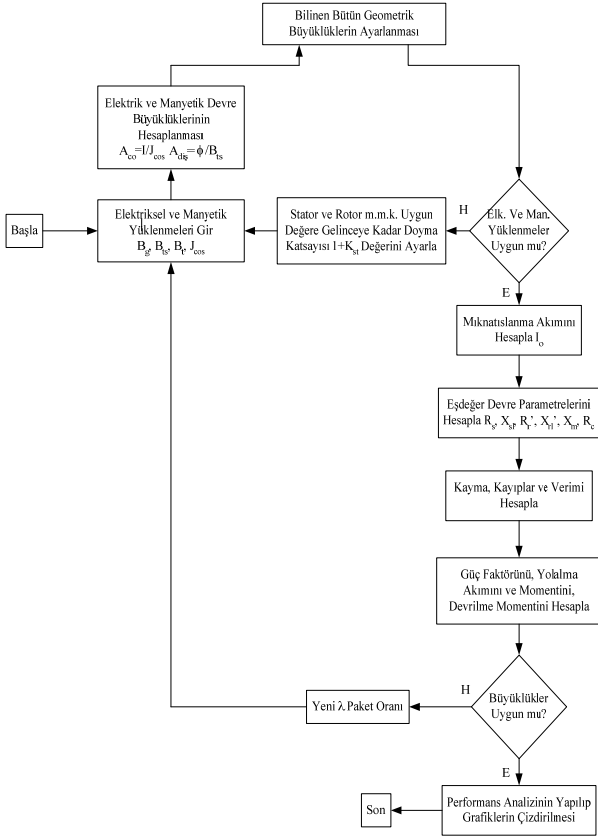
100 kW gücüne kadar olan motorların tasarımını yapan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Yazılan bilgisayar programında, birçok açıdan motor için önem taşıyan parametrelerin sürekli olarak kontrolü sağlanmıştır. Stator, rotor ve hava aralığı magnetomotor kuvvetleri, stator ve rotor sargı akım yoğunluk değerleri, moment, akım, kayıplar ve verim program içinde kontrolü yapılan önemli değerlerdir [2].

Programa giriş değerleri olarak en başta, tasarımı yapılmak istenen motorun etiket değerleri (güç, gerilim, akım, güç katsayısı, verim, devir sayısı ve frekans gibi nominal değerler) verilir. Stator ve rotor nüvesinde kullanılacak manyetik malzemelere ait B-H ve manyetik kayıp karakteristiği, programın iteratif hesap bölümlerinde kullanılmak üzere programa girilir. Şekil 1' de asenkron motorun tasarımı için kullanılan akış diyagramı görülmektedir. Bu akış diyagramına göre, motora ait bütün konstrüksiyon bilgileri (stator ve rotor boyu, iç ve dış çaplar ile stator ve rotor oluklarına ait ölçüler) programdan elde edilir.

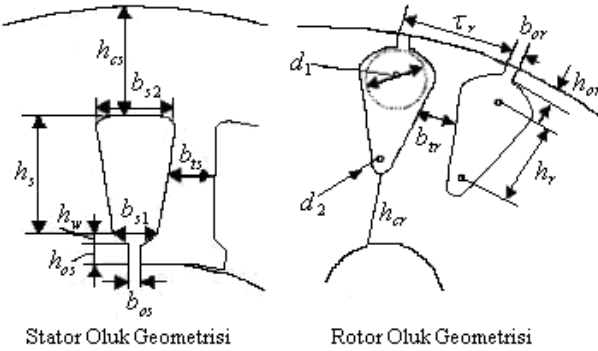
Program içinde manyetik ve elektrik yük değerleri kontrol edilir. Eğer bu değerler eşit veya birbirine yakın değerde değilse tasarım birinci adıma geri döner ve bütün değerler tekrar hesaplanır. Bütün basamaklar başarıyla tamamlanırsa,  $I_0$  mıknatıslanma akımı, eşdeğer devre parametreleri, kayıplar ve verim gibi değerler hesaplanır. Performans değerleri kontrol edilir ve hedeflenen değerlerden çok farklı bulunursa, birinci adımdan itibaren yeni akım yoğunluğu ve yeni  $\lambda$  paket oranı kullanılarak hesaplama tekrar başlar. Bütün değerler uygun ise motorun işletme karakteristik eğrileri çizilir ve nominal çalışma noktaları bulunur. Kullanılan motorda stator ve rotor oluk geometrileri için yuvarlak tipte oluk geometri şekilleri seçilmiştir. Oluk geometrilerinin parametreleri Şekil 2' de, motorun diğer etiket değerleri ise Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Asenkron Motor Etiket Değerleri

Motor Parametreleri	Değerler
Nominal Güç [kW]	3
Stator Gerilimi [Volt]	380
Bağlantı Şekli	Yıldız
Frekans [Hz]	50
Güç Katsayısı	0.88
Verim	0.78
Senkron Devir Sayısı [d/d]	3000
Rotor Devir Sayısı [d/d]	2844
Stator Oluk Sayısı	24
Rotor Oluk Sayısı	18
Stator Oluk Geometrisi	Yuvarlak
Rotor Oluk Geometrisi	Yuvarlak



Şekil 1. Tasarım ve Eşdeğer Devre Parametrelerinin Hesaplanmasında Kullanılan Algoritma



Şekil 2. Stator ve Rotor Oluk Geometri Şekilleri

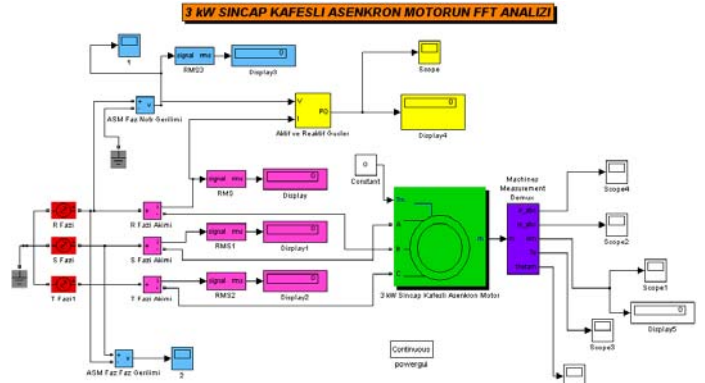
### 3. FFT analizleri için matlab modeli

3 kW, sincap kafesli asenkron motorun MATLAB Simulink ortamında harmonik analizinin yapılabilmesi için Şekil 3' deki simulink modeli oluşturulmuştur. Modelde, tasarım bölümünde özellikleri verilen asenkron motorun parametre bilgileri, 3 kW sincap kafesli asenkron motor bloğuna girilmiştir. Asenkron motora uygulanan gerilim ise yine aynı şekilde, 3 fazlı dengeli bir gerilim kaynağı olarak belirlenmiştir.

Modelde bulunan diğer bloklar ise genel olarak ölçme blokları olarak adlandırılabilir. Bunlar; kaynak faz-faz ve faz-nötr gerilimini ölçen scope' lar, faz akımlarını ölçen scope' lar, aktif ve reaktif güçleri ölçen scope' lardır. Bunların dışında,

“Machines Measurement Demux” bloğundan alınan rotor akım bilgileri, stator akım bilgileri, indüklenen moment değeri bilgisi değerlerinin, “Powergui” bloğu yardımı ile FFT analizleri yapılmış ve analiz sonuçları 4. bölümde verilmiştir.

Powergui bloğunda ise isteğe göre sürekli zamanlı veya kesik zamanlı sinyal incelemesi yapılabilir. Bu çalışmada incelenen değerler sürekli zamanlı olduğu için, blok, “Powergui-continuous” olarak adlandırılmıştır. FFT analizi için ise, analize başlama zamanı 0.5 s, analiz aralığı 200 cycle olarak seçilmiş ve iterasyon, simülasyonlarda genellikle kullanılan ode45 yöntemi ile yapılmıştır.



Şekil 3. FFT Analizleri İçin Matlab Modeli

### 4. Elde edilen sonuçlar

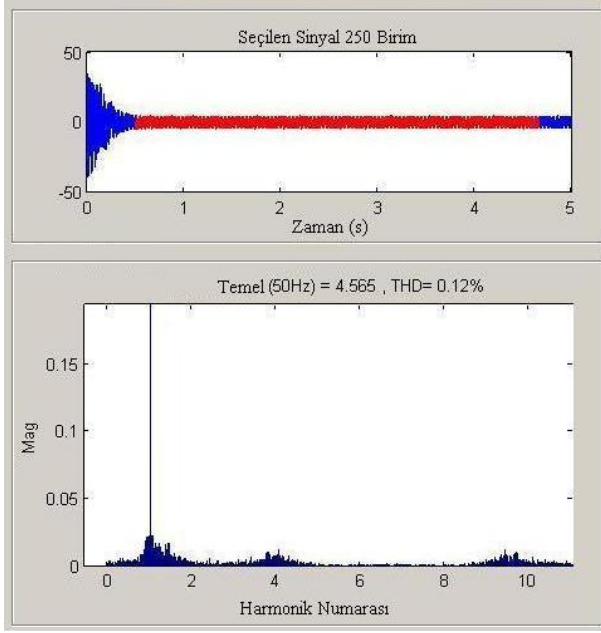
Bölüm 2' de özetlenen yazılım yardımıyla elde edilen ve ELSAN ELEKTRİK SAN. ve TİC. A.Ş. motor fabrikasının kullanmakta olduğu motor oluk parametreleri Tablo 2' de verilmiştir. Motor eşdeğer devre parametreleri ise Tablo 3' de verilmiştir. Matlab simülasyonu ile elde edilen stator akımlarının FFT ve THD sonuçları Şekil 4, 5 ve 6' da verilmiştir. Şekil 7 ve 8' de rotor akımlarının boşa ve yarı yükte grafikleri, Şekil 9 ve 10' da ise indüklenen momentin boşa ve yarı yük durumlarındaki zamana göre değişimleri sırasıyla verilmiştir.

Tablo 2. Motor Tasarım Değerleri

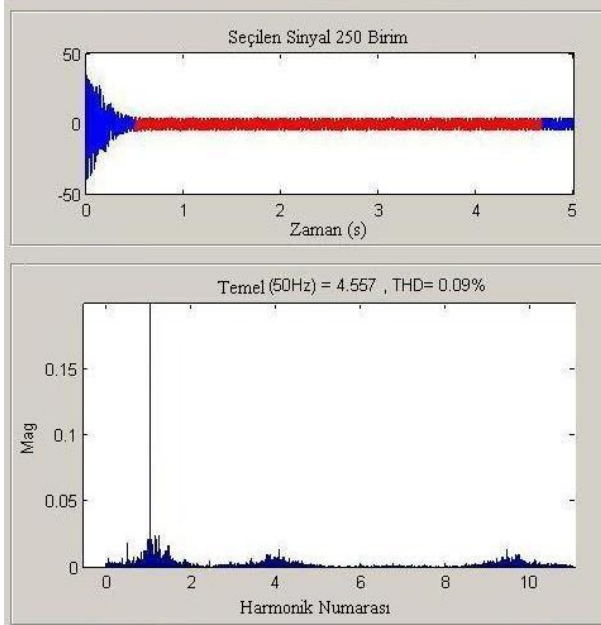
Parametreler [mm]	Sembol	Yazılım Değerleri	Fabrika Değerleri
Stator iç çap	D <sub>is</sub>	80,86	80
Stator dış çap	D <sub>out</sub>	152,58	150
Hava aralığı uzunluğu	g	0,31	0,3
Her olukta iletken sayısı	o <sub>ss</sub>	40	42
Dış genişliği	b <sub>ts</sub>	4,64	4,84
Oluk alt genişliği	b <sub>s1</sub>	6,46	6,5
Oluk üst genişliği	b <sub>s2</sub>	10,82	9,88
Oluk yüksekliği	h <sub>s</sub>	15,62	15
Sırt uzunluğu	h <sub>cs</sub>	18,23	20
Dış genişliği	b <sub>tr</sub>	6,03	6,1
Oluk üst genişliği	d <sub>1</sub>	6,63	6,6
Oluk alt genişliği	d <sub>2</sub>	1,92	2,2
Oluk yüksekliği	h <sub>r</sub>	13,37	13,5
Sırt uzunluğu	h <sub>cr</sub>	7,96	6,8

Tablo 3. Eşdeğer Devre Parametreleri Değerleri

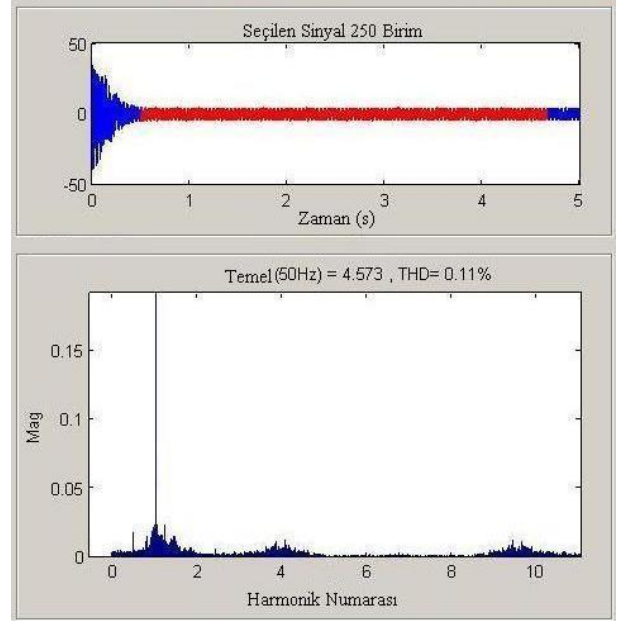
Eşdeğer Devre Parametreleri [ $\Omega$ ]	Yazılım Sonuçları	Deneyisel Çalışma Sonuçları
Stator Direnci $R_1$	1.145	1.141
Rotor Direnci $R_2$	0.983	1.057
Stator Kaçak Reaktansı $X_1$	1.4	1,56
Rotor Kaçak Reaktansı $X_2$	2.93	3.09
Mıknatıslanma Reaktansı $X_m$	80.65	78.41
Demir Direnci $R_c$	231.44	242



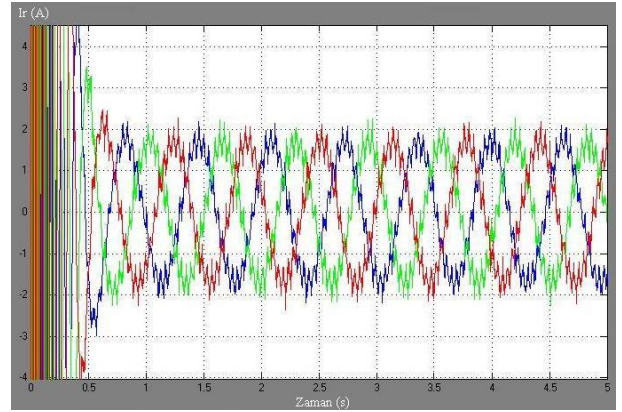
Şekil 4. Is Stator Akımının thd si



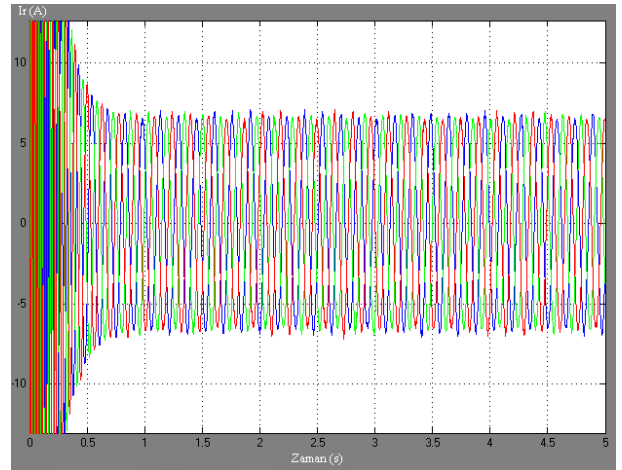
Şekil 5. Ir Stator Akımının thd si



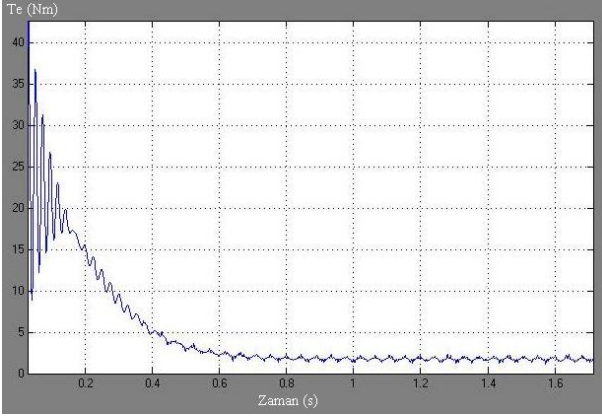
Şekil 6. It Stator Akımının thd si



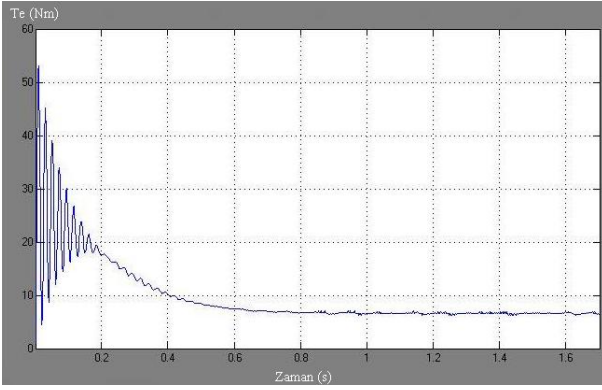
Şekil 7. Boşta Rotor Akımlarının Grafiği



Şekil 8. Yarı Yükte Rotor Akımlarının Grafiği



Şekil 9. Boşta Te İndüklenen Moment Grafiği



Şekil 10. Yarı Yükte Te İndüklenen Moment Grafiği

## 5. Sonuçlar

Üzerinde değerlendirme yapılan deney makinesi, geliştirilen yazılım ile yeniden tasarlanmış ve hesaplanan motor geometri parametreleri ve eşdeğer devre parametrelerin deney sonuçları ile tam bir uyum sağladığı gözlenmiştir.

Asenkron motor tasarım parametrelerine bağlı olarak hava aralığı akısı harmoniklerinin değişeceği ve bunun motor performansına etkiyeceği bilinmektedir [8]. Geliştirilen yazılımda hava aralığı akı harmoniklerinin etkilerini en aza indirecek oluk sayısı çiftleri otomatik seçildiğinden, yapılan akım ve moment harmonik analizlerinde baskın harmonik bileşene rastlanmamıştır.

## 6. Kaynaklar

- [1] Renier, B., Hameyer, K., Belmans, R., "Comparison of Standart for Determining Efficiency of Three Phase Induction Motors", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 3, pp 512-517, September 1999.
- [2] Yetgin, A., G., "Üç Fazlı Asenkron Makina Tasarımı ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi", Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, ss 139, 2004.
- [3] Lindermeier, D., Dommel, H., W., Moshref, A., Kundur, P., "An Induction Motor Parameter Estimation Method", *Electrical Power and Energy Systems*, V:23, pp 251-262, 2001.
- [4] Yetgin, A., G., Çanakoğlu, A., İ., "Farklı Yöntemler Kullanarak Asenkron Motorun Eşdeğer Devre Parametrelerinin Hesaplanması", *Elektrik - Elektronik ve*

*Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, ELECO'2004, 8-12 Aralık, 2004, s 122-127.

- [5] Arifoğlu, U., "Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi", Alfa Yayınevi, İstanbul, 2002.
- [6] Selim, A., "Alçak Gerilim Tesislerinde Harmoniklerin İncelenmesi", *Kaynak Elektrik Dergisi*, Sayı: 129, Aralık, 1999.
- [7] Matlab, <http://www.mathworks.com>, 2008.
- [8] Turan, M., "Asenkron Makinanın Geliştirilmiş Uzay Harmonik Modelinde Harmonik Reaktans ve Momentlerin Hesabı", Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, ss 109, 1996.
- [9] Boduroğlu, T., "Elektrik Makinaları Dersleri, Cilt: 2, Kısım: 3, Asenkron Makinaların Hesap ve Konstrüksiyonu", İ.T.Ü Matbaası, İstanbul, 1984.
- [10] Kostenko, M., Piotrovsky, L., "Electrical Machines Vol. 2., Alternatif Current Machines", Mir Publishers, Moskow, 1974.

## Teşekkür

Bu çalışma sırasında motor verilerinde yardımcı olan ELSAN ELEKTRİK SAN. ve TİC. A.Ş. (Ankara) Elektrik Motoru Fabrikasına teşekkür ederiz.