

## Asenkron Motorlarda Oluk Sayısının Gövde Dışına Takılan Bir Bobinle Belirlenmesi

### Determination of Number of Rotor Slots of an Induction Machine Using an External Search Coil

Ozan Keysan<sup>1</sup>, H. Bülent Ertan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Engineering  
University of Edinburgh  
[o.keysan@ed.ac.uk](mailto:o.keysan@ed.ac.uk)

<sup>2</sup>Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Ortadoğu Teknik Üniversitesi  
[ertan@metu.edu.tr](mailto:ertan@metu.edu.tr)

#### Özet

Motor oluk sayısının bilinmesi ihtiyacı motor kontrolünde ve "durum izleme" algoritmalarında ortaya çıkmaktadır. Bu makalede rotor oluk sayısını kestirmek için sunulan yöntem, bir sürücü süreceği motora bağlandığında "tanıma" algoritması içinde kolayca uygulanabilecek bir yöntemdir. Yöntem motor akımları üzerinden uygulanabileceği gibi, gövde üzerine yerleştirilecek basit bir bobin aracılığı ile de uygulanabilir. Bu nedenle ekipmanın mekanik düzeninde hiç bir değişikliğe ihtiyaç bırakmaz. Makalede yöntemin dayandığı teori sunulduktan sonra, yapılan deneylerle kutup sayısından bağımsız olarak doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Ayrıca kestirim hassasiyeti motor yüküne de bağımlı değildir. Bir PWM sürücü ile değişik frekanslarda da deneyler yapılmıştır. Bu şartlarda da hassas olarak oluk sayısı belirlenebilmektedir. Ancak, özellikle düşük frekanslarda birden fazla veri alınması gereği ortaya çıkabilmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Asenkron motor, oluk sayısı, kestirim, rotor oluk harmonikleri, çıkıntı harmonikleri

#### Abstract

The need for knowing the rotor slot number of a motor is encountered in motor control and "condition monitoring" applications. The technique presented in this paper to predict rotor slot number is a method that can be easily applied during "self commissioning". This method can be applied via measurement of motor current or by using a search coil placed on the frame of the motor. In the paper the theory behind the approach is presented and experiments have been done to illustrate that the method gives good results irrespective of the pole number of the motor. The method is not dependent on the loading of the motor. Experiments have also been made using a PWM drive. The method is found to give good results under this test condition as well. However, at low frequencies it may be necessary to repeat the procedure several times.

**Keywords:** Asynchronous motor, slot number, prediction, rotor slot harmonics, saliency harmonics..

#### 1. Giriş

Günümüzde asenkron motorlar yaygın olarak hız kontrollü uygulamalarda kullanılmaktadır. Hız kontrolü için kullanılan evirgeçler (inverter) kimi uygulamalarda çok basit ve ucuz olurken kimi uygulamalarda ise çok hassas moment ve hız kontrolü yapabilecek nitelikte olmaktadır. Evirgeçlerin temel yapısı oldukça standartlaşmıştır. Hatta çıkış katını oluşturan modüller küçük güçlerde "akıllı modül" olarak hazır bulunmaktadır. Benzer şekilde bir diyot köprü ve bir kaç kapasitör güç katını tamamlamaktadır. Farklılığı yaratan unsur daha çok sistem kontrolünü gerçekleştiren mikro işlemci üzerinde bulunan yazılım olmaktadır.

Hangi tip uygulama için geliştirilmiş olursa olsun, her evirgeçte, sürücünün bağlandığı motoru tanıyan bir yazılım kaçınılmaz olmaktadır. Bu yazılım, kullanılan denetim algoritmasına yapılacak hesaplamalarda kullanılmak üzere, motor parametrelerini sağlamakla yükümlüdür. Sürücü bağlandığı motoru sürme komutunu aldığı anda "tanıma" (self commissioning) algoritmasını işletir. Motor durmakta iken veya döndürülürken, birkaç saniye süren bir işlemle, motora çeşitli gerilim veya akımlar uygulanarak gereken bilgiler elde edilir. Doğal olarak farklı firmalar farklı yaklaşımlarla bu işlevi gerçekleştirir. Çoğu zaman sürücü, bu işlem için, kullanıcıdan da motorun anma gerilimi, akımı ve başka bilgileri de ister. İstenen hız ve moment denetim hassasiyetine göre kullanılan mikroişlemci ve yöntemlerin özellikleri farklılık göstermektedir.

Ancak hız kontrolü yapan her cins sürücüde bir şekilde motor hızının kestirilmesi ihtiyacı vardır. Bu işlem kimi zaman motora takılan bir takometre veya optik-kodlayıcı ile gerçekleştirilmektedir. Kimi zaman ise sürücünün motoru sürdüğü akım ve gerilim kolaylıkla ölçülebildiği için

hesaplamalar bu bilgilere dayanarak yapılabilmektedir. Kuşkusuz doğrudan motor hızının ölçülmesi hassasiyeti artırıcı olmaktadır. Ancak hız ölçme yöntemleri ek maliyet getirmektedir. Doğrudan maliyet yanında, hız ölçücünün kapladığı yerde bir maliyet unsuru oluşturmaktadır. Kimi uygulamalarda ise hız ölçer montajı için yer bulmak zaten mümkün değildir.

Bu bakımdan hızın sensörsüz kestirimi her zaman önemli bir ilgi alanı olmuştur. Burada sensörsüzden kasıt, sadece sürücü üstünden kolayca yapılabilen akım ve gerilim ölçümü haricinde bir sensörün kullanılmamasıdır. Bu tip uygulamalarda hızı belirleme yöntemi kimi zaman rotor üzerindeki çıkıntılı yapının, özellikle rotor oluklarının yarattığı relüktans değişiminden veya rotordaki yerel doymadan veya rotor eksen kaymasından yararlanmak da söz konusu olabilmektedir. Böyle uygulamalarda rotor oluk sayısının bilinmesi de bir ihtiyaç haline gelebilmektedir. Bu durum bir sonraki bölümde rotor oluk harmonikleri incelenirken daha iyi anlaşılacaktır.

Rotor oluklarının yarattığı akı harmonikleri diagnostik amaçlı olarak da kullanılmaktadır [1]. Böyle bir yaklaşımla, rotor çubuklarında oluşabilecek hatalar kolayca belirlenebilmektedir.

Yukarıda bahsedilen uygulamalarda rotor oluk sayısının bilinmesi gereksinimi ortaya çıkabilmektedir. Bu bilgi kimi zaman üretici firmadan sağlanabilmektedir. Ancak oluk sayısı standard etiketlerde görünen bir değişken değildir. Bu bakımdan oluk sayısının sensörsüz olarak motor sürücüsüne belirlenmesine imkan sağlayan algoritmalar önem kazanmaktadır.

Doğal olarak motor oluk sayısını üreticiden temin etmek ilk akla gelen çözümdür. Ancak, üreticiye ulaşmak için gereken efor kullanıcının arzu ettiği bir işlem değildir.

Literatürde rotor oluk sayısını bulmayı amaçlayan pek çok çalışma izlenmektedir. En temel yöntem [2] de belirtildiği gibi bir hız ölçer kullanılmasıdır. Kutup sayısı biliniyorsa akım içindeki harmonikler analiz edilerek, sürülen motorun oluk sayısı belirlenebilir. Ancak bunun tercih edilecek bir yöntem olmadığı açıktır. Hız ölçülüyorsa oluk sayısının bilinmesine de gerek kalmayabilir. Kaldı ki hız ölçer takılması çalışılan sisteme müdahale gerektirir ve pahalı bir yöntemdir.

Başka bir yöntem olarak motorun bilinen bir frekansta yüksüz çalıştırılması ve bu şartlarda senkron hızda çalıştığı kabul edilmesidir [3]. Bu durumda yine akım harmonikleri irdelenerek rotor oluk sayısı bulunabilir. Ancak, motorun senkron hızda çalıştığı varsayımı, oluk sayısının doğru olarak belirlenmesini etkiler. Sonuç olarak, harmoniklere dayalı olarak daha sonra yapılacak tüm hız kestirimleri bu yöntem kullanıldığında hatalı olabilir. [3] numaralı referansta bu nedenle en iyi yöntem olarak rotor oluk sayısına dayalı algoritmalarda gözleme dayalı kalibrasyon veya üreticiden alınan bilginin kullanılması önerilmektedir.

[4] numaralı kaynakta da oluk sayısının belirlenmesi için değerli katkılar yapılmıştır. Akım ölçme, titreşim ölçme, eksenel akı ölçme gibi yöntemler oluk sayısı belirleme amaçlı olarak değerlendirilmiştir. Bu kaynakta akıma dayalı oluk sayısı kestiriminin en iyi sonuç veren yöntem olarak

değerlendirildiğini izlemektediriz.

Burada sunulan çalışma, rotor oluk sayısını motor akımlarından veya motor dışına, gövde üzerine yerleştirilmiş bir bobin kullanılarak belirlenmesine imkan veren, yeni bir yöntem sunmaktadır. Kullanılan araştırma bobini Şekil 1'de gösterilmiştir. Gövde üzerine yerleştirilmiş araştırma bobini Şekil 5'te görülmektedir. Sunulan yöntem motor akımları üzerinden de uygulanabilir.

Makalede öncelikle motor hava aralığında bulunan rotor oluk harmonikleri ve diğer etmenler nedeni ile oluşan harmonikler ele alınmış ve bunlardan önemli görülenler kısaca



Şekil 1: Kullanılan araştırma bobini

açıklanmıştır. Ortaya konan verilerden yararlanılarak rotor oluk sayısının nasıl bulunabileceği takip eden bölümde açıklanmıştır.

Sunulan yaklaşımı test etmek amacı ile bir deney ortamı oluşturulmuştur. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Bölüm 4'te verilmiştir.

## 2. Asenkron Motorlarda Hava Aralığında Harmonikler

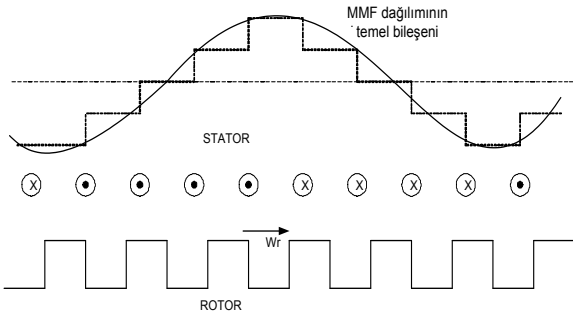
Asenkron motorlar statör sargılarına uygulanan 3-fazlı gerilimin oluşturduğu dönen manyetik alan altında, farklı hızla hareket eden rotor üzerindeki çubuklarda gerilim endüklenmesi ve bu nedenle rotora göre kayma frekansında dönen bir manyetik alan oluşması prensibi ile çalışır. Rotor ve statorda oluşan manyetik alanların birbiri ile etkileşimi moment oluşmasını sağlar.

Statör sargıları oluklara dağıtılmış oldukları için basamaklı bir MMF dağılımı olduğu bilinen bir gerçektir. Ancak, gerek bobin adımının seçimi, gerekse genellikle rotor çubuklarının bir açı ile yerleştirilmesi nedeni ile statör MMF harmonikleri temel bileşene göre çok küçüktür. Bu bakımdan buradaki analizde de statör MMF dağılımının düzgün bir sinüs dalgası olduğu ve periyodunun bir kutup çifti adımı kadar olduğu varsayılmıştır. Bu durum Şekil 1'de gösterilmiştir.

Bu varsayımla, statör tarafında yaratılan MMF dalgası  $\mathcal{F}$ , elektriksel açı  $\theta$  ve zaman  $t$  cinsinden yazılabilir.

$$\mathcal{F}(\theta, t) = \mathcal{F}_1 \cdot \cos(\omega_s t - \theta) \quad (1)$$

Bu denklemde  $\omega_s$ , motora uygulanan gerilimin açısal hızıdır.



Şekil 2: Stator MMF dağılımı ve rotor olukları

Motor çekirdeğinin permeabilitesi yüksek ise bileşke MMF sadece hava aralığı relüktansına karşı akıyı itiyor demektir. Stator tarafında oluk ağızlarının kapalı olduğu düşüncesi ile bu yüzeyin düzgün olduğunu varsayalım. Bu durumda rotor olukları hava aralığında relüktans değişimine neden olacaklardır. Hava aralığı relüktansı konumsal açı (elektriksel)  $\theta$  cinsinden (2)'de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$\lambda(\theta, t) = \lambda_{av.} + \lambda_{var.} \cos \left[ \frac{Z}{P} (w_r t - \theta) \right] \quad (2)$$

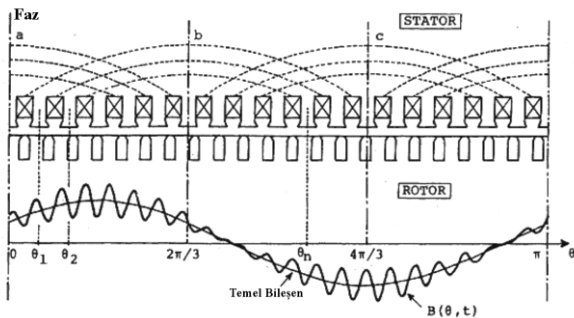
Denklem (2) de  $\lambda$  permeabilite,  $Z$  rotor oluk sayısı,  $P$  kutup çifti sayısıdır. Bu durumda hava aralığında akı dağılımı ifadesi (3) teki gibi olacaktır.

Bu durumda oluşan akı  $\phi$  denklem (3)'ten bulunabilir. Denklem (3)'de  $\mathcal{F}$  MMF temel bileşeni,  $\theta$  ise elektriksel açıdır.

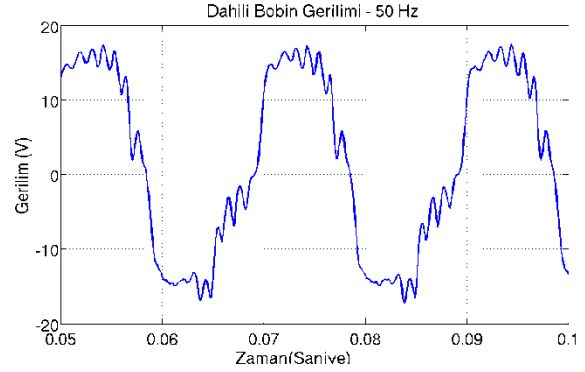
$$\phi(\theta, t) = \mathcal{F}(\theta, t) \cdot \lambda(\theta, t) \quad (3)$$

$$\phi(\theta, t) = \mathcal{F}_1 \cdot \cos(w_s t - \theta) \cdot \left\{ \lambda_{av.} + \lambda_{var.} \cos \left[ \frac{Z}{P} (w_r t - \theta) \right] \right\} \quad (4)$$

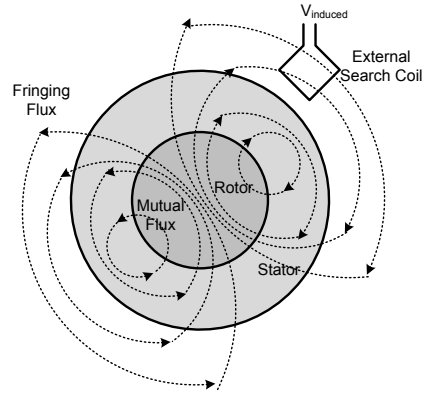
(3) denklemine (2) ifadesi yerleştirilerek (4) denklemi bulunur. Şekil 3'de hava aralığında görülmesi beklenen akı şekli verilmektedir. Şekil 4'de ise hava aralığına yerleştirilmiş bir bobin ile alınmış bir gerilim kaydı verilmiştir. Bu kayıt (4) numaralı denklemden kestirilen sonuçla uyumludur.



Şekil 3: Asenkron motorda beklenen hava aralığı akısı



Şekil 4: Bir deney motoru hava aralığına yerleştirilmiş bobin ile kaydedilmiş gerilim



Şekil 5: İki kutuplu bir motorda ortak ve kaçak akı yolları

Hava aralığında oluşan akı, laminasyon ve gövdenin oluşturduğu manyetik devrede dolaşır. Şekil 5'te 2-kutuplu bir motor için akı yolu şematik olarak gösterilmiştir. Doğal olarak gövde dışına kaçan akı, harici araştırma bobininde bir gerilim endükleyecektir. [7] numaralı referansta bu gerilimin hava aralığına yerleştirilmiş bir bobin ile aynı harmonikleri kapsadığı detaylı olarak çalışılmıştır.

Bu durumda stator üzerine bir kutup adımı açıklığında yerleştirilmiş bir bobin üzerinde endüklenen gerilim (5) denkleminden bulunabilir.

$$v_c(t) = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (5)$$

Akı ifadesi yerine konulursa (6) denklemi elde edilir.

$$v_c(t) = -K_1 \sin(w_s t - \theta_n) - K_f \sin \left[ \left( \frac{Z}{P} w_r + w_s \right) t - \left( \frac{Z}{P} + 1 \right) \theta_n \right] - K_r \sin \left[ \left( \frac{Z}{P} w_r - w_s \right) t - \left( \frac{Z}{P} - 1 \right) \theta_n \right] \quad (6)$$

$K_f$ ,  $K_r$ ,  $K_r$  denklem bileşenlerinin genliğini,  $\theta_n$  araştırma bobininin konumunu göstermektedir. (6) denklemde birinci

ifade, akının temel bileşeninin genliğini göstermektedir. Diğer iki bileşen rotor oluk sayısının yan-bant harmoniklerini göstermektedir. Bu bileşenler  $(Z/P) \cdot \omega_r + \omega_s$  and  $(Z/P) \cdot \omega_r - \omega_s$  frekansındadır.

İzlendiği gibi, (6) denklemi oluk sayısı bilgisini içermektedir. Eğer yan-bant frekans bilgisi elde edilirse rotor oluk sayısının bulunması kolayca yapılabilir.

Yan bant frekanslarını bulabilmek için bir şekilde hava aralığı akısından etkilenen bir işaret elde edilmesi gereklidir. Bu bilgi için hava aralığı akısı nedeni ile stator bobinlerinde endüklenen gerilim ve akımların kullanılması düşünülebilir. Daha zahmetli olmakla birlikte motorun hava aralığına bir araştırma bobini de yerleştirilebilir, ya da yazarların yaptığı gibi gövde dışına bir bobin yerleştirilerek endüklenen gerilimin kayıt edilmesi düşünülebilir. Gövde dışına yerleştirilen bobin, Şekil 1'de gösterildiği gibi, çok basit olabilmektedir. Bunun yanında gövde üstüne yerleştirilen bobinin hiç bir şekilde motor mekanik montajını etkilememesi, yer kaplamaması önemli avantajlar olarak görülmektedir. Bu makalede yan-bant frekanslarının elde edilmesi Bölüm 3'te kısaca ele alınmıştır. Bu çalışmada yapılan deneylerde gövde üstüne yerleştirilmiş bir araştırma bobini kullanılmıştır ve uygulanan algoritmalarından gayet olumlu sonuçlar alınmıştır.

### 3. Araştırma Bobini Geriliminin Harmonik Analizinden Oluk Sayısının Hesaplanması

Her elektrik makinesi, her hangi bir problemi olmasa da rotor oluk harmonikleri dışında, bir çıkıntı (saliency) etkisi altındadır [5]. Bu nedenle araştırma bobininde endüklenen gerilimde bu etki izlenebilir. Bu harmonik bileşenin genel ifadesi (7) denklemindeki gibidir [8].

$$f_{saliency} = f_s \pm k \cdot \frac{f_r}{P} \quad (7)$$

(7) denklemde  $f_s$  besleme frekansdır.  $k$  harmonik numarasını gösterir;  $f_r$  ise rotor elektriksel frekansdır ve son olarak  $P$  kutup çifti sayısıdır. Bu harmonikler rotor oluk sayısına bağımlı olmamaları nedeni ile motor hızının kestirilmesinde kullanılmaya uygundur. Ancak frekanslarının besleme frekansına yakın olması filtre edilip tanımlanmalarını zorlaştırır.

Bu makalede, bu harmonikler motor oluk sayısının belirlenmesinde kullanılacaktır. Bu nedenle tanımlama işleminin sürücü motora bağlandığında bir kere yapılması yeterlidir. Sürücüler genellikle bağlandıkları motoru tanımak için bir devreye girme veya motor "tanıma" diyebileceğimiz bir (self commissioning) süreci uygulurlar. Bu süreçte sürücü kullanıcının girdiği verileri ve kendi uyguladığı bir dizi testi kullanarak motor parametrelerini belirler ve bir model oluşturur. Bu bilgi daha sonra yükün sürülmesinde istenilen moment ve hızın sağlanmasında kullanılır. "tanıma" sürecinin anlık hız belirleme işlemi gibi hızlı olması gerekmez. Bu nedenle takip eden bölümlerde gösterileceği gibi motor oluk sayısını belirlemek için kullanılabilir.

Oluk sayısı belirleme algoritması rotor oluk harmoniklerini ve rotor çıkıntı etkisi harmoniklerini bir arada kullanmayı gerektirmektedir. İlk işlem çıkıntı harmoniklerinin ve rotor

oluk harmoniklerinin belirlenmesidir. Buradaki uygulamada harmonikleri belirlemek için gövde dışına yerleştirilmiş bir bobinden yararlanılmıştır. Ancak, tanımlanan işlemlerin motor akımı üzerinden de yapılması mümkündür. Harmonikleri belirlemek için motor istenilen bir frekansta yüklü veya yüksüz olarak çalıştırılır ve araştırma bobini gerilimi, motorun işlemcisi tarafından, algoritma uyarınca değerlendirilir.

Bu makalede anlatılan deneylerde, çeşitli sinyal işleme tekniklerini değerlendirme esnekliğine sahip olmak için, Motor üzerinde yapılan kayıtlar MATLAB ortamına taşınarak değerlendirme yoluna gidilmiştir.

Bir önceki paragrafta belirtildiği gibi algoritma "tanıma" süreci içinde kullanılacaktır. Bu nedenle değerlendirme algoritmasının saniyeler sürececek bir işlem uygulamasında bir sakınca yoktur. Bu bakımdan gövde üzerine yerleştirilen bobinden alınan sinyalde harmoniklerin aranmasında FFT yöntemi kullanılması benimsenmiştir. Arama işleminin nasıl yapıldığı bir sonraki bölümde ele alınacaktır. Bu aşamada, bir şekilde harmoniklerin tanımlanabildiği varsayımı ile motor oluk sayısının nasıl bulunabileceği üzerinde durulacaktır.

Bilindiği gibi rotor oluk harmonikleri,  $f_{rsh}$ , (8) denklemi ile ifade edilir [9].

$$f_{rsh} = \frac{Z}{P} f_r \pm f_s \quad (8)$$

Bu denklemde  $Z$  rotor oluk sayısı,  $P$  kutup çifti sayısı,  $f_s$  ve  $f_r$  sırası ile besleme frekansı ve rotor devresi elektriksel frekansdır. (8) numaralı denklemlerden ;

$$f_r = \frac{P}{Z} (f_{rsh} \pm f_s) \quad (9)$$

(9) Eşitliği elde edilir. Benzer şekilde (7) numaralı denklemde rotor frekansı için (10) numaralı denklem kolayca elde edilir.

$$f_r = \frac{P \cdot (f_s - f_{saliency})}{k} \quad (10)$$

(9 ve (10) numaralı denklemlerden rotor oluk sayısı  $Z$  için (11) ifadesi bulunur.

$$Z = \frac{(f_{rsh} + f_s)}{(f_s - f_{saliency})} \quad (11)$$

Bu denklemde motoru besleyen kaynağın frekansı,  $f_s$ , zaten bilinmektedir. Çıkıntı harmonik frekansı  $f_{saliency}$  ve rotor oluk harmonik frekansı  $f_{rsh}$  biliniyorsa oluk sayısının bulunabileceği anlaşılmaktadır. Denklem yazılırken hem rotor oluk frekansının hem de çıkıntı harmoniklerinin temel bileşeni dikkate alınmıştır.

#### 3.1. Oluk Sayısı Kestirim Algoritması

Burada yapılan deneylerde kullanılan algoritma Şekil 6'da verilmiştir.

Algoritma araştırma bobini ile bir kayıt alınması ile başlar. Motoru besleyen kaynağın frekansı doğrudan girilebilir veya frekans spektrumundaki en yüksek genlik olduğu için kolayca belirlenebilir. Bir sonraki bölümde açıklandığı gibi rotor

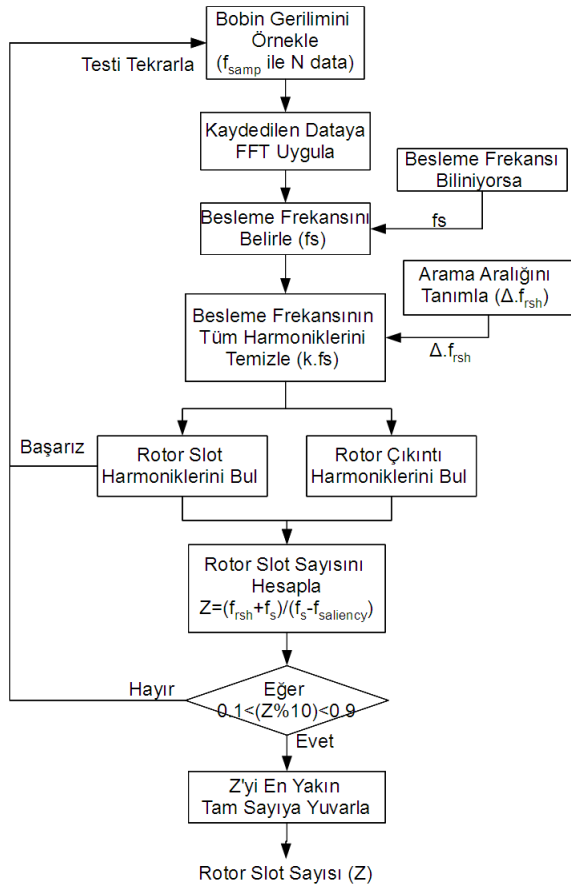
çıkıntısı harmonikleri bulunur. Bu harmonikler güç kaynağı frekansı civarında oldukları için rotor oluk harmonikleri ile karıştırılmaları mümkün değildir.

Rotor oluk harmonikleri de Bölüm 3.2’de açıklandığı gibi bulunur. Bundan sonraki işlem (11) denkleminde oluk sayısının bulunmasıdır.

Bulunan oluk sayısının tam sayı olması gerekir. Bu nedenle elde edilen sayının ondalık kısmı 0.1 ile 0.9 arasında bir sayı ise yapılan hesaplamada hata olması ihtimali vardır. Bu bakımdan yeni bir veri kaydı ve yeniden yukarıdaki işlemlerin tekrarı gerçekleştirilir. Ondalık sayı 0.1 den az olarak bulunduğu bu işlem serisi başarılı kabul edilerek durdurulur.

### 3.2. Harmoniklerin Belirlenmesi

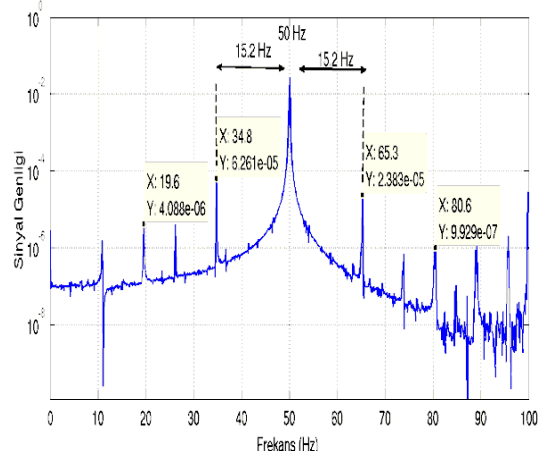
Buradaki çalışmada gövde üzerine monte edilen bobinden her seferinde 65536 ( $2^{16}$ ) örnek alınmıştır. Örnekleme frekansı, frekans çözünürlüğü 0.1 Hz olacak şekilde ayarlanmıştır. FFT analizi için MATLAB’da hazır olarak



Şekil 6: Oluk sayısı kestirme algoritması blok şeması

bulunan algoritma kullanılmıştır. Yapılan kayıtlardan elde edilen tipik bir FFT analiz sonucu Şekil 7’de gösterilmektedir. Şekil çıkıntı harmoniklerinin bulunacağı besleme frekansı civarını göstermektedir.

Çıkıntı harmoniklerinin nasıl belirlenebileceği bu şekilden izlenebilir. Öncelikle besleme frekansı ve harmonikleri spektrumdan temizlenir. Besleme frekansına yakın genliği en yüksek harmonik belirlenir. Denklem (7)’den rotor çıkıntısı harmoniklerinin eşlenikleri olacağı gözlenmektedir. Bu eşlenik spektrumunda varsa, seçilmiş olan harmonik, rotor çıkıntısı harmoniğidir. Şekil 7’de 34.8 Hz ve 65.3 Hz de gözlenen bileşenler eşleniktir ve bir rotor çıkıntısı harmoniğine karşı gelmektedir.



Şekil 7: Araştırma bobininden alınmış örneğin FFT analizi 916 d/d,  $f_s=50$ Hz, (motor 1)

Rotor oluk harmoniklerinin belirlenmesinde izlenen algoritma ise şöyledir: Rotor oluk frekansının aranacağı frekans bandı kabaca kestirilebilir. Besleme frekansını bilindiği için oluk sayısına, ihtimal dışı, örneğin 10 gibi bir sayı atanır. Denklem (8) den frekans bandının alt sınırı belirlenir.

Üst sınır hangi rotor oluk harmoniğine kadar araştırma yapılacağına bağlıdır. Buradaki algoritmada temel bileşen hedeflendiği için oluk sayısına beklenenden yüksek bir değer atanarak frekans bandının üst sınırı belirlenir. Oluk frekans da denklem (8)’de işaret edildiği gibi eşlenikli olmalıdır. Seçilen frekans bandında en alttan başlayarak en yüksek genliğe sahip harmonik seçilir. Eşleniği varsa bu bileşenler rotor oluk harmoniğinden kaynaklanmaktadır. Spektrumda eşlenik harmonikler bulunamazsa frekans bandı genişletilir. Eğer arama sonuç vermezse başka bir veri kaydına geçilir.

Yapılan deneysel çalışmalar, motor inverter üzerinden beslendiğinde bile rotor çıkıntı ve oluk harmoniklerinin bir kaç veri setin kullanılarak belirlenebildiğini göstermektedir. Motor şebeke frekansından beslendiğinde ise tek bir kayıt harmonik frekansların, dolayısı ile oluk sayısının belirlenmesine yetmektedir.

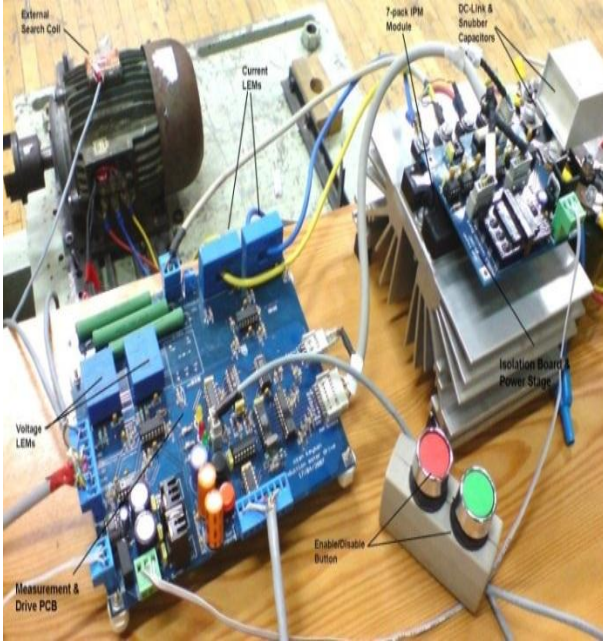
## 4. Deneysel Ortamı ve Deneysel Sonuçları

Burada önerilen yöntemi sınamak için bir deneysel ortamı kurulmuştur. Deneysel motoru olarak 1.1 kW, 6-kutup (motor 1) ve 2.2 kW 2 kutuplu (motor 2) iki farklı deneysel motoru seçilmiştir. Farklı kutup sayısında seçilen motorlar, yöntemin kutup sayısına bağımlılık gösterip göstermediğinin belirlenmesine de imkan vermektedir.



Deney motorları şaft üzerine bağlı bir moment duyargası ile bir DA motora bağlanmışlardır. Böylece yüksüz halde veya motor yüklü iken, yöntemi test etme imkanı yaratılmıştır. Deney motorları şebeke gerilimi ile sürülerek çeşitli deneyler yapılmıştır. Burada değişken frekans kaynağı ile sürüldüğünde ortaya çıkan harmoniklerin yöntemin çalışmasını etkilemesi ihtimali akla gelmektedir. Bu bakımdan motorlar değişken frekans üretebilen bir PWM sürücü ile de sürülerek deneyler yapılmıştır.

Bu deneylerde hem sürücü harmoniklerinin yöntemin işleyişine etkisi incelenmiş, hem de farklı frekanslarda yapılan deneylerle yöntemin nasıl bir frekans bağımlılığı gösterdiği incelenmiştir.

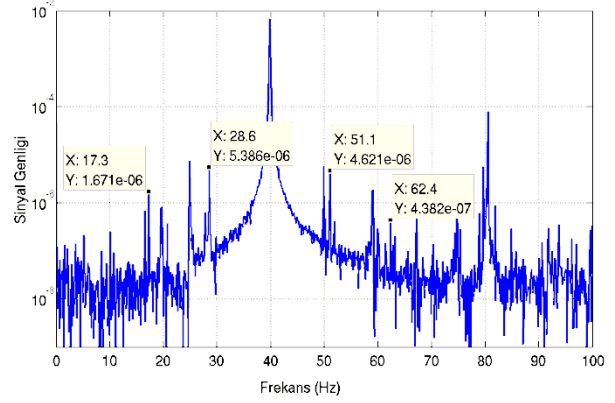


Şekil 8: Araştırma bobini ve genel deney düzeni

Motor 1, 40 Hz'de PWM sürücü ile sürülürken araştırma bobininden alınan bir gerilim kaydının FFT analizi Şekil 9'da gösterilmektedir. Bu şekilde de FFT analizinin besleme frekansı civarını gösteren bir bölümü verilmiştir. Şekil 7 ile karşılaştırıldığında PWM kaynakla sürüldüğünde spektrumda harmonik sayısının nasıl artmış olduğu izlenebilmektedir.

Deney motorları 50 Hz de şebekeden sürüldüğünde her türlü yük altında tek veri setinin oluk sayısını belirlemeye yettiği izlenmiştir. Tablo 1'de yüksüz ve tam yükte elde edilen sonuçları sunmaktadır. Tablodan yükten bağımsız olarak oluk sayısının her iki motor için de doğru ve hassas olarak belirlenebildiği izlenmektedir.

Deneyler frekans kontrollü sürücü ile yapıldığında ise, sürme frekansı azaldıkça iterasyon sayısının arttığı gözlenmiştir. Ancak deney yapılan en düşük frekans olan 20 Hz'de dahi en fazla 3 iterasyon gerektiği izlenmiştir.



Şekil 9: Motor 1, 40 Hz de, 686 d/d da, PWM kaynaktan sürülürken alınan örnekle yapılmış FFT analizi.

Tablo 1: Deney motorlarının yüklü ve yüksüz halde 50 Hz de testleri sonucunda bulunan oluk sayıları

| Yük durumu | Kayma | Kestirilen oluk sayısı  |                         |
|------------|-------|-------------------------|-------------------------|
|            |       | Motor 1 Oluk sayısı: 26 | Motor 2 Oluk sayısı: 18 |
| Yüksüz     | 0.05  | 26.09                   | 18.02                   |
| Tam Yük    | 0.20  | 25.97                   | 18.1                    |

## 5. Sonuçlar

Bu makalede bir asenkron motorun oluk sayısının belirlenmesi için kullanılabilecek bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntem literatürde bulunan yöntemlerden farklı olarak, motorun bağlı olduğu mekanik sisteme hiç bir şekilde müdahaleye gerek bırakmamaktadır. Motorun şaft hızının ölçülmesine gerek yoktur.

Yöntem motor akımları ölçülerek de uygulanabilir. Ancak burada sunulan araştırmada gövde üzerine yerleştirilen bir araştırma bobini kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları şebeke frekansında yapılan oluk sayısı belirleme işleminin tek bir veri kaydı ile hassas sonuç verdiğini göstermektedir. PWM sürücü ile yapılan deneylerde de sunulan yöntemin oluk sayısını hassas olarak verdiği gözlenmiştir. Ancak bir kaç iterasyona gerek olabileceği de belirlenmiştir.

Sunulan yöntemde kullanılan algoritmalar oluk sayısı belirlendikten sonra, motor hızını belirlemeye de imkan vermektedir. Motor hızı bilgisi anlık olarak gerekiyorsa, saniyeler mertebesinde süre alabilen FFT algoritmaları doğal olarak uygun değildir. Bu amaçla yazarlar anlık olarak (Bir kaç yüz mikrosaniye mertebesinde) motor hızını belirlemekte

kullanılabilecek bir yöntem geliştirmişlerdir [10]. Bu yöntem için uluslararası patent koruması sağlanmıştır [11].

## 6. Kaynaklar

- [1] Khezzer, A. Kaikaa, M. Y. ElKamel, Oumaamar, M.; Boucherma, M., Razik, H., "On the Use of Slot Harmonics as a Potential Indicator of Rotor Bar Breakage in the Induction Machine" *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.56, no.11, pp.4592-4605, 2009.
- [2] Briz, F., Degner, M. W., Garcia, P., Lorenz, R. D. "Comparison of saliency-based sensorless control techniques for AC machines" *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 40-4, pp.1107-1115, 2004.
- [3] Blasco-imenez, R., Asher, G. M., Sumner, M.; Bradley, K. J., "Performance of FFT-rotor slot harmonic speed detector for sensorless induction motor drives," *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, vol. 143, no. 3, pp. 258-268, May 1996.
- [4] Supangat, R., Ertugrul, N., Soong, W. L., Gray, D. A., Hansens, C., "Estimation of the Number of Rotor Slots and Rotor Speed in Induction Motors Using Current, Flux or Vibration Signature Analysis", *Australian Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 4 (3), 259-268, 2008.
- [5] Ferrah A., Bradley K. J., "Application of the FFT to the Speed Measurement of Inverter Fed Induction Motors", *Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC '92*, 9th IEEE, 647 – 652, 1992.
- [6] Ishida, M., & Iwata, K. "A new slip frequency detector of an induction motor utilizing rotor slot harmonics", *IEEE Transactions on Industry Applications*, I (3), 575-582, 1984.
- [7] Keysan, O. A., "Non-Invasive Speed and Position Sensor for Induction Machines Using External Search Coils", *Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi*, 2008.
- [8] Negrea, M. D., "Electromagnetic flux monitoring for detecting faults in electrical machines", *Doktora Tezi, Dept. of Electrical and Communications Eng. Helsinki University of Technology*, 2006.
- [9] Vas, P., "Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines", *Clarendon Press*, 1993.
- [10] Keysan, O., Ertan, H. B., "Speed & position estimation by demodulating rotor slot harmonics," *(ICEM), XIX International Conference on Electrical Machines*, (IEEE), Proceedings CD, 2010.
- [11] Keysan, O., Ertan, H. B., "Speed and Rotor Position Estimation of Electrical Machines Using Rotor Slot Harmonics and Higher Order Rotor Slot Harmonics", *World Intellectual Property Organization*, WO/2011/126462, 2011.