

AKÜ FEMÜBİD 18 (2018) 015204 (921-931)

AKU J. Sci. Eng. 18 (2018) 015204 (921-931)

DOI: 10.5578/fmbd.67809

Araştırma Makalesi / Research Article

Asenkron Motorlarda Uzay Harmoniklerin Yok Edilmesi için Yeni Bir Stator Oluk Tasarımı

Ali İhsan ÇANAKOĞLU^{1,*}, Ulaş ÖZEL²¹Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya.²Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kütahya.e-posta: ^{1,*}serdar.ozyon@dpu.edu.tr (*İletişim Yazarı), ²ulas.ozel@dpu.edu.tr.

Geliş Tarihi:07.03.2018

; Kabul Tarihi: 17.12.2018

Özet

Asenkron motorlar, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren önemli makinalardan birisidir. Bunlar yük ve gerilim değişimlerine karşı dayanıklı ve benzerleri olan doğru akım makinalarına göre daha yüksek verimli makinelerdir (R1). Bu çalışmada 3-fazlı, 24 stator oluklu, 2 kutuplu bir asenkron motorun uzay harmoniklerini yok etmek için yeni bir stator oluk tasarımı yapılmıştır. FEMM (Finite Element Method Magnetics) programında ilk olarak normal oluk yapısına göre daha sonra oluk yapısı değiştirilerek çözümlenmeler yapılmıştır. Oluk yapısı değiştirilen motorun bobin adımı belirli değerlerde kısaltılarak uzay harmonikleri elimine edilmeye çalışılmıştır. Yeni oluşturulan stator oluk geometrisinde, 36°e kısaltma ile 5. harmonik değeri, 25.7°e kısaltma ile 7. harmonik değeri sıfıra çekilmiştir.

Anahtar kelimeler

Asenkron motor; Stator oluk tasarımı; Uzay harmonikleri; FEMM.

A New Stator Slot Design in order to Eliminate Space Harmonics in Induction Motors

Abstract

Induction motors are the machines which are preferred mostly when the electrical energy is converted to the mechanical energy. Efficiency during the energy conversions is of the uttermost importance for preferences. In addition, the motors are expected to be cheaper and give long life service under working conditions. In this study, a new double cage stator slot is designed for eliminate space harmonics in three-phase, two-pole and 24 stator slots induction motor. After that, analysis was made for normal slot structure and new slot structure in FEMM program. After we changed the slot structure and made short-pitching, we could see that space harmonics are eliminated. With new stator slot geometry, the 5th harmonic is eliminated with 36°e short-pitching and 7th harmonic is eliminated with 25.7°e short-pitching.

Keywords

Induction motor;
Design of stator slot;
Space harmonics;
FEMM.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Asenkron makinalarda uzay harmoniklerinin varoluşu makinanın doğasından kaynaklanmaktadır.

Stator sargısının bir fazına ait bobin ya da bobinler, çevreye açılmış oluklara dağıtılmış olarak yerleştirilirler. Böylece bobin gurubundaki her bir bobinin makinanın hava aralığında oluşturduğu manyetomotor kuvvet dağılımı basamaklı şekilde oluşur. Basamaklı dağılım sebebi ile de üretilen momentte harmonikler meydana gelir. Harmonik değerleri bobinlerin makina içindeki konumuna bağlı

olduklarından, yapısal çözümler ile bu harmoniklerin etkileri azaltılabilir(R2). En etkili uzay harmonikleri 5. ve 7. Harmoniklerdir çünkü temel harmonik olan 1. harmonikten sonra genlikleri en büyük olan harmoniklerdir(R3). 3 ve katı olan uzay harmonikleri makina içinde döner alan oluşturmazlar. Bunun sebebi 3. harmonik için faz farkı $3 \times 120^\circ_e = 360^\circ_e$

olur ve faz farkı sıfırlanır. Döner alan oluşabilmesi için fazlar arasında mutlaka faz farkının bulunması gereklidir(R4). Makina normal koşullar altında

senkron hıza yakın çalıştığından ve bu hızlar civarında uzak harmonikleri asenkron makineyi frenlediklerinden dolayı moment azaltıcı bir etkileri vardır. Özellikle düşük hızlarda küçük dereceli harmoniklerin moment azaltıcı etkileri daha fazla hissedilir (Boduroğlu 1988a, Boduroğlu 1988b, Kostenko and Piotrovsky 1974). Harmoniklerin, sistem üzerinde meydana getirdikleri olumsuz etkilerden dolayı oluşmadan veya oluştuğundan sonra giderilmesi gerekmektedir. Uzak harmoniklerinin etkilerinin azaltılmasına yönelik önlemler mevcuttur. En yaygın olanı bobin adımının kısaltılmasıdır. Bobin adımının kısaltılması ile istenilen harmoniğin etkisi yok edilebilir (Boduroğlu 1994, Kuhlman 1951). Literatürde uzak harmoniklerinin hesabına ilişkin çeşitli yöntemler ve çalışmalar mevcuttur (Prashanth *et al.* 2015, Didier *et al.* 2005, Subhasis 2008, Neto *et al.* 1999, Youcef 2009, Banupriya and Rani 2013). Burbidge (1958)' in geliştirdiği asimetrik sargılar için de geçerli olan yöntemi döneminin şartlarında oldukça verimli olmuştur. Stepina (1979)' nın uzak harmoniklerinin incelenmesi ve hesabı üzerine çalışmaları vardır. Bilgisayar destekli analizlerin yapılmasını sağlayan çalışmalar da literatürde mevcuttur (Kocabaş 1997, Kocabaş ve Mergen 2000). (Navrapescu *et al.* 2010) uzak harmoniklerinin etkilerini 3 farklı yöntem ile analiz etmişlerdir. (Kocabaş ve Mergen 2008) çalışmalarında uzak harmoniklerini azaltmak için asenkron motorun stator oluk yapısında ve kullanılan sargıların yerleşiminde değişiklik yapmışlardır. (Gyftakis *et al.* 2013) 3 fazlı asenkron motorun stator oluk kenarlarının yapısının motor performansına etkilerini sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analiz etmişlerdir. Uygun oluk kenarının seçilmesi ile harmonikler içeren hava aralığı manyetik alanın azaltılabileceğini ifade etmişlerdir. (Liang and Luy 2006) çalışmalarında asenkron motorlarda uzak ve zaman harmoniklerini azaltmanın yöntemlerini ifade etmişlerdir. Uzak harmoniklerinin düzgün motor tasarımı, sargıların düzgün tasarımı, hava aralığının optimize edilmesi ile azaltılabileceğini, zaman harmoniklerinin ise motor performansı üzerinde etkili olduğunu ifade etmişlerdir. (Jeon *et al.* 2013) çalışmalarında asenkron motorun rotor dışlarında yapısal değişikliğe giderek uzak harmoniklerini içeren

moment salınımlarını azaltmayı amaçlamışlardır. (Kaikaa *et al.* 2006) asenkron motorun rotor oluklarında meydana gelen harmoniklerin etkilerini incelemişlerdir. Bunun için stator akımının analitik ifadelerini geliştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre stator akımı içindeki harmonik bileşenlerin rotor oluk sayısına, kutup sayısına ve kaymaya bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

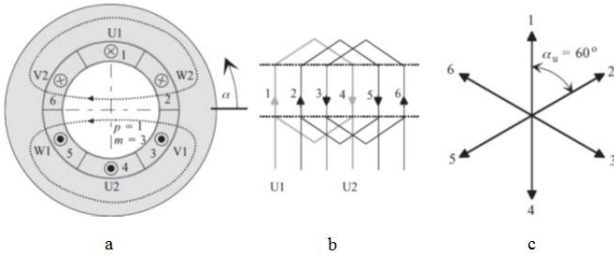
Uzak harmoniklerinin etkilerini azaltıcı yöndeki çalışmalar, genel olarak bobin adımını kısaltma çerçevesinde sarım tekniği üzerinde değişiklikler yapmak yönünde olmuştur. Yok edilmesi hedeflenen harmoniğin ihtiyaç duyduğu kısaltma değeri standart oluk sayısı değerlerinde tutturulamamaktadır. Sargı tekniği üzerine yapılacak değişikliklerin sınırlı kaldığı görülmektedir. Hedeflenen harmoniğin tam olarak yok edilebilmesi için yapısal değişikliklere ihtiyaç duyulduğu açıktır. Mevcut durumda stator oluğu için uygulanan yapı formu yaklaşık dikdörtgen formdadır. Böyle bir oluk yapısını, bobin adımında yapılacak kısaltmayı istenen açı değerine getirmek üzere ikiye bölerek kaydırma yapıp, çift tabakalı sargılara uygulanacak şekilde yeni bir stator oluk geometrisi oluşturulmuştur. Yeni oluk yapısı ile hava aralığındaki alan dağılımı incelenip, alan dağılımlarının analizi ile elde edilen harmonikler incelenmiştir.

2. Asenkron Makinada Stator Sargıları ve Harmonikler

2.1 Stator sargıları

3-fazlı elektrik makinasının endüvi sargısı statora yerleştirilir. Stator akımlarının hava aralığında oluşturacağı manyeto motor kuvvet (mmk) dağılımı mümkün olduğu kadar sinüzoidal şekle yaklaştırılmaya çalışılır. Bir döner alan oluşturabilmek için en az iki faza ihtiyaç vardır. Üç fazlı bir makinada döner alan oluşturan en basit stator sargısı, her faza ait birer tane olmak üzere 3 bobinden oluşur(R5). Bobin kenarları 6 oluğa yerleşeceğinden dolayı en basit stator yapısı 6 oluk

içerir, bu durum Şekil 1' de gösterilmiştir (Pyrhönen *et al.* 2008).



Şekil 1. Döner alan üreten en basit 3-fazlı sargı (a) makinanın dik kesiti ve t_1 anında akı çizgilerinin dağılımı (b) sargı şeması (c) 3-fazlı sistem için gerilim fazör diyagramı

Şekil 1 c' deki fazör diyagramı 6 fazör içermektedir. Her fazör arasındaki açı makinanın oluk açısına eşit olacaktır. Oluk açısı α_u , aşağıdaki denklem ile hesaplanır. Denklemde Q oluk sayısını, p çift kutup sayısını ifade etmektedir.

$$\alpha_u = \frac{360^\circ * p}{Q} = \frac{360^\circ * 1}{6} = 60^\circ \quad (1)$$

2.2 Sargı katsayısı

Sargının stator yüzeyindeki oluklara dağıtılmasından dolayı, sargıları etkileyen akı bütün sargıları aynı oranda kesmez. Bu nedenle sargıda indüklenen gerilim, sarım sayısı N_s kullanılarak doğrudan hesaplanamaz, yani harmoniklere karşılık gelen k_{wv} sargı katsayısı göz önüne alınmalıdır. Sargı katsayısı, bobinin ürettiği harmoniklerle alakalı karakteristik bir değere karşılık gelir (Pyrhönen *et al.* 2008).

Statordaki bobin, tam adımlı ise adım değeri kutup adımına eşittir. Eğer bobin adımı, kutup adımından daha kısa yapılırsa, bu bobin kısa adımlı bobin olarak adlandırılır. Bobin adımı gerçekte anlamda bir kısaltma çift tabakalı sargılarda uygulanabilir. Bobin adımı yapılacak olan kısaltma indüklenerek faz geriliminde bir azalmaya sebep olur. Bobin adımıdaki kısaltmayı tanımlayan katsayı adım katsayısı olarak tanımlanır. Toplam sargı katsayısı k_w aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k_w = k_d * k_p \quad (2)$$

Burada, k_d dağıtım katsayısını, k_p adım katsayısını ifade etmektedir. v . harmonik için dağıtım katsayısı, oluk açısı ve harmonik derecesi $v * \alpha_u$ alınarak aşağıdaki şekilde yazılır.

$$k_{dv} = \frac{\sin v \frac{q \alpha_u}{2}}{q \sin \frac{\alpha_u}{2}} \quad (3)$$

v . harmonik için adım katsayısı k_{pv} ise aşağıdaki denklem ile ifade edilir. Bu ifade de y kısaltılmış oluk sayısını, y_Q tam adım oluk sayısını ifade etmektedir.

$$k_{pv} = \sin \left(v \frac{y}{y_Q} \frac{\pi}{2} \right) \quad (4)$$

2.3 Uzak harmonikleri

Uzak harmonikleri makina geometrisi ile ilgili ve çoğunlukla makina tasarımcılarının incelediği bir konudur. Makina, sinüzoidal gerilimle beslendiğinde manyeto motor kuvvette farklı frekans bileşenleri gözlemlenir. Bu bileşenler genel olarak uzak harmonikleri olarak adlandırılırlar. Uzak harmonikleri, motoru kalkış esnasında zorlamanın yanı sıra titreşim ve sese neden olurlar.

Asenkron makineler geometrik yapılarından ötürü sinüs biçiminden farklı bir manyeto motor kuvvet eğrisi çıkartan sistemlerdir. Kaynaktan tamamen sinüzoidal bir gerilim uygulandığında, stator iletkenlerinin, yuvarlak düzlemde 120° şer derece aralıkla dağılırken sinüs biçimini oluşturamamasından, sargı dağılımı ve kaynak akımı çarpımından oluşan amper-sarım dağılımı, saf sinüsten uzak olmaktadır. Oluşacak olan amper-sarım dağılımı, sabit bir akım değeri için yaratılmaya çalışıldığında, konuma bağlı değişen bir basamak fonksiyon elde edilmektedir. Bu basamak fonksiyon Fourier serisine açıldığında uzak harmonikleri elde edilir (Bayram ve Mergen).

3. Bobin Adımı için Yeni Bir Stator Oluk Yapısı

Bobin adımı kısaltma işlemi çift tabakalı sargılarda uygulanır. İstenilen adım kısaltması her statorda oluk açısı ve katları kadar uygulanır. İki tabakalı sargılarda bir olukta iki bobin kenarı bulunur ve bobin sayısı oluk sayısına eşittir. Bu

bakımdan bu sargılara tam kalıp sargılar da denir. Sarım yapılırken oluktaki bobin kenarlarını birbirinden ayırmak için araya presbant konmalıdır. Çünkü kısa adımlı sarım yapıldığında, aynı oluğa ayrı fazlara ait bobin kenarları gelebilir ve bobinler arasındaki gerilim farkından dolayı kısa devre tehlikesi oluşabilir.

İki tabakalı sargılar adım kısaltmaya çok elverişlidir. Yarım kalıp dağıtılmış sargıya kıyasla adım daha çok kısaltılabilir. İki tabakalı sargılar da, uç bağlantıları bütün kutup sayıları için oklandırma yöntemi ile daha çok devir sayıları elde etmede kolaylık sağladığından çok devirli sargılar genellikle iki tabakalı yapılırlar. Tam kalıp sarımın bir kaç özelliği aşağıda verilmiştir.

1. Tam kalıp sarımlar iki katlı olur. Çünkü bir oluktaki bobinin giriş kenarı üstte ise çıkış kenarı alttadır ve bu durumun oluşması için ayak kaldırma (katlama) işlemi yapılır.

2. Tam kalıp sarımda eşit adımlı sargılar kullanıldığı gibi değişik adımlı sargılar da kullanılabilir.

3. Tam kalıp sarımda oluk adımı kısaltılabilir ya da uzatılabilir (Int Kyn. 1).

3-fazlı, 2 kutuplu, 24 oluklu bir asenkron motorun tam kalıp açık sarım şemasını çizmek için bazı hesaplamalara gerek duyulur. $Q = 24$ stator oluk sayısı, $m = 3$ faz sayısı, $2p = 2$ kutup sayısı olduğuna göre; kutup ve faz başına oluk sayısı q değerini bulmak için aşağıdaki denklem kullanılır.

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{24}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 4 \quad (5)$$

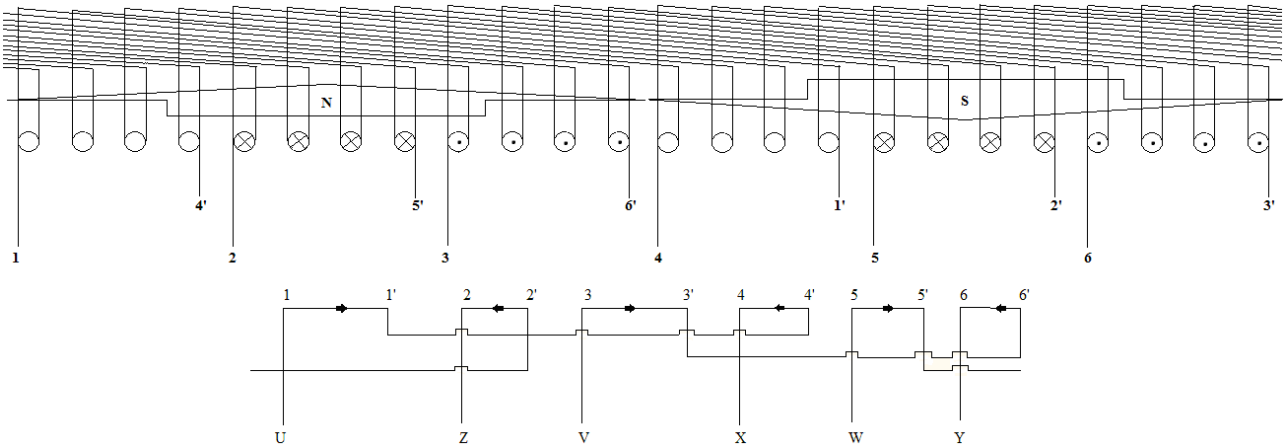
Oluk adımı c ise denklem 6' da verilmiştir.

$$c = \frac{Q}{2 \cdot p} = \frac{24}{2} = 12 \quad (1 - 13) \quad (6)$$

Oluk açısını hesaplamak için ise denklem 7 kullanılır.

$$\alpha_u = \frac{360^\circ \cdot p}{Q} = \frac{360^\circ \cdot 1}{24} = 15^\circ_e \quad (7)$$

Bulunan sonuçlar doğrultusunda çizim yapılacak olursa Şekil 2' deki sarım şeması elde edilir (Özel 2010).



Şekil 2. Tam kalıp açık sarım şeması örneği ve giriş-çıkış alt bağlantısı

3.1 5. ve 7. harmoniği yok etmek için β ve k_p değerleri

Adım katsayısı ifadesinden görüldüğü gibi hedeflenen harmoniğin yok edilmesi için k_p değerinin sıfıra eşit olması gerekir. v , hedeflenen harmonik olmak üzere,

bobin adım kısalma değeri β' nın aşağıdaki değere sahip olması durumunda k_p değeri sıfıra eşit olur.

5. harmonik yani $v = 5$ için β değeri hesaplanırsa;

$$\beta = \frac{180^\circ}{v} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{180^\circ}{5} = 36^\circ_e \quad (9)$$

elde edilir. $\beta = 36^\circ e'$ lik kısaltma için k_{p5} değeri;

$$k_{p5} = \cos\left(\frac{5 \cdot 36^\circ}{2}\right) = 0 \quad (10)$$

bulunur. Bu da 5. harmoniğin elimine olduğunu gösterir.

7. harmonik yani $v = 7$ için β değeri hesaplanırsa;

$$\beta = \frac{180^\circ}{7} \cong 25.7^\circ \quad (11)$$

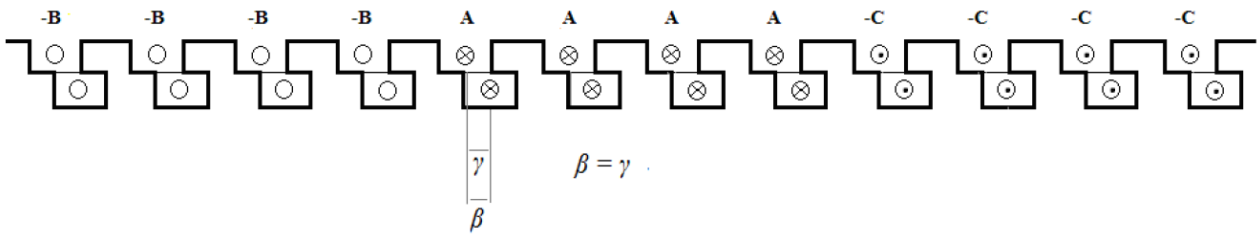
elde edilir. $\beta \cong 25.7^\circ e'$ lik kısaltma için k_{p7} değeri:

$$k_{p7} = \cos\left(\frac{7 \cdot 25.7^\circ}{2}\right) = 0 \quad (12)$$

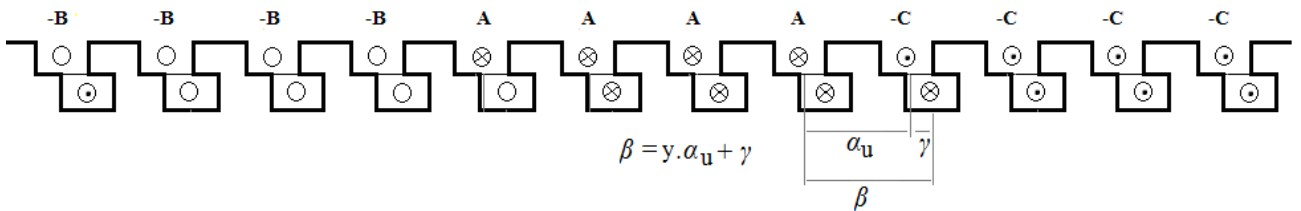
Bu sonuca göre 7. harmoniğin elimine olduğu görülür.

Buna göre $\beta = 36^\circ e'$ de 5. harmonik için ve $\beta = 25.7^\circ e'$ de ise 7. harmonik için adım katsayısı $k_p = 0$ olmaktadır. Yani asenkron motorun stator oluklarında bu açılar kadar yapılacak kaydırmalarda 5. ve 7. harmonikler yok olacaktır.

Makinada y oluk sayısı kadar kısaltma yapıldığı düşünülürse β açısı kadar bobin adımındaki kısalma elektriki açı cinsinden aşağıdaki denklem ile hesaplanır.



Şekil 3. Oluktaki γ açısı kadar kaymanın gösterimi



Şekil 4. Bobin adımının ara değeri için γ açısı kadar kaymanın gösterimi

$$\beta = y \cdot \alpha_u \quad (13)$$

3.2 Bobin adımının ara değerleri için oluk kaydırma işlemi

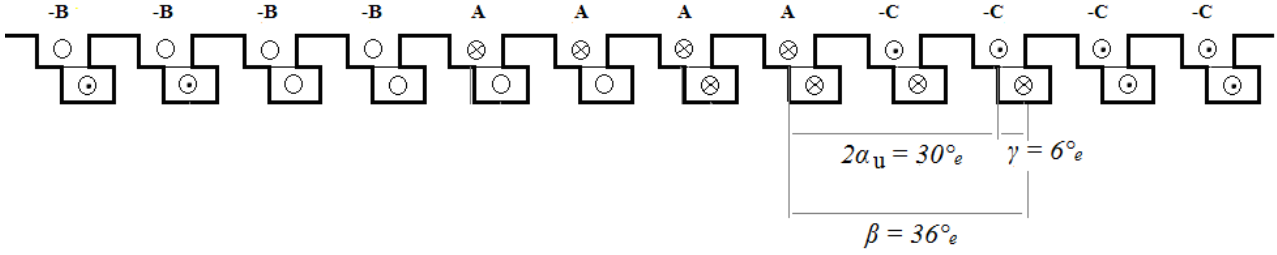
Uzak harmoniklerini elimine ederken bazı durumlarda oluk adımını kaydırmak yeterli olmamaktadır. Asenkron makinalarda statordaki oluk sayıları 18, 24, 36 gibi çift sayılardır. Böyle bir durumda oluk açıları ise 20° , 15° , 10° olmaktadır. Elimine edilmek istenilen 5. ve 7. harmonikler için açı değerleri $36^\circ e$ ve $25.7^\circ e$ daha önceden elde edilmişti. Fakat bu açılar oluk adımında kaydırma yapılarak elde edilemez. $36^\circ e$ ve $25.7^\circ e$ açılarını elde edebilmek için oluk adımını kaydırmanın yanında oluk yapısında da kaydırma yapılması gerekmektedir. Buna göre β ; bobin adımı kısalma açısı, y ; kısaltma yapılan oluk sayısı, α_u ; oluk açısı ve γ ; oluk kayma açısı olmak üzere, bobin adımının ara değer hesabı şu şekilde yapılır;

$$\beta = y \cdot \alpha_u + \gamma \quad (14)$$

Şekil 3 ve 4' de oluk yapısındaki γ kadar kayma gösterilmiştir. Yeni duruma göre β , γ kadar ötelenmiş olur.

Yukarıdaki işlemlerden de gördüğümüz gibi 5. ve 7. harmoniğin yok edilebilmesi için $36^\circ e$ ve $25.7^\circ e$ açılarda bobin adımında kaydırma yapılması

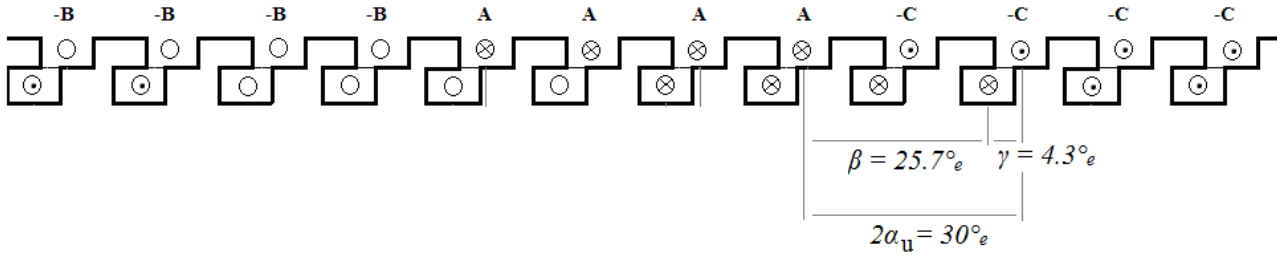
gereklidir. Şekil 5 ve 6' da tasarlanan oluk yapıları verilmiştir.



Şekil 5. 5. harmoniği yok etmek için tasarlanan stator oluk yapısı ($\beta = 36^\circ e$)

Şekil 5' de görüldüğü üzere oluk yapısı 5. harmoniği yok etme amacıyla tasarlanmıştır. Hedeflenen $36^\circ e$ lik kaydırma şu şekilde yapılmıştır; bobinler iki oluk adımı geri kaydırılmış olup, böylece $30^\circ e$ açıda bir

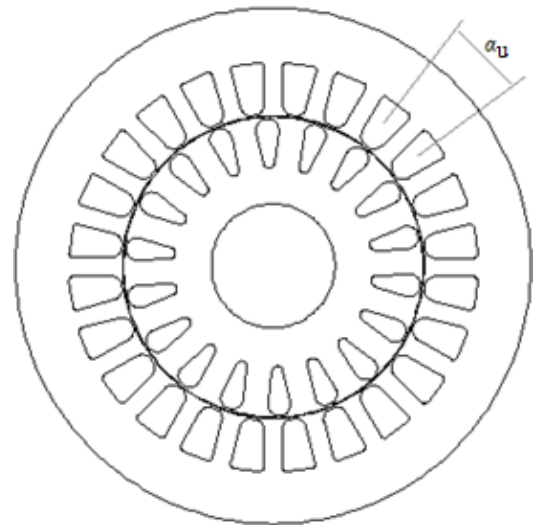
bobin adımı kısaltması elde edilmiştir. Daha sonra oluk $6^\circ e$ geri çekilmiştir. Böylelikle hedeflenen $36^\circ e$ lik bobin adımındaki kısalma elde edilmiştir.



Şekil 6. 7. harmoniği yok etmek için tasarlanan stator oluk yapısı ($\beta = 25,7^\circ e$)

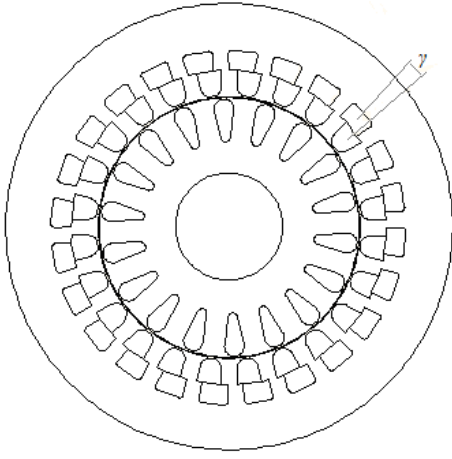
Şekil 6' daki oluk yapısı incelenecek olursa; 7. harmoniği yok etmek için bobin adımında $25.7^\circ e$ lik kısaltma yapılması gereklidir ve şu şekilde tasarımı yapılır. Bobinler 2 oluk adımı geri kaydırılmış olup, böylelikle $30^\circ e$ lik bir adım kısaltması sağlanmış olur, bununla birlikte olukta $4.3^\circ e$ ileri yönlü bir kaydırma yapılır ve sonuçta $25.7^\circ e$ lik kısaltma elde edilmiş olur.

kadar kısaltma yapılan L tipi oluk yapısı görülmektedir.



Şekil 7. I tipi oluk yapısına sahip 24 oluklu bir asenkron motorun iki boyutlu gösterimi (α_u : oluk açısı)

Normal motorun oluk şekline I tipi oluk ve oluk kaydırması yapılan motorunki ise L tipi oluk olarak adlandırılmıştır. Normal motorda tek tabakalı (yarım kalıp) sargı kullanılmıştır. L tipi oluk yapısında ise sargı çift tabakalı ve oluk başına kullanılan sipir sayısı ikiye bölünerek çift tabakalıya uygulanmıştır. Şekil 7' de 24 oluklu I tipi oluk yapısına sahip motor modeli gösterilmiştir. Şekil 8' de ise oluk yapısında γ açısı



Şekil 8. L tipi oluk yapısına sahip 24 oluklu bir asenkron motorun iki boyutlu gösterimi (γ : oluk kayma açısı)

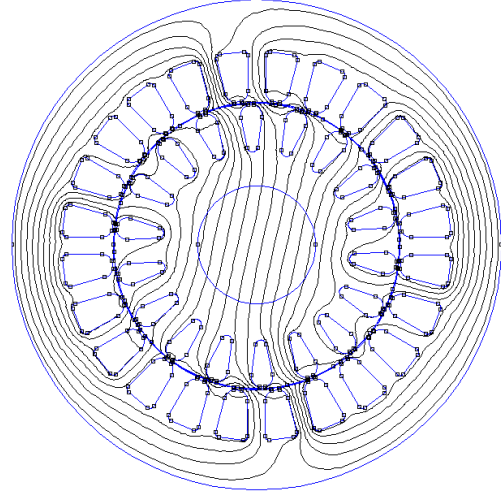
3.3 I tipi oluk yapısı için modelleme ve analizler

Modelin malzeme özellikleri ve sınır şartları belirlendikten sonra, stator ve rotor aynı malzemeden (silisli sac) yapıldıkları için “dem” adı altında, rotor olukları içindeki alüminyum malzeme “al” ve hava aralığı “air” olarak tanımlanmıştır. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile analiz (Int Kyn. 2) için tanımlanan problem sınır değer problemi olduğundan, stator dış çevresi için homojen Dirichlet sınır şartı atanmıştır ($A = 0$). Analizi yapılacak olan model için stator sargı isimleri A, B, C ve faz akımları A fazı için 6.6 Amper, B ve C faz gruplarına ait oluklardaki akımlar da sırası ile 120° ve 240° faz farkıyla atanmıştır. Her bir oluk için sarım sayısı 24 olarak belirlenmiştir. Gidiş iletkenleri “+” ve geliş iletkenleri için “-” işareti ile gösterilmiştir. Bu işlemler sonucunda Şekil 9 elde edilmiştir.

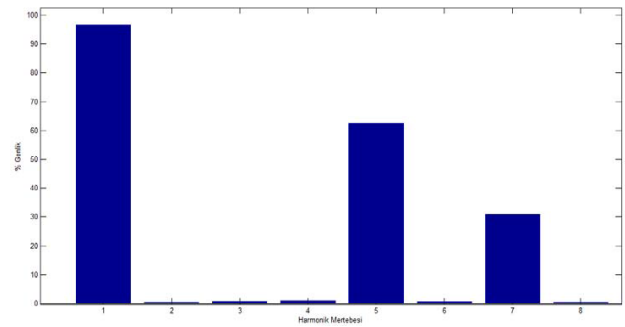


Şekil 9. I tipi modelin malzeme özellikleri ve faz kuşakları

Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılarak motorun hava aralığı akı yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Alan dağılımı Şekil 10’ da verilmiştir. Alan dağılımından elde edilen sayısal değerlerin yazılan Matlab programı yardımıyla Fourier analizleri gerçekleştirilmiştir ve sonuç olarak Şekil 11’ deki grafik elde edilmiştir (Özel 2010).



Şekil 10. I tipi modelin manyetik alan dağılımı



Şekil 11. I tipi motorda 5. ve 7. harmoniklerin görünümü

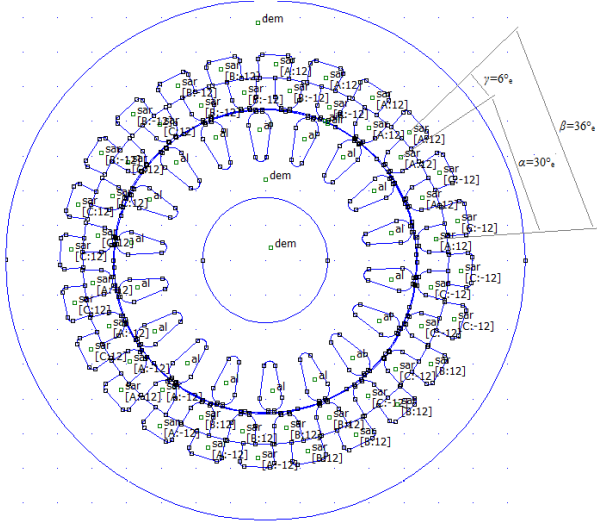
Şekil 11’ de I tipi oluk yapısına sahip motorda, temel harmonik bileşen ile en etkili harmonikler olan 5. ve 7. harmonikler görülmektedir. 5. harmoniğin genliği % 64, 7. harmoniğin genliği ise % 32 olarak elde edilmiştir.

3.4 L tipi oluk yapısı için modelleme ve analizler

3.4.1 5. harmonik için modelleme ve analiz

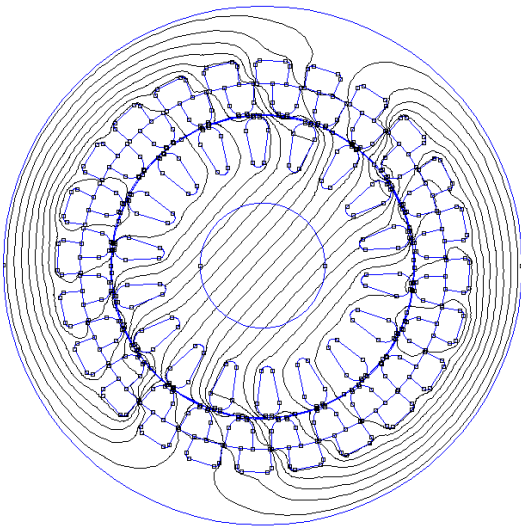
5. harmoniği yok edebilmek için bobin adımında 36° ’ lik bir kısaltma yapılması gerekmektedir. Bunun için motor modelinin olukları 6° ’ e geri çekilmiştir. Böylelikle 36° ’ lik bobin adımı kısaltması

yapılmıştır. Yeni tasarlanmış olan motor modeli Şekil 12' de gösterilmiştir.

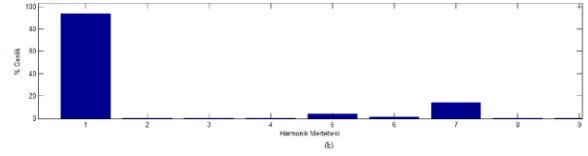
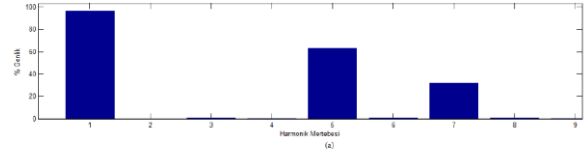


Şekil 12. Bobin adımında 36°' lik kısaltma yapılan motorun modeli

Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılarak motorun hava aralığı akı yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Alan dağılımı Şekil 13' de verilmiştir. Alan dağılımından elde edilen sayısal değerlerin yazılan Matlab programı yardımıyla Fourier analizleri gerçekleştirilmiştir ve sonuç olarak Şekil 14' deki grafik elde edilmiştir (Özel 2010).



Şekil 13. Bobin adımında 36°' lik kısaltma yapılan motorun manyetik alan dağılımı

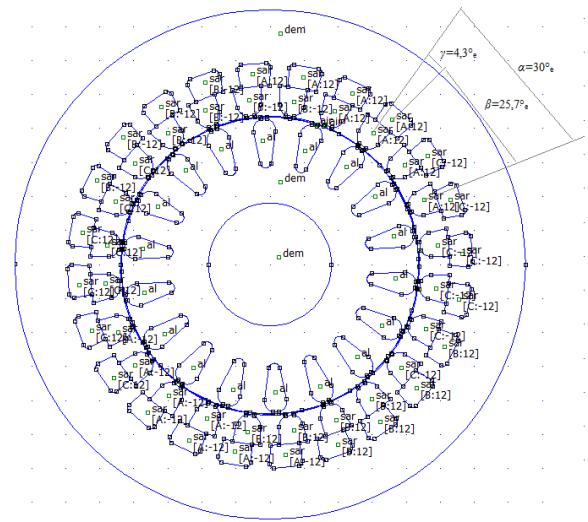


Şekil 14. (a) I tipi oluk yapısındaki motor (b) bobin adımında 36°' lik kısaltma yapılan motorun 5. ve 7. harmoniklerinin karşılaştırılması

Şekil 14' den görülüyor ki bobin adımında yapılan 36°' lik kısaltma sonucunda 5. harmonik değerinin oldukça azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte 7. harmoniğin genliğinde de gözle görülür bir azalma mevcuttur. 7. harmoniğin genliği % 18' e kadar azalmıştır.

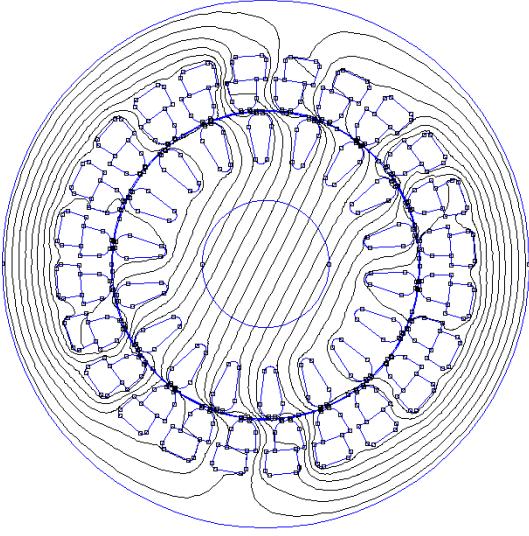
3.4.2.7. harmonik için modelleme ve analiz

7. harmoniği yok etmek için bobin adımında 25.7°' lik bir kısaltma yapılması gerekmektedir. Çizimi yapılan motorun olukları 4.3°' lik ileri yönlü kaydırılır. Bobinler iki oluk adımı (30°' lik) geri kaydırılır, böylece 25.7°' lik bobin adımı kısaltması yapılmış olur. Bu model Şekil 15' de görülmektedir.

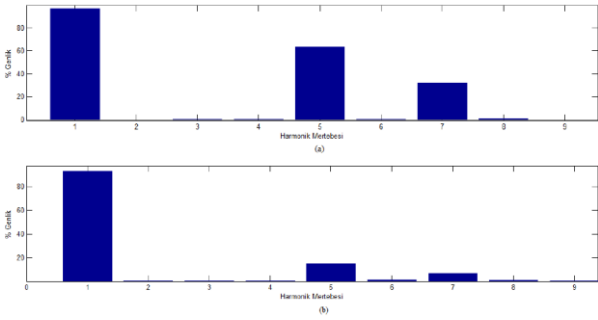


Şekil 15. Bobin adımında 25.7°' lik kısaltma yapılan motorun modeli

Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılarak motorun hava aralığı akı yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Alan dağılımı Şekil 16' da verilmiştir. Alan dağılımından elde edilen sayısal değerlerin yazılan Matlab programı yardımıyla Fourier analizleri gerçekleştirilmiştir ve sonuç olarak Şekil 17' deki grafik elde edilmiştir (Özel 2010).



Şekil 16. Bobin adımında 25.7°e kısaltma yapılan modelin manyetik alan dağılımı



Şekil 17. (a) I tipi oluklu motor (b) bobin adımında 25.7°e kısaltma yapılan motorun 5. ve 7. harmoniklerinin karşılaştırılması

Şekil 17' den görüldüğü gibi bobin adımında yapılan 25.7°e kısaltma sonucunda 7. harmonik neredeyse yok olmaktadır. Bununla birlikte 5. harmoniğin genliğinde de ciddi bir azalma söz konusudur. 5. harmoniğin genliği % 19 civarına kadar azalmıştır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, asenkron motorun sargı yapısı ve asenkron motor uzay harmonikleri üzerinde durulmuş ve uzay harmoniklerinin yok edilmesi için yeni bir stator oluk tasarımı yapılmıştır. 3-fazlı, 2-kutuplu, 24 oluklu bir asenkron motor modelinin SEY ile analizi yapılmış ve harmonikleri incelenmiştir. Harmoniklerin yok edilmesi için gerekli hesaplamalar yapılmış ve yeni bir stator oluk yapısı tasarlanmıştır. I tipi oluk yapısına sahip asenkron motorun hava aralığı akı yoğunluğu değerlerinin Fourier analizi Matlab' da yazılan programla yapılmış ve harmonikleri incelenmiştir. Bu harmonikleri yok etme amaçlı tasarlanan L tipi oluk yapısına sahip motor için de aynı işlemler yapıldığında hedeflenen 5. ve 7. harmoniklerin yok olduğu gözlemlenmiştir.

Yeni oluk yapısı ile asenkron motorlarda harmoniklerin genliğinin azaltılması etkisi, motorda üretilen frenleyici momentlerin etkilerinin azaltılması yönünde sonuç vermektedir. Aynı oluk yapısı bir senkron makinaya da uygulanabilir. Yeni oluk yapısının etkisi, senkron makinanın generatör çalışmasında stator sargılarında endüklenen gerilimdeki harmoniklerin genliklerinin azaltılması ya da tamamen yok edilmesi olarak ortaya çıkacaktır(R6).

İleriki çalışmalarda bu oluk yapısının işletme karakteristikleri üzerine etkisi incelenebilir. Stator oluk dış yapısının değişmesiyle manyetik yollardaki relüktans değişimlerine bağlı olarak oluk geometrisinde bir optimizasyon analizi yapılabilir. Aynı zamanda L tipi oluk yapısından farklı oluk yapıları da geliştirilebilir.

Teşekkür

Bu makale Dumlupınar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenen 2014-39 numaralı proje ile gerçekleştirilmiştir.

5. Kaynaklar

- Banupriya, D., Rani, K.S.S., 2013. Total harmonic distortion minimization in induction motor using space vector modulation scheme. *International Journal of Computer Applications*, **69 (12)**, 13-16.
- Bayram, D., Mergen, A.F., Asenkron Makinada Zaman Harmoniğinin Kayıplara Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi. Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1-4.
- Boduroğlu, T., 1988a. Elektrik Makinaları Dersleri 2-1, Döner Alternatif Akım Makinalarına Giriş. Beta Basım Yayıncılık.
- Boduroğlu, T., 1988b. Elektrik Makinaları Dersleri, 2-2, Asenkron Makinalar (Teorik Bilgi). Beta Basım Yayıncılık.
- Boduroğlu, T., 1994. Elektrik Makinaları Dersleri, 2-3, Asenkron Makinaların Hesap ve Konstrüksiyonu. Beta Basım Yayıncılık.
- Burbidge, R.F., 1958. A rapid method of analyzing the mmf wave of a single or polyphase winding. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, **105-C**, 307-311.
- Didier, G., Razik, H., and Rezzoug, A., 2005. An induction motor model including the first space harmonics for broken rotor bar diagnosis. *European Transactions on Electrical Power*, **15**, 229-243.
- Gyftakis, K.N., Panagiotou, P.A., and Kappatou, J.C., 2013. Application of wedges for the reduction of the space and time-dependent harmonic content in squirrel-cage induction motors. *Journal of Computational Engineering*, 1-9.
- Jeon, K.W., Kim, Y.J., and Jung, S.Y., 2013. Design characteristics of torque harmonics reduction of induction motors for electric vehicle propulsion. *Journal of Magnetics*, **18 (2)**, 212-215.
- Kaikaa, M.Y., Babaa, F., Khezzar, A., and Boucherma, M., 2006. Analytical analysis of rotor slot harmonics in the line current of squirrel cage induction motors. *Journal of Electrical Engineering*, **57 (1)**, 12-19.
- Kocabaş, D.A., Mergen, A.F., 2000. Çok fazlı asimetrik sargılarda uzay harmoniklerinin ve sargı faktörünün matlab destekli analizi. Elektrik, Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı, Bursa, pp. 99-102.
- Kocabaş, D.A., Mergen, A.F., 2008. A novel method to reduce the effects of space harmonics in alternating current machines. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 692-697.
- Kocabaş, D.A., 1997. Alternatif akım makinalarında uzay harmoniklerinin bilgisayar destekli analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 64 s.
- Kostenko, M., Piotrovsky, L., 1974. Electrical Machines in Two Volumes 2. Mir Publishers.
- Kuhlman, J.H., 1951. Elektrik Makinelerinin Hesabı. Kurtulmuş Basımevi.
- Liang, X., Luy, Y., 2006. Harmonic analysis for induction motors. IEEE CCECE/CCGEIJ, Ottawa, pp. 172-177.
- Navrapescu, V., Popescu, M., Chirila, A.I., Deaconu, I.D., and Ghita, C., 2010. Computation methods for space harmonic effects on single-phase induction motor performance. *Revue Roumaine des Sciences Techniques-Serie Électrotechnique et Énergétique*, **55 (3)**, 278-288.
- Neto, L.M., Camacho, J.R., Salerno, C.H., and Alvarenga, B.P., 1999. Analysis of a three-phase induction machine including time and space harmonic effects: The A, B, C reference frame. *IEEE Transaction on Energy Conversations*, **14 (1)**, 80-85.
- Özel, U., 2010. Asenkron motorlarda uzay harmoniklerin yok edilmesi için yeni bir stator oluk tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 84 s.
- Prashanth S A, Sameer N., Ankit D., and Praveen K., 2015. Analytical Determination of Slot Harmonics content of Air-Gap Magnetic Field for an Induction Machine. IEEE Power & Energy Society General Meeting.
- Pyrhönen, J., Jokinen, T., and Hrabovcova, V., 2008. Design of Rotating Electrical Machines. John Wiley & Sons, Ltd., 512 p.
- Stepina, J., 1979. Non-transformational matrix analysis space harmonics of electrical machines. *Electrical Machinery, Electromechanical*, **4**, 255-268.
- Subhasis, N., 2008. Space and time harmonics related problems and their mitigation for position and speed sensorless slip-ring induction motor drives applications. *Sadhana*, **33 (5)**, 565-580.
- Youcef, O., 2009. Computation of the effect of space harmonics on starting process of induction motors using TSFEM. *Journal of Electrical Systems*, **1**, 48-52.

İnternet kaynakları

1-www.elektrikport.com, (10.11.2009)

2-www.femm.info, (10.11.2009)