



ISSN:1306-3111

e-Journal of New World Sciences Academy
2011, Volume: 6, Number: 1, Article Number: 1A0158

ENGINEERING SCIENCES

Received: October 2010

Accepted: January 2011

Series : 1A

ISSN : 1308-7231

© 2010 www.newwsa.com

Mehmet Polat

Hasan Kürüm

Firat University
mpolat@firat.edu.tr

Elazig-Turkey

**8/6 DALGIÇ POMPA TİPİ ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR BOYUTLARININ
ANALİTİK OLARAK TASARLANMASI**

ÖZET

İmalat öncesi hesaplamalarda bir makinenin boyutlarının belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada 8/6 dalgıç pompa tipi bir Anahtarlama Relüktans Motor'un (ARM) matematiksel olarak boyutlarının nasıl hesaplanabileceği ayrıntılı olarak verilmiştir. Makine boyutlarının hesaplanmasında silisyumlu sacın B-H eğrisi modellenip hesaba dâhil edilmiştir. Hesaplamalar için gerekli olan programlar, MATLAB 7.04 kullanılarak yazılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dalgıç Pompa Tipi ARM, Motor Boyutlarının Belirlenmesi, MATLAB, Analitik Tasarım, Non-Lineerliğin Hesaba Katılması

**ANALYTIC DESIGN OF DIMENSIONAL AT SUBMERSIBLE PUMP-TYPE SWITCHED
RELUCTANCE MOTOR WITH 8/6 POLES**

ABSTRACT

Manufacturing pre-calculations to determine the dimensions of a machine is of great importance. In this study, submersible pump-type Switched Reluctance Motor with 8/6 poles (SRM), how to mathematically calculate the dimensions are given in detail. B-H curve modeling of silicon sheet was infused into account at calculation of machine dimensions. Programs are required for calculations written using MATLAB 7.04.

Keywords: Submersible Pump-Type Switched Reluctance Motor, Determination of Motor Dimensions, MATLAB, Analytic Design, Take Into Account of Non-Linear

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

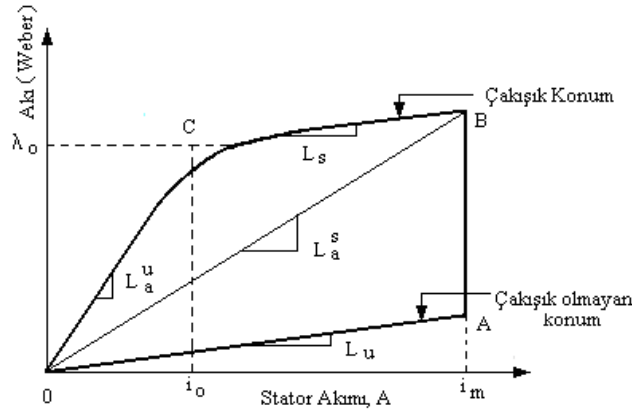
ARM'nin performans analizi, stator ve rotor saçlarının boyutlarına, sargı detaylarına, kutup sayısına ve kutup yaylarının genişliğine ihtiyaç duyar. ARM'nin yaklaşık boyutu makina tasarımcıları tarafından iyi bilinen çıkış gücü denklemleri kullanılarak elde edilir. Makina boyutları sonuçları tasarım için başlangıç noktasıdır [1].

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARC SIGNIFICANCE)

Motor prototip üretimine geçmeden önce teorik olarak motor boyutlarının ve elektriksel büyüklüklerinin iyi bir şekilde ortaya konması gerekmektedir. Bunun içinde yapılacak olan analitik tasarım büyük önem arz etmektedir. Motor tasarımın ilk adımı analitik çalışmadır. Dikkat edilmeyen veya hatalı yapılacak olan analitik tasarımlar, hem zaman kaybına hemde iş kaybına neden olur. Bu nedenle, bu çalışma ne kadar hassas gerçekleştirilse, tasarlanacak üründe o kadar gerçeğe yakın olur.

3. ÇIKIŞ DENKLEMİNİN ÇIKARILMASI (REMOVAL OF THE OUTPUT EQUATION)

Çıkış denklemi, mil çapı, uzunluk, hız ve bir makinanın çıkışındaki manyetik ve elektrik yüklerini gösterir. Genelde geleneksel makinalar çıkış denkleminde başlanarak tasarlanır. ARM için temel bir çıkış denkleminin geliştirilmesi tasarımı sistematik bir hale getirebilir. Ayrıca, makina tasarımcılarının deneyimlerini bu makinalar ile geleneksel makinalar arasındaki ortak noktaları kullanabildikleri için yeni bir makinanın tasarımında oldukça etkili bir yararı olabilir. ARM'nin çıkış denklemi geleneksel makineden farklıdır.



Şekil 1. ARM'nin stator akımına karşılık akı değişim [1]
(Figure 1. Flux linkages vs. stator current for SRM)

Şekil 1'de de stator ve rotor kutuplarının çakışık olmayan ve tam çakışık konumdaki akı yollarına karşı akım karakteristikleri verilmiştir. Stator ve rotor kutuplarının çakışık konumda olmaması, stator kutup merkezinin iki rotor kutbu arasında olması anlamına gelmektedir. Bir darbelik motorun mekaniksel çıkış enerjisi O,A,B,C ve O noktalarıyla kapatılan alanla gösterilir. Makina sargıları içindeki direncin gerilim düşümü ihmal edilirse, o zaman uygulanan gerilim akı yollarının değişim oranına eşittir. Bu nedenle, sabit faz akımı için akı yolu ve gerilim arasındaki komşuluk direnç üzerindeki gerilim düşümü ihmal edilirse aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$V \cong \frac{\partial \lambda}{\partial t} = \frac{(\lambda_a - \lambda_u)}{\lambda_u} = \frac{(L_a^s - L_u)}{t} i \quad (1)$$

L_a^s :Her bir fazın çakışık konumdaki doymuş endüktansı

L_u :Her bir fazın çakışık olmayan endüktansı

V :Uygulanan gerilim

t :Rotorun çakışık olmayan konumdan çakışık olan konuma gelene kadar ki geçen süre.

λ :Faz akısı

t süresi ise stator kutup yayı ve rotor hızıyla tanımlanabilir,

$$t = \frac{\beta_s}{\omega_m} \quad (2)$$

β_s :Radyan olarak stator kutup yayı

ω_m :Rotor hızı (rad/sn)

Diğer tanımlar;

$$\sigma_s = \frac{L_a^s}{L_a^u} \quad (3)$$

$$\sigma_u = \frac{L_a^u}{L_u}$$

(4)

L_a^u :Çakışık konumdaki doymamış endüktans

Denklem 3 ve 4, denklem 1'de yerine konulursa uygulanan gerilim,

$$V = \frac{\omega_m}{\beta_s} L_a^s i \left(1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u} \right) \quad (5)$$

olarak elde edilir. Çakışık konumdaki akı çizgileri, akı ve sarım sayısına göre yazıldıktan sonra akı yoğunluğu ve makina boyutları aşağıdaki gibi elde edilir;

$$L_a^s i = \phi T_{ph} = B \times A_{sp} \times T_{ph} = B \times D \times L \times \beta_s \times T_{ph} / 2 \quad (6)$$

ϕ :Çakışık konumdaki akı

A_{sp} :Stator kutup alanı

D :İç çap

L :Stator kutbunun eksensel uzunluğu

B :Çakışık konumdaki stator kutup akı yoğunluğu

T_{ph} :Faz başı sarım sayısı

Spesifik elektrik yükü A_s , stator akımı cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$A_s = \frac{2T_{ph} i m}{\pi D} \quad (7)$$

m :Aynı zamanda iletimde olan faz sayısıdır. 6/4 yapısına sahip motorun başlangıç anı düşünülürse aynı zamanda sadece bir faz iletimdedir. O zaman geliştirilen güç;

$$P_d = k_e k_d V i m \quad (8)$$

V ve i fazın tepe değerleridir.

k_d :Denklem 9'da tanımlanan görev periyodudur.

k_e :Verimlilik katsayısıdır.

Görev Periyodu;

$$k_d = \frac{\theta_i \cdot q P_r}{360} \quad (9)$$

θ_i : Her bir yükselen endüktans profili için akım iletim açısıdır.

q : $P_s/2$ olarak verilen stator faz sayısı, P_s , stator kutup sayısıdır.

P_r : Rotor kutup sayısıdır.

Denklem 5 ve 6, denklem 8'de yerine konursa geliştirilen güç;

$$P_d = k_e \cdot k_d \left(\frac{\pi^2}{120} \right) \left(1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u} \right) B A_s D^2 L n_r \quad (10)$$

n_r : Rotor hızı

Denklem 10 tekrar düzenlenerek geleneksel AA makinelerin çıkış denklemi şeklinde ifade edilebilir.

$$P_d = k_e k_d k_1 k_2 B A_s D^2 L n_r \quad (11)$$

$$k_1 = \frac{\pi^2}{120} \quad (12)$$

$$k_2 = 1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u} \quad (13)$$

Denklem 10'dan momenti elde edebiliriz,

$$T = k_d k_e k_3 k_2 \cdot (B A_s) D^2 L \quad (14)$$

$$k_3 = \frac{\pi}{4} \quad (15)$$

Moment ve çıkış gücü, spesifik elektrik ve manyetik yüklerinin çarpımıyla orantılıdır ve burada $(\pi D^2 L) / 4 \cdot k_2$ olarak verilen çap hacmi sadece motorun çalışma noktasına bağımlılık gösteren bir değişkendir ve stator faz akımı, nüvenin manyetik karakteristiği ve motorun boyutlarıyla tanımlanır. Verilen çalışma noktası için k_2 bir sabittir. Bu nedenle, ARM'den maksimum çıkış gücünü elde etmek için, k_2 'nin maksimum stator akımından hesaplanması gerekir. $k_d=1$ 'de verilen bir stator akımında geliştirilen güç maksimumdur. Genelde 1'den küçük olan maksimum görev periyodunu bulma yoluna gidilir. Ayrıca, moment ve güç kontrolü, kıyıcı kontrollü DA motora benzer şekilde görev periyodu tarafından denetlenir. Hız, fazların anahtarlama frekansı tarafından senkron motora benzer şekilde kontrol edilir [1, 2 ve 3].

4. BOYUTLARIN SEÇİMİ (CHOICE OF DIMENSIONS)

4.1. Çap ve Uzunluk (Diameter and length)

Genelde ARM değişken hız uygulamalarında kullanıldığı için, temel hız ayarlarına sahip olarak imal edilir. Temel hızda motor, anma momentini ve buradan anma çıkış gücünü vermelidir. Nominal çıkış gücüne tekabül eden denklem 11 kullanılarak ve paket boyu bir çarpım veya rotorun yerleştirildiği iç çapın alt çarpımları olarak alınır,

$$L = k \cdot D \quad (16)$$

L 'yi çıkış gücü denkleminde yerine yazarsak;

$$P_d \propto k_2 \cdot D^3 \quad (17)$$

Eğer nominal hızda B , A_{sp} , k_2 , k_d ve k biliniyorsa, D denklem 17'den değerlendirilir. Tasarımın iterasyon işlemini makul değerlerle başlatmak mümkündür. Genelde nominal çalışma noktasında, k_2 'nin çalışma aralığı denklem 18'deki gibi alınabilir.

$$0.65 < k_2 < 0.75 \quad (18)$$

Çakışık konum için B 'nin değerleri çekirdek materyali için mümkün olan maksimum değerde alınabilir. Spesifik elektrik yükü

metre başına iletken-akım genellikle aşağıda verilen değerler arasında alınır,

$$25000 < A_s < 90000 \quad (19)$$

Görev periyodu k_d başlangıçta 1 olarak alınabilir. Üst başlangıç değerleri kullanılarak çekirdek çapı D hesaplanır. Hava aralığı imal tekniklerinin uygulamaları tarafından belirlenen sınırlamalardan belirlenir. Küçük makinalardaki hava aralığı 0.18 mm ile 0.25 mm arasındadır. Büyük güçlü makinalarda 0.3 mm ile 0.5 mm arasında alınabilir. Çap için uzunluk oranı k rastgele alınmamalıdır. k için doğal çalışma koşulları ve boşluk sınırlamalarına göre karar vermek gerekir. Servo uygulamalar dışında bu aralık aşağıdaki gibi alınabilir;

$$0.25 < k < 0.70 \quad (20)$$

Servo uygulamalar için k genellikle aşağıdaki aralıkta seçilir;

$$1 < k < 3 \quad (21)$$

4.2. Sarım Sayısı (Winding Number)

Her faz için sarım sayısı, T_{ph} , denklem 7 kullanılarak verilen akım için hesaplanır. İletken boyu sargı boşluğunu doldurabilecek şekilde seçilir. Motor içerisinde uygulanan soğutma metoduna bağlı olarak meydana gelen akım yoğunluğu hesaplanıp izin verilen maksimum değerle karşılaştırılır. Eğer dış çap üzerinde kısıtlamalar yoksa sargı boşluğu, sarım sayısından, iletkenin kesit alanından ve yalıtım kalınlığından hesaplanabilir. O zaman stator kutbunun yüksekliği sargı boşluğundan elde edilir [4].

Denklem 7'den verilen özel elektriksel yük ve mil çapı için T_{ph} ve i 'nin çarpımı bir sabit olarak görülebilir. Bu durumda en iyi değerler aşağıda verilen karşılıklı zıt taleplerden elde edilebilir;

- Küçük akım büyük sarım sayısını gösterir.
- Sargının küçük endüktans ve direnç değerleri küçük sarım sayısını gösterir.

4.3. Stator Dış Çapı (Stator Outer Diameter)

Eğer dış çap önceden belirlenirse, tasarım dış boyuttan iç boyuta taşınır. Makinalar belirli ayarlanabilir hız uygulamaları içinde kullanılırlar ve kamu kuruluşu veya özel bir organizatör tarafından sınıflandırılan çerçeve numaralarının altında olabilir. Bu durumda, tasarım detayları stator iç çapıyla başlar ve sonra bu yolda hareket ederek stator saçlarının dış çapını, onun kutup yüksekliğini ve dış demir kalınlığını ekleyerek belirlenir. O zaman aşağıdaki sonuç elde edilir;

$$D_0 = D + 2b_{sy} + 2h_s \quad (22)$$

4.4. Rotor Dış Demir Kalınlığı (Rotor Back-Iron Thickness)

Rotor dış demir kalınlığı, b_{ry} , yapısal bütünlüğü ve çalışma akı yoğunluğunu temel alır. Stator dış demir kalınlığı kadar olmasına gerek yoktur ve stator kutup genişliğinin yarısına eşit olan minimum değere eşit olmak zorunda değildir. Değer aralıkları çakışık ve çakışık olmayan durumdaki endüktanslar arasında yüksek oranı sağlamak için geniş iç kutup hava aralığını izah ederek seçilmek zorundadırlar, fakat aynı zamanda rotor içerisinde minimum titreşim sağlamak için küçük rotor kutuplarına sahip olması istenir. Bu durumlar temel alınarak, rotor dış demir kalınlığı stator kutup genişliği cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$0.5w_{sp} < b_{ry} < 0.75w_{sp} \quad (23)$$

4.5. Rotor Kutup Yüksekliği (Height of Rotor Pole)

Verilen iç çap, hava aralığı uzunluğu, ℓ_g , rotor dış demir kalınlığı ve rotor mil çapından rotor kutup yüksekliği aşağıdaki gibi formülüne edilir;

$$h_r = \left[\frac{D - 2\ell_g - D_{sh} - 2b_{ry}}{2} \right] \quad (24)$$

D_{sh} :Rotor mil çapı

4.6. Faz Sayısının Belirlenmesi (Determining the Number of Phase)

Faz sayısı aşağıdaki faktörler dikkate alınarak belirlenir;

- **Başlama kabiliyeti:** Tek fazlı makinanın eğer rotor ve stator kutupları çakışık ise dönme olmaz. Bu makinalar orta konumda, stator kutupları ile rotor kutuplarını çakışık olmayan konuma almak için stator üzerinde sürekli mıknatıslığa ihtiyaç duyar.
- **Yön kabiliyeti:** Gerekli olan minimum stator fazı ne olursa olsun makina bir veya iki yönde çalışmaya ihtiyaç duyar. Örneğin, bir 4/6 kutuplu bir makina sadece tek yönde dönme kabiliyetine sahiptir, oysa 6/4 kutuplu bir makina iki yönde dönme kabiliyetine sahiptir. Birinci söylenen durum iki fazlı ikinci söylenen durum ise üç fazlı ARM'dir.
- **Güvenirlilik:** Yüksek faz sayısı, arızalı bir veya birden fazla faz makinanın geriye kalan sağlıklı fazlarıyla birlikte halen çalışmasına izin verdiğinden dolayı yüksek güvenirlilik anlamına gelir. Bu durum kritik uygulamalarda yararlı olabilir.
- **Maliyet:** Yüksek sayıdaki fazlar aynı faz sayısında konvertör faz ünitelerine, onların sürücülerine, lojik güç kaynaklarına ve kontrol ünitelerine ihtiyaç duyarlar. Bunların hepsi muhtemelen maliyeti ve paketleme boyutunu etkileyecektir ve bu nedenle bu durumun makinanın tasarımıyla birlikte düşünülmesi gerekmektedir.
- **Güç Yoğunluğu:** Birçok uygulamada yüksek sayıdaki fazın yüksek güç yoğunluğu verme eğiliminde olduğu gözlenmiştir (üç faz iki faz ile karşılaştırılmıştır).
- **Yüksek Hızda Çalışma Verimi:** Yüksek hızda verimli çalışma çekirdek kayıplarının azaltılmasıyla elde edilir. Bu da stator faz sayısının azaltılması ve her bir turda faz anahtarlama sayısının düşürülmesi ile olur. Üç faz, dört faz ve üstündekilere karşı uçak marş/dinamo ARM'sinde yüksek hızda çalışma durumu ve küçük boyutta olması gerektiği için tercih edilir.

4.7. Kutupların Seçimi (Selection of Poles)

Stator ve rotor kutupları arasında bir oran olması tercih edilir. Bu oranlarda tam sayı değerler denenmesine rağmen tam sayı olmaması istenir [5]. Bugün temel alarak, endüstriyel tasarımda kullanılan stator ve rotor kutup kombinasyonları aşağıdaki tablo 1'de verilmiştir [1],

Tablo 1 Stator-rotor kombinasyonları
(Table 1. Stator-rotor combinations)

	Kutuplar			
Stator	6	12	8	12
Rotor	4	8	6	10

Kutup seçimini sınırlayan faktörler, konvertör güç anahtarlarının sayısı, güç anahtarlarının sürme devre maliyetleri,

lojik güç kaynakları ve faz akımlarının kısa yükselme ve düşme zamanları açısından kontrol gereksinimleri olarak sayılabilir. Bir 12/8 ARM her faza 4 stator kutbu gelecek şekilde sarılırsa üç fazlı makinadır. Eğer makinanın maksimum hızı w_{rm} rad/saniye ise, o zaman bir fazın stator frekansı;

$$f_s = \left(\frac{w_{rm}}{2\pi} \right) P_r \quad (25)$$

Bu nedenle, artan rotor kutup sayısı ile birlikte orantılı olarak stator frekansı da artar. Daha az rotor kutup sayısına sahip olan bir ARM sürücüsüne göre, çekirdek kayıplarının artması ve oldukça önemli olan iletim zamanının yükselmesi (akımın yükselme ve düşme zamanları) sonuçlarını ortaya çıkarır. Buda yüksek kırıyıcı kayıplarına ve geniş faz iletim çakışmasına neden olur. Artan kutup sayısı yanı zamanda, motor üretim maliyetini ve konvertör maliyetini arttırır.

4.8. Kutup Yayılı/Kutup Aralığı Oranı (Ratio of Pole Arc/Pole Pitch)

ARM tasarımında stator ve rotor kutup yayları önemli bir değişkendir.

Stator ve rotor kutup yayları oranları istenilen akıma göre değiştirilip makinada geliştirilen ortalama moment üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bunun için kutup yayı / kutup aralığı (kutup aralığı iki stator kutbu arasındaki mesafe/açıdır bu aynı zamanda rotor kutbu içinde yapılabilir) oranı gibi kutup çevreleri tanımlanmıştır.

Yapılan çalışmalarda stator kutup yayındaki değişimlerin ortalama momenti rotor kutup yayındaki değişimlerden daha fazla etkilediği gösterilmiştir [6]. Yine aynı çalışmada bütün uyartım akımlarında, ortalama moment değeri rotor kutup yayının artmasıyla birlikte arttığı ve bir tepe değere ulaştıktan sonra stator kutup yayı sabit olduğunda azaldığı gözlenmiştir. Çalışmanın sonucunda ARM'nin, stator ve rotorun kutup yayılı/kutup aralığı oranlarının aynı olma zorunluluğu olmadığı ve bu nedenle, rotor için kutup yayılı/kutup aralığı oranı 0.3-0.45, stator içinde 0.35-0.5 aralığı tavsiye edilmiştir [6]. Rotor oranındaki ilave artışlar daha çok demir yoğunluğuna ve yüksek atalete neden olacaktır. Stator oranındaki ilave artışlar ise stator sargı alanları azalacak ve stator genişliği de artacaktır bunun sonucu olarak ta materyalden yararlanma azalacaktır [1 ve 7].

4.9. Kutup Yaylarının Seçimi (Selection of Pole Arcs)

Rotor ve stator kutup yaylarının seçim öncelikleri;

- Kendinden başlama gereksinimleri
- Statik momente karşı rotor konumu karakteristiğinin şeklidir [1 ve 8].

Bunlar analitiksel olarak elde edilebilir. Bu tasarım faktörlerinin elde edilmesi aşağıda anlatılmıştır.

4.9.1. Kendinden Başlamayı Başarmak için Minimum Stator ve Rotor Kutup Yayılı Oranı (Minimum Stator and Rotor Pole Arcs for Achive Self-Starting)

Mekaniksel rotor kutup yayılı aralığı aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\theta_{rp} = \frac{2\pi}{P_r} \quad (26)$$

Arka arkaya gelen stator faz endüktansları veya akı yolları arasındaki faz kayması;

$$\theta_{rs} = \left(\frac{2\pi}{P_r} \right) \cdot \frac{1}{q} = \frac{\theta_{rp}}{q} \quad (27)$$

Burada temel yapı içerisinde yani her kutba bir diş gelecek şekilde q ;

$$q = \frac{P_s}{2} \quad (28)$$

Şekil 2 arka arkaya gelen fazlar arasındaki endüktans değişimlerini gösterir. Bu şekilden de görüleceği üzere sürekli başlama momenti için ihtiyaç duyulan çakışma açısı θ_0 olarak gösterilir ve bunun sıfırdan küçük veya sıfıra eşit olması gerekir, yani;

$$\theta_0 \leq 0 \quad (29)$$

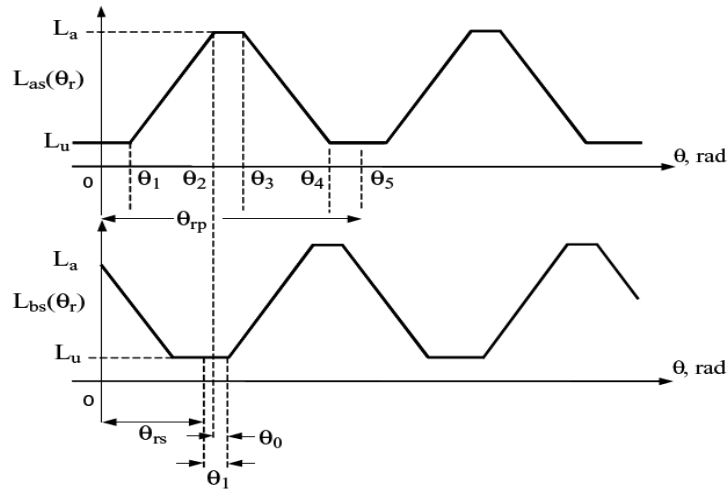
θ_0 'ın minimum durumunun sıfıra eşit olduğu göz önüne alınıp θ_0 diğer açılar cinsinden yazılırsa;

$$\theta_0 = \theta_{rs} + \theta_1 - \theta_2 = \theta_{rs} - (\theta_2 - \theta_1) = 0 \quad (30)$$

Buradan minimum $(\theta_2 - \theta_1)$ aşağıdaki gibi elde edilir,

$$(\theta_2 - \theta_1) = \theta_{rs} = \frac{\theta_{rp}}{q} = \frac{2\pi}{qP_r} = \frac{4\pi}{P_s P_r} \quad (31)$$

P_s ve P_r sırasıyla stator ve rotor kutup sayılarıdır. Denklem 3.81'in sol tarafındaki açılar stator ve rotor kutup yayları cinsinden yazılabilir;



Şekil 2. Ard Arda gelen stator fazları için stator endüktansının rotor konumuna göre değişimi [1].

(Figure 2. Stator inductance vs. rotor position for two successive stator phases).

$$\theta_1 = \frac{1}{2} [\theta_{rp} - (\beta_s + \beta_r)] \quad (32)$$

$$\theta_2 = \theta_1 + \beta_s \quad (33)$$

Buradan $(\theta_2 - \theta_1)$ aşağıdaki gibi elde edilir,

$$(\theta_2 - \theta_1) = \beta_s \quad (34)$$

Denklem 31 ve 34'ü birleştirirsek minimum kutup yayı;

$$\min[\beta_s] = \frac{4\pi}{P_s P_r} \quad (35)$$

4.9.2. Çakışma Açısının (θ_0) Sınırlanması (Limits of Overlap Angle)

Motorun kendiliğinden başlaması için çakışma açısının sınırlanması;

$$\begin{aligned} \min[\theta_0] &= 0 \\ \max[\theta_0] &= -\frac{2\pi}{P_r} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{q} \right) \end{aligned} \quad (36)$$

Buradan,

$$\frac{2\pi}{P_r} \left(\frac{1}{q} - \frac{1}{2} \right) \leq \theta_0 \leq 0 \quad (37)$$

θ_0 aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \theta_{rs} - (\theta_2 - \theta_1) = \frac{\theta_{rp}}{q} - (\theta_2 - \theta_1)_{\max} = \frac{2\pi}{qP_r} - \frac{2\pi}{2P_r} \\ &= \frac{2\pi}{qP_r} \left(1 - \frac{q}{2} \right) = \theta_{rs} \left(1 - \frac{q}{2} \right); \quad q > 2 \text{ için} \end{aligned} \quad (38)$$

Burada negatif θ_0 çakışmanın olduğu anlamına gelirken pozitif değerler ise çakışmanın olmadığını gösterir.

$$\theta_3 = \theta_2 + (\beta_r - \beta_s) \quad (39)$$

Buradan,

$$(\beta_r - \beta_s) = (\theta_3 - \theta_2) \quad (40)$$

Şekilden de görüldüğü gibi $(\theta_3 - \theta_2)$ 'nin sifıra eşit veya sıfırdan büyük olma zorunluluğu vardır. Böylece denklem 40;

$$(\beta_r - \beta_s) \geq 0 \quad (41)$$

olur. Bu denklemden de anlaşılacağı üzere rotor kutup yayı ya stator kutup yayına eşit yada büyük olmak zorundadır. Denklemi tekrar yazacak olursak;

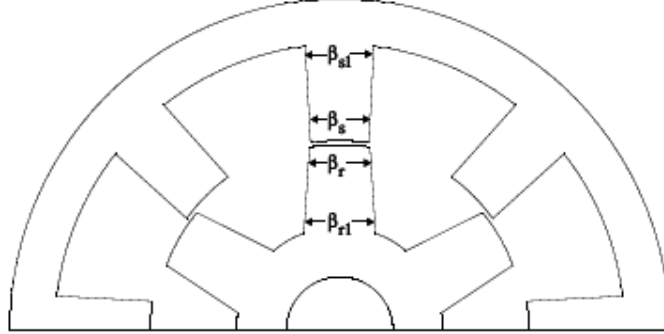
$$\beta_r \geq \beta_s \quad (42)$$

Denklem 35 ve 40 kendinden çalışabilme durumu için sırasıyla minimum stator ve rotor kutup yaylarını vermektedir. Denklem 37 minimum stator kutup çiftini verir ve bu nedenle faz sayısının iki ye eşit ya da ikiden büyük olması lazım.

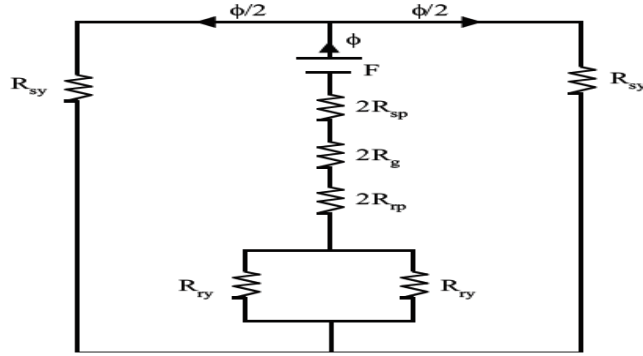
4.9.3. Kutup Tabanının Seçimi (Selection of Pole Base)

Şekil 3'te gösterildiği gibi, stator kutupları değişik uç ve taban genişliklerine sahip olan bir ARM'nin momente karşı rotor konum karakteristikleri çıkarılabilir. Şunu söyleyebiliriz ki, tasarımda rotor kutuplarının genişliğinin değiştirilmesi moment şekil karakteristikleri üzerinde oldukça küçük etkiye sahiptir [6 ve 7]. Tabandaki stator kutup genişliğinin arttırılması, baştanbaşa kesit alanının artmasına sebep olacak ve buda stator kutup bölgesinin relüktansının azalmasına neden olur. Şekil 4'te gösterilen yarım simetri olan manyetik eşdeğer devreyi göz önüne alırsak, bu etki aşağıdaki sonuçları çıkartabilir. F mmk'tir, R_{sp} stator kutup relüktansı, R_g hava aralığı relüktansı, R_{rp} rotor kutup relüktansı, R_{ry} her kenar için rotor çekirdek relüktansı ve R_{sy} her kenar için dış demir (back-iron) relüktansı. Stator kutuplarının taban genişliği arttırıldığından dolayı R_{sp} azaldığı için, eşdeğer devre relüktansı azalır ve devre içerisinde akan akının yükselmesine izin verir. Bu momenti arttırır aynı zamanda faz endüktansını arttırır. Bu etkiler özellikle çakışık konuma yakın bölgede oldukça belirgindir. Bu bölgede stator kutbu çakışık olmayan konuma göre doyum eğiliminde olmaktadır.

Buradaki manyetik devre doğrusal bölgede çalışmayı temsil eder. Akı artmasına rağmen stator kutup tabanının kesit alanı arttığından dolayı akı yoğunluğu azalmaktadır. Bu sırasıyla çelik tabakalarının geçirgenliğini arttırıp relüktansını azaltır ve akıyı arttırır sonuç olarak üretilen momenti artırır [1].

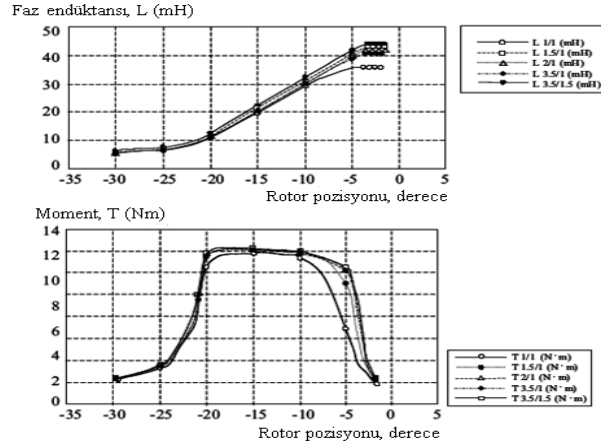


Şekil 3. ARM'nin kutup taban ve yay şekli
(Figure 3. Pole base and arc shaping of SRM)



Şekil 4. ARM'nin yarım simetri manyetik eşdeğer devresi [1]
(Figure 4. Magnetic equivalent circuit of the SRM assuming half symmetry)

Değişen kutup tabanının etkisini incelemek için sabit kutup genişliğine sahip ARM ile karşılaştırılır. Stator kutup tabanının ucu kutup yayının 1 katından 3.5 katına kadar değiştiriliyor. Sonuçlar şekil 5'te faz endüktansı ve momente karşı rotor konumu olarak gösterildiği gibi sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Dikkat edilirse endüktansın artmasından dolayı çakışık konuma yakın bölgedeki moment geliştirilmiştir. Simulasyon süresince sürdürülebilir akım 1 p.u.'dur (yani nominal akımdır). Momente karşı rotor konumu şekli hemen hemen dikdörtgen olmuştur bu komutasyon sırasındaki moment dalgalıklarının etkisinin azalması yönünde fayda sağlar. Bundan dolayı diğer makinalarda olduğu gibi ideal ve sürekli bir moment sağlanabilir. Moment yumuşatma kontrolü ve dolayısıyla akım denetleyicileri istenildiği zaman bu moment şeklinden dolayı minimize edilmiş olur.



Şekil 5. Stator kutup tabanının ucu kutup yayının 1 katından 3.5 katına kadar değiştirilmesiyle elde edilen makina karakteristikleri [1]

(Figure 5. Machine characteristics for stator pole base variation from 1 to 3.5 times the pole arcs.)

Bunun dışında rotor kutuplarına belirli bir derece eğim verme, testere dişi rotor kutbu kullanma, rotor kutbunun yüzeyini genişletme ve rotor kutbunun kenarlarına eğim verme gibi geometriksel çalışmalar yapılmıştır [6, 7, 9, 10 ve 11]. Rotor kutbu ile yapılan çalışmaların sonucunda; hem geniş rotor genişliği hem de küçük bir rotor eğimi (bükümü), çakışık konumdan uzaklaşırken endüktans eğrisinin pozitif eğiminde faydalı bir kayma ortaya çıkardığı gözlenmiştir. Pozitif eğimin çakışık olmayan konuma doğru kayması iki avantajı beraberinde getirir. Birincisi, faz enerjilendiği zaman faz endüktansı maksimumum pozitif eğiminde olduğundan dolayı momentte maksimumdur. İkincisi, yassı endüktans profili çakışık konuma yakın olduğu zaman faz akımına komutasyonda, komutasyon akımından daha hızlı bir düşüşe izin verir. Böylece küçük bir negatif moment oluşur. Büyük rotor kutup genişliğinde, stator ve rotor kutupları arasındaki çakışmanın başlangıcı erken olacak ve rotor ve stator kutuplarının eksenleri çakışık konuma gelmeden önce çakışma tamamlanmış olacak. Düşük uyartım akımında moment, çakışma tamamlanana kadar göreceli olarak sabit kalır ve bu durumda stator kutuplarında hacim doyumu meydana gelir. Fakat yüksek uyartım akımlarında, hacim doyumu erkenden olur ve o zaman moment tepe değerindedir. Dönme yönüne göre rotorun küçük kaydırılması da benzer etkilere sahiptir. Fakat kaydırmada, nötr moment konumu geometriksel çakışık konuma doğru kaymaktadır, bir de maksimum statik moment daha düşük endüktans oranından (L_{min}/L_{max}) dolayı küçük olabilir. Teorik olarak, dar üçgen şekilli veya testere dişli kutup yüzeyleri, akı yoğunluğunun teğetsel bileşenin artmasından dolayı momentin artmasına neden olabilir. Fakat eşit mekaniksel boşluğun temeli gereği, ortalama momentin artması radyal bileşenin azalmasının eşlik etmesinden dolayı önemli olmayacaktır [7].

5. 8/6 ARM'nin Tasarımının Gerçekleştirilmesi (Implementation of the SRM Design with 8/6 poles)

Bu kısımda yukarıdaki denklemlerden ve uluslararası standartlardan yararlanarak 8/6 dört fazlı dalgıç pompa tipi ARM'nin adım adım tasarımı anlatılmıştır.

5.1. Dört Fazlı ARM'nin Seçilmesinin Sebebi (The reason for choosing the four-phase SRM)

Üç fazlı bir ARM'de, akım bir fazdan diğer faza geçerken komutasyon sırasında momentte iniş çıkış görülür. Tam faz akımının en

azından bir fazda hemen hemen bütün zaman için akmakta olduğu gerçeğine rağmen moment dalga biçiminde hala bir iniş çıkış vardır. Moment eksikliği yeni başlayan fazla ilişkilidir. Genel çalışma momentinin yüksek değerleri için bu olay sadece stator ve rotor kutuplarının genişletilmesi ile azaltılabilir fakat bu oyuk alanını azaltır ve bakır kayıplarını artırır. Bu uyumsuzluk veya zıtlığın üç fazlı anahtarlamalı relüktans motorlarda çözülmesi zordur. Düzgün moment için dört fazlı motorlar tercih edilir. Daha yüksek faz sayısının dikkate alınmasının bir nedeni de $\varepsilon = 2\pi/mN_r$, eşitliğinde görüldüğü gibi kutup sayısını (N_r) artırmadan dönüş başına adım sayısının artırılabilmesidir. Bunun anlamı moment iniş çıkışları probleminin yüksek kutup sayılarında ortaya çıkan endüktans oranı kaybı olmadan yatıştırılabilmesidir. Moment dalgalanmalarının yatıştırmanın yanı sıra 4 ve 5 fazlı motorların diğer avantajı aynı zamanda iki faz iletimde iken çalıştırılabilmesidir.

5.2. Çıkış Momentinin Belirlenmesi (Determination of Output Torque)

Bir ARM'nin tasarımı başlangıçta; çıkış gücüne (P_{hb}), hıza (n), oluşabilecek tepe akımına (i_p) ihtiyaç duyar. Bu ihtiyaçlar motorda kullanılacak olan yükün durumuna göre tespit edilir.

P_{hp} : 3 Hp
 n : 3000 dev/dak.
 i_p : 12 A

Bu durumda ARM tarafından geliştirilecek moment;

$$T_{ort} = \frac{P_{hp} * 746}{2\pi \left(\frac{n}{60}\right)} = \frac{3 * 746}{2\pi \left(\frac{3000}{60}\right)} = 7.12 Nm. \text{ dir.}$$

5.3. Çerçeve Numarasının Seçimi (Selection of Frame Size)

İyi bir başlangıç noktası için makinanın fiziksel boyutlarına dikkat etmek gerekir. IEC71 standartlarından seçilecek bir indüksiyon motora eşit boyutlarda yapılarak karşılaştırılabilir. Birçok uygulama için bu bir avantajdır. Çünkü yapılacak ARM belki de diğer yapılmış makinaların yerine kullanılabilir. IEC standartları bütün elektrik makinaları için boyutu belirler. Bu da uluslararası standart kuruluşuna göre yapılır. Tasarımın bu aşaması süresince eğer makina boyutu çok büyük veya çok küçük çıkarsa, o zaman değişik bir çerçeve numarası kullanılabilir [8].

Pratik olarak stator dış çapı aşağıdaki denklemle sabitlenebilir;

$$D_o = (\text{Çerçeve Numarası} - 3) * 2$$

IEC standartlarında çerçeve boyutunu 50 seçersek;

$$D_o = (50 - 3) * 2 = 94 \text{ mm olur.}$$

3 mm'lik çıkarma işlemi endüstride makinanın montaj işlemi için kullanılır.

Boyut 50 için mümkün olan paket uzunluğu başlangıçta 100 mm ile sınırlanabilir. Ancak motorumuz pompa tipi olduğu için bu değer daha yüksek alınabilir. Bu sonuçlara göre değiştirilebilir.

$$L = 200 \text{ mm (Başlangıç değeri)}$$

IEC standartlarına göre, eğer sürekli moment 18 Nm'den büyük 31.5 Nm 'den küçük ise minimum mil çapının 28 mm olması uygundur [8]. Ancak bizim motorun geliştireceği moment 7.12 Nm olduğu için, diğer mil çapı 22 mm olarak seçilebilir.

$$D_{sh} = 22 \text{ mm seçilir.}$$

Bu boyuttaki bir makina için hava aralığı $g=0.5$ mm seçilebilir. İmalat yapımında bu değer birçok avantaj sağlaması için yaklaşık olarak 0.3 mm'ye kadar indirilebilir.

Başlangıçta iç çap (D) çerçeve boyutuna eşit alınabilir. Yani $D=50$ mm, ancak tasarımın diğer adımlarında bu değer optimize edilebilir.

5.4. Stator ve Rotor Kutup Açılarının Seçimi (Selection of stator and rotor pole angles)

- Stator kutup açısı genellikle rotor kutup açısından küçük seçilir.

$$\beta_s < \beta_r$$

- Etkili moment bölgesi stator kutup açısından β_s 'ten küçük fakat darbe açısından ε büyüktür.

$$\varepsilon = \frac{2\pi}{\frac{N_s * N_r}{2}}$$

$$8/6 \text{ ARM için darbe açısı; } \varepsilon = \frac{2\pi}{\frac{8}{2} * 6} = 0.2618 \text{ rads} = 15^\circ, \text{ Eğer } \beta_s < \varepsilon$$

seçilirse o zaman makinanın bazı konumlarda başlangıç yapamayabilir (yani o anda hiçbir faz yükselen endüktans eğimine sahip olmayabilir).

- Komşu rotor kutuplarının köşeleri arasındaki açı stator kutup açısından büyük olmalıdır veya çakışık olmayan durumda stator ve rotor kutupları arasında bir çakışma olacak.

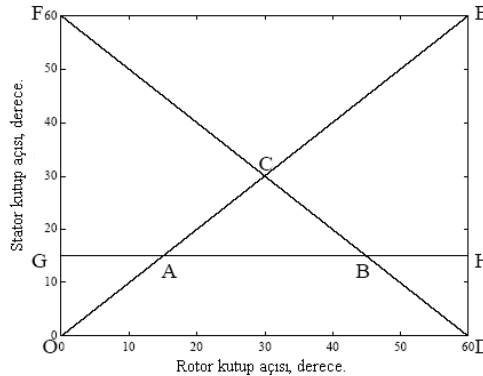
Bu durumu sağlamak için;

$$\frac{2\pi}{N_r} - \beta_r > \beta_s$$

Bu durum, makinaya yol verileceği zaman minimum endüktansa ulaşmadan önce bir pozitif endüktans değerine sahip olması anlamına gelmez. Bu çakışık olmayan endüktans değerinin büyük olmasına neden olur ve düşük bir moment üretimine yol açar. 8/6 bir makina için;

$$\frac{2\pi}{6} > \beta_s + \beta_r$$

Yukarıda bahsedilen üç durum için uygulanabilir bir üçgenle aşağıdaki gibi gösterilebilir. Gerekli olan şart stator ve rotor kutup açılarının bu üçgen içerisinde yer almasıdır. Şekil 6 8/6 bir makina için uygulanabilir bir üçgendir.

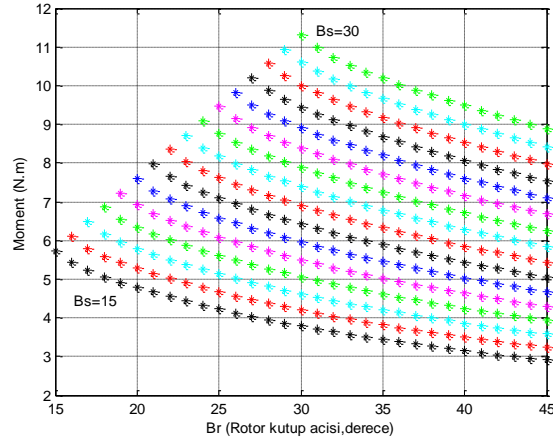


Şekil 6. 8/6 makina için uygulanabilir üçgen diyagramı
(Figure 6. Diagram of the feasible triangle for a 8/6 machine)

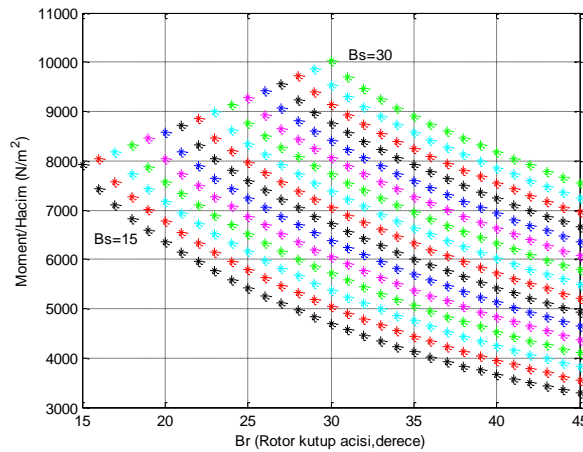
OE bölgesi 1. şartı göstermektedir. GH ikinci şartı ve DF de üçüncü şartı temsil etmektedir. Örneğin, $\beta_s = 20^0$ alınırsa o zaman $20^0 < \beta_r < 40^0$ olmalıdır.

Bu üçgen sadece stator ve rotor kutup açıları üzerindeki kısıtlamaları verir, optimum kutup açılarının tahmininde kullanılan bir yol değildir.

Tasarımın başlangıcında β_s ve β_r henüz bilinmediği için mümkün olan bütün tamsayıli kombinasyonları göz önünde tutmamız gerekecek ve ondan sonra değişik kriterler kullanılarak birçok olasılık elimine edilecektir. 376 olasılıktan dolayı bu işlem uzun ve karmaşık görünmesine rağmen, bazı ana hatlar üzerinden olasılıklar azaltıldığı için bu çalışma biraz çabayla çok yararlı olabilir. Şekil 7'de değişik stator kutup açıları için geliştirilen moment ve rotor kutup açısı verilmiştir. Şekil 8'de değişik stator kutup açıları için birim demir hacmi başına üretilen momentin rotor kutup açısına göre değişimi verilmiştir.



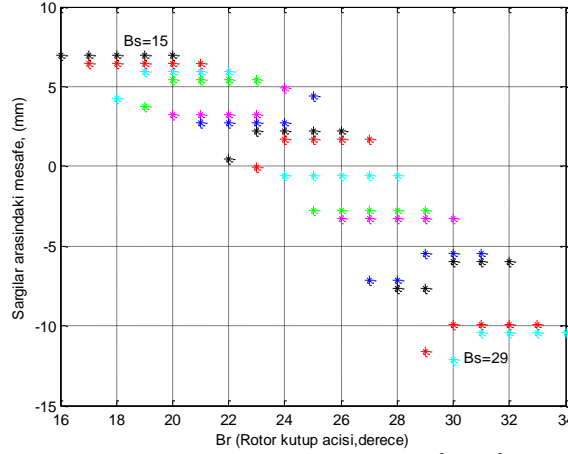
Şekil 7. Değişik stator kutup açıları (15^0-30^0) için geliştirilen momentin rotor kutup açısına göre değişimi verilmiştir.
(Figure 7. Plot of torque vs. rotor pole angles for varying stator pole angles from 15^0 to 30^0)



Şekil 8. Değişik stator kutup açıları (15^0-30^0) için birim demir hacmi başına üretilen momentin rotor kutup açısına göre değişimi verilmiştir.

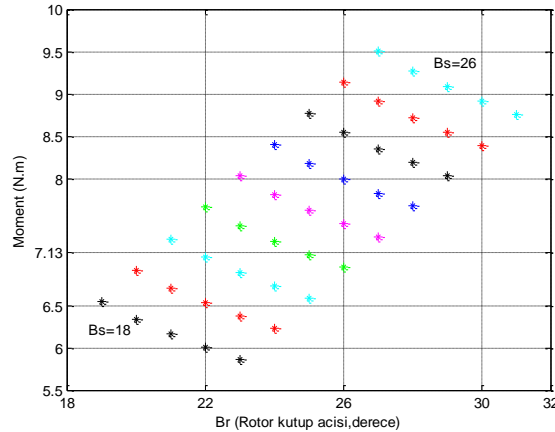
(Figure 8. Plot of torque/iron volume vs. rotor pole angles for varying stator pole angles from 15^0 to 30^0)

$\beta_s = \beta_r$ 'ye indirgendiği zaman olasılık sayısı 360'a indirgenmiş olur. Dikkat etmek gerekir ki $\beta_r - \beta_s > 5^0$ olduğu zaman moment/birim demir hacmi oranında sert bir düşüş vardır, bu yüzden bunun ötesindeki bütün kombinasyonlar elimine edilir. Bu durum uygulanabilir olasılıkları 75'e düşürür. Geriye kalan olasılıklar için, komşu kutuplara sarılan sargılar arasında kalan açıklığın rotor kutup açısına göre değişimi Şekil 9'da verilmiştir. Burada sargı tasarımı, maksimum akım 12 A göre yapılmıştır (sabittir). Bu açıklık sıfırdan küçük olamaz ve 5 mm'den büyük seçilmelidir. Bu sayede olasılığımız 21'e düşüyor.



Şekil 9. Değişik stator kutup açıları (15^0 - 29^0) için kalan açıklık yerinin rotor kutup açılarına göre değişimi.
(Figure 9. Plot of clearance vs. rotor pole angles for varying stator pole angles from 15^0 to 29^0)

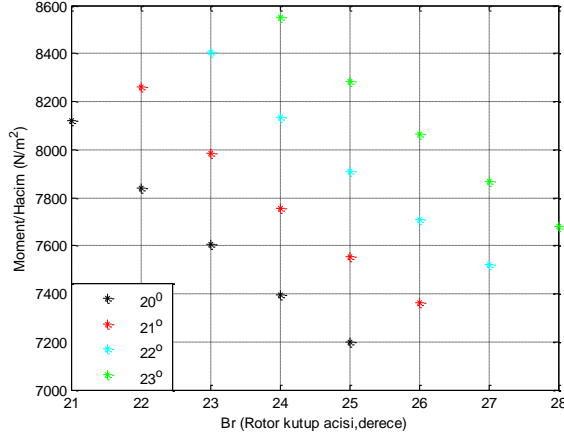
Varsayalım başlangıçtaki minimum endüktansın hesaplanmasında bazı hatalar oldu, bu durumda bütün kombinasyonlar içinde üretilen moment 7.13'ten küçük olanlar elimine edilir. Şekil 10 dikkatli bir şekilde gözden geçirilirse kalan olasılık sayısının 10'e indiği görülür.



Şekil 10. Değişik stator kutup açıları (18^0 - 26^0) için geliştirilen momenti rotor kutup açısına göre değişimi verilmiştir.
(Figure 10. Plot of torque vs. rotor pole angles for varying stator pole angles from 18^0 to 26^0)

Kalan kombinasyonlar için moment/birim demir hacim oranı tekrar gözden geçirilirse (Şekil 11), net bir şekilde görülür ki bu prototip

için 5 adet uygulanabilir olasılık vardır. Bu beş kombinasyon farklı çıkış momentleri ürettiği için, paket uzunluğu isteğe bağlı moment için azaltılabilir. Tablo 2'den bu kombinasyonları açık bir şekilde inceleyebiliriz. 1.,2. ve 5. kombinasyonların mümkün olduğu görülebilir. 2. kombinasyon düşük moment/demir hacmine sahip olduğundan dolayı, bu tasarım için 5. kombinasyon seçilmiştir. Bu kombinasyonda stator kutup açısı 22° ve rotor kutup açısı da 24° dir.



Şekil 11. Birim demir hacmi başına üretilen momentin rotor kutup açısına göre değişimi
(Figure 11. Plot of torque/iron volume vs. rotor pole angles)

Tablo 2. Kalan 5 kombinasyonun incelenmesi
(Table 2. Examination of 5 possible combinations)

	1	2	3	4	5
Stator Kutup Açısı (Derece)	20	20	21	21	22
Rotor Kutup Açısı (Derece)	21	22	22	23	24
Çıkış Momenti (N.m)	7.28	7.2	7.2	7.06	7.16
Sargılar arasındaki boşluk (mm)	2.7	3	0.57	2.3	2.4
Paket Boyu (mm)	200	200	188	190	180
Demir Hacmi (m ³)	0.000897	0.000912	0.000871	0.000885	0.000873
Geliştirilen Moment/Demir Hacmi (N/m ²)	8118.8	7890.1	8262	7986.7	8195.4
Bakır Kaybı (W)	113.85	101.64	113.87	97.44	96.97

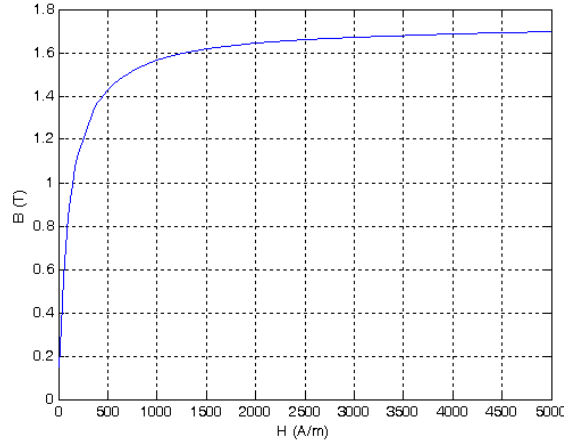
Stator ve rotor kutup açılarının seçim işleminin özeti;

- Rotor kutup açısının stator kutup açısından en fazla 2° büyük olacak şekilde sınırlanır. Bu durum başlangıç kombinasyonlarını azaltır .
- Bu kombinasyonlar için sargılar arasındaki açıklık kontrol edilir ve çok düşük veya negatif açıklıklar elimine edilir. İstenen minimum değer çerçeve boyutu ile birlikte değişir. Yeterli miktardaki açıklık sargılar arasındaki ortak endüktansı da azaltır.
- Kalan kombinasyonlarda üretilen moment kontrol edilir ve ihtiyaç duyulan momentten daha düşük momente sahip olanlar elimine edilir.
- Birim demir hacmi başına ortalama moment kontrol edilir ve bu kombinasyonlardan en yüksek değere sahip olanları seçilir.

- Değişik paket uzunluğu için moment çıkışı normalleştirilir ve geriye kalan kombinasyonlar içinden dikkatli bir seçim yapılır.

5.5. Diğer Boyutların ve Parametrelerin Hesabı (Calculation of other dimensions and parameters)

İlk adımda, dış çap, kutup sayıları, paket uzunluğu ve başlangıç kutup yayları sabitlenir. İç çap D başlangıçta çerçeve numarasıyla eşit kabul edilir ve paket uzunluğu L, 200 mm'ye ayarlanır. Bu aşamada B-H karakteristiği dikkatli bir şekilde incelenir. Şekil 3.22'deki B-H karakteristiğinin doyuma geçiş noktası not edilir. Aşağıdaki sonuçlar bir çok denemenin sonucunda elde edilen optimum datalara göre verilmiştir.



Şekil 12. M530-50A Silisyumlu Sacın B-H karakteristiği
(Figure 12. B-H characteristics of M530-50A Steel)

$$B_{\max}=1.6 \text{ T.}$$

Stator kutup akı yoğunluğu B_s , B_{\max} ile eşit olduğu kabul edilir. Kaçak akı ve paketleme faktörü ihmal edilirse stator kutup alanı A_s aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$A_s = \frac{D}{2} L \beta_s = \frac{52}{2} * 180 * 22 * \frac{\pi}{180} 10^{-6} = 1.796 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

Stator kutbu içindeki akı ϕ ;

$$\phi = B_s * A_s = 1.6 * 1.796 * 10^{-3} = 2.874 \text{ mWb}$$

Boyunduruk içindeki akı ϕ_y ;

$$\phi_y = \frac{\phi}{2} = \frac{B_s * A_s}{2} = \frac{2.874}{2} = 1.437 \text{ mWb}$$

Boyunduruğun alanı;

$$A_y = A_s = 1.796 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

Dış demir kalınlığı C;

$$C = \frac{A_y}{L} = \frac{1.796 * 10^{-3}}{180 * 10^{-3}} \approx 10 \text{ mm}$$

Stator kutup uzunluğu h_s ;

$$h_s = \frac{D_0}{2} - C - \frac{D}{2} = \frac{92.2}{2} - 10 - \frac{52}{2} = 10.1 \text{ mm}$$

Rotor kutup alanı A_r ;

$$A_r = \left(\frac{D}{2} - g \right) L \beta_r = \left(\frac{52}{2} - 0.5 \right) * 180 * 24 * \frac{\pi}{180} * 10^{-6} = 1.922 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

Rotor kutup akı yoğunluğu B_r ;

$$B_r = \frac{B_s A_s}{A_r} = \frac{1.6 * 1.796 * 10^{-3}}{1.922 * 10^{-3}} = 1.495 T$$

Rotor nüvesinin alanı A_{rc} ;

$$A_{rc} = \frac{A_s}{1.6} = \frac{1.796 * 10^{-3}}{1.6} = 1.122 * 10^{-3} m^2$$

Rotor nüvesindeki akı yoğunluğu;

$$B_{rc} = 0.8 * B_s = 1.28 T$$

Rotor kutbunun uzunluğu h_r ;

$$h_r = \frac{D}{2} - g - \frac{D_{sh}}{2} - \frac{A_{rc}}{L} = \left(\frac{52}{2} - 0.5 - \frac{22}{2} \right) * 10^{-3} - \frac{1.122}{180 * 10^{-3}} \approx 8.3 mm$$

Sızıntı ve saçaklar ihmal edilirse, hava aralığı alanı yaklaşık olarak;

$$A_g = \left(\frac{D}{2} - \frac{g}{2} \right) \left(\frac{\beta_r + \beta_s}{2} \right) L = \left(\frac{52}{2} - \frac{0.5}{2} \right) \left(\frac{22 + 24}{2} \right) \frac{\pi}{180} 180 * 10^{-6} = 1.86 * 10^{-3} m^2$$

Hava aralığı akı yoğunluğu

$$B_g = \frac{(A_s * B_s)}{A} = \frac{1.796 * 10^{-3} * 1.6}{1.86 * 10^{-3}} = 1.545 T$$

Hava aralığındaki manyetik alan şiddeti H_g

$$H_g = \frac{B_g}{4 * \pi * 10^{-7}} = 1.23 * 10^6 A/m$$

Şekil 12'de verilen B-H eğrisi MATLAB'ta matematiksel olarak modellenip, bilinen B_s , B_g , B_r ve B_{rc} akı yoğunluklarına karşılık gelen manyetik alan şiddetleri sırasıyla;

$$H_s = 1490 A/m$$

$$H_y = 159.13 A/m$$

$$H_r = 550.11 A/m$$

$$H_{rc} = 188.07 A/m$$

Bölgelerin yol uzunlukları;

Stator bölgesinin yol uzunluğu;

$$l_s = h_s + \frac{C}{2} = 10.1 + \frac{10}{2} = 15.1 mm$$

Hava aralığı bölgesinin yol uzunluğu;

$$l_g = g = 0.5 mm$$

Rotor bölgesinin yol uzunluğu;

$$l_r = (0.25 * D - 0.5 * g + 0.5 * h_r - 0.25 * D_{sh}) \cong 11.4 mm$$

Rotor nüvesinin yol uzunluğu;

$$l_{rc} = \pi * (0.25 * D - 0.5 * g - 0.5 * h_r + 0.25 * D_{sh}) \cong 44.4 mm$$

Stator boyunduruğunun yol uzunluğu;

$$l_y = 0.5 * \pi * (D_0 - C) = 129.1 mm$$

Toplam Amper-Sarım;

$$TAS = 2 * (H_s * l_s + H_g * l_g + H_r * l_r) + 0.5 * (H_{rc} * l_{rc} + H_y * l_y) \cong 1.3 * 10^3 A.S$$

Faz başına tur;

$$T_{ph} = \frac{TAS}{I_p} \cong 108$$

Akım oranı

$$i_p = \frac{TAS}{T_{ph}} \cong 12.04 \text{ A}$$

Sızıntı ihmal edilerek çakışık konumdaki doymuş endüktans

$$L_{\text{çakışık}} = \frac{TAS * B_s * A_s}{i_p^2} \cong 25.7 \text{ mH}$$

Takoz kalınlığını, h_{tk} , 4 mm seçersek stator kutup yayı uzunluğu;

$$t_s = (0.5 * D + h_{tk}) * \left(\frac{pi * \beta_s}{180} \right) \cong 11.4 \text{ mm}$$

Stator kutup eğimi;

$$S_{ke} = \frac{\pi * (D + 2 * h_{tk})}{8} \cong 23.7 \text{ mm}$$

Sargının maksimum yüksekliği;

$$h_w = h_s - h_{tk} = 6.1 \text{ mm}$$

Akım değerine göre 0.75 mm çapında iletken seçilmiştir. Bunun yalıtım kalınlığı da hesaba katılırsa tel çapı, d_w , 0.80 mm alınabilir. Bu durumda, Mümkün olan sargı yüksekliğini de içeren katman sayısı;

$$KS \cong \frac{h_w}{d_w} \cong 7.7$$

elde edilir. Bu değeri önce 8'e tamamlayalım. Yatay katman sayısı sargılar arasındaki mesafe bakımından önemli olup çok fazla büyük olmaması gerekir. Bunun içinde KS sayısını yuvarlatılmış değer bir fazlasını seçildi yani KS=9 olarak alındı. Aslında bunların hepsi bir en uygun şekle sokma problemidir. Burada dikkat edilmesi gereken faktörlerden biri de sargılar arasındaki boşluk olduğundan dolayı bu tercih yapılmıştır.

Sargılar için ihtiyaç duyulan yatay katman sayısı;

$$YKS = \frac{T_{ph}}{2 * KS} \cong 6$$

Sargı genişliği;

$$SG = d_w * YYS \cong 4.8 \text{ mm}$$

Bu değerler temel alındığında iki stator ucu arasında kalan boşluk;

$$Z = S_{ke} - t_s = 12 \text{ mm}$$

$$Cl = Z - 2 * SG \cong 2.4 \text{ mm}$$

Elde edilen sonuçlara göre momentin yaklaşık olarak hesabı

$$W = \frac{1}{2} * L_{\text{çakışık}} * i_p^2 = 1.8729 \text{ J}$$

$$T_{ort} = \frac{W * N_r * N_s}{4 * \pi} \cong 7.16 \text{ Ntm}$$

Demir hacminin bulunması için motor geometrisinden genel bir denklem elde edildi;

$$D_{hacmi} = [(A_s * h_s * N_s) + (A_r * h_r * N_r)] + \pi * L * [(0.5 * D - g - h_r)^2 + (0.5 * D_o)^2 - (0.5 * D_o - C)^2] \cong 8.73 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

Elde edilen sonuçlar toplu halde tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Hesaplamalar sonucunda elde edilen motor parametreleri
(Table 3. As a result of the calculations obtained the motor
parameters)

Stator kutup sayısı (N_s)	8
Rotor kutup sayısı (N_r)	6
Stator kutup yayı uzunluğu (β_s)	22 ⁰ derece
Rotor kutup yayı uzunluğu (β_r)	24 ⁰ derece
Stator kutup adımı (β_s)	45 ⁰ derece
Rotor kutup adımı (β_r)	60 ⁰ derece
Stator kutup genişliği	9.98 mm
Rotor kutup genişliği	10.9 mm
Stator kutup uzunluğu	10.1 mm
Rotor kutup uzunluğu	8.3 mm
Stator dış çapı	92.2 mm
Stator iç çapı	52 mm
Rotor dış çapı	51 mm
Hava aralığı	0.5 mm
Mil çapı	22 mm
Stator paket uzunluğu	180 mm
Bir fazın sarım sayısı	108
Demir Hacmi	8.73 10 ⁻⁴ m ³
İletken çapı	0.75 mm
Katman Sayısı	9
Yatay Katman Sayısı	6
Sargılar Arasındaki Boşluk	2.4 mm
Çakışık Konumdaki Endüktans	25.7 mH
Nominal Gerilim	200 V
Nominal akım	12 A

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS)

Yapılan çalışma sonucunda 8/6 kutuplu 4 fazlı dalgıç tipi bir ARM'nin boyutları ve parametreleri programlardaki iterasyonlar sonucunda optimum bir şekilde elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen bu sonuçlar sadece bir ön fikir anlamı taşımaktadır. Çünkü yapılan hesaplamalarda hata oranı istenmeyen düzeylerde çıkabilir. Özellikle endüktans hesabında, tabii ki bu durum diğer parametreleri de etkileyecektir. Bu sonuçları iyileştirmek ve ARM'yi imalat noktasına getirebilmek için, ARM'nin boyutlarının belirlenmesinde optimizasyon teknikleri kullanılarak yapılması fayda sağlayabilir. Ayrıca ARM'nin, elde edilen boyut ve parametrelerine göre sonlu elemanlar yöntemiyle (SEY) yönteminde tekrar ele alınması imalat öncesi tasarımı daha da perçinleştirebilir. Bu durumda kutupların yay uzunlukları, kutup boyları, sarım sayıları, sargılar arasındaki mesafe, hava aralığı, paket boyu gibi terimlerde tam bir uyumluluk sağlanabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Krishnan, R., (2001). Switched Reluctance Motor Drives Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications, CRC Press.
2. Krishnan, R., Arumugam, R., and Lindsay, J.F., (1988). Design Procedure For Switched-Reluctance Motors, IEEE Transactions On Industry Application, Vol. 24, No. 3, p.456-461, May/June.
3. Koibuchi, K., Onho, T., and Sawa K., (1997). A Basic Study For Optimal Design of Switched Reluctance Motor By Finite Element Method , IEEE Transaction On Magnetics, Vol. 33, No. 2 ,p. 2077-2080, March.
4. Corda, J., (1996). Search for Optimum Number of Turns of Switched Reluctance Motor, IEEE Cuernavaca, Mexico, October, p. 241-245.

5. Reay, D.S. and Williams, B.W., (1999). Sensorless Position Detection using Neural Networks for the Control of Switched Reluctance Motors, IEEE International Conference on Control Applications, Vol. 2, p. 1073-1077.
6. Arumugam, R., Lindsay, J.F., and Krishnan R., (1988). Sensitivity of Pole Arc/Pole Pitch Ratio on Switched Reluctance Motor Performance, Industry Applications Society Annual Meeting, Vol. 1, Oct., p.50-54.
7. Moallem, M., Ong, C. M., and Unnewehr, L.E., (1990). Effect of Rotor Profiles on The Torque of a Switched Reluctance Motor, IEEE Transactions On Industry Application, Vol.28, No.2, p. 247-253.
8. Vijayraghavan, P., (2001). Design of Switched Reluctance Motors and Development of a Universal Controller for Switched Reluctance and Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives, Helisel, Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Blacksburg, Virginia.
9. Miller, T.J.E., (2002). Optimal Design of Switched Reluctance Motors, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 1, p.15-27, February.
10. Mecrow, B.C., Finch, J.W., El-Kharashi, E.A., and Jack, A.G., (2002) Switched Reluctance Motors with Segmental Rotors, IEE Proc.- Electr. Power Appl., Vol. 149, no. 4, p. 245-254.
11. Rasmussen, P.O, Blaabjerg, F., Pedersen, J.K., and Jensen, F., (2000). Switched Reluctance-Shark Machines- More Torque and Less Acoustik Noise, IEEE, p.93-98.