

VİDA POMPA YAPILI BİR ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTOR (VP-ARM) TASARIMI ÖNERİSİ

Ahmet FENERCİOĞLU

Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Turhal Meslek Yüksekokulu, Elektrik Programı, 60300, Turhal, Tokat

Geliş Tarihi : 19.02.2008

Kabul Tarihi : 03.11.2008

ÖZET

Bir anahtarlamalı relüktans motor (ARM) yapısı çift çıkıntılı kutuplu olup, sabit mıknatıs, iletken ve çubuk içermemektedir. Bu nedenle, bu geometrik yapının vida pompa önerisi için bir avantaj olarak kullanılması düşünülmüş; eksenel ve radyal akılı ARM'nin yapısından esinlenerek manyetik rotor parçalı olarak tasarlanmıştır. Önerilen ARM, 6/4 kutuplu, 3 fazlı olup manyetik olmayan malzemeden yapılmış vida rotor, manyetik rotor parçaları arasına yerleştirilmiş ve pompanın rotor yapısı elde edilmiştir. Statorda her faz için akı yoluna yerleştirilmiş 2000 sarımlı 4 sargı vardır. Vida rotor manyetik kuplaja dahil değildir. Burada pompa rotorunun kendisi doğrudan tahrik uygulamasında bir hareketlendiricidir. Bu sistem VP-ARM olarak isimlendirilmiştir. VP-ARM'nin endüktans, tork, güç ve manyetik akı gibi elektriksel ve manyetik büyüklükleri analitik olarak hesaplanmış ve sonlu elemanlar yöntemiyle (Ansoft Maxwell 3D) ile tahmin edilmiş; önerilen sistemin mekanik ve dinamiği incelenmemiştir. Rotorun kendisinin özellikle bir hareketlendirici olduğu doğrudan tahrik uygulamasında VP-ARM ayrıca bir sürücü motorun, kaplinlerin ve devir ayarlama elemanlarının kullanılmaması üstünlüğü ile cazip bir seçim olarak gözükmektedir.

Anahtar Kelimeler : *ARM, ARM tasarımı, Eksenel akılı ARM, Vida pompa, Doğrudan tahrik.*

DESIGN PROPOSAL OF SCREW PUMP STRUCTURED A SWITCHED RELUCTANCE MOTOR (SP-SRM)

ABSTRACT

Structure of a Switched Reluctance Motor (SRM) has double salient poles and does not include permanent magnet, conductor and bar. Therefore, this geometrical structure is intended to be used as an advantage for the screw pump proposal; magnetic rotor has been designed partially, inspired from the structure of radial and axial flux SRM. Proposed SRM has 6/4 poles and 3 phase configuration. Screw rotor, which is made of non-magnetic material, has been installed between magnetic rotor and the rotor structure of the screw pump has been obtained. In stator, there are 4 coils of 2000 turns installed in flux path for each phase. The screw rotor isn't included in the magnetic coupling. Here the pump rotor itself is an actuator of direct drive application. This system has been called as SP-SRM. Electrical and magnetic quantities like inductance, torque, power, magnetic flux of the SP-SRM have been calculated analytically and predicted by finite elements method (Ansoft Maxwell 3D); it doesn't cover mechanics and dynamics of the proposed system. In the direct drive actuator application where the rotor itself is considered as an actuator, the SP-SRM looks like an attractive choice with its superiority of eliminating the used of a driver motor, couplings and gear boxes.

Key Words : *SRM, SRM design, Axial flux SRM, Screw pump, Direct drive.*

1. GİRİŞ

Pompa genel olarak mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye çeviren bir su makinesidir. Suyun veya benzeri bir sıvının enerji düzeyinde bir yükselme sağlanarak pompalama işlemi gerçekleşir (Kirkor, 1998).

Vida pompalar özellikle viskoz ve ağır sıvıların emilip basıldığı çeşitli sanayi kollarında geniş kullanım alanı bulmuşlardır. Vida pompalar hacimsel pompalar arasında, sıvı akımının dönme eksenini doğrultusunda gerçekleştiği pompalar olarak özel bir yere sahiptir. Sıvı hareketli vidanın helisel kanalları içerisinde, emme kanalından basma kanalına doğru hareket halindedir. Bu pompalarda hareketli parçaların atalet, kuvvet ve momentlerinin zayıf olması, daha yüksek devir hızlarında çalışmalarına imkan vermektedir (Kirkor, 1998; Rosses, 2000).

Vida pompa yapısına benzer olan minyatür bir kalp pompası literatürde yer almaktadır. Burada dakikada 10 litre kan pompalayabilen, hızı 12.000 d/dk ya kadar ulaşabilen fırçasız doğru akım motoru kullanılmıştır (Micromed Inc., 2008).

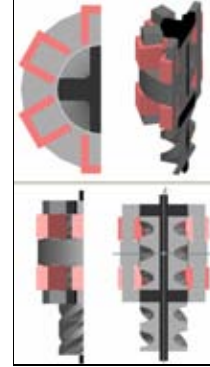
Bu çalışmada vida pompa hareketini sağlamak için anahtarlamalı relüktans motor (ARM) kullanılması düşünülmüştür. ARM yapı olarak çok basittir; ancak, denetimi karmaşıktır. Sadece son yıllarda, yaygın ve düşük maliyetli mikroişlemci ve güç elektroniği elemanlarının elde edilebilmesiyle, ARM'lerin diğer motorlar ile rekabet edebilmesi sağlanmıştır (Gürdal, 2001; Krishnan, 2001).

2. VP-ARM'İNİN YAPISI

Vida pompa yapısına benzeyen helisel rotorlu bir pompa fikri ortaya atılmış ve önerilen sisteme, Vida Pompa Yapılı Anahtarlamalı Relüktans Motor (VP-ARM) ismi verilmiştir. Geleneksel pompalar motor ve pompa olmak üzere iki üniteden oluşmaktadır. Bu tasarımda öne sürülen VP-ARM fikri ile bu birimler birleştirilerek tek ünite haline getirilecektir.

VP-ARM, 3 fazlı 6 stator ve 4 rotor kutuplu olup rotoru birbiri ile aynı olan 2 parçadan oluşmaktadır. Bu rotorların arasına manyetik olmayan malzemeden yapılmış vida rotor yerleştirilerek vida pompa yapısı sağlanmaktadır. Pompa olarak öngörülen sistemin Maxwell 3D alan çözücüsü programının editörü üzerinde 3 boyutlu olarak tasarlanmıştır. Bu tasarımın kesiti Şekil 1'de gösterilmiştir (Davis, 1988; Gizaw, 2003).

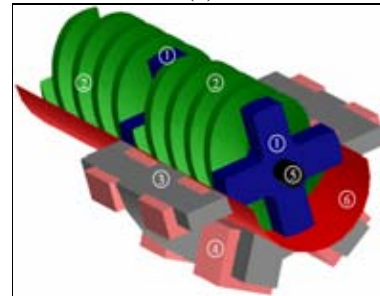
Silindirik rotorlu elektrik motorları vida yapılı pompa tasarımı için uygun olmadığından, hareketlendirici (actuator) olarak çalışacak helisel yapı rotorun kullanılması için sadece çift çıkıntılı yapı ARM'nin kullanımı uygundur. Gerçekte çıkıntılı yapı bir motor için dezavantajdır, fakat hareketlendirici uygulamasında bu durum yapısal bir avantaja dönüşmektedir (Fenercioğlu, 2006; Gürdal ve Fenercioğlu, 2007).



(a)



(b)



(c)

1) Manyetik rotor 2) Manyetik olmayan vida rotor (4 dişli), 3.) Demir Nüve 4) Sargı, 5) Mil (paslanmaz çelik) 6) Akışkan kanalı.

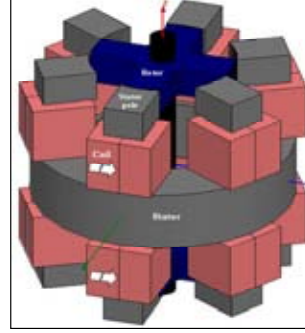
Şekil 1. VP-ARM simülasyon modeli, a) perspektif kesit görünüşü, b) rotor, c) pompa kesiti.

Vida yapılı pompayı hareketlendiren artı(+) şeklindeki bu rotorların arasında kalan boşluğa ise manyetik olmayan malzemeden (alüminyum, pirinç, sert plastik vb.) yapılmış bir vida rotor düşünülmüştür. Bu sistemde pompa rotoru akuple bir elektrik motoru ile tahrik edilmemektedir. Tek ünite halinde önerilen pompa rotorunun kendisi doğrudan tahrik uygulamasında bir hareketlendiricidir (Fenercioğlu, 2006). Burada sıvı, sızdırmazlık ve yalıtımı yapılmış motora yerleştirilen bir kanal içerisinde mil eksenini boyunca sürüklenerek pompalanacaktır.

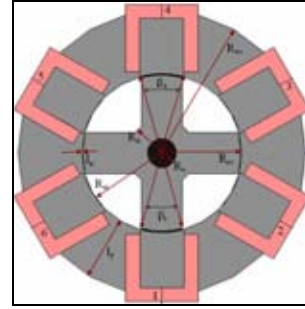
Rotor parçalarını, gücü artırmak için daha uzun tasarlamak mümkündür fakat pompanın helisel yapısı bozulmaktadır. Rotor parçalarını da vida rotorun devamı şeklinde helisel yaparak pompa yapısını bozmamak mümkündür fakat helisel yapı rotor akı yolu eksenini helisel açı kadar kaydıracağı için mil eksenini dışında mekanik zorlanmalara neden olan tork oluşmasına ve verimin düşmesine sebep olmaktadır (Fenercioğlu, 2006; Gürdal ve Fenercioğlu, 2007). Bu nedenle rotor parçaları kısa ve düz olarak vida rotorun arasına eklenmiştir. Bu rotor parçalarının sayısı artırılarak, vida rotor üzerinde manyetik akı yolu için uygun konumlara yerleştirildiğinde, daha uzun ve güçlü bir pompa tasarımı elde edilebilir.

ARM tasarım kriterleri pompa tasarımı için söz konusu olabilecek bazı olumsuzluklara sebep olmaktadır. Manyetik kuplajın ve torkun daha yüksek olması için, rotorun en az 4 kutuplu olması tercih edilir. Bu durum pompalanacak sıvı hacmini küçültecektir. Ancak ARM'nin hızı artırılarak bu olumsuz etki ortadan kaldırılabilir. Vida rotor manyetik olmayan malzemeden yapılacağı için elektriksel ve manyetik parametrelere etki etmeyecektir. Model içerisinde manyetik olmayan vida rotor kısmı çıkarılarak, VP-ARM modeli

tasarlanmış olup 3B resmi Şekil 2(a)'da ve önden görünüşü Şekil 2 (b)'de verilmiştir.



(a) 3 fazlı 6/4 ARM'nin simulator modeli.



(b) Boyut değişkenleri.

Şekil 2. VP-ARM'nin manyetik tasarımı.

Burada elektriksel verimin yüksek olması için hava aralığının oldukça küçük tutulması gerekmektedir. Fakat sargıların sıvı yalıtımı ve akışkanın içinden geçeceği kanalın hava aralığına yerleştirilmesi nedeniyle boşluk mesafesi 1 mm olarak alınmıştır. Tasarımı ve analizi yapılan VP-ARM'nin boyutları Tablo 1'de verilmiştir.

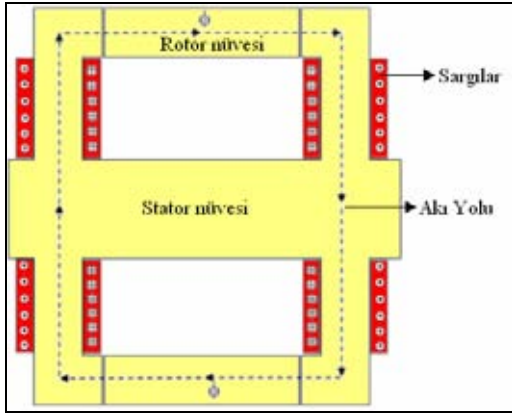
Tablo 1. VP-ARM'nin boyutları.

	Büyüklik ve birim	Değer
R_{so}	Stator dış yarıçapı (m)	0,0900
R_{si}	Stator iç yarıçapı (m)	0,0500
R_{ro}	Rotor dış yarıçapı(m)	0,0490
R_{ri}	Rotor iç yarıçapı(m)	0,0210
R_{sf}	Mil yarıçapı (m)	0,0080
l_p	Boyunduruk genişliği (m)	0,0400
l_g	Hava aralığı (m)	0,0010
l_r	Rotor uzunlukları (m)	0,025
L_{stk}	Paket uzunluğu (m)	0,2000
β_s	Stator kutup yayı açısı (rad)	0,5582
β_r	Rotor kutup yayı açısı (rad)	0,5234
n_s	Stator kutup sayısı	6
n_r	Rotor kutup sayısı	4
q	Faz sayısı	3
N	Tek sargı sarım sayısı	500
l_{sr}	Vida rotor uzunluğu (m)	0,150

3. ANALİTİK ÇALIŞMALAR

3. 1. VP-ARM'nin Endüktans Modeli

Bu çalışma için tasarlanan VP-ARM'nin her fazına ait dört sargı bulunmaktadır. Bu sargılar 500 sarımdan oluşur ve birbirine seri bağlıdır. Bu sargılar aynı manyetik devre üzerinde bulunduğu için bir faz 2000 sarım olarak alınabilir. Sargıların konumu akım ve manyetik akı yönleri Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. VP-ARM sargıları, akım ve manyetik akı yönleri şekli.

Bir ARM'nin ara rotor pozisyonlarındaki faz endüktanslarını bulmak için maksimum ve minimum endüktans değerlerini kullanarak kosinüs bağıntıları bir Fourier Serisi olarak Eş. (1)'de verilmektedir (Vasquez ve Parker, 2004; Fenercioğlu ve Tarimer 2007b).

$$L(\theta, i) = \sum_{k=0}^m L_k(i) \cos(kn_R \theta) \quad (1)$$

ARM düşük enerji oranına sahiptir. Bunu ifade etmek için bir enerji dönüşüm döngüsü doğrusal manyetik olarak hesaplanmıştır. ARM rotor pozisyonuna göre endüktansın Fourier Serisinin birinci harmoniğinde doğrusal bir modeldir. Burada endüktans değeri Eş. (2)'de verilmiştir (Rafajdus v.d., 2004; Fenercioğlu ve Tarimer, 2007a).

$$L(\theta, i) = [a_0 - a_1 \cos(n_R \theta)] \quad (2)$$

Eş. 2'deki a_0 ve a_1 katsayıları Eş. (3)'den elde edilebilir.

$$a_0 = \frac{1}{2}(L_a + L_u), \quad a_1 = \frac{1}{2}(L_a - L_u) \quad (3)$$

Burada; n_R rotor kutup sayısı, bir faz için L_a maksimum, L_u minimum endüktanstır. Uygulamada bu motor, örtüşmeyen bölgede çalıştırılmamaktadır. Motorun çalışma bölgesi rotorla stator kutbunun örtüşmeye başladığı pozisyon ile tam örtüşmenin gerçekleştiği pozisyon arasındır. Bu pozisyondan sonra 2. faz için aynı bölge söz konusudur ve 1. faz örtüştüğü anda uyarımı kesilir 2. faz uyarılır. Bir fazdan akım geçtiğinde endüktansın maksimum değerinde olacağı bir pozisyona ulaşmaya kadar torkun endüktansı artıracak bir yönde rotoru döndürme eğilimi vardır. Torkun yönü daima en yakın örtüşen pozisyona doğrudur. Her rotor pozisyonunda bir fazın meydana getirdiği ani torkun en genel ifadesi Eş. (4)'de verilmiştir.

$$T = \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^i \lambda(\theta, i) di \right] = \left[\frac{\partial W'}{\partial \theta} \right]_{i=\text{sabit}} \quad (4)$$

Burada, T ani tork (Nm), W' ko-enerji (J)'dir. Ani tork rotor pozisyonuna göre değiştiğinden dolayı bir motorun torkunu ifade etmek için ortalama tork ifadesi daha uygundur. ARM'nin doğrusal manyetik karakteristiğini ele aldığımızda ortalama tork veya elektromanyetik tork Eş. (5)'de verilmiştir.

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{L_a - L_u}{\beta_s} = \frac{1}{2} i^2 \frac{L_a}{\beta_s} \left(1 - \frac{L_u}{L_a} \right) \quad (5)$$

Burada; β_s (rad) stator kutup yayı açısıdır (Moallem v.d., 1992; Rafajdus v.d., 2004; Fenercioğlu ve Tarimer, 2007b).

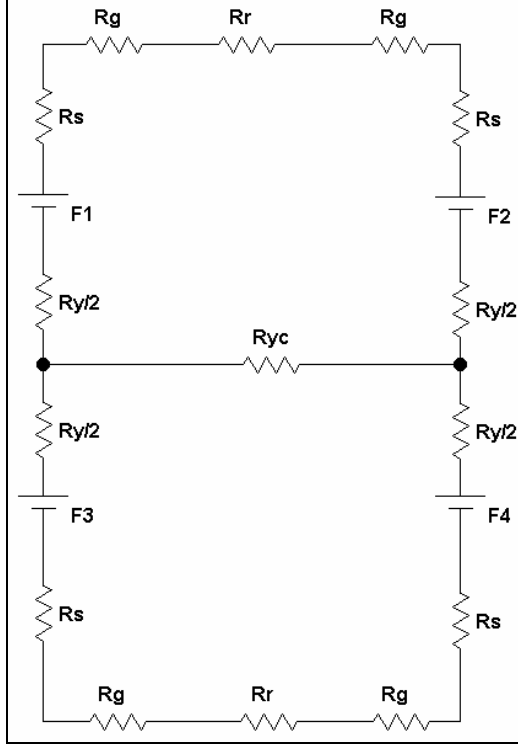
3. 2. VP-ARM Manyetik Eşdeğer Devresi

ARM'de rotor pozisyonu akı yolunu değiştirdiğinden relüktans ve endüktansın değişimine neden olmaktadır. Hava aralıkları tam örtüşen pozisyonda 1 mm dir. Rotor pozisyonuna bağlı olarak rotor kutuplarının örtüşmeyen kısımlarında hava aralığı mesafesi artmakta olup bu nedenle relüktans değeri artmakta endüktans değeri azalmaktadır. Endüktansın değişimi koenerjiyi ve buna bağlı olarak elektromanyetik torku değiştirmektedir.

VP-ARM'nin manyetik eşdeğer devresi Şekil 4'de verilmiştir.

Şekil 4'deki manyetik eşdeğer devrede hava aralığı relüktansı R_g (H^{-1}), boyunduruğun relüktansları R_y , stator parçalarının relüktansları R_s , rotorların relüktansları R_r , boyunduruğ relüktansı R_{yc} ile ifade edilmiştir. Burada verilen relüktans değerleri

rotor pozisyonuna göre değişim göstermektedir. F manyetomotor kuvvetidir (mmk) (At). Manyetik eşdeğer devreye göre her bir relüktans değeri Eş. (6) ile hesaplanır (Krishnan v.d., 1990, Rafajdus v.d., 2004).



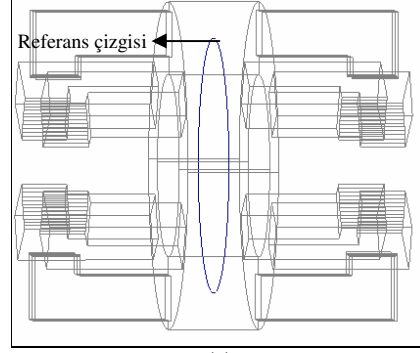
Şekil 4. VP-ARM manyetik eşdeğer devresi.

$$R = \frac{l}{S\mu} = \frac{Hl}{BS} \quad (6)$$

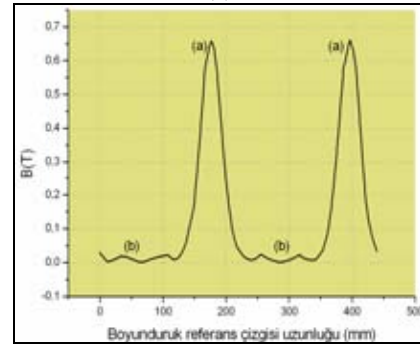
Burada; l akı yolu uzunluğu (m), μ manyetik geçirgenlik H/m, S manyetik akı yolu kesiti (m²), H alan şiddeti (A/m), B manyetik akı yoğunluğudur (T). Bir faza ait her sargının meydana getirdiği mmk birbirini destekleyecek yöndedir. Amper-tur (At) olarak toplam mmk Eş. (7)'de verilmiştir.

$$\Sigma F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (7)$$

Oluşan akı mil eksenine ve yarıçap boyunca manyetik devreyi oluşturur. Akı stator ve boyundurukta aksel olarak, hava aralığı ve rotorda radyal olarak oluşur (Rafajdus v.d., 2004; Fenercioğlu 2006; Fenercioğlu ve Tarımer 2007b). Boyunduruktan aksel olarak geçen akı (Φ_y) tork üretimi için etkilidir.



(a)



(b)

Şekil 5. a) boyunduruk referans çizgisi b) çevresel boyunduruk akısı.

Fakat boyunduruk içerisinde çevresel olarak küçük bir kaçak akı (Φ_{yc}) dolaşmaktadır ve tork üretimine faydası yoktur. Simülasyon sonucunda boyunduruk içerisine dairesel olarak yerleştirilen referans çizgisindeki (kontur) akı değerleri Şekil 5'de verilmiştir.

Burada; (a) bölgesindeki değerler aksel akının geçtiği yola rastlamaktadır, (b) bölgesindeki akı değerleri ise boyunduruktan geçen çevresel akılardır ve sıfıra yakındır. Bu çevresel boyunduruk akısı (b) ihmal edildiğinde toplam relüktans, Eş. (8)'de verilmiştir.

$$\Sigma R = 4(R_g + R_s) + 2(R_r + R_y) \quad (8)$$

Bu ifadelerle göre oluşan toplam akı Eş. (9) ile ifade edilmiştir.

$$\Phi = \frac{\Sigma F}{\Sigma R} \quad (9)$$

Burada Φ weber olarak manyetik akıdır. Tam örtüşen pozisyondaki maksimum endüktans (L_a) ve tam örtüşmeyen pozisyondaki minimum endüktans (L_u) değerleri Eş.(10) ile hesaplanır.

$$L = \frac{N^2}{\Sigma R} \quad (10)$$

Bu hesaplama işlemi için referans akı yolları kabul edilerek bu akı yollarındaki relüktansların toplamından, maksimum ve minimum endüktanslar analitik olarak elde edilir. Bu işlemler için uzun bir hesaplama gerektiğinden pratik hesap yapabilmek için motor boyutlarından ARM endüktansını doğrusal olarak hesaplayan bir bilgisayar programı kullanılır (Krishnan, 2001; Fenercioğlu, 2006). Elde edilen L_a ve L_u değerlerine göre Eş. (2) kullanılarak ara rotor pozisyonlarındaki endüktans değerleri hesaplanmaktadır.

6/4 ARM'de, uyarılan fazın stator kutupları ile rotor kutuplarının çakışık olduğu durumda (tam örtüşen pozisyon, 0°) minimum relüktans, uyarılan fazın stator kutupları ile rotor kutuplarının birbirinden ayrı ve hava aralığının en yüksek olduğu durumda (tam örtüşmeyen pozisyon, 45°) maksimum relüktans oluşmaktadır. Relüktansın rotor pozisyonuna göre değişimi, akı yolu uzunluğunu, akı yolu kesitini, hava aralığı mesafesini, saçaklanma, kaçak akıları ve doyumu etkileyeceği için analitik bir relüktans hesaplanması oldukça zordur. Sadece tam örtüşen pozisyonda bu faktörlerin etkisi az olduğu için bu pozisyon için relüktans tahmini analitik olarak yapılabilir (Krishnan, 2001). Bu tür elektriksel ve manyetik parametrelerin çok fazla değişim gösterdiği doğrusal olmayan sistemlerde bilgisayar destekli 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi ile sonuçların tahmini oldukça kolaylık sağlamaktadır (Fenercioğlu 2006; Gürdal ve Fenercioğlu 2007; Fenercioğlu ve Tarimer, 2007b).

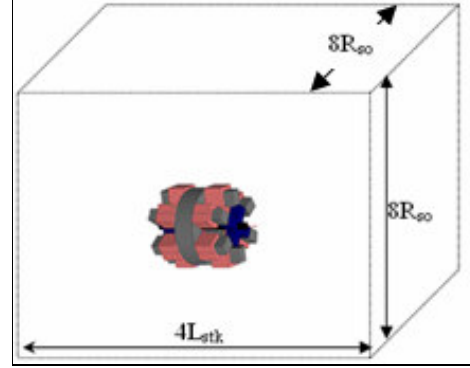
4. ANALİZ ÇALIŞMALARI

Bu kısımda, elde edilen analitik sonuçların statik manyetik analizlerle desteklenmesi düşünülmüş, bu çerçevede Ansoft Maxwell 3D programı kullanılarak çeşitli incelemeler yapılmıştır.

4. 1. Kabuller

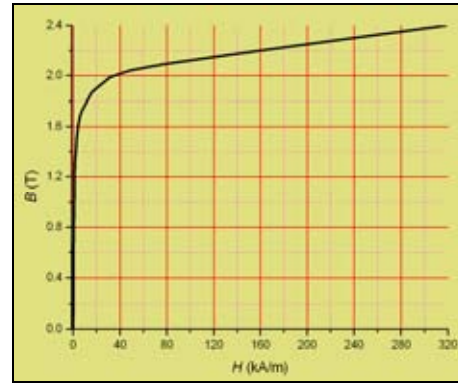
Bu çalışmada pompa tasarım kriterleri, akışkanlar mekaniği ve dinamiği dikkate alınmadan hazır pompa uygulamaları göz önünde tutularak bir tasarım geliştirilmiştir. Motorun manyetik tasarımı ve bilgisayar destekli 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle statik manyetik analizleri yapılmıştır. Analizde Dirichlet sınır şartı, paket uzunluğu (L_{stk}) ve stator dış çapı ($2R_{so}$) 4 katı büyüklüğünde alınarak tanımlanmış olup Şekil 6'da verilmiştir. Rotor örtüşen pozisyonla, tam örtüşmeyen pozisyon

(0°- 45°) arasında 5'er derecelik açılarla mil ekseninde döndürülerek her pozisyonda ani tork, endüktans, manyetik akı yoğunluğu değerleri tahmin edilmiştir.



Şekil 6. Modelin Dirichlet sınır şartı.

Simülasyonlarda motorun dinamik çalışma şartları, kontrol stratejisi ve sürücü devresinin etkileri dikkate alınmamıştır. Tasarımda stator ve rotor bütün olarak ele alınmıştır, laminasyon yapılmamıştır. Bir faz 4 sargıdan oluşmaktadır ve her sargının tek sarımlı olarak tasarımı yapılmıştır. Bu nedenle de faz uyarımı mmk olarak verilmiştir. Fakat her sargı 500 sarımdan oluştuğu kabul edilerek bir fazın toplam sarım sayısı 2000 olarak kabul edilmiştir. Böylece mmk olarak bir faza 4000 At (2A), 6000 At (3A) ve 8000 At (4A) uygulanmıştır. Simülasyonda kullanılan manyetik malzeme BH eğrisi Şekil 7'de verilen steel 1010 isimli malzemedir (Gürdal ve Fenercioğlu, 2007; Fenercioğlu ve Tarimer, 2007a).



Şekil 7. Rotor ve stator nüvesinde kullanılan malzemenin (steel 1010) B-H eğrisi.

Analitik sonuçlar ise doğrusal çalışma şartlarına göre verilen eşitliklerden hesap edilmiştir. Simülasyon ve analitik yöntemle tahmin edilen tork, ko-enerjiye göre hesaplandığından elektromanyetik

torkdur. Bu nedenle tahmin edilen güç değerleri hava aralığı gücüdür ve kayıplar dikkate alınmamıştır. Simülasyonlar 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi ile yapıldığı için parametrelere etki edebilecek doyum, kaçak akılar, saçaklanma ve bağlı geçirgenliğin değişken olmasının etkileri dikkate alınmıştır (Fenercioğlu ve Tarımer, 2007b).

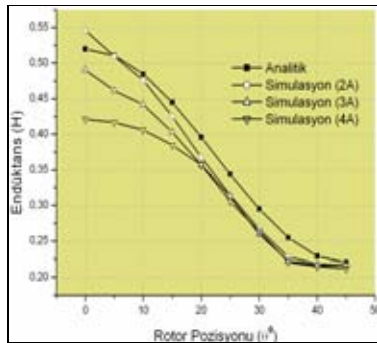
4. 2. VP-ARM'nin Manyetik Modeli

VP-ARM sisteminin 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi ve analitik çözümleri yapılarak faz endüktansı, ani ve ortalama tork değerleri tahmin edilmiştir. Ayrıca maksimum ve minimum endüktans değerleri ve bunlara göre hesaplanan ara rotor pozisyonlarındaki endüktans değerleri analitik yöntemlerle hesaplanmıştır. Rotorun 5 er derecelik mil eksenini etrafındaki hareketi ile her pozisyonda elde edilen endüktans değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Burada 0° tam örtüşen (aligned), 30° örtüşmenin başladığı (overlap), 45° tam örtüşmeyen (unaligned) pozisyonudur.

Tablo 2. Faz endüktansı değerleri.

$\theta(^{\circ})$	L (analitik) mH	L (2A) mH	L (3A) mH	L (4A) mH
0	0,520	0,546	0,491	0,421
5	0,511	0,510	0,461	0,417
10	0,485	0,476	0,442	0,406
15	0,445	0,426	0,403	0,385
20	0,396	0,368	0,357	0,357
25	0,344	0,314	0,313	0,306
30	0,295	0,266	0,260	0,264
35	0,255	0,228	0,223	0,221
40	0,229	0,219	0,217	0,215
45	0,220	0,216	0,216	0,212

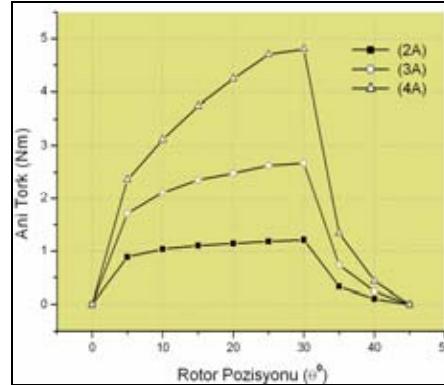
Tablo 2'de verilen endüktans değerlerinin grafiği Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. VP-ARM faz endüktansının rotor pozisyonuna göre değişimi.

Analitik sonuçlarda nüve malzemesi doğrusal olarak kabul edildiği için bağlı geçirgenlik ve endüktans sabittir. Oysaki gerçek çalışma şartlarında ve simülasyon sonuçlarında malzemenin BH eğrisi dikkate alınır (Fenercioğlu, 2006; Fenercioğlu ve Tarımer, 2007a). Dolayısıyla faz sargılarının 2A, 3A ve 4A uyarımında endüktans değerleri değişim gösterir. BH karakteristiğine göre 2A uyarım doymamış bölgedir, 3 A stator nüvesinde doyum başlangıcı olan yaklaşık 1.9 T değerinin başladığı diz bölgesidir. 4A uyarımda ise motor doymuş bölgede çalışmaktadır. Bu üç akım değerinin BH eğrisi üzerindeki oluşturduğu akı değerlerine karşılık gelen noktalarda eğim ve geçirgenlik ($\mu = B/H$) farklı olduğundan akım arttıkça endüktans azalmaktadır. Bu durum doyumun etkisini göstermektedir.

Şekil 8'deki grafiğe göre 20° den sonraki rotor pozisyonlarında analiz sonuç eğrileri çakışmıştır. Bunun sebebi bu rotor pozisyonlarında hava aralığının büyümesi ile relüktansın artması ve manyetik akının azalarak doyum bölgesinden uzaklaşmasıdır. Böylece motor 20 dereceden sonra BH eğrisinin aynı bölgesinde çalıştığı için endüktans değerleri yaklaşık olarak eşit gözükmektedir. Analitik olarak hesaplanan endüktans tahminleri de analiz sonuçlarına yakın çıkmıştır (Gürdal ve Fenercioğlu, 2006; Fenercioğlu ve Tarımer, 2007b).



Şekil 9. VP-ARM'de ani torkun rotor pozisyonuna göre değişimi.

Şekil 9'da rotor pozisyonundaki 5°'lik artışlara göre analiz sonuçlarından alınan ani tork değerleri 2A, 3A ve 4A uyarım için verilmiştir. Örtüşen pozisyonda (0°) tork sıfırdır. Rotorun manyetik olarak kilitlendiği pozisyondur. Bu nedenle rotor bu konuma geldiğinde kilitlenmeden o fazın uyarımı kesilerek sonraki faz uyarılır. Rotor ve stator kutbunun çakışmaya başladığı pozisyonda (30°) en yüksek tork elde edilir. 30°-45° arasındaki konum ise referans alınan faz için rotor ve statorun çakışmadığı örtüşmeyen pozisyonudur ve bu pozisyonda ilgili faz

uyarımda değildir. Bu durumda çakışma durumunda olan diğer faz enerjilidir (Moallem v.d., 1992; Rafajdus v.d., 2004).

1, 3 ve 4 A lik akımlar için, Şekil 8’de görülen ani tork değerlerinin 3000 d/dk hıza göre açısal hızla çarpılması sonucu bulunan hava aralığı güç değerleri Tablo 3’de verilmiştir (Gürdal ve Fenercioğlu, 2006; Fenercioğlu ve Tarımer, 2007b).

Tablo 3. Ortalama tork ve hava aralığı güç değerleri.

Akım	Ortalama Tork (Nm)	Hava aralığı Gücü (W)
2 A	1,182	371
3 A	2,211	694
4 A	2,995	941

Akımın artışı karesel olarak torku artırmasının yanı sıra, endüktansdaki azalma oranı kadar ko-enerjideki değişimden dolayı torku azaltacaktır. Tablo 3’deki değerlere bakıldığında 2A deki güç 371 W iken 4A’ye çıktığında akım karesiyle orantılı olarak torkun ve gücün 4 kat artması gerekirken doğrusallık olmadığı ve endüktans azaldığı için 2,53 kat artarak 940 W olarak tahmin edilmiştir.

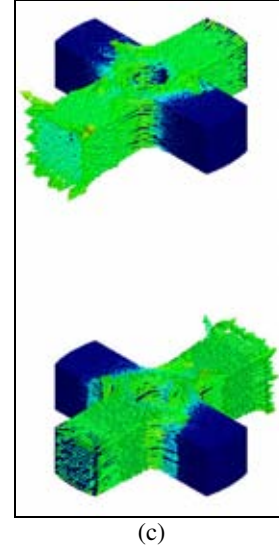
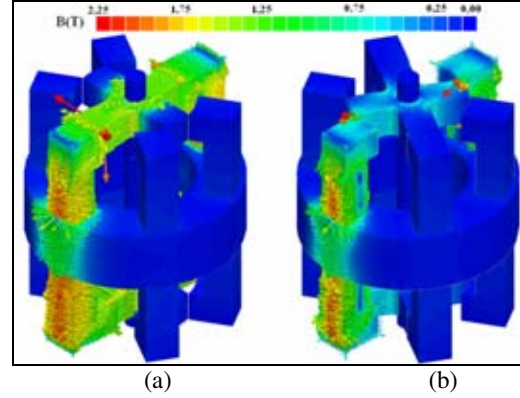
Şekil 10 (a)’da VP-ARM’nin 0° ve 4A uyarımda stator ve rotorundaki akı dağılımı genlik ve vektör olarak verilmiştir. Burada akı yolunun ve gövde üzerindeki akı dağılımının genlik ve vektörel olarak düzgün olduğu görülmektedir. Bu nedenle sadece mil ekseninde tork üreten kuvvetler oluşmaktadır.

Diğer motorlarla kıyaslandığında, motor boyutlarına göre elde edilen güç (4 A de 941 W) az olarak görülebilir. Bu sistemin tamamı motor değildir. Orta kısım pompa olarak tasarlanmıştır. Tork üretimine katılan manyetik devre motorun boyutlarına göre oldukça küçüktür. Kuplaja dahil olan sadece 2 parçalı rotorun toplam genişliği olan 50 mm’dir. Bu durumda motor gücü buna göre değerlendirilmelidir. Ayrıca ARM’de fazlar sırayla anahtarlandığı için sadece 1 faz (4 bobin) anlık olarak tork üretimini sağlarken, diğer fazlar devre dışıdır. Bu durum güç değeri hesabında göz önünde bulundurulmalıdır.

BH karakteristiğine göre gövde doyumu oluşmaya başlamış stator kutup köşelerinde ise bölgesel doyum daha fazladır. Akı stator ve boyunduruktan eksenel doğrultuda, hava aralığı ve rotorda radyal doğrultuda birbirini kuvvetlendirecek şekilde yönlendirilmektedir. Şekil 10 (b) ise 30° pozisyonundaki akı dağılımını genlik ve vektörel olarak göstermektedir. Bu pozisyonda rotor kutup ekseninin stator manyetik eksenine aynı doğrultuya gelme eğiliminin en fazla olduğu konumdur. Dolayısıyla en yüksek tork sağlanır. Fakat akı yolu

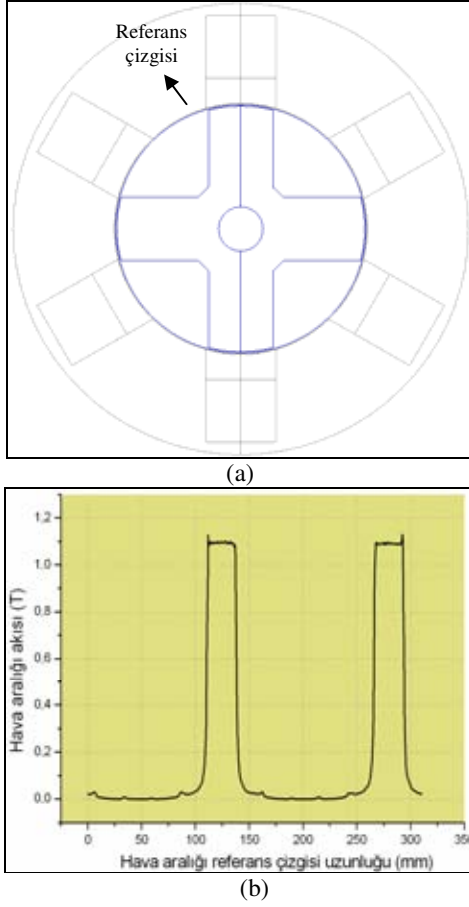
daraldığı için çakışmaya başlayan kutup köşelerinde bölgesel doyum daha fazladır (Fenercioğlu, 2006; Fenercioğlu ve Tarımer, 2007a; Fenercioğlu ve Tarımer, 2007b).

Şekil 10 (c)’de rotorun örtüşen pozisyonundaki akı dağılımını genlik ve vektörel olarak vermektedir. Burada vida dişli rotor kısmı manyetik olmayan malzemeden yapıldığı ve manyetik parametrelere etki etmeyeceği için statik manyetik analiz içerisinde çözüme katılmamıştır.



Şekil 10. VP-ARM manyetik akı dağılımı, a) örtüşen pozisyon, b) örtüşmeyen pozisyon c) rotor örtüşen pozisyon.

Hava aralığındaki akı değerleri genlik olarak Şekil 11 (b) de ki grafikte görülmektedir. Bu değerler 4A uyarımlı, örtüşen pozisyonda simülasyon sonucunda hava aralığının ortasına yerleştirilen dairesel bir referans çizgisinde (kontur) tahmin edilen sonuçlardır. Bu referans çizgisinin yeri Şekil 11 (a)’da gösterilmiştir.



Şekil 11. a) hava aralığı referans çizgisi b) hava aralığındaki manyetik akı.

Rotorla statorun çakıştığı iki bölgede (100-150, 250-300) akı maksimumdur. Fakat manyetik akılar statordan çıkıp rotora girerken, hava aralığı bölgesinden geçtiği için rotorda, stator akısına göre daha az bir akı oluşmaktadır. Rotorla statorun aynı doğrultuda olmadığı diğer bölgelerde hava aralığı yüksektir bu nedenle oluşan akı çok zayıftır.

6. SONUÇ

Bu çalışmada ARM'nin çıkıntılı yapı geometrisini bir avantaja dönüştürmek için bu yapının doğrudan hareketlendirici olacağı bir vida pompa sistemi önerilmiştir. Bu sistem için bir prototip model manyetik olarak tasarlanarak 3 boyutlu statik manyetik analizleri yapılmıştır. Sistemin uygulaması olmadığından analiz sonuçları analitik yaklaşımlarla desteklenmiştir. Analizlere göre önerilen sistemin motor olarak çalışma şartları uygundur. Manyetik kuplaj ve akı yolunun düzgün olması nedeniyle

sadece mil ekseninde tork üretilmektedir. Kayıplara ve mekanik zorlanmalara sebep olan diğer eksenlerde tork oluşmamaktadır. Akı yolu üzerindeki düz rotor parçaları, vida geometrisini bozduğu için pompalama veriminin azalmasına etki edebilir düşüncesiyle dar tutulmuştur. Isınmaya ve kayıplara karşı pompa içerisinden geçen sıvı soğutma görevi yapabilir. Ayrıca simulator programında nüve blok olarak tanımlanabildiğinden dolayı analizlerde laminasyon gösterilememiştir. Gerçek uygulamada laminasyon kullanılması eddy akımı kayıplarını düşüreceği için hızla göre ısınma ve kayıpları azaltacaktır.

Pompalardaki pompa ve elektrik motoru ünitesinin yeni bir tasarımla tek ünite haline getirilmesi fikrinin incelendiği VP-ARM'nin helisel yapı rotorunun kendisi bir hareketlendiricidir. Dolayısıyla doğrudan tahrik uygulamasında, ayrıca bir sürücü motor, kaplinler ve hız ayarlama elemanları kullanılmadığından, bu elemanlardaki kayıpların olmaması bir üstünlük olarak gözükmektedir.

7. KAYNAKLAR

Davis, R.M. 1988. A comparison of switched reluctance rotor structures, IEEE Transactions on Industrial Electronics. 35 (4), 524-529.

Fenercioğlu, A. and Tarımer, İ. 2007a. Bir Manyetik Sistemin Maxwell 3d Alan Simülatörü İle Statik Manyetik Analizinin Çözüm Süreçleri, Selçuk Üniversitesi ISSN 1302/6178 Teknik-Online Dergisi. 6 (3).

Fenercioğlu, A. and Tarımer, İ. 2007b. Anahtarlamalı Relüktans Motorlarda Faz Endüktansına Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi. 13 (2), 145-150.

Fenercioğlu, A. 2006. Anahtarlamalı Relüktans Motorun (HY-ARM) Tasarımı ve Analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Gizaw, D. 2003. Pumping motor with skewed rotor laminations, USA Patent No. 0057800-A1.

Gürdal, O. and Fenercioğlu, A. 2007. Computer Aided Three Dimensional Magnetostatic Analysis of Helically Structured Switched Reluctance Motor (HS-SRM), Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. 22 (2), 315-322.

Gürdal, O. 2001. Elektrik Makinelerinin Tasarımı, Atlas Yay. Dağ. İstanbul.

Kirkor, Y. 1998. Hacimsal ve Santrifuj Pompalar Çağlayan Ktp., İstanbul.

Krishnan, R. 2001. Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press, Florida.

Krishnan, R., Abouzeid, M. and Mang, X. 1990. A Design Procedure For Axial Field Switched Reluctance Motors, **IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**. 7-12 (1) 241-246.

Moallem, M., Ong, C.M. and Unnewehr, L.E. 1992. Effect of Rotor Profiles on the Torque of a Switched Reluctance Motor, *IEEE Transactions on Industry Applications*. 28 (2).

Rafajdus, P., Zrak, I. and Hrabovcova, V. 2004. Analysis of the Switched Reluctance Motor (SRM) Parameters, *Journal of Electrical Engineering*. 55 (7-8), 195-200.

Rosses, C. 2000. The Turn of The Screw: Optimal Design of an Archimedes Screw, *Journal of Hydraulic Engineering*. 126 (1), 72-80.

Vasquez, H. and Parker, J.K. 2004. A new simplified mathematical model for a switched reluctance motor in a variable speed pumping applications , **Elsevier Mechatronics**. 14 (9), 1055-1068.

Micromed Cardiovascular Inc. Görüldüğü tarih 15/02/2008. <http://www.micromedtech.com/products.html>.