

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORLARI VE BU
MOTORLARIN DEMİRYOLLARINDA
KULLANILMASI**

Elek. Müh. İsmail ÖZGÜR

**F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Mebrure ŞANAL

İSTANBUL, 1995

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET	vii
SUMMARY	viii
BÖLÜM 1.ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORLARININ ENDÜSTRİ UYGULAMALARINDAKİ YERİ	
1.1. Genel	1
1.2. Fırçasız tipte olan motorların gelişimi	5
1.3. Endüstride farklı boyutlarda kullanılan anahtarlı relüktans motorları	8
BÖLÜM 2. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORLARI	
2.1. Genel	9
2.2. Anahtarlı relüktans motorlarının temel çalışma prensibi	10
2.2.1. İndüktans değişimi ve motor momentinin çıkarılması	12
2.2.1.1. Tek fazlı motorda moment üretimi	16
2.2.1.2. Dört fazlı anahtarlı relüktans motorunda moment üretimi	16
2.3. Çift taraflı çıkık kutuplu bir yapıda elektromekanik enerji dönüşümünün temel prensipleri	17
2.4. Anahtarlı relüktans motorunun tasarım nitelikleri	26
2.4.1. Faz sayısı, stator ve rotor kutup sayısı	29
2.4.2. Stator ve Rotor Kutup Eni	32
2.4.3. Motorun magnetik yapısı	33
2.4.3.1. Magnetik devre yapısı ve hava aralığı etkisi	33
2.4.3.2. Magnetik doymanın olumlu ve olumsuz etkileri	34
2.5. Mekanik dizayn ve ısı işletimin önemi	34
2.6. Moment dalgalılığı ve gürültü	35
2.7. A.R. Motorlarının çeşitli karakteristikleri	36
2.7.1. Moment - Hız karakteristiği	36
2.7.2. Sabit hızda A.R. Motorunun çıkış momenti	39

2.7.3.	A.R. Motorunun kalkış momenti	42
2.7.4.	Statik moment karakteristikleri	43
2.7.5.	Akı dalga biçimleri	45
2.7.6.	Akım dalga biçimi	48
2.7.7.	A.R. Motorunun iletken akım yoğunluğu	49
2.7.8.	ARM Kalkış akımı	50
2.7.9.	ARM'de endüktans konum eğrileri	51
2.7.10	ARM'nin yüksek güçlerde uygulanabilirliği	53
2.7.11.	A.R. Motorunun verimi	54

BÖLÜM 3. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORLARININ KONTROLU

3.1.	Genel	57
3.1.1.	Motorun sürülmesi ve bazı tanımlar	60
3.1.2.	Tipik sürücü devreleri	63
3.2.	A.R. Motorunun kontrol karakteristikleri ve çalışma modları	64
3.3.	A.R. Motorunun güç elektroniği ile kontrol uygulamaları	69
3.3.1.	A.R. Motoru için kontrol devreleri	71
3.3.1.1.	Anahtarlı relüktans motoru kontrol devresi için anahtarlama elemanlarının seçimi	71
3.3.1.2.	Faz başına bir anahtarlama elemanının kullanıldığı güç konverter devresi	72
3.3.1.3.	Faz başına iki adet anahtarlama elemanı bulunan kontrol devresi	75
3.3.1.4.	Bir adet anahtarlama elemanı olan bölünmüş kaynaklı A.R. motoru kontrol devresi	76
3.3.1.5.	İki katlı stator sargısı olan A.R. Motorunun kontrol devresi	77

BÖLÜM 4. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUNUN ULAŞIM UYGULAMALARINDA KULLANILABİLMESİ İÇİN ELDE EDİLEN KAREKTERİSTİKLERİN İRDELENMESİ

4.1.	Genel	82
4.2.	Ulaşım tahriğinde kullanılan alternatif akım ve doğru akım motorlarının parametrelerinin anahtarlı relüktans motorları ile karşılaştırılması	83

4.2.1.	Genel bir karşılaştırma	83
4.2.2.	Doğru akım motoru ile asenkron motorunun anahtarlı relüktans motoru ile benzerliği	84
4.2.2.1.	A.R. Motorunun D.A. Motorlarına yaklaştıran moment sabitinin hesabı ile karakteristiklerinin genel olarak karşılaştırılması	84
4.2.2.2.	Asenkron motorların relüktans motorları ile karşılaştırılması	88
4.3.	Motor tahrikli sistemler ile diğerlerinin maliyet ve performans bakımından değerlendirilmesi	91

BÖLÜM 5. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORLARININ DEMİRYOLLARINDA KULLANILMASI

5.1.	Genel	94
5.2.	ARM'nin sağladığı yararlar	94
5.3.	Motor dizaynı	95
5.3.1.	Genel	95
5.3.2.	Boyutlar	96
5.3.3.	Mekanik dizayn	97
5.3.4.	Hava aralığı	98
5.3.5.	Performans	98
5.4.	Sürme devresi	100
5.4.1.	Devre şekilleri	100
5.4.2.	Anahtarlama elemanları	103
5.4.3.	Pasif elemanlar	103
5.5.	Sistem maliyeti	104
5.6.	Bakım	110
5.7.	Enerji	111
SONUÇ		113
KAYNAKLAR		115
ÖZGEÇMİŞ		

TEŐEKKÖR

Bu çalıőmada ũlkemizde yeterince tanınmayan Anahtarlı Relũktans Motorlarının temel űzellikleri ve karakteristikleri incelenmiőtir. Diđer motor tipleriyle karőtılaőtırmalar yapılmıőt ve demiryolu uygulamalarından sűzedilmiőtir. alıőmalarında bana yol gűsteren sayın hocam Y. Doç.Dr. Mebrure ŐANAL'a teőtikkűrũ bir borç bilirim.



ÖZET

Anahtarlı Relüktans motoru, son yıllarda değişik tiplerde endüstride birçok uygulama alanı bulmuştur. Son zamanlarda uygulamalarda DC ve AC motorlara ciddi bir rakip olarak ortaya çıkmıştır.

Relüktans motorlarının yaygın olarak kullanım alanı bulması için daha çok gelişmelere ihtiyaç duyulmasına rağmen, DC ve AC sistemler ile karşılaştırıldığında teknik özellikleri ve ekonomik yararlarıyla daha avantajlı bir duruma gelmiştir.

Değişken hız tahriği uygulamalarında, motorun tasarım özelliklerinin iyileştirilmesi ve performans avantajlarının yüksek olmasından dolayı günümüzde geniş bir kullanım alanı bulabilmektedir. Motorun düşük hızlarda yüksek moment verebilmesi, boyutlarının aynı güçteki konvansiyonel makinalara nazaran daha ufak olması, yapısal özelliklerinin çok basit olması, kontrolünün ekonomik ve verimli bir şekilde yapılabilmesi, motorun endüstri uygulamaları açısından cazip duruma getirmektedir.

DC motorlar genellikle problemlili makinalardır. Bu makinalarda çok miktardaki toz ve kir yüzünden soğutma havası yalıtım teçizatına zarar verir ve komitasyonun zor olması nedeniyle elektriksel ve mekanik gücün elde edilmesinde zorluklar meydana getirir.

Bu dezavantajlara karşı AC motorun kullanılmasıyla komitasyon problemi ortadan kalkmış ve yüksek bir kullanım olanağı sağlanmıştır. Bobinlerdeki yalıtım sınırlanması Sincap kafesli motorun kullanılmasıyla yalıtım sisteminin de güvenilirliğini arttırmıştır.

Anahtarlı Relüktans motorlarında ise statorda basit şekilde az sayıda bobin bulunur (genellikle 8). Bu özellik yalıtım sisteminin güvenilirliğinde önemli bir gelişme sağlamaktadır ve gerektiğinde sistemin bakımında büyük bir basitleştirme sağlar. Üstelik rotor üzerinde sarımların bulunmayışıda motorun sağlamlılığını artırır.

AC motorların eşit tipteki bir DC motora göre daha ucuz olmasına rağmen, kontrol sisktem maliyetinin fazla olmasından dolayı ilk maliyetleri çok daha pahalıdır. A.R. Motomun kullanılmasıdaki amaç bu dezavantajı minimuma indirmektedir. Bu motorun elektriksel elemanlarının maliyetleri aynı tipteki motorlara göre çok daha azdır.

SUMMARY

The reluctance motor has evolved in various forms over several decades and has found commercial applications in general industry. Recently it has emerged as a serious competitor for both the DC and AC motors in applications.

Much development work is required before the reluctance motors can be applied to practical applications, but it has reached the stage where it is appropriate to conduct thorough appraisal of its technical features and possible economic benefits in comparison with both existing DC system and AC systems.

In applications of variable speed drives, there is a wide range of industrial using area, because of being improved as design specifications of motors and highest level performance advantages. Very high specific torques at low speeds, the smaller frame sizes compared with conventional machines, the simple constructional structure, economic and efficient controllability have made these motors very attractive for industrial applications.

DC motors are usually troublesome machines. The arduous electrical and mechanical conditions under which these machines operate make commutation very difficult, and the presence of large quantities of dirt and dust in the cooling air can damage the armature insulation.

The leading objective of all proposals to use AC motors is to eliminate the commutation problem and so to achieve a higher availability. Confining insulated coils to the stationary by using a squirrel - cage induction motor will give improved reliability to the insulation system.

In the switched reluctance motor the stator winding comprises a few (typically 8) coils of large section and simple shape. This feature is expected to lead to further improvements in the reliability of the insulation system and to simplify rewinding when it becomes necessary. Furthermore, the absence of any winding at all on the rotor will make for a greatly enhanced integrity of that member.

However, using AC motors brings a heavy penalty on first cost, because, although AC motors are cheaper than equivalent DC motors, the control equipment is always more expensive, often by a gross margin. The switched reluctance motor proposal is an attempt to minimise this penalty. The cost of the electrical components of the motor is very much less than other equivalent motors.

BÖLÜM 1 : ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORLARININ ENDÜSTRİ UYGULAMALARINDAKİ YERİ

1.1. GENEL

Relüktans motorunun çalışma prensibi, Wheatstone ve Davidson tarafından ilk kez 1840'lı yıllarda tanımlanmıştır. Ancak 1960'lı yılların sonlarına kadar bu motorlar çok küçük güç değerlerine sahipti. 1980 yılından önceki araştırmalarda değişken Relüktans Motoru (Variable Reluctance Motor) olarak tanımlanmaktaydı. Uyarmanın doğru gerilim ile anahtarlama sureti ile yapılmasından dolayı motor, İngiltere'de Leeds ve Nottingham Üniversitelerinde bulunan araştırmacılar tarafından, Anahtarlı Relüktans Motoru (Switched Reluctance Motor) olarak isimlendirilmiştir. Anahtarlı Relüktans Motorlarının endüstride işlerlilik kazanması, gücünün birkaç watt değerinden yüzlerce kilowatt'a kadar ulaşması ile sağlanmıştır. Motorun ilk kez güç elektroniği ile birleştirilmiş dizaynı, 1970'li yılların ikinci yarısına rastlamaktadır. Ayrıca, geliştirilmiş ve en iyi performansı (yani çıkış gücü, çıkış momenti ve verim gibi parametreleri) veren kontrol tahrikli alanını, ticari amaçla Oulton Switched Reluctance Drives Ltd. lisansı ile, Tasc Drives, ilk kez İngiltere'de üretmeye başlamıştır.

Anahtarlı Relüktans Motor tahriği, bugüne kadar yapılan gelişmeler ile çift taraflı çıkış kutuplu relüktans motoru yapısı esasına göre kurulmuştur. Motorun gücünü arttırmayı amaçlayan ve dizayn konusunda kayda değer gelişmeler için çalışan araştırmacılar, prensip olarak önceden bilinen, ancak, günümüzde hızla değişen motor hız tahrik sistemlerinde, konvansiyonel makinalara rakip oluşturan Anahtarlı Relüktans Motorlu tahrik sistemlerini gündeme getirmişlerdir. Bu tahrik sistemi, geniş bir uygulama alanı bulabilmesi açısından çok önemlidir. Motorun iyi bir potansiyele sahip olduğu, güç elektroniği alanında sağlanan gelişmeler ve kompüter destekli elektromanyetik dizayn ile birlikte farkedilmiştir. Enerjinin etkin ve optimum kullanılması, üretimin esnekliği ve üretim hızının artması ile birlikte tahrik sistemlerinde yeni arayışlar ortaya çıkmıştır.

Günümüzde Anahtarlı Relüktans Motorları, endüstri işletmelerinin her alanında, genellikle servo sistemlerinde, asansör ve krenlerde, karayolu, demiryolu ve denizyolu taşımacılığında, karıştırıcı makinalarında, matbaa

makinalarında, çeşitli üretim hatlarında, ev aletlerinde, madencilik gibi uygulamalarda kullanılabilir. Yukarıda belirtilen birçok uygulama örneği için endüstride, genellikle endüstri tahriği açısından kolay kontrol edilebilirliği ile Doğru Akım Motorları, evirici beslemeli Alternatif Akım Makinaları, özellikle Asenkron Motorlar yaygın bir biçimde kullanılmaktadır.

Motor gücünün yeterli olması ve gelişen teknoloji ile birlikte güç elektroniği elemanlarının fiyat avantajı yaklaşık 10-15 yıldır araştırmacıların ilgisini Doğru Akım Motorlarını yerine, Alternatif Akım Motorları ile fırçasız tipte olan motor sistemlerine yönelmiştir. Bu bakış açısından hareketle, endüstride kullanım alanına göre bir örnekleme yapacak olursak, pompa ve fan uygulamalarında evirici beslemeli asenkron motorlar, performans-maliyet bileşimini daha da çekici duruma getirmektedir. Ayrıca, motorlar arasında bir karşılaştırma yaparken yalnızca, elektronik devre bileşenleriyle tanımlanan fiyatlarla değil, denge unsurundan salınım kadar bütün kriterlere bakmak gereklidir. Günümüzde, endüstrideki kullanıcılar Doğru Akım Makinalarından uzaklaştıran bir başka neden de, dizayn özellikleri ve başarılı bir biçimde elektronik olarak kontrol edilebilen komütatörsüz motor tahrik sistemleridir. Son yıllarda olumlu gelişmeler ve sağladığı avantajlardan dolayı, Anahtarlı Relüktans Motorlarına karşı artan bir ilgi oluşmaktadır. Motorun çıkış gücünün yüksek olması özellikle sistemin yüksek verimi ve fiyat avantajı ile Alternatif Akım Motorlu sistemler, şu anda Doğru Akım Motorlarının da karşısında güçlü bir seçenek oluşturmaktadırlar. Mekanik ve elektronik olarak Anahtarlı Relüktans Motorları da, kuvvetli bir yapıya sahip ve güvenilir oldukları için önemli çalışma avantajları yaratmaktadırlar.

Anahtarlı relüktans Motorlarına duyulan ilgiye neden olan avantajları aşağıda özetlemiştir.

1- Motorun, rotor kısmı basit bir yapıya sahiptir ve sadece birbiri ile ilgili birkaç üretim adımı gerektirir.

2- Stator üzerindeki sınırlar çok basittir ve fazlar arasında herhangi bir elektriksel bağlantı yoktur.

3- Moment faz akımı yönünden bağımsızdır. Belirli uygulamalar için kontrol devresinde gerekli olan, güç elektroniği anahtarlarının sayısının azalmasına neden olur.

4- Arıza koşulları altında, açık devre gerilimi ve kısa devre akımı sıfır veya çok küçüktür.

5- Yüksek kayma için, asenkron motorlarının kalkış akımında olduğu gibi, aşırı akım problemi olmadan kalkış momenti çok yüksek olabilir.

6- Aşırı değerlerde yüksek hızlar mümkün olabilir.

7- Her boyutta motor için, yüksek güç ve moment çıkışı elde edilebilir.

8- Belirli uygulamalar için, uyarlanması kolay ve avantajlıdır.

9- Elektriksel verim çok yüksektir.

10-Çalışma karakteristikleri serbest bir şekilde programlanabilir.

11-Standart olarak üretim kolay, ucuz ve basittir.

Tablo 1.1. de ise endüstride kullanılan motor tipleri, besleme şekilleri ve uygulama alanları kısaca hatırlatılmaktadır. Tablo, ayrıca, Anahtarlı Relüktans Motorunun, konvansiyonel motorlar içinde yapılabilecek sınıflandırmada yerini tanımlamakta yardımcı olmaktadır.

A.R. Motorları, çalışma ilkesi açısından değişken relüktans adım motorlarına benzemektedir. Bu tahrik sistemleri, endüstride çok önemli çalışma avantajları sağlamaktadır. Çok gelişmiş konvansiyonel tahrik sistemlerine karşılık bu tekniğin gelişmesinin başlıca nedeni, çok geniş çapta güç ve uygulama alanında, önemli bir üstünlük sağlayan üretim maliyetidir.

Kontrolü açısından Anatarlı Relüktans Motor tahriği, başlıca dört bölgedir. Yüksek bir moment-atalet oranı ile çok iyi dinamik performans vermektedir. Ayrıca kapalı çevrim sistemi şeklinde çalışmak ve istenilen moment hız karakteristiklerini sağlamak için kolayca uyarlanabilir.

Bunun yanısıra yüksek verim, yüksek güç çıkışı gibi performans avantajları, bu gelişmelere pozitif bir yaklaşım gerekmektedir. [1]

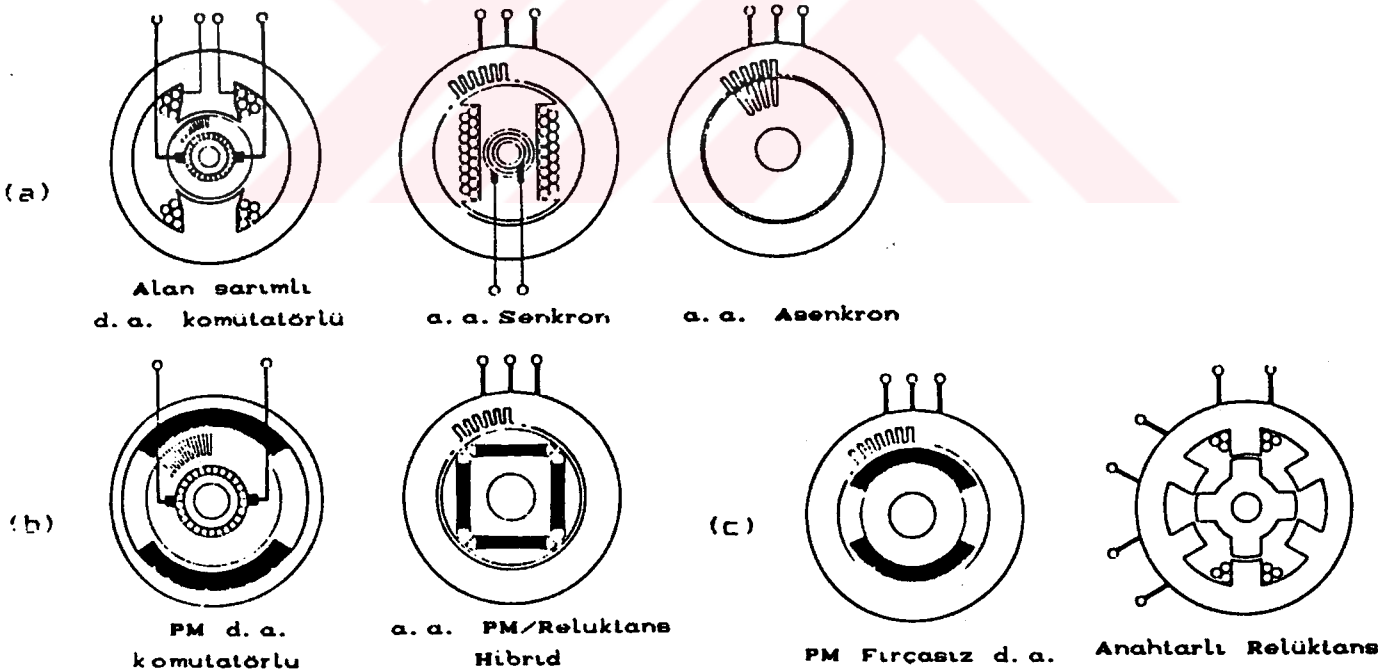
TABLO 1.1. MOTORLARIN SINIFLANDIRILMASI

MOTOR TIPI	BESLEME SEKLI	UYGULAMA ALANI
D. a., komutatorlu		
-Alan sarmıli	Kontrollu, sabit d. a.	Çelik, kağıt, endüstriyel ve ulaşım tahrişi
-Sürekli mıknatıslı	Kontrollu, sabit d. a.	Farklı şekillerde servo hız kontrolü.
-D. A. ortak kutuplu	Kontrollu, sabit d. a.	Gemilerde
-D. A. fırçasız motor	Alternatif kutuplama, 120 kare dalga, 3 fazlı sinüs dalga d. a.	Konum kontrolünde, bilgisayarlı yazıcı mak. küçük güçte fan ve pompa uygulamaları
-A. A. komutatorlu	Tek fazlı p. a. per. SCR veya triyakla kontrol	Ev aletleri ve tesisatları
Asenkron Motorlar		
-3 fazlı kafesli	3 fazlı sin. dalga a. a. 6 adımlı, pvm a. a.	Pompa, fan, kompresör hız kontrolü
-Tek fazlı kafesli	Tek fazlı sin. dalga a. a. per. SCR veya triyakla kontrol edilebilir	Düşük maliyetli ve düşük güçlü endüstriyel ve ev aletlerinde
-Uç fazlı rotoru sarmıli	Uç fazlı sin. dalga a. a.	Sınırlı hızda, büyük güçlü end. ve ev aletlerinde
Senkron Motorlar		
-Alan sarmıli, bilezikli	Uç fazlı sin. dalga a. a. veya akım kaynaklı inv.	Büyük güç, kompresör ve fan tahriři
-Fırçasız uyarmalı	3 fazlı sin. dalga a. a. / pvm a. a.	Düşük güç integral BG end. tahriřinde
-Sürekli mıknatıslı		
Reluktans Motorları		
-Senkron reluktans	Uç fazlı sin. dalga a. a. pvm a. a.	inverter beslemeli dönen mak. ve senkron tahriřinde
-Senkron reluktans (kafesiz tip)	Uç fazlı pvm a. a.	
-Anahtarlı reluktans	Anahtarlı d. a.	Geniş hız aralığı, ucuz end. ev aletleri, 50-100kW end. uyg.
-Tek fazlı reluktans	Farklı şek. genelde anahtarlı d. a.	Küçük senkron tah. saatlerde
Adım Motorları		
-Tek yığılmalı, dengelenen reluktans	Anahtarlı d. a.	Konum kontrolünde, yazıcı ve çizici
-Çok yığılmalı, dengelenen reluktans		
-Sürekli mıknatıslı		
-Karma motorlar		
Misterese motorlar	3 fazlı veya tek fazlı sin. dalga a. a., pvm a. a.	Döner platformlar

1.2. FIRÇASIZ TIPE OLAN MOTORLARIN GELİŞİMİ

Gelişen endüstriye bağlı olarak, kontrollü-değişken hız tahriği uygulamalarına yanıt verebilen ilginç araştırmalar yapılmaktadır. Bu konuda, mıknatıslanma karakteristiklerini iyileştiren gelişmelere en büyük katkı sürekli-mıknatıslar konusundaki olumlu araştırmalar sayesinde yapılmıştır. Örneğin, en büyük gelişme, oda sıcaklığında diğer mıknatıs türleri içinde enerji üretimi en büyük olan NdFeB (Neodmiyum-demir-bor) mıknatıs türündendir. Ayrıca, seramik (ferromagnetik) mıknatıslarda da yapılan kayda değer araştırmalar, fırçasız tipteki metodların hızla gelişmesine pozitif etki yaratmaktadır.

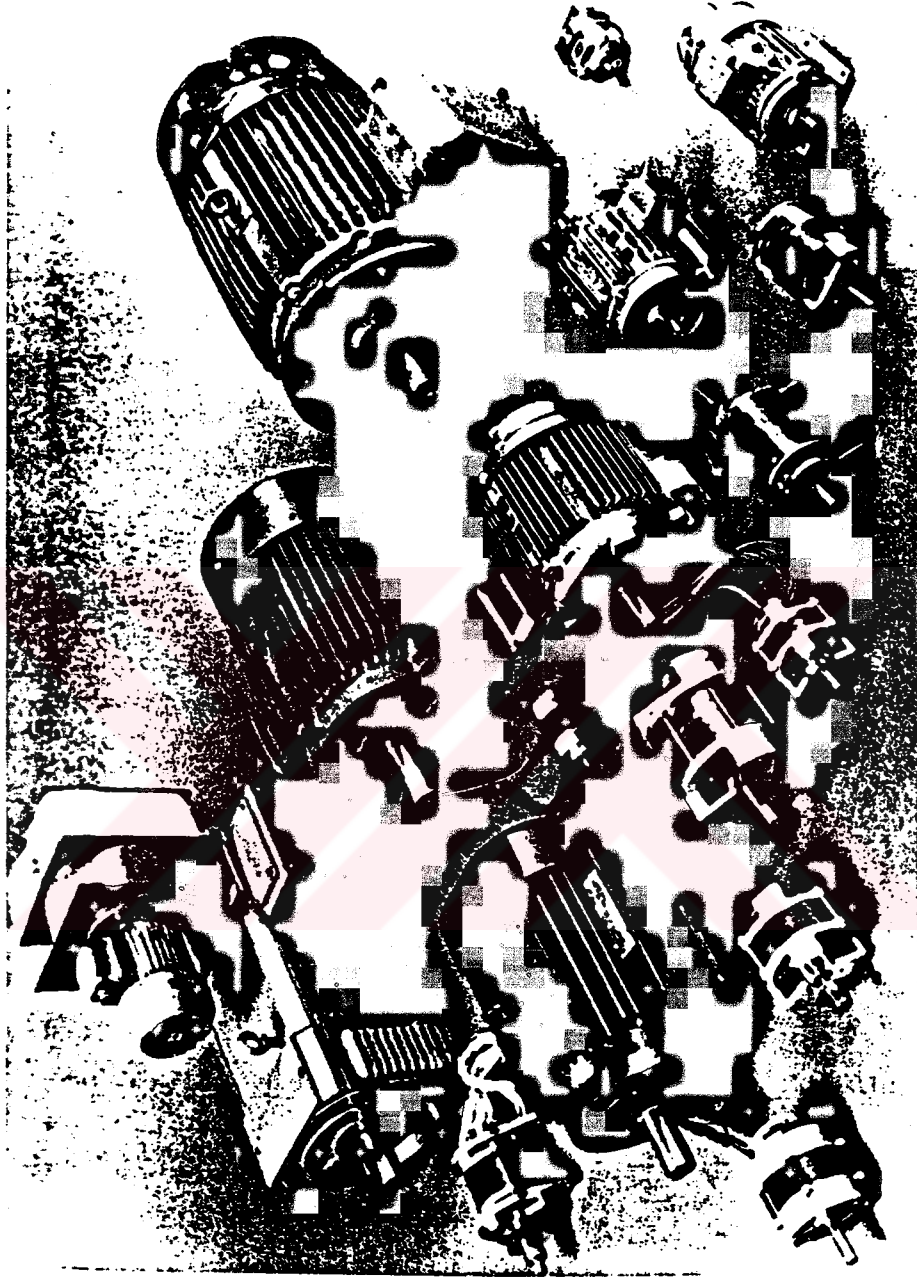
Bununla birlikte yaklaşık 100 kW'ın altındaki tahrik uygulamaları için günümüzde seçimi mümkün olan Alan Etkili Tranzistörler (FET) ile Çift Kutuplu Jonksiyon Tranzistörlerin (BJT) çalışma sınırları genişlemiştir. Ayrıca, güç elektroniğindeki en son gelişmelerin sonucu, kapısı izolasyonlu Çift Kutuplu Tranzistörlerin (Insulating Gate Bipolar Transistör-IGBT), 1 kV gerilim değerinde ve 200A akım kabiliyetinde kullanılabilir duruma gelmiştir.



Şekil 1.1. Konvensiyonel D.A. ve A.A. Motorlarından fırçasız doğru akım motorlarına doğru bir gelişme.

Şekil 1.1. de, Anahtarlı Relüktans Motorlarının diğer motor türleri arasındaki yeri belirtilmektedir. Şekilde, konvansiyonel alternatif akım ve doğru akım motorlarından, fırçasız doğru akım motorlarının gelişimi gösterilmektedir. Bilindiği gibi, konvansiyonel motorlar, güç elektroniğindeki gelişmelerle birlikte, ayarlanabilir hızı sağlayan elektronik kontrol edicilerle kolayca birleştirilebilirler. Ancak oluşan sakıncaları artan tasarım çalışmalarıyla giderme eğilimi sonucunda, son zamanlarda yeni fırçasız tipte, sürekli mıknatıslı ve anahtarlı relüktans motorları geniş çapta üretilmeye başlamıştır. Şekil 1.1. de (b) no'lu motor tipleri (a)'da gösterilen motorlarda alan sarımlarının sürekli mıknatısla (permanent magnet) yer değiştirmesi ile elde edilir. Senkron motor, (b)'de kolaylıkla fırçasız olabilmektedir. Sürekli mıknatıslı fırçasız tipte senkron makinanın mıknatısları rotor yüzeyine yerleştirilebilir. Bu tipte olan motor, tümüyle alan kontrolludur. Şekilde adım motorları gösterilmektedir ve bilindiği gibi adım motorları da fırçasızdır. Ayrıca, rotor konum sezicisi olmadan çalışır. Anahtarlı Relüktans ya da Değişken Relüktans Motorları ise, tek yığınlı Değişken Relüktans Adım Motorlarından yola çıkılarak geliştirilmiştir ve rotor konum sezicisi gereklidir.

Fırçasız tipteki motorların gelişmesine katkıda bulunan en büyük etkenlerden birisi de tasarımlarının kompüter destekli yapılabilmesidir. A.R. Motorlarında lineer olmayan magnetik alan analizleri için en popüler yöntem sonlu eleman analizi (Finite element method) ile çözümdür. Rotor dizaynını optimum kılmak için kullanılan bu yöntem, motor verimini, güç faktörünü ve momenti tanımlar. İlgili yazınlardan da görüleceği gibi, Anahtarlı Relüktans Motorunun farklı rotor konumları için akı dalga şekillerinin hesaplandığı iki boyutlu sonlu eleman analizi yöntemleri kullanılmaktadır. [1]



Şekil 1.2. Bazı uygulamalar için A.R. Motor tipleri (Fotograf, Tasc Drives Ltd. tarafından Oulton adı ile üretilen modellerini göstermektedir)

1.3. ENDÜSTRİDE FARKLI BOYUTLARDA KULLANILAN ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORLARI

Genel amaçlı endüstri tahriği uygulamaları için günümüzde 4-22 kW değerlerinde Oulton Anahtarlı Relüktans Motoru kullanıma sunulmaktadır. Bu büyüklükteki motorlar, çok düşük hızlarda düzgün olarak dönebilen 200 kW'a kadar güçlerde, bazı özel uygulamalar için tasarlanmıştır. Şekil 1.2.'de gözleneceği gibi; 50 kW güç değerine kadar çeşitli amaçlar için kullanılabilen A.R. Motoruna ait örnekler sunulmaktadır.

Anahtarlı Relüktans Motorları, endüstride kullanılan boyutlarının dışında, küçük güçlü motorlar olarak da sınıflandırılabilir. 100 - 1000 W gücündeki küçük güçteki uygulamalarda çok iyi kontrol edilebilen doğru akım motoru uygulamaları ile aynı performansı göstermekte olduğu ilgili yazınlarda gözlenmektedir. Gürültüye duyarlı bazı hassas uygulamalar için ise, bu problem detaylı bir elektronik kontrol sistemi ile ortadan kaldırılabilir.

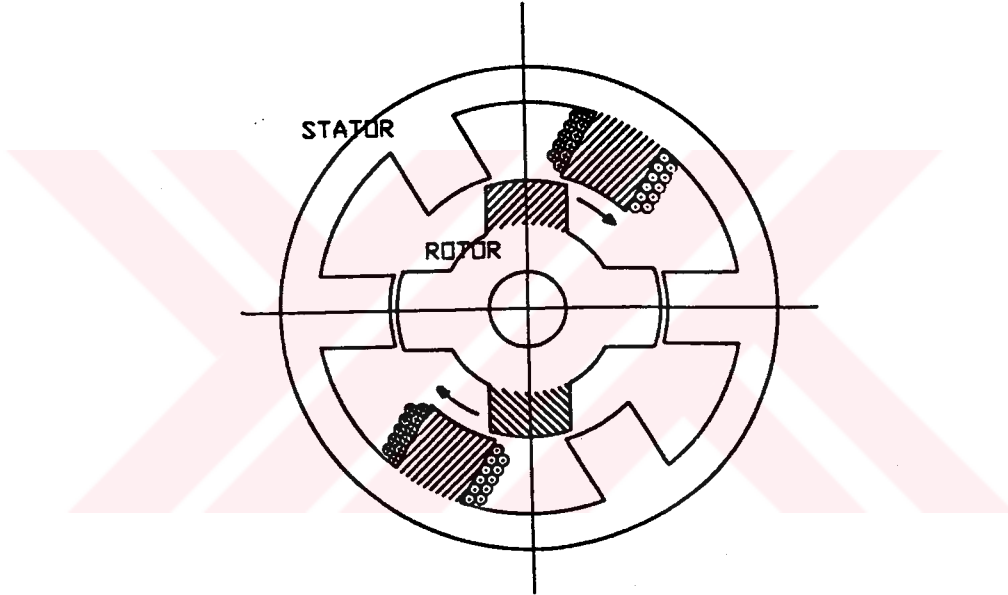
Alışılmamış yapıda zorlamalı soğutmalı bir doğru akım motoruna benzeyen bir türü de 36 kW, 3000 dev / dak olarak dizayn edilmiştir. Bununla birlikte, 65 kW değerinde 3700 dev / dak hızına sahip ve sistem verimi % 89 olan doğrudan soğutmalı modeli de geliştirilmiştir. Başka ilginç bir tasarım da 1 kV besleme gerilimi ile çalışabilen su soğutmalı modeli olup bu tipi daha çok maden uygulamaları için uygundur.

Anahtarlı Relüktans Motorunun 25000 dev / dak değerinde yüksek hızlar için tasarlanmış 21 kW gücünde tipleri de vardır. Ayrıca, 50000 dev / dak hızında Anahtarlı Relüktans Generatörünün tasarımı konusunda araştırmacılar halen çalışmaktadırlar. Düşük hız ve moment uygulamaları için de tasarlanan Anahtarlı Relüktans Motorları bulunmaktadır. Bütün endüstri alanlarında kullanılabilen bu motor tipi ulaşım tahriği için de başarılı bir biçimde uygulanabilmektedir. Bu motorların gelişmesi ile robot teknolojisinde A.R. direk tahriği fırçasız servo motorlarının kullanılması Japonya da üreticilerin dikkatini çekmektedir. Dünya çapında yaklaşık olarak 1987 yılı rakamlarına göre çeşitli endüstri dalları için toplam 31.5 milyon dolarlık motor satılmıştır. 5 kW'ın üzerindeki motor güçleri 1992 yılı itibarı ile 20 milyon dolarlık motorun, yalnızca askeri uygulamalarda kullanılmak üzere satışı planlanmaktadır.[1]

BÖLÜM 2 : ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORLARI

2.1. GENEL

Anahtarlı Relüktans Motorunun tasarımı, performansı, kontrolü ve tahriğinin iyileştirilmesi konusu, günümüzde araştırmacıların yoğun ilgisini çekmektedir. Motorun basit yapısı, stator sarımlarının basit ve konsantre olması ile rotorun sarımsız ve mıknatıssız olması motoru, yüzeysel olarak diğer elektrik makinalarından daha basit kılmaktadır, ancak bu görünüm oldukça aldatıcıdır.



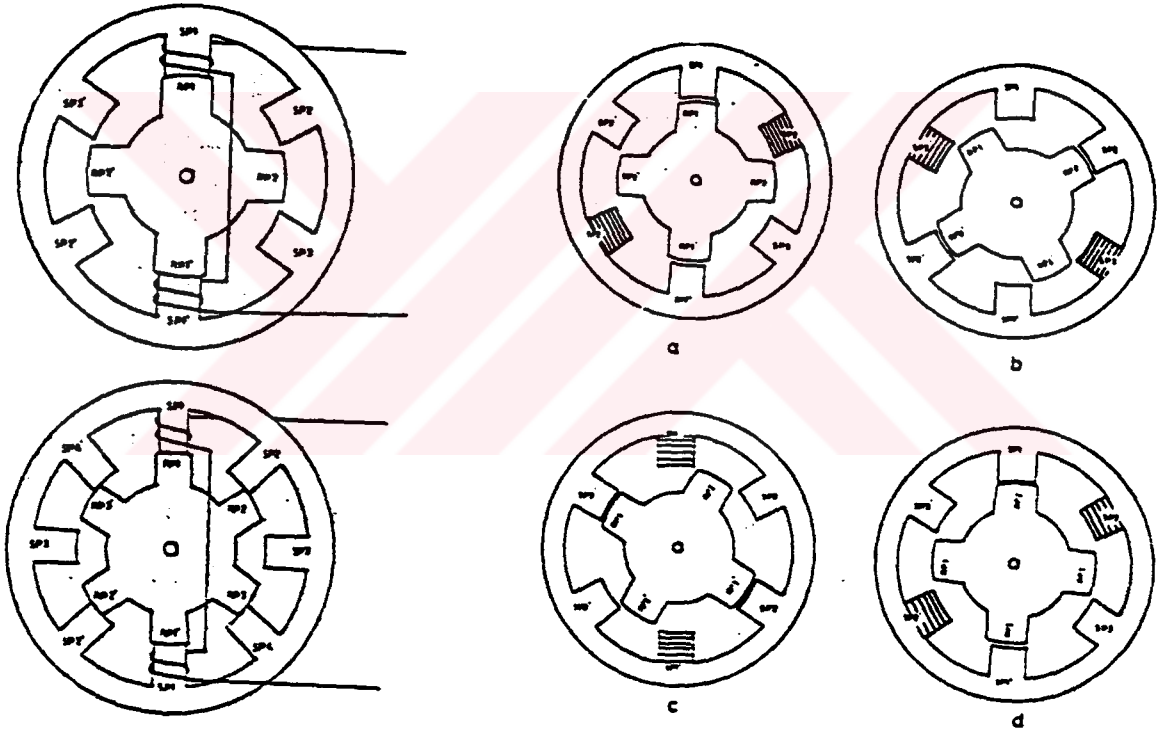
Şekil 2.1- Anahtarlı Relüktans Motorunun basitleştirilmiş şeması.

Motorun enerjilenen stator kutbu rotor kutbunda moment üretmektedir. Maksimum indüktansın olduğu, stator ve rotor kutuplarının tümüyle çakışık olduğu konumda moment sıfır olmaktadır. Anahtarlı Relüktans Motorunda momentin yönü, faz akımının yönünden bağımsızdır ve sürekli moment üretebilmek için stator fazlarının sıralı olarak uyarılması gereklidir. Rotorun sürekli olarak dönmesi için, stator fazlarının rotor dönüş yönünün tersine bir dizi ile (4-1-2-3) iletme sokulur. Kısaca, istenen dönme yönünün tersine bir uyarma

sırası izlenmelidir. 2.1. no'lu şekilde 3 fazlı bir A.R. Motorunun prensip şeması gösterilmektedir.

Bu bölümde, Anahtarlı Relüktans Motorlarının temel çalışma esasları, çıkık kutup yapısındaki bir motorun elektronik enerji dönüşümünün prensipleri, dizaynı, faz sayısı ile magnetik devre yapısı, dalgalılık gürültü ve çeşitli karakteristikleri hakkında bilgi verilecektir. [1]

2.2. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORLARININ TEMEL ÇALIŞMA PRENSİBİ



Şekil 2.2. 3 ve 4 fazlı ARM temel yapıları

Şekil 2.3. Rotorun saat yönünün tersine hareketi

A.R.Motorunun çalışması bir manyetik devrede hareketli parçanın devrenin relüktansını en aza indirecek bir konum olmak üzere. bir kuvvet üretileceği gerçeğine dayanır. Bu açıdan, şekil 2.2' de 3 fazlı (6/4 kutuplu) motor incelenirse fazlardan birini oluşturan SP1 ve SP1' kutupları enerjilendiğinde rotorun şekilde gösterilen konumda kalacağı anlaşılır. Buna karşın, 2. fazı oluşturan SP2 ve SP2' kutupları uyarıldığında, rotorun minimum relüktansı konumu olmak üzere, saat yönünün tersine; 3. fazı oluşturan SP3 ve SP3' kutupları uyarıldığında ise saat yönünde döneceği görülür. Saat yönünün tersine dönüş için 2. fazın uyarıldığını düşünelim. (şekil 2.3.a). Rotor, stator ve rotor adımları arasındaki fark kadar (30°) hareket edecektir. (şekil 2.3.b). Aynı yönde dönüşünü sürdürmek için 3. faz uyarıldığında ise saat yönünün tersine 30° daha hareket söz konusudur. (şekil 2.3.c) Rotorun her yeni fazı uyarıldığında hareket ettiği bu mesafeye adım açısı (θ) denir. 3 faz uyarıldıktan sonra hareketin sürdürülmesi isteniyorsa yeniden 1. faz enerjilendirilmelidir. Bu durumda 2 numaralı rotor kutup çifti (RP2-RP2') SP1 ve SP1' stator kutup çiftinin altında şekil 2.3.d' de görülen konumu alır, kısacası faz sayısı kadar adım açısı atıldığında rotor adımı kadar bir hareket sağlanmış olur.

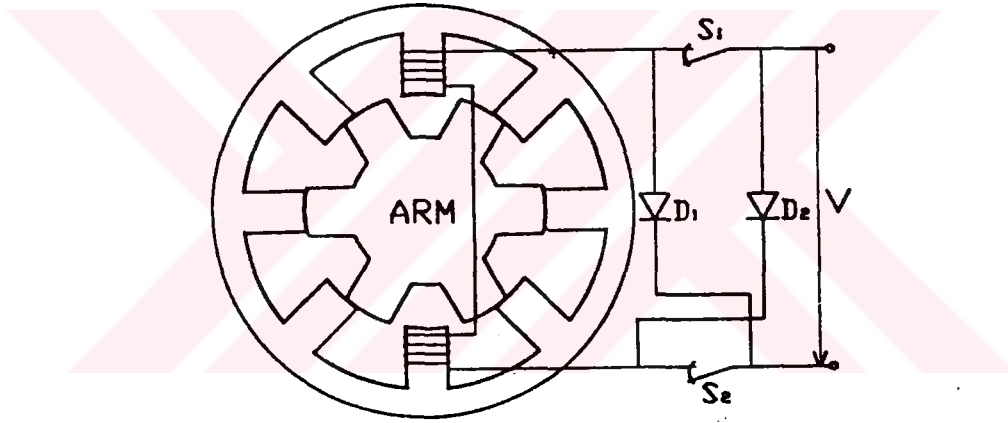
Böylece rotor dişi N_r , faz sayısı q ve adım açısı θ cinsinden aşağıdaki eşitlikleri yazılabilir. [11]

$$\text{Rotor adımı} = \frac{360^\circ}{N_r} = q \cdot \theta$$

$$\text{Adım açısı} = \theta = \frac{360^\circ}{q \cdot N_r}$$

2.4.no'lu şekil, dört fazlı Anahtarlı Relüktans Motorunun bir stator fazına alt sargısını göstermektedir. Motorun statoru üzerinde sekiz, rotoru üzerinde de altı adet çıkık kutup bulunmaktadır. Stator kutuplarının her birisi uyarma sargılarını taşır. Karşılıklı olarak sargılar bir fazın N ve S kutup çifti için seri olarak birleştirilmiştir. Rotor elektriksel bir devreye sahip değildir.

Kutupların farklı sayıda olması ve farklı adım açısına sahip olmaları , faz sayısını tanımlamaktadır. Bu kutupların farklı sayılarda birleşimi tasarım konusunda detaylı bir biçimde tekrar incelenecektir. Şekil 2.2' de verilen dört fazlı motor örneğinde 8/6 kutup sayısında olan motor 15° adım açısına sahiptir. Uygulamada dört fazlı motorların, özellikle akülü taşıtlar ve bazı endüstri uygulamaları için uygun olduğu bilinmektedir. Şekilde S_1 ve S_2 anahtarları ile doğru akım kaynağından uyarılan bir faz sargısı gösterilmektedir. Anahtarlar kapandığı zaman, doğru gerilim kaynağı ile uyarılan faz sargılarından akım akmaktadır. Anahtarlar açıldığı zaman ise, akım D_1 ve D_2 diyotlarından geçer. Faz sargısı akımın azalmasına neden olan ters yöndeki gerilim değerini görür ve enerjinin kaynağa geri dönmesini sağlar. [1,11,12,13,14,15]



Şekil 2.4. Dört fazlı Anahtarlı Relüktans Motorunun tek bir fazına ait anahtarlama devresi.

2.2.1. İNDÜKTANS DEĞİŞİMİ VE MOTOR MOMENTİNİN ÇIKARILMASI

Magnetik devrede uyarılan faz sargısına ait olan stator kutbunun rotor kutbu ile, üst üste çakışmaya başladığı minimum indüktans konumunda

moment oluşmaya başlar. Rotor kutbu ile stator kutbunun tümüyle çakışık olduğu konuma; kısaca maksimum indüktans değerine ulaşana kadar, pozitif moment üretilir. Moment, sargı akımının yönünden bağımsızdır, bu nedenle tek yönlü akım kullanılabilir. Motorun, lineer olmayan magnetik yapısından dolayı moment ifadesi, W_a ko-enerjisinin (bütünleyen enerji) bir ifadesi olarak gösterilebilir.

$$T(\theta, i) = \frac{\delta W_a(\theta, i)}{\delta \theta} \Big|_{i = \text{sabit}} \quad (2.1)$$

Yukarıdaki ifadede θ , rotorun dönüş açısı, i , stator sargısından geçen akımdır. Akımın ani değeri ile rotor konumuna bağlı ko-enerjisinin değişimi moment olarak tanımlanabilir. Moment ifadesinin magnetik olarak lineer olduğunu varsayarak, devrenin indüktansının θ 'nın fonksiyonuna bağlı değişimi aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$T(\theta, i) = \frac{i^2}{2} \frac{dL}{d\theta} \quad (2.2)$$

Moment ifadesinde L , θ 'nın herhangi bir değerindeki devrenin self indüktans değeridir. Burada magnetik doyma ihmal edilerek, stator kutup eni (l_s) ile rotor kutup eni (l_r)'nin oluşturduğu rotor konumuna bağlı belirli bir indüktans profili ve sabit stator sargı akımının yarattığı momentin değişimleri 2.5 no'lu şekilde verilmektedir. Bu değişim 4 fazlı, 8 / 6 kutup sayısında olan bir motor için düzenlenmiştir. Bilindiği gibi, stator sargısının indüktansı, rotor konumu ile çevrim içinde değişir ve

$$\theta_{\text{çev}} = \frac{360}{N_r} = q \cdot \theta \quad (2.3)$$

şeklinde tanımlanan açısal periyoda sahiptir. Burada N_r ; rotor kutup sayısını, q faz sayısını, θ ise adım açısını tanımlamaktadır.

Stator kutup eni 21° , rotor kutup eni 24° olan motor örneği esas alınarak , aşağıdaki şekilde faz indüktansı ile sargının momenti tanımlanmaktadır. Motorun magnetik olarak lineer olduğu varsayılarak değişimler gösterilmiştir. Davranışı fiziksel olarak inceleyebilmek için, indüktansın değişim bölgelerini tanımlamak gereklidir.

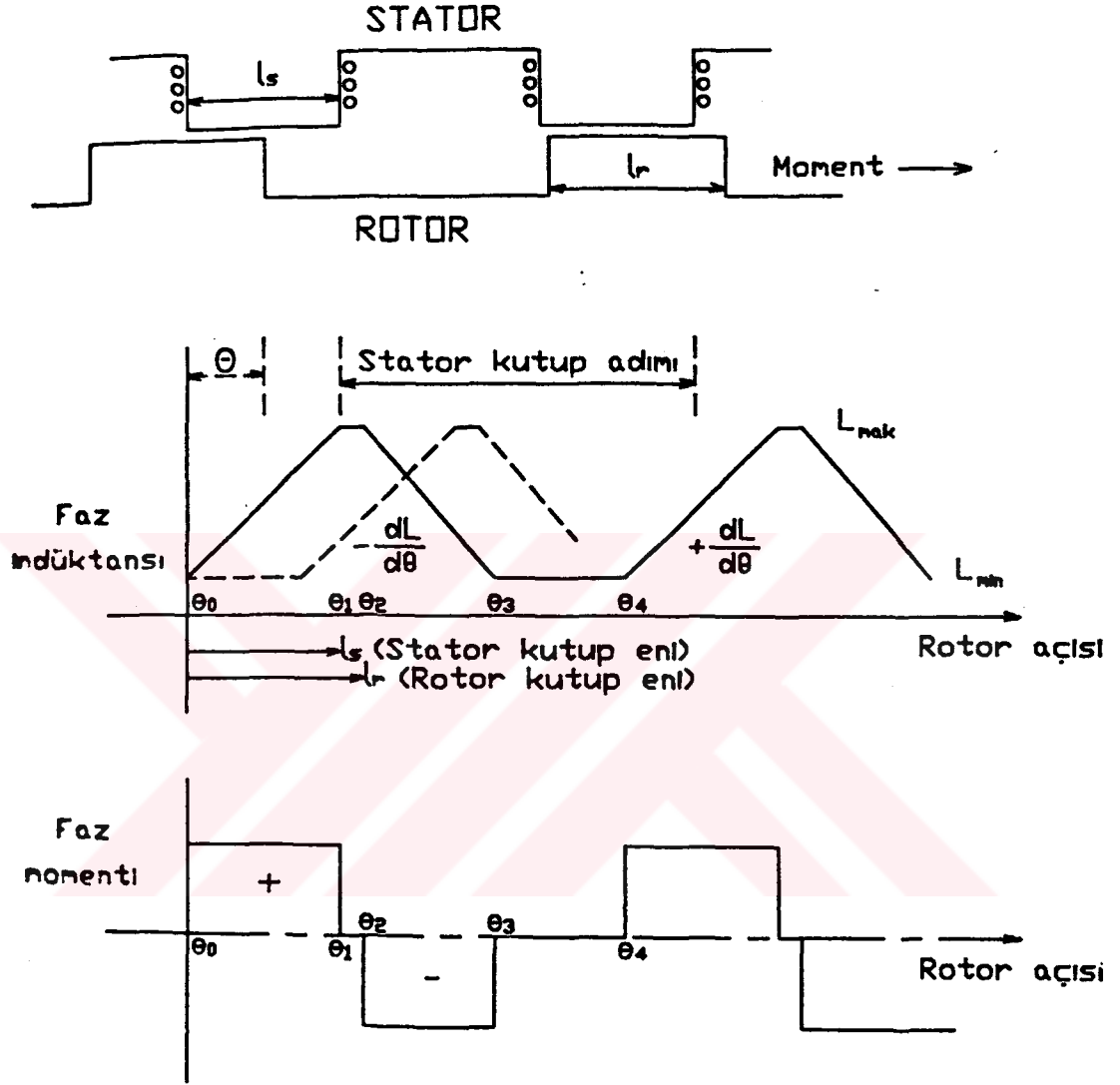
a) $\theta_0 - \theta_1$ bölgesi : Bu bölgede rotor ile stator kutuplarının kutup kenarları karşılaşır ve indüktans dönme hareketi ile birlikte lineer olarak artmaya başlar ($+ dL / d\theta$). θ_1 konumunda kutuplar tamamen çakışmaya kadar sürer. Bu noktada indüktans (L_{mak}) maksimum değerine ulaşır.

b) $\theta_1 - \theta_2$ bölgesi : θ_1 ve θ_2 konumları arasında indüktans, maksimum değerinde sabit kalır. Bu bölgede rotor ve stator kutuplarının eninin farkından oluşan "ölü bölge" olarak tanımlanır ve şekildeki örnekte yaklaşık 3° olarak gösterilmektedir.

c) $\theta_2 - \theta_3$ bölgesi : θ_2 konumundan θ_3 'e kadar olan bölgede indüktans, minimum değerine kadar ($-dL , d\theta$) değişimi ile lineer olarak azalır.

d) $\theta_3 - \theta_4$ bölgesi : θ_3 'den θ_4 'e kadar olan bölgede ise, stator ve rotor kutupları çakışmaz. İndüktans minimum indüktans değerinde sabit kalır.

Sabit motor sarım akımı için, momentin değişimi (2.2) eşitliği tanımından 2.5 no'lu egrideki ikinci grafikte verilmektedir. Moment-indüktansın değişimi sırasında, sarımda akım uygun zamanlarda anahtarlama sureti ile basit olarak motor hareketini tanımlayan pozitif momenti, generatör hareketini tanımlayan negatif momenti verecek şekilde kontrol edilebilir. Şekilde örneğin verilen dört fazlı motorda 15° dönme açısına karşılık moment oluşmaktadır ve burada tanımlanan rotor kutup adımı 60° 'dir. Bu da magnetik olarak lineer varsayılan motorun her fazı, saat yönünde ya da saat yönünün tersine dönecek şekilde, sırasıyla aynı akım değeri ile uyarıldığında çok düzgün bir moment elde edilebilir. [14,15]



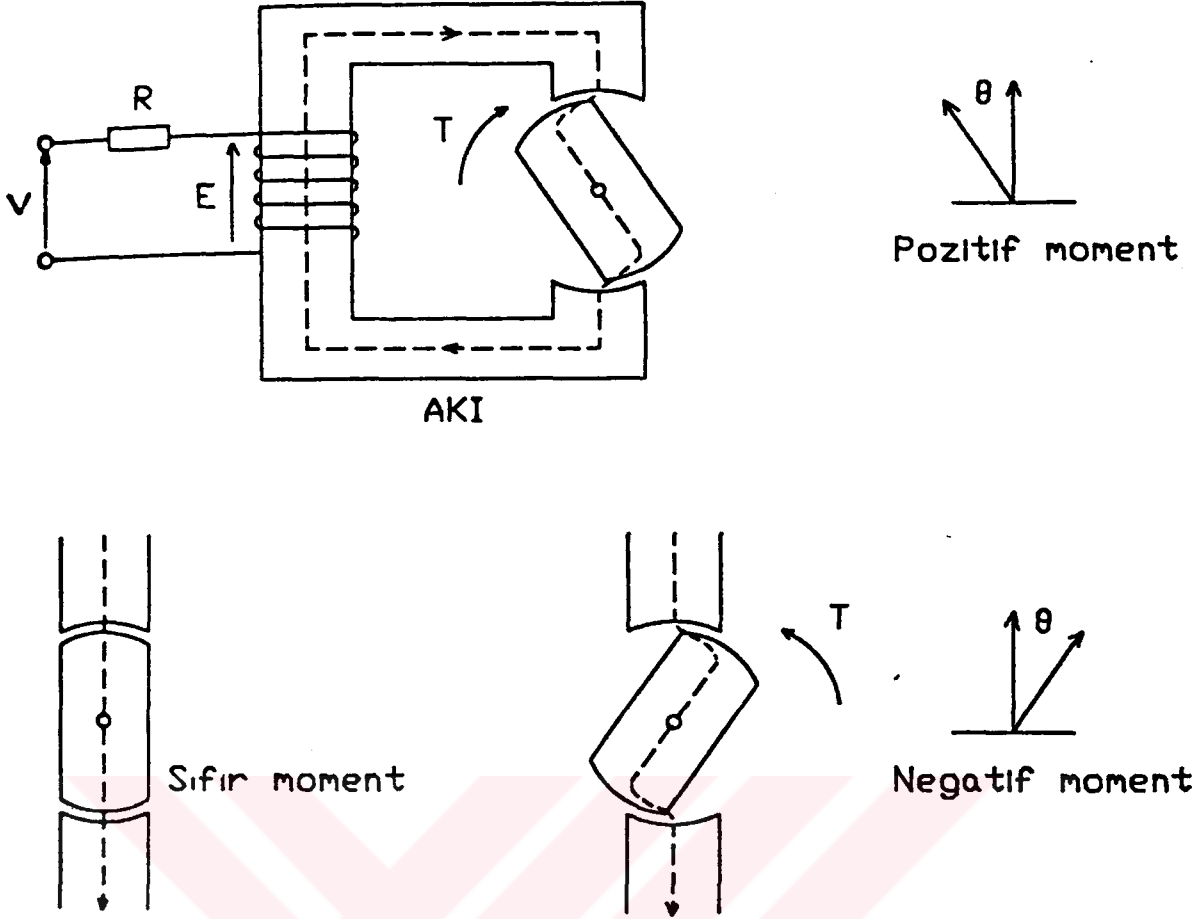
Şekil 2.5. Anahtarlı Relüktans Motorunda rotor konumunun fonksiyonuna bağlı indüktans ile sabit akım değeri için momentin değişimi (magnetik olarak motorun lineer olduğu kabul edilmektedir).

2.2.1.1. TEK FAZLI MOTORDA MOMENT ÜRETİMİ

Tek fazlı motorda momentin üretilmesi prensibi 2.6 no'lu şekilde basit olarak tanımlanmaktadır. Stator ve rotor kutupları uyarıldığında, kutuplar arasında çekime neden olmaktadır. Bu çekim, uygulanan faz akımının yönünden bağımsız oluşan dönme momenti ile sonuçlanır. Rotor, indüktans artışında olduğu gibi bir yönde hareket eder. Kısacası bitişik rotor kutbu, uyarılan stator kutbu ile düzgün bir konuma doğru çekilir. Artan indüktansın oluşması ile, her fazda pozitif moment üretmek için senkronize olarak uyarılır. Tek fazlı motorda pozitif moment 90° 'de üretilir. Toplam pozitif ve negatif moment üretmek için 180° lik adım açısı gereklidir. [1,12,13,14,15]

2.2.1.2. DÖRT FAZLI ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUNDA MOMENT ÜRETİMİ

Dört fazlı A.R. Motorunda momentin oluşmasını gösteren eğri şekil 2.5'te tanımlanmaktadır. Burada rotor konumunun toplam indüktans değişimi 60° olarak gösterilmektedir. Bu değere karşılık pozitif moment 30° 'de üretilmektedir. Negatif moment ise, rotor kutbunun ilgili olduğu stator ekseninden ayrıldığı konumda oluşur. Sabit bir moment elde edebilmek için, faz akımları rotor konumunun fonksiyonu olarak kontrol edilmelidir. Ayrıca, rotor konumlarının da doğru bir biçimde seziciler ile farkedilmesi gereklidir. Bu da A.R. Motorlarında yerleştirilmiş optik konum sezicileri ile yapılmaktadır. [1,12,13,14,15]



Şekil 2.6. Tek fazlı çift taraflı çıkıntılı kutup yapısına sahip olan bir makinada relüktans momentinin üretilmesi.

2.3. ÇİFT TARAFLI ÇIKIK KUTUPLU BİR YAPIDA ELEKTROMEKANİK ENERJİ DÖNÜŞÜMÜNÜN TEMEL PRENSİPLERİ

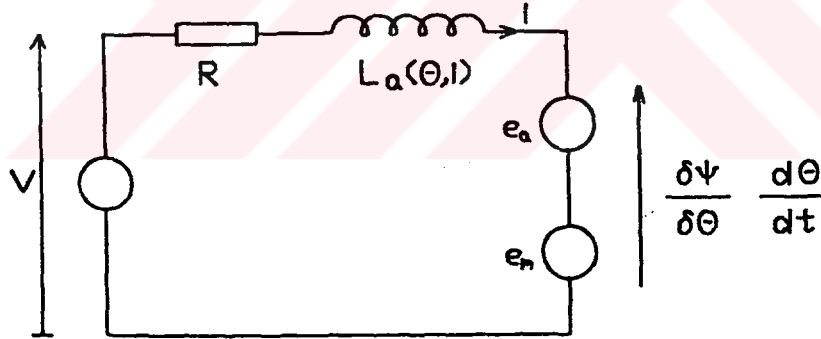
Anahtarlı Relüktans Motorunun çalışma prensibini daha detaylı anlayabilmek için, inceleme, çift taraflı çıkık kutuplu basit bir yapıda yapılacaktır. Tek fazlı makina, şekil 2.6' daki gibi çıkık kutupları olan rotor ve stator çiftini içermektedir. Şekilde üç farklı rotor konumunun pozitif, Sıfır ve negatif moment üretme durumları tanımlanmaktadır. Şekilde gösterilen basit makina yapısının bir tek faz için gerilim eşitliği,

$$V = R \cdot i + \frac{d\psi}{dt} (\theta, i) \quad (2.4)$$

biçimindedir. Eşitlikte $\psi (\theta, i)$ magnetik devrenin stator sargısı için, lineer olmayan yapısına bağlı, rotor açısı ile akımın bir fonksiyonu olan manyetik alan akısıdır. V ; sargıya uygulanan gerilim, R ; stator faz sargısının direnci, i ; sargı akımıdır. (2.4) eşitliğini θ ve i gibi iki değişkene bağlı akı fonksiyonunun kısmi türevini alarak yeniden düzenlersek;

$$V = R \cdot i + \frac{\delta\psi}{\delta i} \frac{di}{dt} + \frac{\delta\psi}{\delta\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (2.5)$$

biçiminde yazılabilir.



$i \cdot e_m$: mekanik çıkış gücü,

e_a : İndüktans değişimine bağlı olarak depolanan magnetik alan enerjisiyle orantılı ters EMK

Şekil 2.7. Anahtarlı Relüktans Motorunun bir fazı için elektrik eşdeğer devresi.

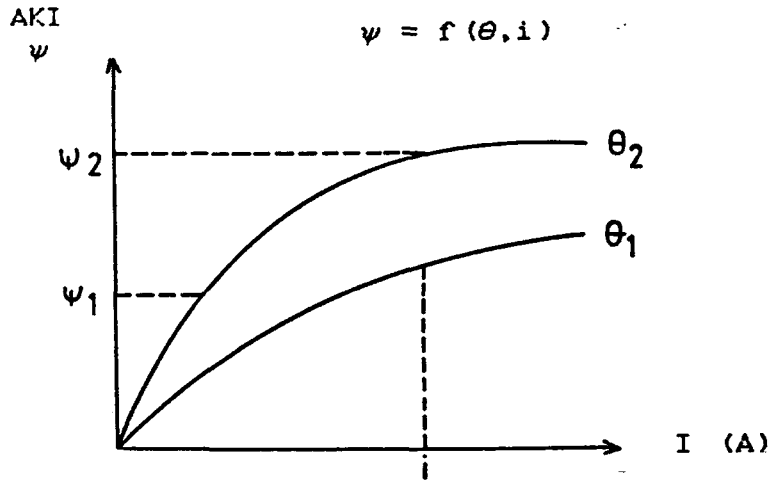
Motorunda oluşan ve (2.5) bağıntısında kısmi türev ile gösterilen gerilim ifadeleri aşağıdaki biçimde tanımlanabilir.

$R \cdot i$: Sarımın R direncinin oluşturduğu gerilim düşümü

$$\frac{\delta\psi}{\delta\theta} \frac{d\theta}{dt} : \text{Ters elektromotor kuvveti,}$$

$$\frac{\delta\psi}{\delta i} \frac{di}{dt} : \text{Artan indüktans etkisi ile oluşan gerilim}$$

Diğer elektrik makinalarına benzemeyen, akının akıma ve rotor konumuna bağlı ifadelerinin katsayısı olarak değil de değişken olarak alınması motor performansının elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, basit eşdeğer devre tanımı ile motortun momentini ve enerjisini kolayca hesaplamak mümkün değildir. Ancak, tanımlanan eşdeğer devre, güç elektroniği ile kontrol sisteminin tasarımı dikkate alındığında, Anahtarlı Relüktans Motor tahriği için oldukça kullanışlı bir model oluşturmaktadır.



Şekil 2.8. Basit bir yapıya sahip A.R. Makinasının sabit rotor konumu için mıknatıslanma eğrisi.

Yukarıda tanımlanan eğri sabit bir rotor konumu için magnetik alan akısının akıma bağlı değişimini göstermektedir. Bu değişim, rotor ile stator kutbunun birbirine yakın olduğu konumda, doymanın olduğu bölge için tanımlanmaktadır.

$$\text{Enerji} = W_{\alpha} = \int_0^{\psi} i(\psi, \theta) d\psi \Big|_{\theta = \text{sabit}} \quad (2.6)$$

$$\text{Ko-enerji} = W_{\alpha}' = \int_0^i \psi(i, \theta) di \Big|_{\theta = \text{sabit}} \quad (2.7)$$

Eğrinin altında kalan bölge, magnetik alanda depolanan ko-enerjiyi göstermektedir. Ko-enerji fiziksel bir büyüklük değildir. Yalnızca, matematiksel bir analiz yapabilmek için gereklidir. Kayıpları ihmal edersek, enerjinin dengesi prensibine dayanarak giriş elektrik enerjisi, geçiş periyodu süresince alanda depolanan enerji (ko-enerji) ile mekanik çıkış enerjisinin toplamına eşittir.

$$dW_e = dW_{\alpha}(\psi, \theta) + dW_m \quad (2.8)$$

Yukarıdaki ifadedeki mekaniksel çıkış enerjisi yerine ($dW_m = T d\theta$) tanımı konulursa yeni ifade şu şekilde olur.

$$dW_{\theta} = dW_{\alpha}(\psi, \theta) + T(\psi, \theta) d\theta \quad (2.9)$$

$$dW_{\alpha}(\psi, \theta) = dW_e - T(\psi, \theta) d\theta \quad (2.10)$$

$dW_{\alpha}(\psi, \theta)$, iki değişkene olan alan enerjisinin kısmi türevi;

$$dW_{\alpha}(\psi, \theta) = \frac{\delta W_{\alpha}}{\delta \psi}(\psi, \theta) d\psi + \frac{\delta W_{\alpha}}{\delta \theta}(\psi, \theta) d\theta \quad (2.11)$$

biçimindedir. ψ ve θ ifadeleri burada bağımsız değişkenler olduğundan (2.10) ve (2.11) eşitliklerindeki katsayılar da eşit olmalıdır. Buradan;

$$T(\psi, \theta) = - \frac{\delta W_{\alpha}}{\delta \theta}(\psi, \theta) \quad (2.12)$$

$$dW_e = e \cdot i \cdot dt = i \cdot d\psi \quad (2.13)$$

şeklinde tanımlanabilir, ve buradan $i = \frac{\delta W_{\alpha}}{\delta \psi}(\psi, \theta)$ değişimi elde edilir. Enerji ile ko-enerji arasındaki ilişki,

$$W_{\alpha} + W'_{\alpha} = \psi \cdot i \quad \text{veya} \quad W_{\alpha} = \psi \cdot i - W'_{\alpha} \quad (2.14)$$

şeklindedir. Ve değişkenlere bağlı diferansiyeli aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$dW_{\alpha}(\psi, \theta) = d(\psi, i) - dW'_{\alpha}(i, \theta) \quad (2.15)$$

yukarıdaki ifade için önceki bağıntıda tanımlanan enerjinin dengesi eşitliğine dönersek;

$$d(\psi, i) - dW'_{\alpha}(i, \theta) = i \cdot d\psi - T \cdot d\theta \quad (2.16)$$

veya

$$dW_{\alpha}(i, \theta) = d(\psi, i) - i \cdot d\psi + T \cdot d\theta$$

olarak yazılabilir. $d(\psi, i) = i \cdot d\psi + \psi \cdot di$ şeklinde açıklanabildiği için yukarıdaki eşitlikte karşılığı yerine konulursa;

$$dW'_\alpha (i,\theta) = i.d\psi + \psi.di - i.d\psi + T.d\theta \quad (2.17)$$

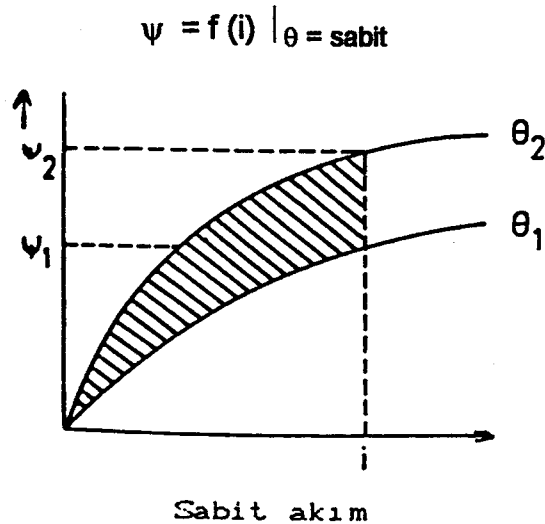
$$dW'_a (i,\theta) = \psi.di + T.d\theta$$

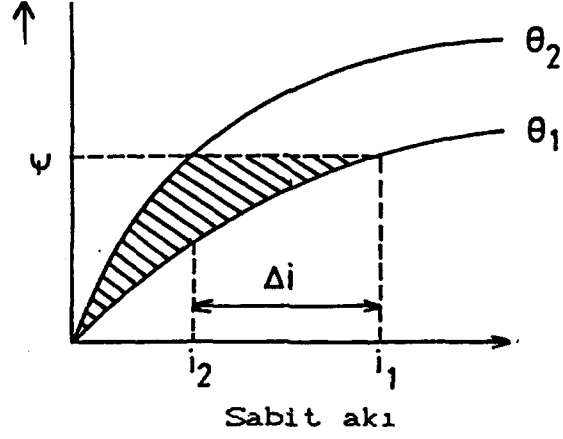
bulunur. (2.17) de elde ettiğimiz ko-enerjinin değişim eşitliği (2.10) denkleminde benzer şekildedir. Burada, i ve θ bağımsız değişkenler olduğundan, $dW'_\alpha (i,\theta)$ 'nin kısmi türevlerinin katsayıları (2.17) no'lu eşitliğe benzetilirse

$$T (i,\theta) = \frac{\delta W'_\alpha (i,\theta)}{\delta \theta} \quad (2.18.a)$$

$$\psi(i,\theta) = \frac{\delta W'_\alpha (i,\theta)}{\delta i} \quad (2.18.b)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan ani moment , depolanmış enerji ile birleştirilmiş alan akısı ψ 'nin veya ko-enerji ile birleştirilmiş i akımının ifadelerinden açıklanabilir. Kısaca (2.18.a) bağıntısı ile sarımın ko-enerjisinden hesaplanmalıdır. Analiz,enerji veya ko-enerji kullanılarak yapılabilir, ancak akım ve konum açısının fonksiyonu olarak momenti elde etmek ve ko-enerji yaklaşımını kullanmak daha uygundur. İleride tanımlayacağımız gibi,deneysel verileri kullanarak oluşturulan moment değerleri de bu şekilde elde edildi.





Şekil 2.9. İki farklı rotor konumunda oluşan küçük değişim için, sabit akı ve akım koşulları.

Yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi θ_1 konumundan θ_2 konumuna doğru rotor hareketi ile oluşan iki farklı durum incelenirse;

a) Rotorun yavaş hareketi ile ters elektromotor kuvvetini de ihmal edersek sabit akım i ,

b) Hızlı rotor hareketi veya kısa devre edilmiş sarım, sabit akı (ψ) değerini tanımlar.

Yukarıda açıklanan her iki durum (2.10) ve (2.17) no'lu eşitliklerde tanımlarsak

$$T = - \frac{dW_{\alpha}}{d\theta} \quad \left| \quad \begin{array}{l} \psi = \text{sabit} \end{array} \right. \quad (2.19)$$

$$T = \frac{dW'_\alpha}{d\theta} \quad \left| \quad i = \text{sabit} \right. \quad (2.20)$$

ifadeleri bulunur. Bu açıklamalar, momentin, sabit akıda toplanan enerjiyi azaltacak, sabit akımda ise ko-enerjiyi arttıracak şekilde hareket ettiğini göstermektedir. Bunun anlamı, momentin indüktansı arttığı veya magnetik devrenin relüktansını azalttığı durumudur. Magnetik doymanın olmadığı lineer bir sisteminin enerji ve ko-enerji eşittir.

$$W_\alpha = W'_\alpha = \frac{1}{2} \psi \cdot i = \frac{1}{2} L \cdot i^2 \quad (\psi = L \cdot i) \quad (2.21)$$

Buradan hareketle lineer durum için ani moment ifadesi (2.2) eşitliğindeki gibi yazılabilir.

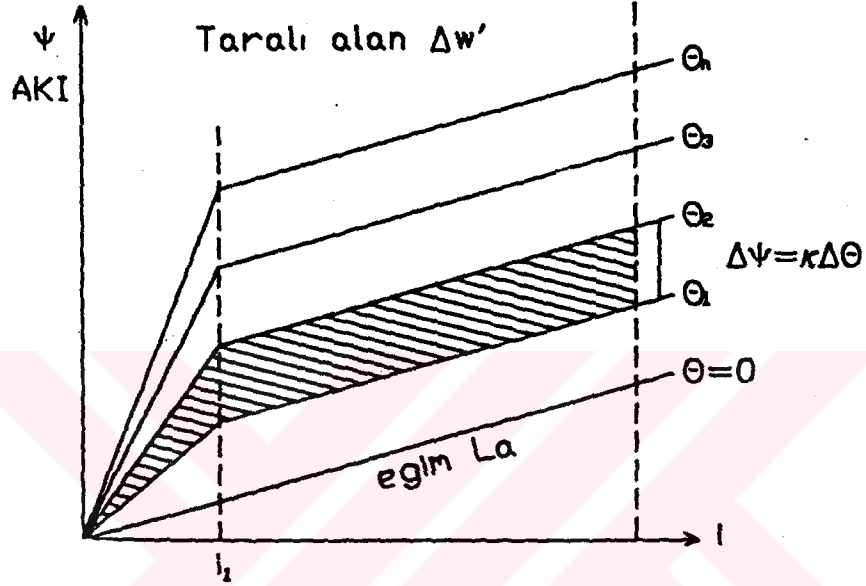
$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2.2)$$

Bu eşitliklerin çözümü, magnetik malzemenin lineer olmayışından dolayı çok zordur.. Bu nedenle eşitliklerin çözümü için değişik sayısal yöntemler bulunmaktadır.

$$\psi = L_\alpha \cdot i + k \cdot \theta \quad (i \geq i_1, 0 \leq \theta \leq \theta_n) \quad (2.22)$$

$$\psi = \left[L_\alpha + \frac{k \cdot \theta}{i_1} \right] \cdot i \quad (i \leq i_1, 0 \leq \theta \leq \theta_n) \quad (2.23)$$

$$\psi = f(i)$$



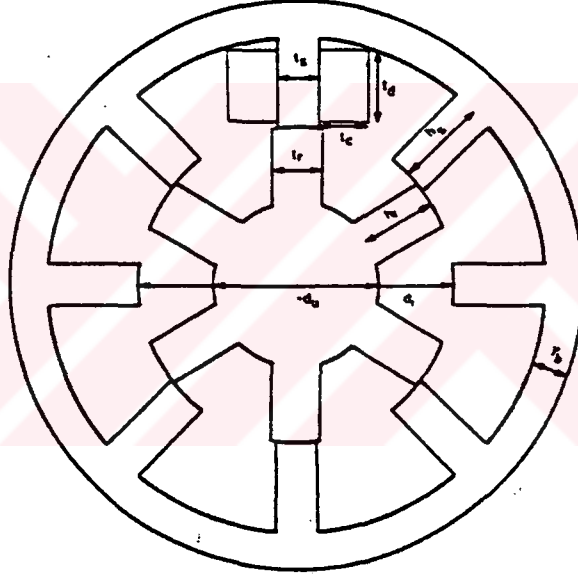
Şekil 2.10. Yarı lineer akı karakteristikleri .

Yukarıda gösterilen karakteristiklerin yaklaşıklığını veren denklemlerde L_{α} k ve i_1 değerleri sabit ve θ artan indüktans periyoduna karşılık elde edilen rotor konumudur. Ancak bu model sadece pratikte yardımcı olabilen tahminleri yapabilir. Bunlar;

- i) Moment akımı ile artar.
- ii) Magnetik alanda depolanan enerjiye dönüşen enerjinin oranı, doymuş bir motor için büyüktür.[1]

2.4. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUNUN TASARIM NİTELİKLERİ

A.R. Motorunun tasarımı için hesaplamalarda kullanılan yapısal değişkenleri (tipik bir 4 fazlı ARM'nin kesiti üzerinde) şekil 2.11' de gösterilmiştir.



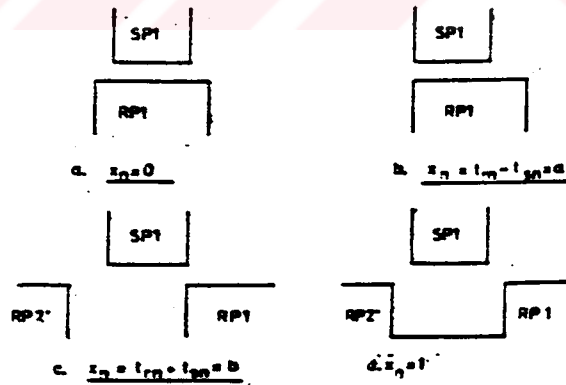
Şekil 2.11. Tipik bir ARM ve yapısal değişkenleri

$$t_{sn} = \frac{t_s}{\lambda r} \quad t_{sn} : \text{Normalize stator kutup eni} \quad (2.23 a)$$

$$t_{rn} = \frac{t_r}{\lambda r} \quad t_{rn} : \text{Normalize rotor kutup eni} \quad (2.23 b)$$

$$x_n = \frac{x}{\lambda r/2} \quad x_n : \text{Normalize rotor konumu} \quad (2.23 c)$$

Görüldüğü gibi normalize parametrelerin tümü boyutsuzdur. Yukarıda gösterilen normalize konum tanımıyla maksimum permeans konumu $x_n = 0$, minimum permeans konumu ise $x_n = \pm 1$ normalize konumlarına karşılık gelmektedir. Şekil 2.13' de dört ayrı normalize konum için rotor ve stator kutuplarının göreceli yerleri görülmektedir.



Şekil 2.13. Dört ayrı normalize konum için stator rotor kutuplarının göreceli yerleri

Makina için tasarım nitelikleri; kaynak gerilim değeri, moment / hız karakteristiği, sürekli yükleme karakteristiği, efektif görev çevirimi, kalkışı, dönüş yönü, frenleme ve kontrol gerekliliği, sıcaklık artışı, soğutma yöntemi, montaj düzeni, verimlilik, gürültü, moment dalgalılığı ve boyutlarının sınırlandırılması gibi konuları kapsamaktadır. Optimum motor tasarımı, yukarıda belirtilen özellikler dikkate alınarak yapılmalıdır. Motorun tasarımı, tahrik sisteminin belirli bir uygulama şekli için ciddi bir biçimde düzenlenmelidir, ya da genel amaçlı tahrik için uygun bir tasarım da yapılabilir. Genel olarak konvansiyonel makinaların tasarımı, çıkış denklemleri çıkartılarak yapılır. Anahtarlı Relüktans Motorunun tasarım sistematiğini oluşturmak için bu denklemlerden faydalanılır. Bu bölümde, motorun magnetik dizaynında faz sayılarının seçimi ile ilgili değişik yapılara göz atılacaktır.

Anahtarlı Relüktans Motorunun başlıca tasarım seçimleri aşağıda belirtilen tanımlar dikkate alınarak yapılabilir.

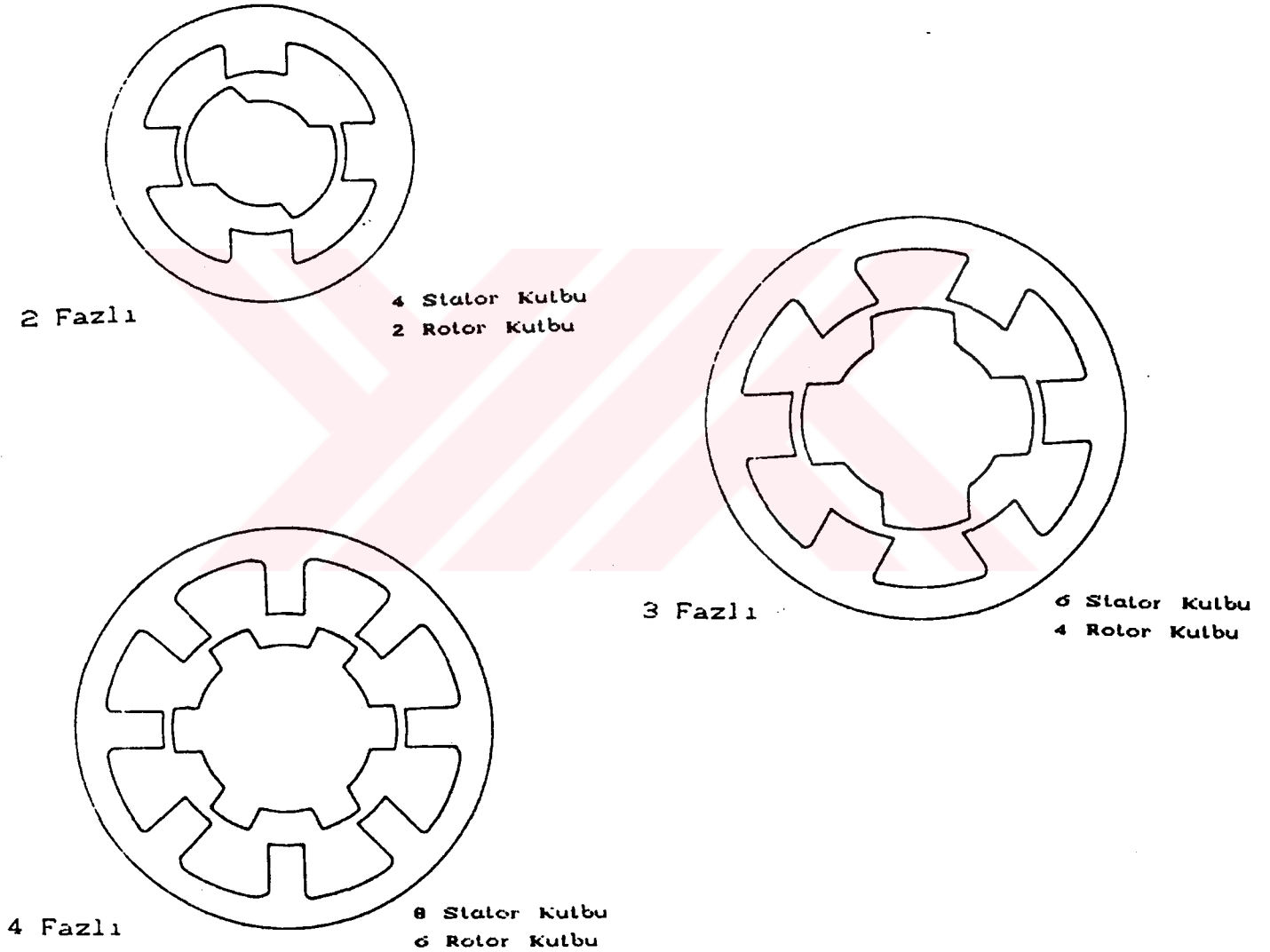
- Faz sayısı, (q)
- Stator kutup sayısı, (N_s)
- Rotor kutup sayısı, (N_r)
- Stator ve rotor kutup eni, (l_s , l_r)
- Hava aralığı, (δ)
- Stator kutbu sarım sayısı, (s)

2.4.1. FAZ SAYISI , STATOR VE ROTOR KUTUP SAYISI

Stator ve rotor kutuplarının sayısı, faz sayısı ve her stator kutbunun diş sayısı, dikkate alınması gereken başlıca tasarım parametreleridir. Stator kutup sayısının rotor kutup sayısına oranı, tasarımcıya çok geniş seçim kriterleri sunmaktadır. Şekil 2.14' de gösterilen Anahtarlı Relüktans Motorunun pratik olarak magnetik geometrileri 2 , 3 ve 4 fazlı olan yapıları, en çok karşılaşılan türleridir. Motorlar herhangi bir konumdan kalkış yapabilecek şekilde dizayn edilir. Ayrıca tahrik devresinin maliyeti ve karmaşıklığı dikkate alınmazsa faz sayılarının büyük olmasının, momentin dalgalılığını azaltıcı etkisi olduğu belirtilmektedir. Şekil 2.14' de tanımlanan motorların rotor ve stator kombinasyonlarına göre sayıları aşağıdaki gibidir. [9,10,13]

- a) $N_s = 4, N_r = 2$ kutup sayıları için; iki fazlı motor,
- b) $N_s = 6, N_r = 4$ kutup sayıları için; üç fazlı motor,
- c) $N_s = 8, N_r = 6$ kutup sayıları için; dört fazlı motor,

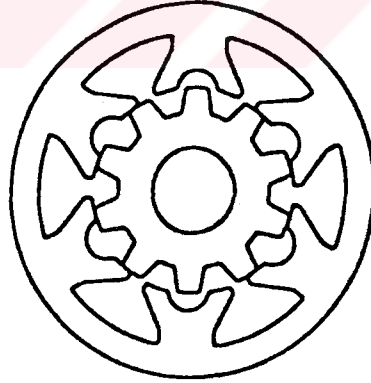
Genelde, rotor kutup sayısının mümkün olduğu kadar az sayıda olması, anahtarlama frekansını düşük kılmak açısından faydalı olabilir. Ancak, bu gerekli kalkış momentine ve ters yönde çalışmaya etki eder.



Şekil 2.14. Anahtarlı Relüktans Motorlarının pratikte tanımlanan bazı yapıları.

Bu arada çift taraflı çıkık kutupların sayılarının artırılmasında mümkündür., örneğin 3 fazlı, 12 adet stator ve 8 adet rotor kutbu bulunan motor, 15° 'lik adım açısına sahiptir. Oysa- aynı faz sayısına sahip ve 6 / 4 kutup kombinasyonu olan motor için adım açısı 30° dir. Ayrıca, belirli bir hızda, anahtarlama frekansı da bu kez iki katlı olacaktır. Kutuplarda aynı akı yoğunluğunu oluşturmak için motorda yaklaşık iki katı daha fazla magnemotor kuvveti gereklidir. Momentin salınımını azaltmak ve kontrollu bir şekilde doymayı sağlamak için, magnetik devrede statorun arka çekirdek bölgesinde demir kayıplarını minimum kılmak amacı ile yeni bir stator yapısı ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca, rotor kutup sayısının stator kutup sayısından daha fazla olduğu ilginç bir çalışma da, tasarım konusunda gerçekleştirilen bir başka ilginç yapıdır.

Şekil 2.15' de ise herbir stator kutbunda iki dişi olan 3 fazlı bir motor tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 2.15 . 3 fazlı ve çok dişli A.R. Motorun yapısı.

Üç fazlı kutup başına çok dişli motorların tasarımı yapılarak, bu sayede moment, diş sayısı ile orantılı olarak arttırılabilir. Ancak, çok detaylı bir tasarım çalışması gerektiğinden ve anahtarlama frekansı ile orantılı olarak artan maliyet ve doyma etkileri nedeni ile bu yapıdaki uygulamalar daha çok düşük hız uygulamalarında ve megamoment değerinde moment gerektiren endüstri uygulamalarında (örneğin, robotlarda) kullanılması daha uygundur. Ayrıca, çift taraflı çıkık kutup yapısında olan anizotropik, silindirik rotor yapısı için moment üretimi ile ilgili teorik çalışmalar yapılmaktadır. [1]

2.4.2. STATOR VE ROTOR KUTUP ENİ

Stator ve kutup enlerinin seçimi, tahrik sisteminin isteklerine bağlıdır. Bilindiği gibi kutup enlerinin belirli değerleri, motorun tek bir fazı için, şekil 2.6' da gösterildiği gibi indüktans / rotor açısı değişimini dikkate alması yönünden yararlıdır. Negatif moment üretiminden kurtulmak veya her fazın pozitif ve negatif moment üretme bölgelerinin ayrılması için rotor kutuplarının eni, stator kutuplarının eninden daha geniş yapılır. Bu, faz akımı azalırken zaman periyodu süresince dönüş esnasında sağlanır ve burada negatif momentten kurtulunur. Bu bölümde tasarım konusunda çok fazla ayrıntıya girilmeyecektir. Ancak motorun tanıtılması amacı ile temel kavramlar üzerinde durulmaktadır. Rotor kutbu ile stator kutbunun faz sayısı ile kutup sayılarına bağlı değişimleri aşağıdaki gibidir. Kutup enlerinin minimum değerleri için; [1,6,13,15]

$$\min (I_r \cdot I_s) > \frac{2}{q \cdot N_r} \quad (2.24)$$

$$I_s \leq \frac{2}{N_r} - I_r \quad (2.25)$$

$$\text{Eğer } I_s > I_r \text{ ise, } (\min) I_r = \frac{2}{q \cdot N_r}$$

olarak elde edilir. Böylece;

$$(\max) I_s = \frac{2}{N_r} \left(1 - \frac{1}{q}\right) \quad (2.26)$$

şeklinde olur.

$$\text{Eğer } I_s < I_r \text{ ise, } (\min) I_s = \frac{2}{q \cdot N_r} \quad (2.27)$$

olarak elde edilir. Burada I_r ve I_s 'nin her ikisinde de faz sayısı q 'nun artmasına bağlı olarak artar, N_r rotor kutup sayısının artışıyla da azalır. Bu da;

$$(I_r + I_s) \leq \frac{2}{N_r} \quad (2.28)$$

tanımıyla ifade edilir.

2.4.3. MOTORUN MAGNETİK YAPISI

Anahtarlı Relüktans Motoru lineer olmayan bir yapıya sahiptir ve iki farklı rotor konumu arasında indüktans değeri büyük farklılık gösterir.

2.4.3.1. MAGNETİK DEVRE YAPISI VE HAVA ARALIĞI ETKİSİ

Anahtarlı Relüktans Motorunun çift taraflı çıkık stator ve rotor kutup yapısından dolayı oluşan hava aralığı değerleri çok farklıdır. Enerjilenen hareketli kısmı maksimum indüktans konumuna doğru çekecek şekilde kuvvet oluşur. Bu da artan indüktans bölgesinde momentin üretilmesi olarak tanımlanmıştır. Kutupların çakışık olduğu konumda hava aralığı çok küçük yapılmıştır. Böylece motor doyma bölgesinde çalıştırılabilir. Doymanın olduğu bölge için daha büyük bir ko-enerji ve daha fazla moment üretilir. [1]

2.4.3.2. MAGNETİK DOYMANIN OLUMLU VE OLUMSUZ ETKİLERİ

Anahtarlı Relüktans Motorunun çıkış gücü ve momenti, doyma noktasının üzerinde motorun uyarımı arttığı sürece sürekli olarak artar. Bu artış magnetik devre içindeki doyma ile sınırlı olduğundan sürekli değildir. Doymamış Anahtarlı Relüktans Motoru için giriş elektrik enerjisinin yarısından daha azı mekanik enerjiye dönüşür oysa,doymuş A.R. Motoru için giriş enerjisinin yarısından daha fazlası mekanik enerjiye dönüşür. Kısaca mekanik enerjiye dönüşen elektrik enerjisinin oranı artar., A.R. motoru eviricisinde güç girişinin azalmasına neden olan elektrik enerjisine daha az gereksinim duyar. Motorun verimliliği artar ve kayıpları azalır. Motorda doymanın düzgün kullanılması ile tahrik sisteminin besleme gerilimi gereksinimini azaltabilir veya alternatif olarak maksimum faz akımını azaltır.

Motorda doymanın tek olumsuz etkisi verimin azalmasıdır. Oysa doyma, Anahtarlı Relüktans Motorunda dolaşan enerjiyi azaltığından verimdeki artış fazla önemli değildir. [1]

2.5. MEKANİK DİZAYN VE ISIL İŞLETİMİN ÖNEMİ

Bilindiği gibi Anahtarlı Relüktans Motoru mekanik olarak basit ve kuvvetli bir yapıya sahiptir. Motoru basit kılan en belirgin özellik rotor üzerinde elektrik iletkenlerin olmayışıdır, bu da yüksek hızlarda çalışmak için çok uygundur. Rotor lamelleri birbiriyle birleştirilip yığın haline getirilerek rotor oluşturulur. Sator yapısı ise, benzer şekilde kurulan lameller ile basittir ve sarımlar çıkık kutuplar üzerine sarılmıştır. Konvensiyonel sarımlara karşın avantajlarından birisi de sarımlar arası geçişlerin olmayışı ve uçlarının el ile sarılabilir olmasıdır. Sarımlardaki bakır ve demir kayıplarının yalnızca statorda olması, konvensiyonel makinalara göre A.R. motorunun üstünlüğünü oluşturmaktadır. Motorun belirli bir çalışma noktasında, bakır kayıpları efektif faz akımına bağlıdır, bu da $R \cdot I^2$ şeklinde tanımlanmaktadır. Demir kayıpları ise, magnetik devrenin kısımlarına ve anahtarlama frekansı için temel seçim kriterlerine bağlıdır. Demir ve bakır kayıpları konvensiyonel elektrik makinalarında olduğu gibi gücün büyüklüğüne ve hızına bağlıdır, özellikle demir kayıpları büyük ve hızlı motorlarda önemli bir parametredir. [1]

2.6. MOMENT DALGALILIĞI VE GÜRÜLTÜ

Anahtarlı Relüktans Motorları düzgün bir dönüş için tasarlanmıştır. Düşük hızlarda çalışma, bütün uygulamalarda kullanılabilir. Ayrıca, momentin elektromagnetik olarak oluşmadığı da göz önüne alınmalıdır. Moment ve moment salınımı, frekansı arttığı için bu sistemin ataletine de etki eder ve uygun hız değişimi azalır. 8 /6 kutuplu ve 4 fazlı motor örnek alınırsa her bir dönüş için faz uyarma sayısı 24'tür ve böylece momentin en düşük dalgalı bileşeni 60 dev / dak için 24 Hz, 1800 dev / dak için ise 720 Hz'dir. Motorda, hızın belirli bir değerine karşılık momentin, gürültü seviyesine etkisi çok azdır. % 25'in üzerinde olan moment değeri için motor gürültüsünün momente karşı duyarlı olmadığı belirtilmektedir.

Düşük hızda moment salınımı için şu açıklamalara dikkat etmek gerekir.

a) Ters yönde oluşan minimum frenleme momenti herhangi bir başlangıç konumunda oluşabilmelidir.

b) Servo sistem uygulamalarında düşük hızda çalışmada hız dalgalılığı önemlidir.

Anahtarlı Relüktans Motoru yüksek moment kabiliyetine ve düşük rotor atalet momentine sahiptir. Moment salınımının önemli olduğu servo uygulamalarda bunu azaltmak için ;

a) akımı açının bir fonksiyonu olarak uyarlamak,

b) bulk doymasını azaltmak için magnetik tasarımı değiştirmek ve akım modülasyonunu azaltmak için fazlar arasındaki geçişleri düzgün kılmak sureti ile başarılabilir. Hızdaki Dalgalanma minimum olduğunda çıkış gücü maksimuma ulaşır. Bu tip motorlarla çok düşük hızlarda çalışmak mümkündür.

Anahtarlı Relüktans Motorunun gürültü problemini evirici beslemeli asenkron motorlar, konverter beslemeli doğru akım motorları veya yüksek hızlı universal motorlar ile karşılaştırmaya bile gerek yoktur. Prensip olarak gürültünün kaynağı, stator uyarımında harmonikler tarafından oluşur. Motorun iyileştirilmiş mekanik tasarımı ve kontrol yöntemlerinin uygun biçimde seçilmesi ile gürültü önemli ölçüde azaltılabilir.[1]

2.7. A.R. MOTORLARININ ÇEŞİTLİ KAREKTERİSTİKLERİ

Bu bölümde Anahtarlı Relüktans Motorunun davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi için çeşitli karakteristilerine yer verilmiştir. [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]

2.7.1. MOMENT - HIZ KAREKTERİSTİĞİ

Bir A.R. Motorunun ürettiği anlık momenti;

$$T = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\theta}$$

ifadesinden hesaplanabileceği daha önce belirtilmiştir. Yine bu eşitlik yardımıyla ortalama motor momentinin;

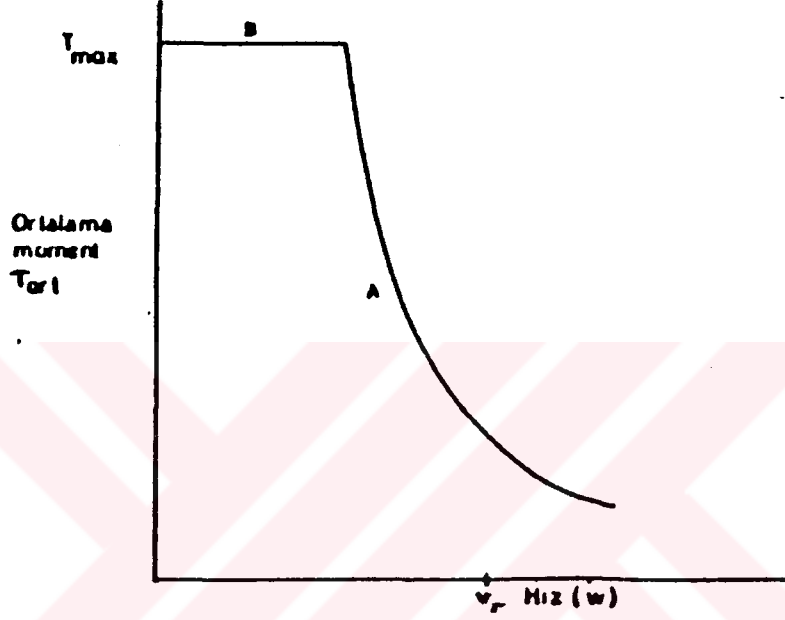
$$T_{ort} = \frac{1}{2} q \cdot \frac{\pi}{N_r} \cdot \frac{V^2}{W^2} \cdot \frac{t_{sn}}{L_j - L_o} F(t_{sn}, t_m, x_{nu}, x_{nk}, L_R)$$

$$L_R = \frac{L_j - L_o}{L_o} \quad (2.29)$$

yukarıdaki eşitlikten hesaplanabileceği gösterilebilir.

Bu eşitlikte q faz sayısı, V ise faz gerilimidir. F fonksiyonu ise gözlemlendiği gibi motor yapısına, uyarım ve kesim konumlarına bağlı karmaşık bir fonksiyondur. Bu fonksiyonun, gerek motor tasarımı, gerekse çalıştırma sırasında optimizasyonu, motor performansı açısından büyük önem taşır. Yukarıdaki T_{ort} eşitliğinde bir A.R. motorunun, sabit iletim ve kesim konumları için, ortalama momentini, bir DA motorunda olduğu gibi, motor hızının karesiyle azaldığı anlaşılır. (şekil 2.16. A bölgesi). Pratikte motorun üretebileceği maksimum moment (ya sürücü devre elemanlarının akım

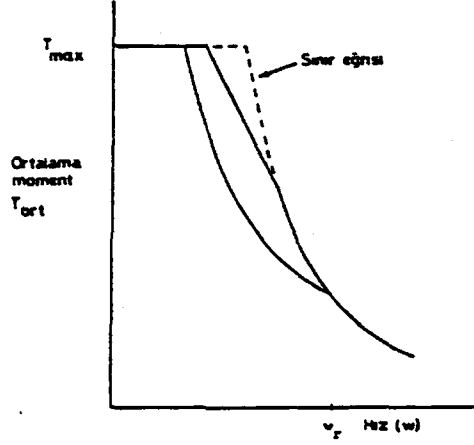
sınırlaması, ya da uygulanan gerilimin genliği üzerindeki sınırlama nedeniyle) belli bir değeri aşamaz. (şekil 2.16 .B bölgesi)



Şekil 2.16. Sabit uyarım ve kesim konuları için moment -hız karakteristiği.

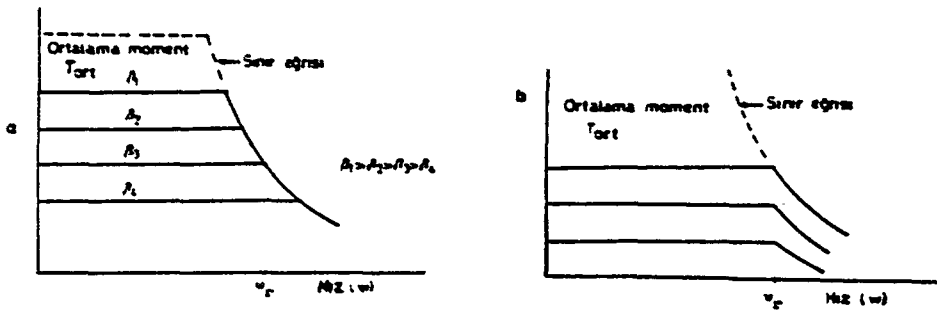
Eğer moment hız eğrisi F fonksiyonunu en çoklayan değerler için çizilmişse A.R. Motoru bu eğrinin altında kalan herhangi bir noktada çalışabilir. Kısacası bu eğri motorun çalışabileceği bir bölgeyi tanımlar Bu bakımdan motor karakteristiği kontrol devresinin müsaade ettiği oranda esnektir., ve çeşitli şekiller alabilir. Bu teoriye bir açıklık getirmek amacıyla, bazı parametrelerin değiştirilmesiyle karakteristiğin nasıl denetlenebileceği üzerinde durulacaktır. Bir ARM'nin faz gerilimi sabit tutuluyor ve iletim konumları denetleniyorsa şekil 2.17' de gösterilen bir dizi moment-hız karakteristiği elde edilebilir. Her bir karakteristik sabit bir iletim süresine karşılık gelmektedir. Herhangi bir anda

iletim konumu değiştirilerek moment-hız karakteristiği sınır moment karakteristiğini aşmamak üzere değiştirilebilir.



Şekil 2.17. Faz gerilimi sabit, iletim konumları denetlenen bir ARM için moment-hız eğrileri.

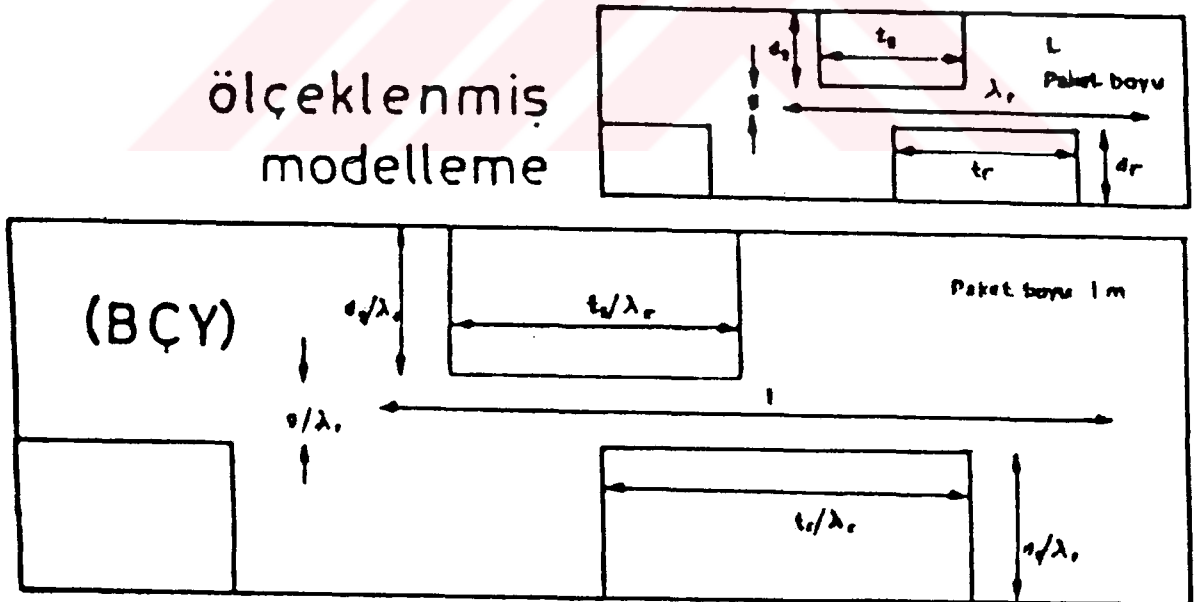
Bazı endüstriyel uygulamalarda ise motorun sabit bir moment üretmesi istenebilir. Bu tip karakteristiğin elde edilmesi için faz geriliminin bir kısıyıcı ile denetlenmesi ve gerilim / hız oranının (β) sabit tutulması yeterlidir. Bu durumda farklı β değerleri için şekil 2.18.a daki karakteristikler elde edilecektir. Belli bir β değeri için iletim süresi kısaltıldığında ise şekil 2.18. b deki karakteristik elde edilir. [10,12,15]



Şekil 2.18. Gerilim / hız oranı sabit bir ARM için moment-hız eğrileri.

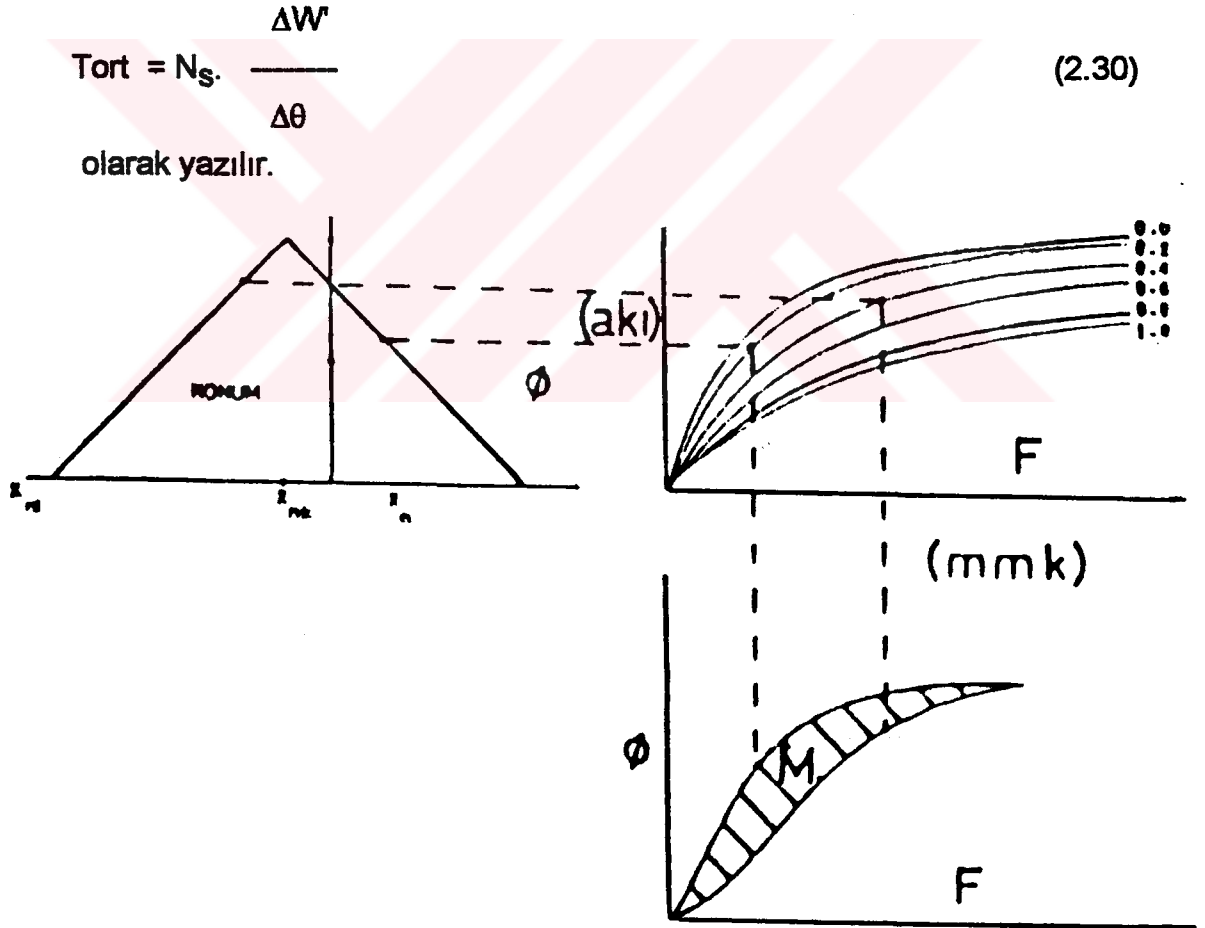
2.7.2. SABİT HIZDA A.R. MOTORUNUN ÇIKIŞ MOMENTİ

Sabit hızda (kararlı halde) çalışan bir A.R. Motorun herhangi bir anda milinden çıkan moment, o anda akım taşıyan fazların ürettikleri momentlerin, yönleri de dikkate alınarak toplanmasıyla bulunur. Eğer kapatılan fazdaki akım yeterince hızla tahliye edilebiliyorsa, motor anlık momentini bir fazı oluşturan karşılıklı iki kutbun ürettiği momentlerin toplamına eşit olacaktır. Momentin konumun bir fonksiyonu olduğu dikkate alındığında yüke uygulanan momentin zaman içinde değişim gösterdiği hemen anlaşılır. Ancak kararlı halde yükü etkileyen ortalama momentin bilinmesi çıkış gücünün ve ortalama mil hızının belirlenmesi için yeterlidir. Rotor kutup adımı λ , paket boyu L olan çift taraflı çıkık kutuplu bir yapıyı ele alalım Bu yapıyı rotor kutup adımı, paket boyu 1 m olacak şekilde ölçersek, sonuçta gerçek yapının ölçeklenmiş modeli olan (normalize boyutlar cinsinden) yeni bir yapı elde ederiz. Bu yeni yapıyı birim çift taraflı çıkık kutuplu yapı-BÇY olarak adlandıracağız. (şekil 2.19) [4,6,10,12,15]



Şekil 2.19. Bir-çift taraflı çıkık kutuplu yapı ve karşılığı olan BÇY.

Göz önüne alınan gerçek yapının stator kutup sayısı N_s , rotor kutup sayısı N_r olan bir A.R. Motoruna karşı geldiğini ve normalize anahtarlama konumlarının X_{nu} ve X_{nk} olduğunu düşünelim. Bu yapının kutup akısı magnetomotor kuvveti (mmk), $\phi - F$, eğrileri sayısal olarak, simetrik çıkık kutuplu yapılar için elde edilmiş permeans-ortalama akı yoğunluğu eğrilerinden elde edilebilir. Faz direnci ihmal edildiğinde kutup akısının değişimi şekil 2.20.a 'daki gibi olacaktır. Böylece motor döndükçe şekil 2.20 c'deki akı-mmk eğrisinin izleneceği anlaşılır. Eldeki verilerle hesaplayabileceğimiz bu konturun içinde kalan alan rotorun bir kutup adımı boyunca hareketi sırasında meydana gelen ko-enerji değişimidir. (ΔW) Benzer şekilde enerjilenen N_s kutuplu bir motor için ortalama moment böylece;



Şekil 2.20. Moment faktörünü hesaplama yöntemi.

Aynı manyetik yükleme koşullarında (aynı kutup maksimum akı yoğunluğunda) çalışan BÇY ko-enerji değişimi , M ile $\Delta W'$ arasındaki ilişki ise şöyledir;

$$\Delta W' = \lambda^2 \cdot L \cdot M \quad (2.31)$$

Böylece ortalama moment;

$$T_{ort} = 2 \frac{N_s}{N_r} \cdot V \cdot M \quad (2.32)$$

olarak bulunur. Burada V, etkin hacim olarak adlandırılmıştır ve rotor iç çapı d ve paket boyu L cinsinden,

$$V = d^2 \cdot \pi \cdot L / 4 \quad (2.33)$$

yazılabilir. Böylece A.R. Motorunun ortalama momentinin motor boyutlarıyla ilişkili olarak hesaplanabileceği ortaya çıkmaktadır. M katsayısı ise moment faktörü olarak adlandırılmıştır. Bu katsayı;

- Normalize edilmiş motor boyutlarının (t_{rm} , t_{sn} , $\lambda r / 9$)
- Anahtarlama konumlarının
- Manyetik yüklemenin (hava aralığında akı yoğunluğu dağılımının tepe değeri)

bir fonksiyondur. Moment faktörünün, böylece motorun gerçek boyutlarından bağımsız olarak BÇY için hangi koşullarda en yüksek olacağı incelenebilir.

Bu bölümde özetlenen hesaplama yöntemi şu önemli özelliklere sahiptir.

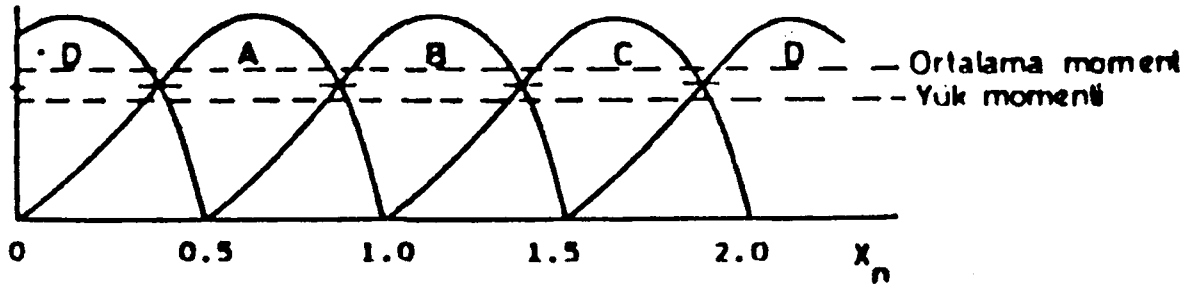
1- Manyetik devrenin doğrusal olmayan çalışma koşulları dikkate alınmaktadır.

2- Hesaplamalarda sürücünün getirdiği kısıtlamalar dikkate alınabilir. (Akım-gerilim sınırlamaları gibi)

3- Hesaplamalar anlık ters momentlerin etkisini doğal olarak dikkate almaktadır.

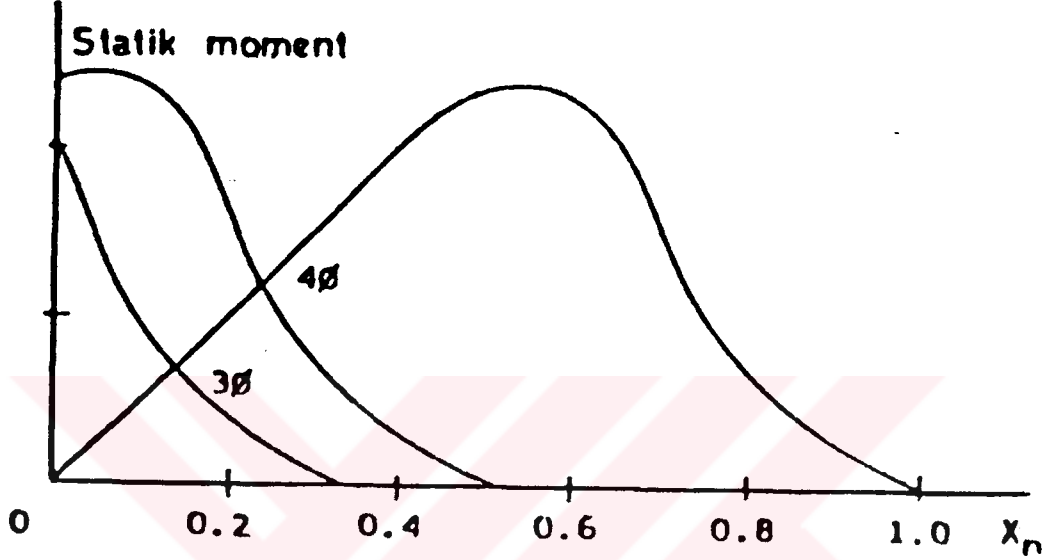
2.7.3. A.R. MOTORUNUN KALKIŞ MOMENTİ

Kalkış momenti bir tahrik sisteminin en önemli parametrelerinden birisidir. Yükün harekete geçirilip mümkün olduğunca kısa sürede hızlandırılması açısından birinci derecede rol oynar. Düşük motor hızlarında fazların sabit akım darbeleriyle sürüldüğü varsayılabilir. Bu durumda yük takibeden fazların uyarılmasıyla şekil 2.21' de 4 fazlı bir motor için gösterilen birbirini takip eden statik moment-konum eğrilerinin etkisi altında hareketlenecektir. Eğer yük ve rotor ataletinin etkisi ihmal edilirse, motor momenti yük momentinin altında kalmadıkça hareket sürekli olacaktır. Böylece kalkış momenti kısıtlı olarak motorun statik moment eğrilerinin kesim noktasının istenilen değerinde olması sağlanabilir. Dikkat edilirse bunun en kötü hale karşı geldiği kolayca anlaşılır.; çünkü yük ve rotor ataletinin büyük olması halinde kalkış momenti statik moment eğrilerinin ortalama değerine eşit olacaktır. Bu etkinin önemini anlatmak açısından eğrilerin sinüsoidal olduğunu varsayalım. Dört fazlı bir A.R. Motoru için kesim noktası kriterine göre, kalkış momenti moment tepe değerinin (T_p) 0.7'si iken ortalama moment kriterine göre 0.9'dur. [10,12,15]



Şekil 2.21. 4 fazlı A.R. Motoru için statik moment eğrileri.

Ayrıca şekil 2.22'de 3 ve 4 fazlı iki motor için statik moment eğrileri görülmektedir. Bu şekilden 4 fazlı motorların kalkış momenti açısından avantajı olacağı henem anlaşılmaktadır. Özetle faz sayısının, kalkış momentinde belirleyici bir unsur olduğu görülür. Tasarım sırasında kalkış momentinin hesabı için statik moment eğrilerinin hesabı gerekir.



Şekil 2.22. 3 ve 4 fazlı ARM'ler için statik moment eğrilerinin kesişme noktaları.

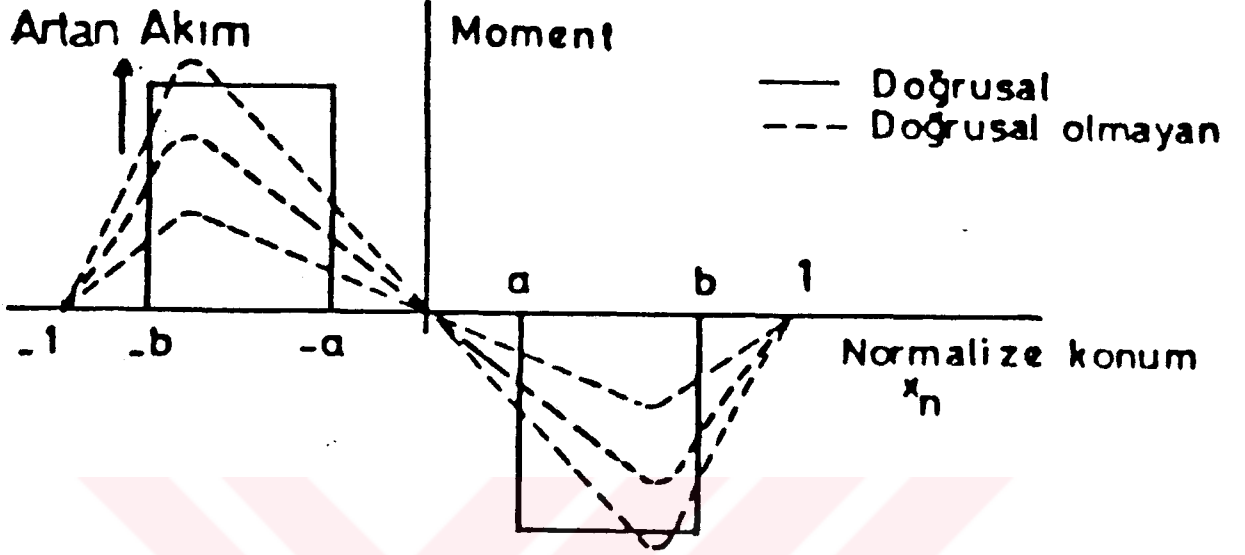
2.7.4. STATİK MOMENT KAREKTERİSTİKLERİ

Sabit bir I akımıyla uyarılan bir faz altında konumun değiştirildiğinde motorun üreteceği momentin;

$$T = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\theta}$$

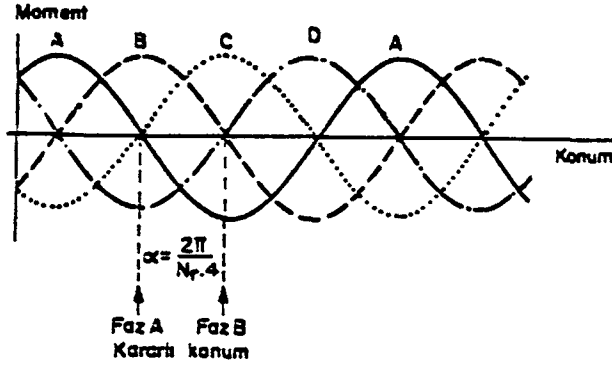
ifadesiyle hesaplanacağı daha önce belirtilmiştir. Endüktans konum eğrileri yardımıyla bir A.R. Motorunun statik moment-konum eğrisinin şekil 2.23'de sürekli çizgiyle gösterildiği gibi olacağı hemen anlaşılır. Pratikte kaçak

akı ve doyumun etkisiyle moment eğrisi şekilde kesikli çizgiyle gösterilen eğriye benzer. Momentin büyüklüğü şekilde görüldüğü gibi akımla artar.



Şekil 2.23. A.R. Motorunun statik moment eğrileri.

Moment eğrisinde $X_n = 1$ ve $X_n = -1$ konumları, rotor ve stator kutuplarının çakışmadığı, rotorun dışarıdan tutulmadıkça kalmadığı kararsız konumlara karşı gelmektedir. Endüktans eğrisi gibi periyodik olan ve kendisini $X_n = 2$ aralığında tekrarlayan moment eğrisinin pratikte önemli bir özelliği kararsız konuma yakın bir tepe değerinden geçmesidir. Farklı fazlar için moment-konum eğrileri, endüktans eğrilerinde olduğu gibi, bir diğerini adım açısı ($\alpha = 2\pi / N_r \cdot q$) veya normalize konum cinsinden $2 / q$ kadar bir açıyla takip ederler. [8,12]



Şekil 2.24. 4 fazlı bir ARM için moment-konum eğrileri.

2.7.5. AKI DALGA BİÇİMLERİ

A.R. Motorlarının bilinen motor tiplerinden farklarını vurgulamak performans hesaplama ve tasarım zorluklarını ortaya koymak açısından akı dağılımı ve şeklini incelemek yararlı olacaktır. Faz sargılarının direnci ihmal edilirse aşağıdaki eşitlik yazılabilir. [8,12]

$$V(X_n) = N \cdot \frac{d\phi}{dt} = N \cdot \frac{d\phi}{dX_n} \cdot \frac{dX_n}{d\phi} \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.34)$$

$$V(X) = \frac{N \cdot N_r}{\pi} W \frac{d\phi}{dX_n} \quad (2.35)$$

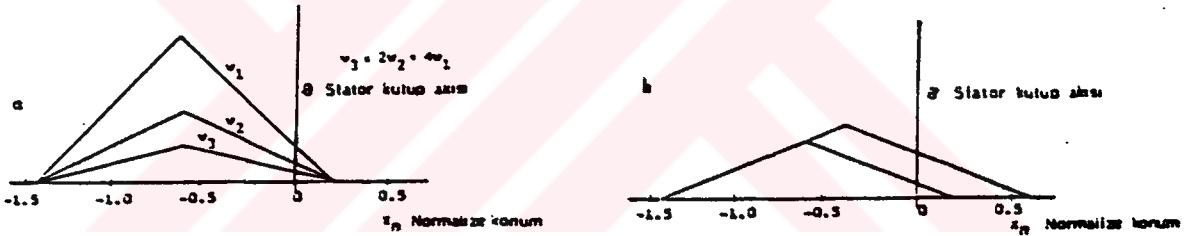
Bu eşitlikte X_n normalize konum, $V(X_n)$ faz gerilimi, N sarım sayısı ϕ kutup akısı, N_r rotor kutup sayısı, W ise açısal hızdır. Faz geriliminin konuma bağlı olarak değişimi aşağıdaki gibidir.

$V(X_n) = V$ $X_{nu} \leq X_n < X_{nk}$ (uyartım konumundan kesim konumuna kadar)

$V(X_n) = -V$ $X_{nk} \leq X_n < 2X_{nk} - X_{nu}$ (Kesim konumundan akı sıfır düşünceye kadar)

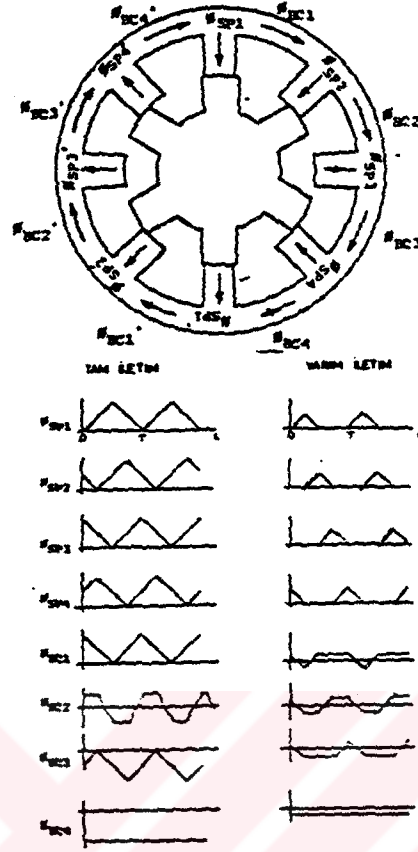
$V(X_n) = 0$ $2X_{nk} \leq X_n < X_{nu} + 2$ (Yeni uyarım konumuna kadar)

Bu durumda yukarıdaki eşitlikte aynı uyarım (- 1.4) ve kesim (-0.6) konumları için rotor dönme hızıyla , stator kutup akısının değişimi şekil 2.25.a' da gösterildiği gibi olacaktır. Aynı hızda farklı iletim süreleri için akının değişimi ise şekil 2.25.b' deki gibidir



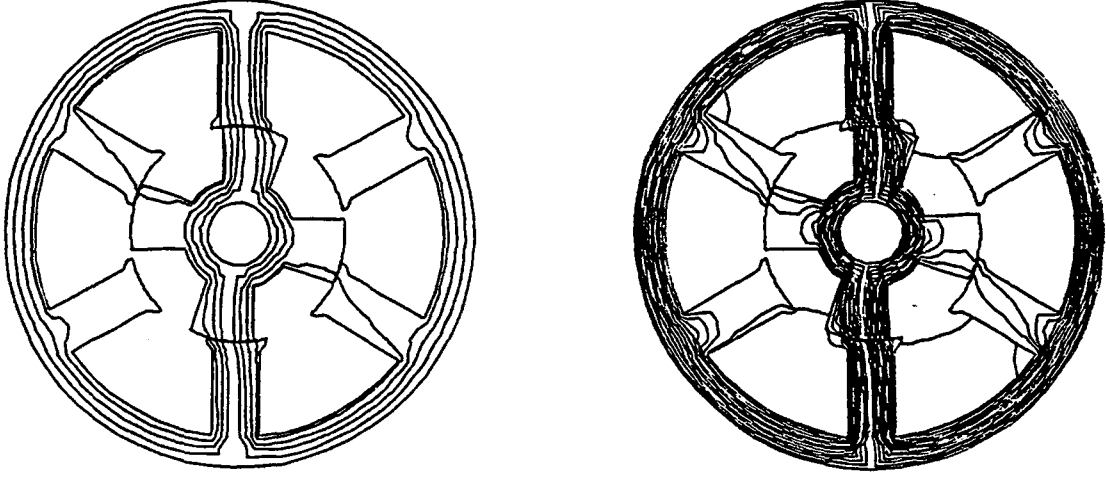
Şekil 2.25 . Tipik akı dalga biçimleri .

Motorun diğer kısımlarındaki akı şekilleri, fazlar arasındaki konumsal fark dikkate alınarak hesaplanabilir. Şekil 2.26.a' daki 4 fazlı A.R.M. için manyetik devrenin çeşitli kısımlardaki akı biçimleri şekil 2.26.b' deki gibi olacaktır.



Şekil 2.26. 4 fazlı bir A.R.M. için manyetik devrenin değişik kısımlarındaki akı dalga biçimleri .

Aşağıdaki şekilde ise yüksüz ve yüklü (1 p.u.) motorun akıları gösterilmiştir. (şekil 2.27)



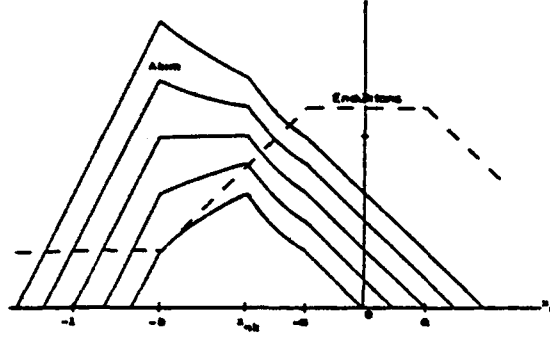
Şekil 2.27. Yüksüz ve yüklü (1.0 p.u.) A.R.M'nin akı şekilleri

2.7.6. AKIM DALGA BİÇİMİ

Akım dalga biçiminin değişik çalışma koşullarında hesaplanabilmesi gerek sürücü devre tasarımı gerekse motor momentinin hesaplanabilmesi açısından önemlidir. Kutup akısı ϕ , Endüktans L ve sarım sayısı N, arasında aşağıdaki bağıntı yazılabilir. [11,14]

$$N \cdot \phi (X_n) = L (X_n) \cdot I (X_n) \quad (2.36)$$

Bu durumda akım dalga biçiminin değişik uyartım ve kesim konumları için şekil 2.28' deki gibi olacaktır.



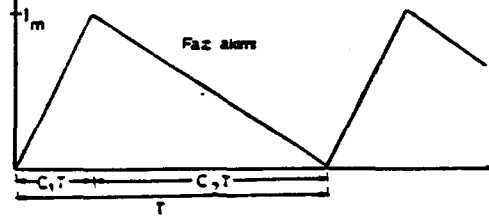
Şekil 2.28. Tipik akım dalga biçimleri.

2.7.7. A.R. MOTORUNUN İLETKEN AKIM YOĞUNLUĞU

A.R. Motor tasarımı sırasında geometriden yola çıkarak hesaplanması gereken performans fonksiyonlarından biri, iletken akım yoğunluğunun etkin değeridir. Tasarımda bu değere bir sınır koyarak motor sıcaklığını sınırlamak olasıdır. Bundan önceki bölümde doğrusal analiz sonucu elde edilmiş tipik A.R.M. faz akımı dalga biçimleri gösterilmiştir. Özellikle iletim süresi arttıkça, akım dalga biçimleri giderek üçgen dalga biçimine yaklaşmaktadır. İletim süresinin olası en yüksek değeri ($X_{ni} = 1$) için ise, faz akımı (ya da mmk) yaklaşık şekil 2.29' da görülen dalga biçimi ile gösterilebilir. Böyle bir dalga biçimi için akının etkin değeri, I_e , ile tepe değeri, I_m arasındaki ilişki (C_1 ve C_2 katsayılarından bağımsız olarak)

$$I_e = I_m / 1.73 \quad (2.37)$$

biçiminde elde edilir.



Şekil 2.29. $X_{ni} = 1$ için yaklaşık akım biçimi.

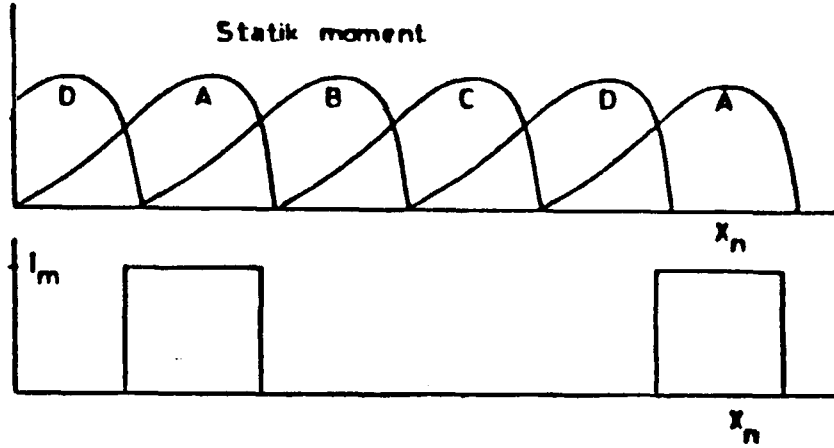
Bu değerlerin hesaplanabilmesi için mmk'nın tepe değerinin hesaplanabilmesi gerekir. ($I_m = \text{tepe mmk} / N$) Belirli manyetik yükleme koşulları için, mmk tepe değeri, I_p mmk'nın maksimum olduğu anda, (doğrusal analiz sonuçları bu anın $X_n = -(t_m + t_{sN})$ konumuna karşılık geldiğini göstermektedir.) manyetik devrenin değişik kısımlarında düşen mmk'nın hesaplanıp toplanması sonucu bulunabilir. Bu durumda iletken akım yoğunluğu için aşağıdaki eşitlik yazılabilir;

$$J_c = \frac{F_p}{1.73 \cdot 2 \cdot kw \cdot tc \cdot td} \quad (2.38)$$

(A.R.M.imalatından kazanılan deneyim,sargı doluluk faktörünün , kw,0.47 olarak seçilmesinin sağlıklı sonuç verdiğini göstermektedir.) [11,14]

2.7.8. ARM KALKIŞ AKIMI

Kalkış sırasında fazların düşük bir frekansta uyarıldığı gözönüne alındığında akım dalga şeklinin kare dalgaya yakın olacağı (faz zaman sabitlerinin çok daha küçük olması nedeniyle) anlaşılır. Böylece faz akımları şekil 2.30 da gösterildiği gibi olacaktır. [14]



Şekil 2.30. 4 fazlı bir ARM için statik moment eğrileri ve bir faza ait kalkış akımı dalga biçimi.

Faz sayısı q olan bir ARM için faz sayısının akım taşıdığı sürenin toplam çevrime oranı $1 / q$ olarak ifade edilebilir. Kalkış sırasında bir faz sargısının taşıdığı akımın tepe değeri I_k olarak gösterilirse, kalkış faz akımının etkin değeri I_{ke} ve I_k arasındaki ilişki şu şekilde yazılabilir.

$$I_{ke} = I_k / \sqrt{q} \quad (2.39)$$

Sürücü devrenin kalkış sırasında nominal akımın k misli olmasına müsaade ettiği düşünülürse; nominal akımı I_e , cinsinden kalkış akımı aşağıdaki gibi yazılabilir.

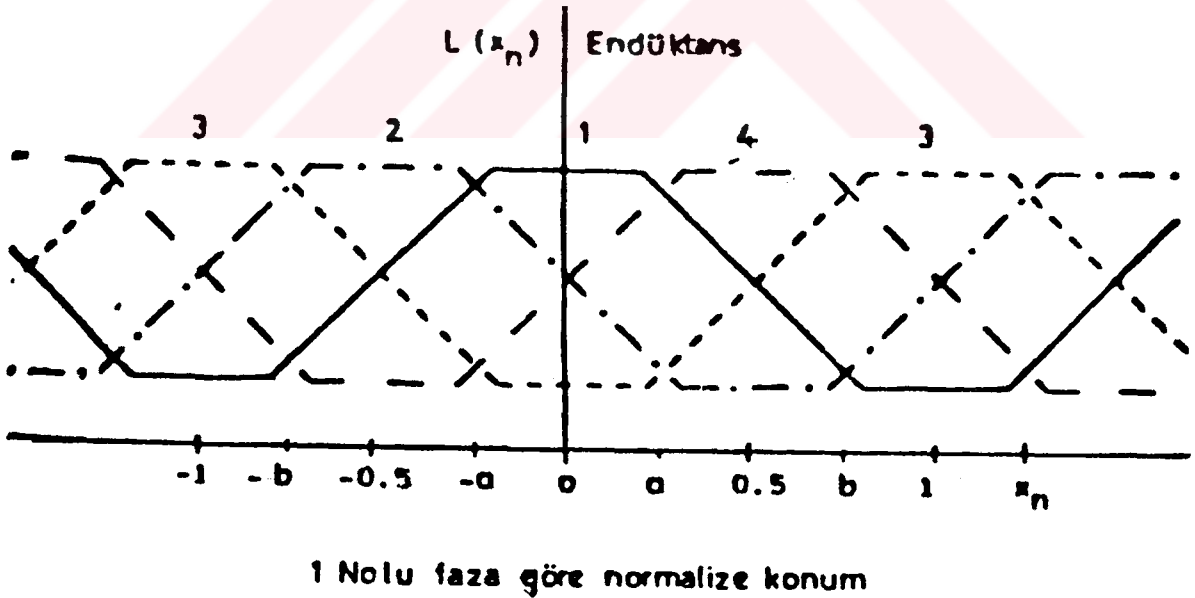
$$I_k = k \cdot \sqrt{q} \cdot I_e \quad (2.40)$$

2.7.9. ARM'DE ENDÜKTANS KONUM EĞRİLERİ

Daha önce yapılan varsayımlar çerçevesinde, ARM'nin bir fazının endüktansı, L , verilen bir konum için motor relüktansının, R bir fonksiyonudur.[14]

$$L = \frac{N^2}{R} \quad (2.41)$$

Bu eşitlikte N bir fazdaki sarım sayısıdır. Böylece endüktansın konumla değişiminin bir maksimum değerle, L_i , (rotor ve stator kutuplarının çakıştığı minimum relüktans konumu, $X_n = 0$) bir minimum değer, L_0 , (kutupların çakışmadığı maksimum relüktans konumu, $X_n = 1$) arasında değiştiği anlaşılır. Bu değişim şekil 2.31 de gösterildiği gibidir. Şekilden anlaşılabilirdiği gibi stator ve rotor dişlerinin çakıştığı kısmın sabit kaldığı konumlar için endüktans L_i değerinde kalmakta, çakışma azaldıkça L_0 değerine düşerek yeniden çakışma başlayana dek bu minimum değeri korumaktadır. Endüktans karakteristiği periyodiktir ve kendisini $X_n = 2$ periyodunda tekrarlar. Diğer fazların moment konum eğrileri adım açısı, α , kadar bir açıyla birbirini izler.



Şekil 2.31- 4 fazlı bir ARM için endüktans konum eğrileri

2.7.10. ARM'İNİN YÜKSEK GÜÇLERDE UYGULANABİLİRLİLİĞİ

Relüktans motorları değişken hızlı tahriğin kullanıldığı tekstil makinaları, vantilatörler, pompalar ve elektrikli ulaşım sistemleri gibi birçok alanda hızla kullanıma girmektedir. Günümüzde demiryolu ile ulaşımında doğru akım seri motorları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak olumsuz elektriksel ve mekaniksel şartlar altında bu makinalarda komitasyon problemi oluşmaktadır. Ayrıca soğutma havasında bulunan toz ve kirler endüvri izolasyonuna zarar vermektedir. Bu duruma karşı ulaşım sistemlerinde alternatif akım motorlarının kullanımının düşünülmesinin nedenlerinin başında komitasyon problemlerinin ortadan kalkması gerekmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi anahtarlı relüktans motorunda statora ait sarımlar büyük bir kesit içinde birkaç tane bobin içermektedir ve basittir. Bu durumda izolasyon sisteminin güvenilirliğini sağlamaktadır. ARM sisteminin bir diğer üstünlüğü de geniş bir hız aralığında tam yük elde etmenin mümkün olmasıdır.

Ancak alternatif akım makinalarının kullanılması ile eşdeğer doğru akım makinalarından fiyat avantajı sağlanmasına rağmen, kontrol elemanları çok daha pahalıdır. A.R. Motorlarının önerilmesindeki başlıca etken anahtarlama elemanlarının sayısının yarıya indirilmesidir ve motorun elektriksel bileşenlerinin fiyatı eşdeğer a.a makinalarına oranla daha azdır.

Yüksek güç kullanımında maliyet problemini minimuma indirmek amacıyla araştırmacılar anahtarlı relüktans motoru içeren sistemlerin dizaynına götürmüştür. Bu amaçlı, bir araştırma programı çerçevesince İngiltere de Leeds ve Nottingham Üniversitelerinde 50 kW'lık akülü elektrik araçları için yeni bir tür elektrikli tahrik sistemi geliştirmişlerdir. Bu çalışma daha sonraları demiryolu taşımacılığına uygulanabilmesi amacıyla İngiliz Demiryolları, tarafından desteklenmiştir. Ancak ortak bir görüş belirli bir güç ve gerilim seviyesinde anahtarlı relüktans motorlarının avantajlı olabileceği, doğru akım motorlarıyla bile rekabet edebileceği ve ileriki yıllarda öneminin artacağı yolundadır.

Araştırmacıların bir görüşü de 200 kW'lık bir güçte ARM'nin maliyetinin alternatif akım makinalarından biraz fazla olacağı ancak belirli bir seviyede avantajlı olabileceği yolundadır. Bir diğer bir görüş de yapılan deneyler sonucunda bir kaç yüz kW gücündeki ARM sisteminin demiryolu taşımacılığında aynı hız-moment değerleri için PWM indüksiyon motorundan % 25 - % 30 daha ucuz bileşen fiyatlarına sahip olduğudur. [1]

2.7.11. A.R. MOTORUNUN VERİMİ

Verim bir elektrik motorunun önemli tasarım kriterlerinden biridir ve genellikle tam yük koşullarında tarif edilir. Verim, η , ARM'ler için de motora giren elektriksel güç (P_i) ile şafttan çıkan gücün (P_o) birbirine oranına eşittir. [4, 11]

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_o}{P_o + \text{kayıplar}} \quad (2.42)$$

Motor anma çıkış gücü, P_o ve bunun elde edildiği dönüş hızı bir tasarım kriteri olarak belirlenir. Buradaki hesaplamalarda anma çıkış gücünün maksimum iletim koşullarında, $X_{\eta i} = 1$ elde edildiği düşünülmüştür. Tasarımda bu gücün başka bir iletim aralığında elde edilmesi öngörülmüşse yine benzeri yöntemler kullanılabilir. Yukarıda belirtilen kayıplar iki ana kısımdan oluşur;

$$\text{Kayıplar} = \text{Bakır kaybı (PB)} + \text{Demir kaybı (PD)} \quad (2.43)$$

Tam yük koşullarında motor geometrisinden yararlanarak, motor kayıpları aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

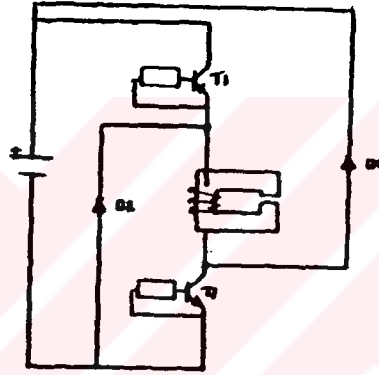
A- BAKIR KAYIPLARI : Tam yük koşulları altında bakır kayıpları, sargı boyutları ve daha önce nasıl hesaplandığı gösterilen iletken akım yoğunluğu J_c , değerleri kullanılarak

$$P_B = 1.1 N_s.p. l. K_w. t_c. t^d. j_c^2 \quad (2.44)$$

biçiminde hesaplanabilir. Bu eşitlikte g bakırın öz direnci, l ise bir stator kutup sargısının ortalama tur uzunluğudur. 1.1 faktörü ise deri etkisine (skin effect) karşılık gelmektedir.

B- DEMİR KAYIPLARI: Daha önceki bölümlerde akı dalga şekillerine yer vermiştir. Akı dalga biçimleri iletim aralığına yakından bağlıdır. Ancak verim hesaplanmasında, tam yükün elde edildiği iletim aralığı için ortaya çıkan akı dalga biçimlerinin bilinmesi yeterlidir. Demir kayıplarının tasarım sırasında

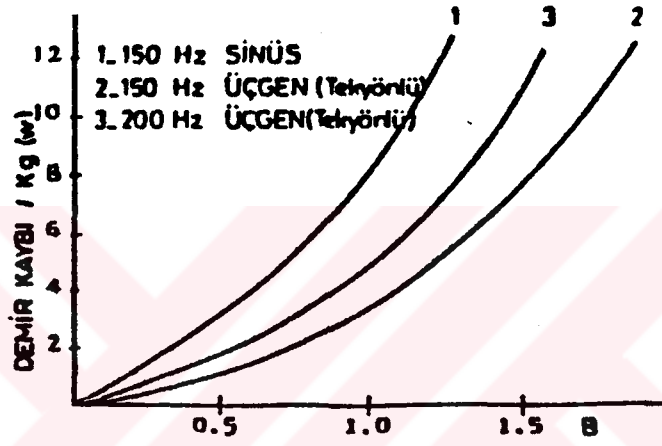
hesaplanabilmesi için bu dalga şekillerinde, kullanılan sacın değişik akı yoğunluklarında, kg başına kayıplarının bilinmesine gerek vardır. Motorun toplam demir kaybı, boyutlar cinsinden, demir ağırlığı bilindiğinden, bu veriler yardımıyla kolayca hesaplanabilir. Bu amaçla bir Epstein karesi kullanılmış ve örnek saçlarda istenilen tek yönlü üçgen akı dalga biçimlerinin oluşturulmasını sağlayan şekil 2.32'deki devreden yararlanılmıştır.



Şekil 2.32- Demir kayıplarını hesaplamak için kullanılan deney düzeneği

4 fazlı bir ARM için 1500 d / d'da stator kutup akısı 150 Hz'de tek yönlü üçgen bir değişim gösterir. Rotor kutup akısı ise 200 Hz'lik üçgen dalgalardan oluşur ve 50 Hz'lik bir frekansla yön değiştirir. Rotor demir kayıplarının hesabında akının yön değiştirmenin etkisinin dikkate alınmasına gerek olmadığı öngörülmüştür. Şekil 2. 33'de bir fikir vermek amacıyla, motor imalinde kullanılan bir sac üzerinde ölçülen, 150 Hz sinüsoidal, 150 Hz ve 200 Hz üçgen tek yönlü dalga biçimleriyle elde edilen kg başına kayıplar vermiştir. Gözlediği

gibi kg başına kayıplar üçgen dalga biçimli (tek yönlü) akı için sinüsoidal (çift yönlü) akı değişiminden daha azdır ve frekans yükseldikçe artmaktadır.



Şekil 2. 33- Çeşitli akı dalga biçimleri için kg başına demir kayıpları

BÖLÜM 3 : ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORLARININ KONTROLU

3.1. GENEL

Alternatif akım ve doğru akım motorlarında, değişken hız tahriği için kullanılan, kontrol elektroniği elemanları gelişen teknoloji sonucunda iyileşen özellikleri ile piyasada kullanıcıya birçok alternatif yöntemler sunmaktadır. Ayrıca değişken hız tahriği için son yıllarda görülen en büyük avantajlardan biriside sayısal kontrol elektroniğindeki son gelişmelerin karmaşık kontrol sistemini, maliyet ve uygunluk açısından cazip duruma getirmesidir. Bütün bu olumlu gelişmelere motor kontrüksiyonu için yeni ve iyileştirilmiş malzemelerin kullanılmasını da ilave edersek, bu alanda yapılan yenilikler şaşırtıcı değildir.

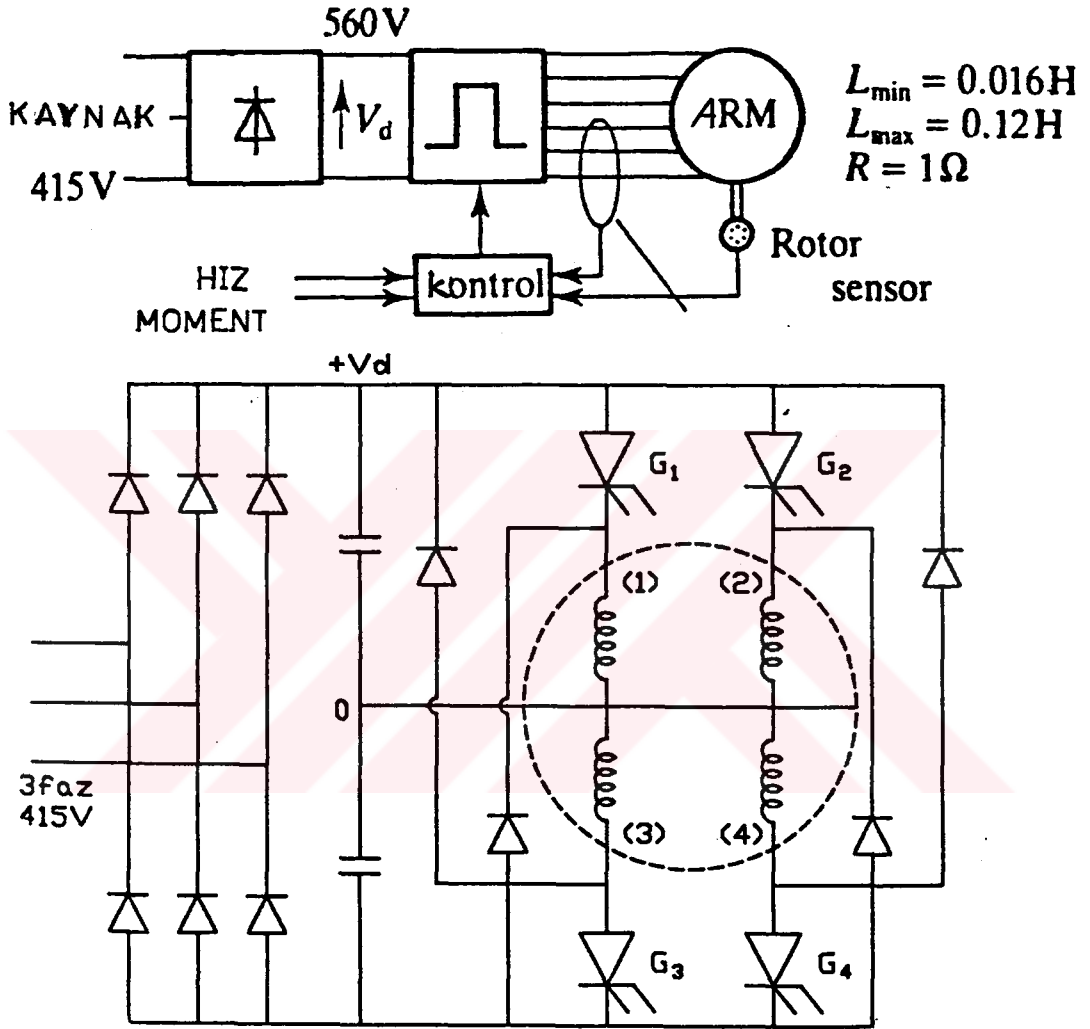
Kontrollü hız tahriğinin en iyi şekli, tristör kontrollü doğrultucu tarafından beslenen doğru akım motorudur. Bu tipteki motor Tahriği özellikle, yüksek performans uygulamaları için endüstri standardındadır. Ancak fırça ve komütatörler sürekli bakım gerektiği için maliyeti yüksektir, tehlikeli ortamlara kolayca uyarlanmaz ve maksimum hızlar için sınırlıdır. Güçleri ise watt değerlerinden megawatt değerlerine kadar değişebilir.

Değişken frekanslı eviricilerle beslenen Asenkron Motorlar, önceleri karşılaşılan güvenilirlik ve maliyet sorunlarından sonra , gittikçe daha iyi bir performans göstermektedirler. Sistemin gittikçe düşük frekanslarda iyi bir şekilde çalışması (özellikle % 20'nin altındaki hızlarda) zorluklarından birisidir. Örneğin darbe genişlik modülasyonu evirici tahriğinde, üç fazlı bir köprü için 12 adet tristör elemanı gereklidir. Bu şekilde bir tahrik sistemi, genel olarak, birkaç yüz watt değerinden birkaç yüz kilowatt'a kadar güç değerleri için uygulanabilir.

Son yıllarda geliştirilen ve birkaç yüz kilowatt değerlerine kadar uygulanabilen alternatif tahrik sistemi de fırçasız doğru akım tahrik sistemidir. Rotor mıknatıslarının dönme yönünü veren seziciler kullanılır ve evirici buna bağlı olarak sistemi kontrol eder. Sistem tahriği uygulaması, motor için gerilimin sinüs ve üçgen dalga şekli kullanılarak yapılır. [1]

Bu bölümde söz konusu olan tahrik sistemi, değerleri ile kısmen ilgili, kuvvetli bir yapıya sahip ve yüksek bir performans veren Anahtarlı Relüktans motor tahriğidir. Daha önceki bölümde de belirtildiği gibi, rotor sarımsız veya sürekli mıknatıslara sahiptir. Güç elektroniği katı,elektriksel hatlardan kolayca korunabilir. Tahrik sistemi,10.000 dev / dak hız değerlerinden, 200 kw güç

dönüştürülür. Motorun nominal hızı ile orantılı olarak gerilim çıkışları 0-10 V arasında gözlenebilir. Bu işaret, kapalı çevrim hız kontrol sistemi için geri besleme sinyali olarak kullanılır. Anahtarlama lojiği için makinasının çalışma komutları mod seçici ile gerçekleştirilir. Motor ileri ve ters yönde çalışabilir ve frenleme yapabilir. D.C. link



Şekil 3.2- a- A.R. Motorunun kontrol devresi
b- Kontrol devresinin güç katı

Yukarıdaki devreden de gözlenebileceği gibi dönüştürücü devresinin girişinde kullanılan iki adet doğru gerilim kondansatörü ile besleme gerilimi bölünmüş olarak kullanılmaktadır. Her bir kondansatöre karşılık 4 kV gücünde 415 V gerilim değerinde olan kontrol devresinde kondansatörün uçlarındaki gerilim;

$$V_d = \frac{3 \cdot V_{max}}{\pi} = \frac{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 415}{\pi} = 560 \text{ V}$$

$V_c = V_d / 2 = 280 \text{ V}$ değerinde gerilim, kondansatörün yalnızca bir tanesinin uçlarında oluşur. Devrede 1 nolu fazda akımı oluşturabilmek için tristör elemanı iletimdeyken üst yarım kaynaktan beslenir. Anahtar kesime gittiği zaman ise enerji alttaki kaynağa geri döner. 2 nolu faz için ise bu kez durum tersine oluşur. Devrede bulunan serbest dolaşım diyotları ile kesimde enerjinin doğru gerilim kaynağına geri dönmesini sağlar. Böylelikle motorun faz sarımları 4 fazlı güç dönüştürücü çıkışlarından enerjilenir. Daha önce belirtildiği gibi motorun dönme yönü enerjilenen faz sarımlarının tersine doğru oluşur. Magnetik devrenin indüktansı, rotor ile statorun düzgün olmayan konumu için minimum olduğundan, faz sarımında akım çok hızlı bir şekilde artar. Rotor kutuplarının stator kutuplarıyla düzgün konuma yaklaştıkları durumda sezicilerden gelen işaretler ile lojik devre yardımı ile sarıma seri bağlı tristörler kesime giderler. Bu da GTO'nun kapısına negatif gerilim uygulamak sureti ile gerçekleşir. Sarımlarda depolanan magnetik enerjinin geri akışı ile kapasiteye enerjinin dönüşü sağlanır.

Bu bölümde, Anahtarlı Relüktans Motorunun kontrol karakteristikleri tanımlanarak, kontrolünün nasıl yapıldığı gösterilecektir. Bu arada rotor geri beslemenin önemi de vurgulanacaktır. Anahtarlı Relüktans Motorunun tahriğinde kullanılan güç elektroniği devre yapıları, çalışma prensipleri, performans karakteristikleri incelenecektir. [1]

3.1.1. MOTORUN SÜRÜLMESİ VE BAZI TANIMLAR

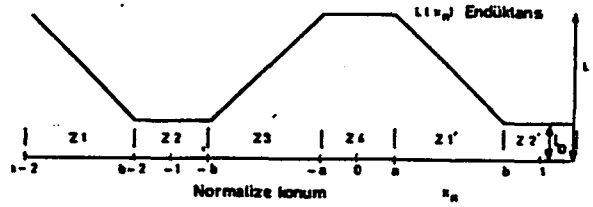
Anahtarlı Relüktans Motorları önceden belirtildiği gibi, fazların dönüş yönüne göre, ardarda uyarılmasıyla döner. Bir fazın uyarılması için devresindeki bir anahtar aracılığı ile gerilim kaynağı bağlanması gerekir. Faz sargılarından akım geçirilmesi amacıyla bu anahtarın kapatıldığı ana, uyarım anı, o fazın konusuna (minimum relüktans) göre, bu anda rotorun bulunduğu konuma da, uyarım konumu denir. Devredeki anahtarın açılarak güç kaynağından faza akan akımın kesildiği an , kesim anı, rotorun o anda

bulunduğu konum ise kesim konumu olarak adlandırılır. Bir fazın iletim ve kesim anları arasında, güç kaynağından beslendiği konular arasındaki fark da, iletim aralığı, olarak adlandırılır. Burada normalize uyartım konumu X_{nu} , kesim konumu X_{nk} , iletim aralığı ise X_{ni} , sembolleriyle gösterilmiştir. Uyartım ve kesim konumları moment üretimi üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Bir an için faz akımının uyartım anında hemen anma değerine ulaştığını düşünelim. Doğrusal manyetik devreye sahip bir motor için moment aşağıdaki eşitlikten hesaplandığı daha önce belirtilmişti. [1]

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta}$$

Motorun pozitif moment yönünde döndüğü düşünülürse, her fazın sadece pozitif moment üretebilmesi için endüktansın arttığı bölgede akım taşınması gerektiği sonucuna hemen varılabilir.

Eğer iletim, endüktansının minimum ve sabit olduğu bölgeye (Z2) rastlıyorsa, endüktans değişiminin başladığı kısma (-b) kadar, herhangi bir moment üretilmeyecektir. Ancak uyartım anından endüktans artışının başladığı konuma kadar geçen zaman aralığında, faz akımının yükselmesine (anma değerine ulaşmasına) imkan tanımak için yararlanabilir. Eğer iletim şekil 3.3 deki endüktansın değişen konumla düştüğü bölgeye (Z1) rastlıyorsa, minimum endüktans bölgesine kadar (Z2) dönüşü engelleyecek ters bir moment üretilmek demektir. Bu düşünce dizisi momenti maksimum değerinde tutabilmek için uyartım anının hiçbir zaman bu bölgeye düşmeyecek biçimde seçilmesi gerektiği izlenimini vermektedir. Ancak momentin değerinin akımın karesiyle orantılı olduğu gözden uzak tutulmamalıdır. Motor hızı arttıkça uyartım anından pozitif moment üretilen bölgeye ulaşma süresi kısılarak, faz sınımlarının zaman sabitiyle karşılaştırılabilir. hale gelecektir. Bu nedenle akım anma değerine ulaşamayacağından moment olabileceğinden küçük bir değerde kalır. Bu bakımdan uyartım anını şekil 3.3'de (Z1) bölgesinde seçmek, akımın yükselmesine zaman tanımak açısından avantajlı olmakta,



Şekil 3.3. ARM bir fazı için endüktans konum karakteristiği

İletimin başında akım değeri küçük olduğundan üretilen zıt momentler de küçük değerlerde kalmaktadır.

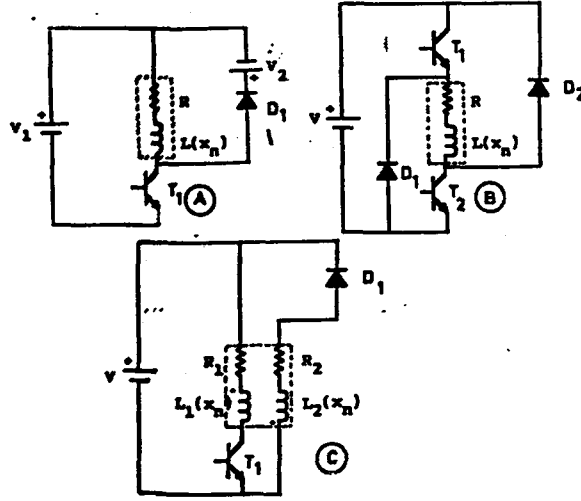
Kesim anı da moment üretim açısından önem taşır. Bu an şekil 3.3'deki (Z1) bölgesine ulaşıldığında akım sıfıra düşmeyecek şekilde seçilirse, ters moment üretilecektir. Pratikte kesim anı, fazdaki akımın kesim anından sonra, devrenin zaman sabitiyle düşüneceği de gözönüne alınarak seçilir ve motor hızına bağlıdır. Yukarıdaki tartışmalar, Anahtarlı Relüktans Motorlarında neden rotor konumundan işaret alınması gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır. İşaret alma işlemi bir enkoderle yapabileceği gibi akım ve gerilimden işaret alma yoluyla da yapılabilir. Bu bölümdeki açıklamalar faz sınırlarındaki akımın hızla yükselmesinin sağlanmasının ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Kesim sonrasında faz akımının hızla ufalanmasını sağlamak da maksimum ortalama momentin elde edilmesi açısından aynı derecede önemlidir. [1,5]

3.1.2. TİPİK SÜRÜCÜ DEVRELER

Bir önceki açıklamalar sürücü devrenin besleme geriliminin, akımının hızla yükselmesini sağlayacak biçimde, en az anma akımını geçirmeye yeterli olan bir değerde seçilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu durumda faz akımlarının bir kıyıcı yardımıyla gerektiğinde sınırlanması en uygun çözüm olarak gözlenmektedir. Bir faza uygulanananlık gerilim (V), faz akımı (i), endüktans (L), sargı direnci (R) ve motor açısal hızı (W) cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir. (2.5)

$$V = R i + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{d\theta} W$$

Görüldüğü gibi hız arttıkça W'ya bağlı 3. terimin büyümesi de, anma akımına yüksek hızlarda ulaşılabilmesi açısından, besleme geriliminin denetlenebilir ve yüksek bir değerde seçilmesinin önemine işaret etmektedir. Akımın kesimden sonra hızla düşürülmesi gerektiği de gözönüne alındığında en uygun seçenek gerilim kaynağını bu işleme yardımcı olacak biçimde kullanmak, kesimden sonra faz sınırlarına ters bağlamak olarak görülmektedir. Bu değerlendirmeler çerçevesinde, çeşitli sürücü devre düzenlemeleri düşünülebilir. Amaca uygun üç devre şekil 3.4. a,b,c' de görülmektedir. Burada anahtarlama elemanları transistör olarak gösterilmiş olsada başka anahtarlama elemanları da kullanılabilir. (tristör, kapıdan susturulabilen tristör GTO)



Şekil 3.4- Tipik ARM sürücü devreleri

Şekil 3.4.a'deki devre yarı iletken sayısını en aza indirirken, iki ayrı gerilim kaynağı gerektirmektedir. Akım T2 iletimdeyken, V1 geriliminin etkisiyle kaynaktan motora doğru akar. T1 susturulduğunda faz akımı D1 üzerinde ters bağlı V2 gerilim kaynağı nedeniyle hızla düşer ve sargılarda depolanmış enerjiyi kaynağa aktarır. İkinci bir güç kaynağı arzu edilmiyorsa şekil 3.4.b'deki devre , ikinci bir yarı iletken kullanılarak , istenilen özelliklerde bir sürücü devrenin nasıl elde edilebileceğini göstermektedir. İletim süresince akımın sınırlanması T1 , T2 anahtarlarının açılıp kapatılmasıyla sağlanır. Şekil 3.4. c'deki devre ise yarı iletken ve güç kaynağı sayısı tektir. Sargılarda enerji aynı kutbu (fazı) paylaşan ikinci bir sargı aracılığıyla , D1 diyodu üzerinden kaynağa aktarılır. [1]

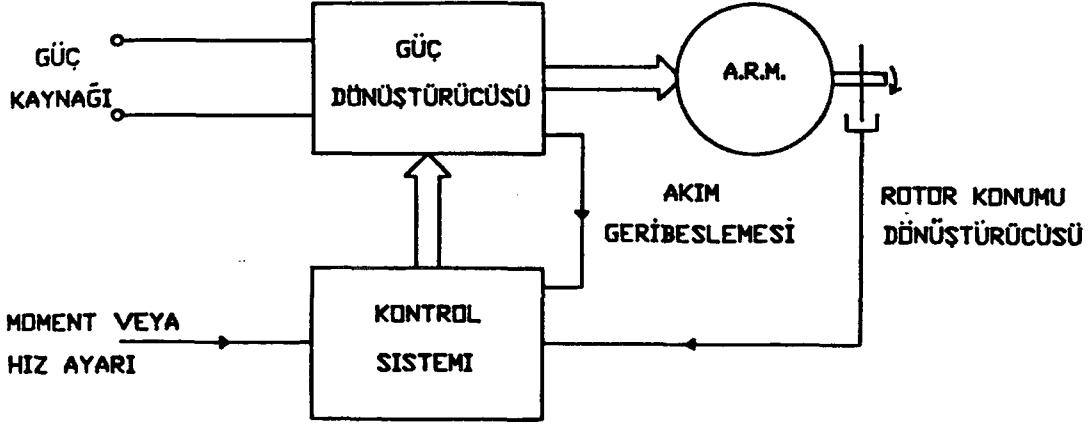
3.2. A.R. MOTORUNUN KONTROL KAREKTERİSTİKLERİ VE ÇALIŞMA MODLARI

Anahtarlı Relüktans Motoru lineer olmayan bir makinadır. DA ve fırçasız DA motorlarına benzemeyen A.R.makinanın lineer kontrol modelleri, bazı sınırlı çalışma koşulları dışında, makinanın çalışma prensibini doğru olarak elde

etmek fazla karmaşık değildir. AR motoruna yapısal olarak en çok benzeyen motor, değişken relüktans adım motorudur fakat her ikisinin de kontrol şekli birbirinden farklıdır. Adım motorları genel olarak açık çevrimde çalışırken, faz akım darbeleri açılma konumu yüke ve hıza bağlı olarak değişir. A.R. Motoru ise daima konum geri besleme ile çalışır., böylece faz akımı sadece hıza ve yüke bağlı kalmayarak, optimum moment üretimi elde edilir.

Başlangıçta adım motorları ve fırçasız tipte olan doğru akım motorlarında kullanılan kontrol ediciler, genellikle açık çevrim kontrol devresine sahiptirler. Açık çevrim kontrol devresinde, bilindiği gibi, motora, rotor konumunun herhangi bir verisi olmadan seri darbeler gönderilir. Motor, bir faz geriliminin sabit darbe genişliği ile enerjilendiğinde açık çevrim sistemi olarak çalıştırılır. Anahtarlı Relüktans Motorunun kontrol elektroniği düzeninde, motorun sürekli ve kontrol edilebilir bir moment üretmesi için güç dönüştürücüsünün anahtarlama senkronize olmalıdır. Rotor konum sezicisinden elde edilen geri besleme ile sarımların, artan ve azalan indüktans bölgelerinde, kısaca moment üretilen rotor açılara karşılık gelen konumlarda uyarılması ile yapılır. Buradan, Anahtarlı Relüktans Motoru kapalı çevrim kontrol edicisine gereksinim duyar. Kapalı çevrim kontrol sistemi, moment-hız gereksinimi için, işaret darbe modunda doğru anahtarlama açıları, ateşleme lojisi ile birlikte kıyılma modunda uygun akım seviyeleri ve güç anahtarlama elemanlarını sıralı olarak ayarlamak için bellek gereklidir. [1,7]

Anahtarlı Relüktans Motor tahrihinin temel bileşenleri, şekil 3.5' de akım diyagramı şeklinde verilmiştir. A.R. Motorunun sarımdaki akım akışı, yarı iletken elemanlarla kontrol edilen güç dönüştürücüsü ile beslenir. Güç dönüştürücüsündeki akım sezicilerinden gelen sinyalleri ve motordaki konum sezicisinden gelen konum sinyallerini geri besleme sinyali olarak kullanılan kontrol sistemi, güç katındaki davranışını kontrol eder.



Şekil 3.5- A.R. Motor tahrik sisteminin temel bileşenleri

Şekil 3.5'de gösterilen kontrol sisteminde, istenen momenti en verimli biçimde oluşturmak için, sarımların uygun anlarda uyarılmasını sağlayan, rotor konumu sezicilerden alınan bilgiler kullanılır. Bu amaçla yerleştirilen seziciler, motorun milinin bağlı olmayan tarafına monte edilmektedir. Ayrıca, seziciler olmadan rotor konumunu algılayan düzenler hakkında günümüz araştırmacıları yoğun bir ilgi ile çalışmaktadırlar.

Rotor momenti, stator fazlarını uygun açısal konum değerinde enerjileyerek, rotor ve stator kutupları arasında basit bir şekilde oluşan magnetik çekimle üretilir. Önceki bölümde de belirtildiği gibi, moment darbeleri, indüktans çevrimi esnasında, uygun zamanlarda, güç elektroniği elemanlarının açılıp kapanması ile, sarımda akımı anahtarlayarak, negatif veya pozitif değeri verebilecek şekilde kontrol edilebilir. Rotor kutupları uyarılan stator kutup çiftine yaklaştığı konumda, artan indüktans bölgesinde motor momenti üretilir,

azalan indüktans bölgesinde, kutupların birbirinden uzaklaştığı durumda ise frenleme momenti oluşur.

Momentin büyüklüğü akım değerini ayarlamak sureti ile kontrol edilir. Ayarlama yöntemi düşük ve yüksek hızlarda farklı olmaktadır. Düşük hızlarda moment kontrolü, gerilim darbesi süresince akımın değerini değiştirmek sureti ile yapılır. Düşük hızlarda AR motoru moment üretimi için , akımı veya faz gerilimini değiştirerek ve fazları sabit açılarda enerjilendirerek fırçasız sürekli mıknatıslı makinalara benzer şekilde kontrol edilebilir. Kullanılan bu çalışma şekli kıyılma modu olarak tanımlanan çalışma şeklinde, dönüştürücü belirlenen anlarda motor fazlarına tek darbe gerilimi uygular. Bu çalışma modunda moment, gerilim darbesinin genişliği ve rotor kutuplarına bağlı olarak motor açılal konumunu değiştirerek kontrol edilebilir. Bu durumda motor hızı ve momenti tümüyle elektronik kontrol düzeninin kontrolü altındadır ve istenen moment / hız karakteristiğini üretmek için kontrol sistemi programlanabilir.

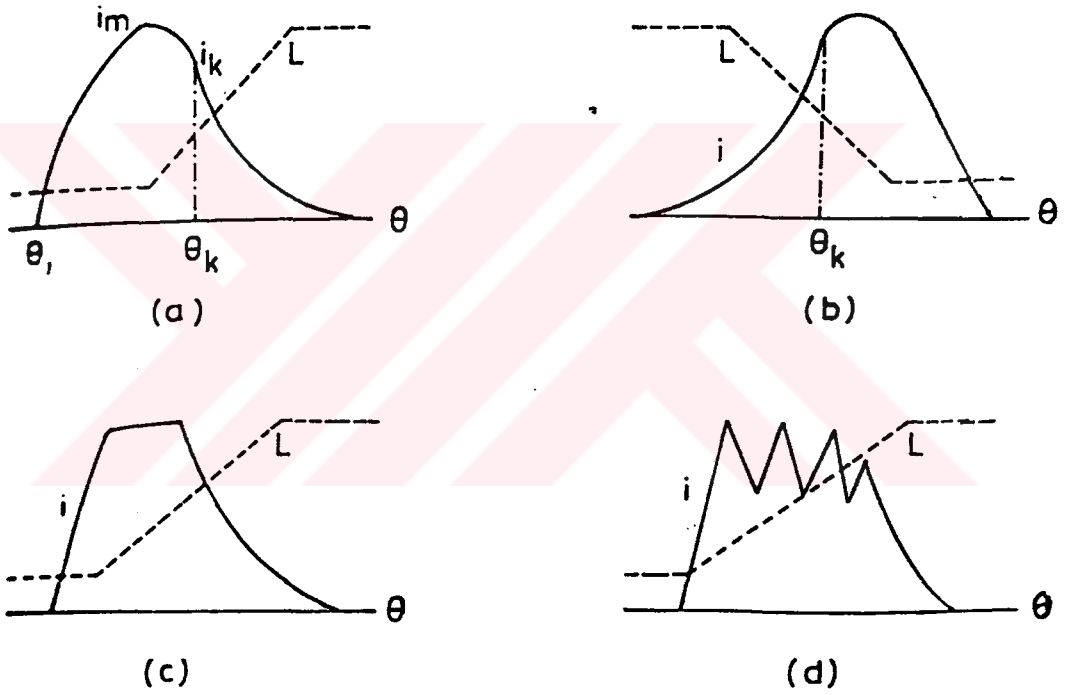
Bilindiği gibi AR motorunun çalışma momenti, eğer akım artan indüktans bölgesinde oluşuyorsa, üretilmektedir. 3.6 no'lu şekilde motorun değişik çalışma modları için akım dalga şekilleri gösterilmektedir.

Şekil 3.6.a'da A.R. motorunun yüksek hızda motor çalışma durumu için akımın dalga şeklini göstermektedir. θ olarak tanımlanan açılal konumun komütasyon değerinde, periyot süresince enerji sağlanır. Bu enerjinin bir kısmı mekanik çıkış enerjisine dönüşür, bir kısım magnetik alanda depolanır, bir kısmı ise bakır ve demir kaybı olarak harcanır. Komütasyon noktasından sonraki periyot esnasında , alan enerjisi kısmen kontrol devresinden kapasite yardımı ile kaynağa döner.

Aşağıda verilen şekilde, b'de tanımlanan akım dalga şekli ise motorun yüksek hızda frenleme veya generatör olarak çalışma bölgesini tanımlar. Burada akım darbelerinin rotor kutbundan ayrıldığı durumda oluşması için kontrol devresindeki güç elektroniği elemanı ateşlenir ve motor negatif moment üretir. Burada sarım akımının tek yönlü ve momentin yönünden bağımsız olması özelliğinden dolayı AR motor tahriğinde motor ve frenleme modlarında çalışma için faz başına, tek anahrarlı elemanı ile kontrol yapılabilmektedir. Burada akım dalga şeklinin üzerinde çalışıldığında akıma ters etki yapar ve ortalama akım doğru akım kaynağına geri döner. Kısaca faydalı frenleme

süresince enerji depolanmış magnetik enerjiden kaynağa transfer edilir. Birçok uygulama şekli için önemli bir enerji avantajı sağlayan faydalı frenleme, ayrıca ilave evirici bileşeni olmadan gerçekleştirilebilir.

- a- Yüksek hızda motor olarak çalışma,
- b- Faydalı frenleme,
- c- Ortalama hızda tek darbe modunda,
- d- Düşük hızda kıyılma modunda çalışma,



Şekil 3.6- Motorun faz indüktansı ve açısıl konumuna bağlı olarak değişen faz akımının dalga şekli.

Yüksek hızda "tek darbe modu" olarak adlandırılan çalışma şekli c'de tanımlanmaktadır. Artan indüktans periyodunda, komütasyondan önce, akımın azalmasına ters elektromotor kuvveti (EMK) neden olmaktadır, bu da a'da açık bir şekilde tanımlanmaktadır. Eğer oluşan elektromotor kuvveti, kaynak gerilimine eşitse, üst kısmı düz olan akım şekli oluşur. Bu şekil daha çok maksimum hızın % 40'ının üzerindeki çalışma koşullarında gerçekleşir. Elektromotor kuvvetinin akım, hız ve konuma bağlı ifadesi aşağıdaki şekilde verilmektedir.

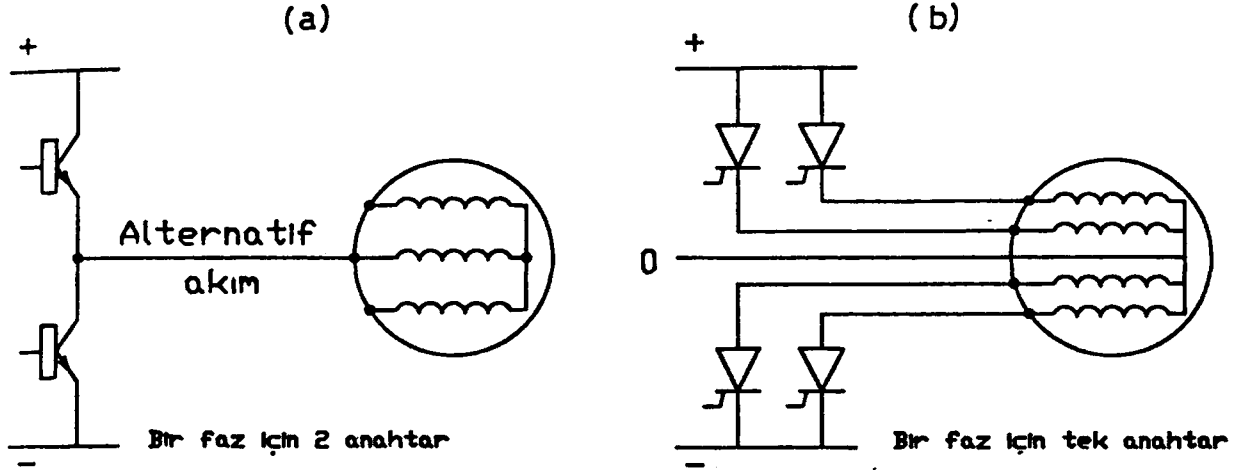
$$E = i. \frac{\delta L (\theta, i)}{\delta \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3.1)$$

Düşük hızlarda ise, akım dalga şekli d'de gösterildiği gibi, artan indüktans periyodunda kontrol devresindeki güç anahtarlarını periyodik olarak iletim ve kesime sokarak I1 ve I2 akım değerlerinin üst ve alt kıyılma seviyelerinde tutulur. Bu çalışma periyodu, maksimum hızın % 40'ının altında oluşur. Tahrik, doğal olarak dört bölgede çalışma için çok uygundur. [1]

3.3. A.R. MOTORUNUN GÜÇ ELEKTRONİĞİ İLE KONTROL UYGULAMALARI

Motorun moment ve hız kontrolü için gerekli kontrol devreleri faz sayısına, sarım biçimine, devrede kullanılan kontrol elemanlarına ve besleme gerilimini de içeren bir çok faktörlere bağlı olarak değişir. Şekil 3.5'de tanımlanan güç konverteri kontrolör devresinin 3 fazlı kaynaktan beslendiği durumda evirici girişine doğru gerilimi sağlamak amacı ile doğrultucu devresi kullanılır.

Anahtarlı Relüktans Motor Kontrolunun güç elektroniği elemanlarının sayısının minimum olmasını sağlayan en göze çarpıcı özelliği de stator faz akımlarının tek yönlü olmasıdır. Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, alternatif akım motorunda, çift yönde akım gereksinimi için gerekli olan eleman sayısı, A.R. motor tahriği ile kıyaslandığında iki katı fazladır.



Şekil 3.7.a- sadece bir faz gösterilen asenkron motor tahriğinin basit devre yapısı,

b- Anahtarlı Relüktans Motor tahriğinde 4 faz için gösterilen basit devre yapısı

Kıyaslamada eleman sayısının azalması gerçeğinin dışında bir başka pozitif etki de, AR konverterinde motor sarım empedansı güç kontrol elemanına seri bağlı olmasıdır. Bu da konvansiyonel eviricilerde oluşan "shoot through" olarak bilinen darbe hatalarından kurutulmaya yarar. [1]

3.3.1. A.R. MOTORU İÇİN KONTROL DEVRELERİ

Anahtarlı Relüktans Motorunun güç elektroniği kontrol devresi için, çok sayıda dizayn seçimleri sunulabilir. Bu seçim kriterleri, motorun stator sargısının yapısına, güç elektroniği elemanlarının gerilim değerlerine ve besleme gerilimine de bağlı olarak farklılık göstermektedir. Motor fazlarını enerjilenmesi için gerekli doğru gerilim, ya aküden ya da alternatif akım kaynağından doğrultularak elde edilmektedir. Tek fazlı kaynak, birkaç kilowatt değerinde tahrik için uygundur. Ancak, 3 fazlı besleme şekli genellikle daha geniş güç değerleri için kullanılabilir. Şebekenin güç faktörü, özellikle düşük hızlardaki çalışma koşullarında ,Anahtarlı Relüktans Motoru tahriğinde, kontrollü doğrultucu ile beslenen doğru akım motoru tahriğinden daha büyüktür. [1]

3.3.1.1. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORU KONTROL DEVRESİ İÇİN ANAHTARLAMA ELEMANLARININ SEÇİMİ

Anahtarlı Relüktans Motorlarının kontrolü için dizayn özellikleri ile güç elektroniği anahtarlama elemanlarının seçimi teknik ve ekonomik koşullara bağlı olarak yapılır. A.R. motor kontrol uygulamalarının ilk örneklerinde, zorlamalı komütasyonlu tristörler kullanılmaktaydı. Ancak bu seçim kriterleri bir yıldan diğer bir yıla kadar gelişen teknolojiye bağlı olarak değişebilmektedir. Bu sistem için kullanılan anahtarlama elemanları şunlardır.

- Bipolar tranzistörler,
- Kapısı izolasyonlu bipolar tranzistörler (IGBT),
- Mosfetler,
- Kapıdan söndürülebilen tristörler (GTO),

Yukarıda sınıflandırılan elemanlar için, elemanın fiyatı, kullanım kolaylığı, anahtarlama hızı,iletim kayıpları ile akım ve gerilim değerleri dikkate alınması gereken önemli parametrelerdir. 100-3000 w değerinde, küçük güçlerde olan A.R. tahriği uygulamaları için en iyi çözümün mosfet elemanları ile olabildiği belirtilmektedir. Bilindiği gibi mosfet elemanı için iletim kayıpları, sabit gerilim düşümü karakteristiklerine bağlıdır, anahtarlama hızları yüksektir ve

anahtarlama kayıpları azdır. Bipolar tranzistörlere ve kapıdan kesime götürülebilen tristörlere karşılık en büyük avantajı tahrik gücünün, yüksek olan kapı giriş empedansından dolayı çok düşük olmasıdır. 3 k_W 'ın üzerinde olan güç değerleri için Mosfet elemanın iletim kayıplarının yüksek olmasından dolayı seçimi ekonomik kılmaz. Bu güç değerleri için günümüzde ,IGBT'ler güçlü bir rakip olmaktadır, fakat pahalıdır. Ancak, gelişen teknoloji ile birlikte, bu elemanlar için kullanıcı açısından maliyet faktörünün cazip olması bu rekabeti daha da güçlendirmektedir. Demiryolu tahriği vya madencilik uygulamalarında olduğu gibi, daha yüksek güçlere (örneğin 100-200 k_W değerlerinde), 1 kv gibi yüksek kaynak geriliminde GTO elemanları uygun olmasından dolayı tercih edilmektedirler. Çalışmanın gerçekleştirildiği 7.5 k_W 'lık test motorunun dönüştürücü devresinde de güç elektroniği kontrol elemanı olarak GTO kullanılmaktadır. [1]

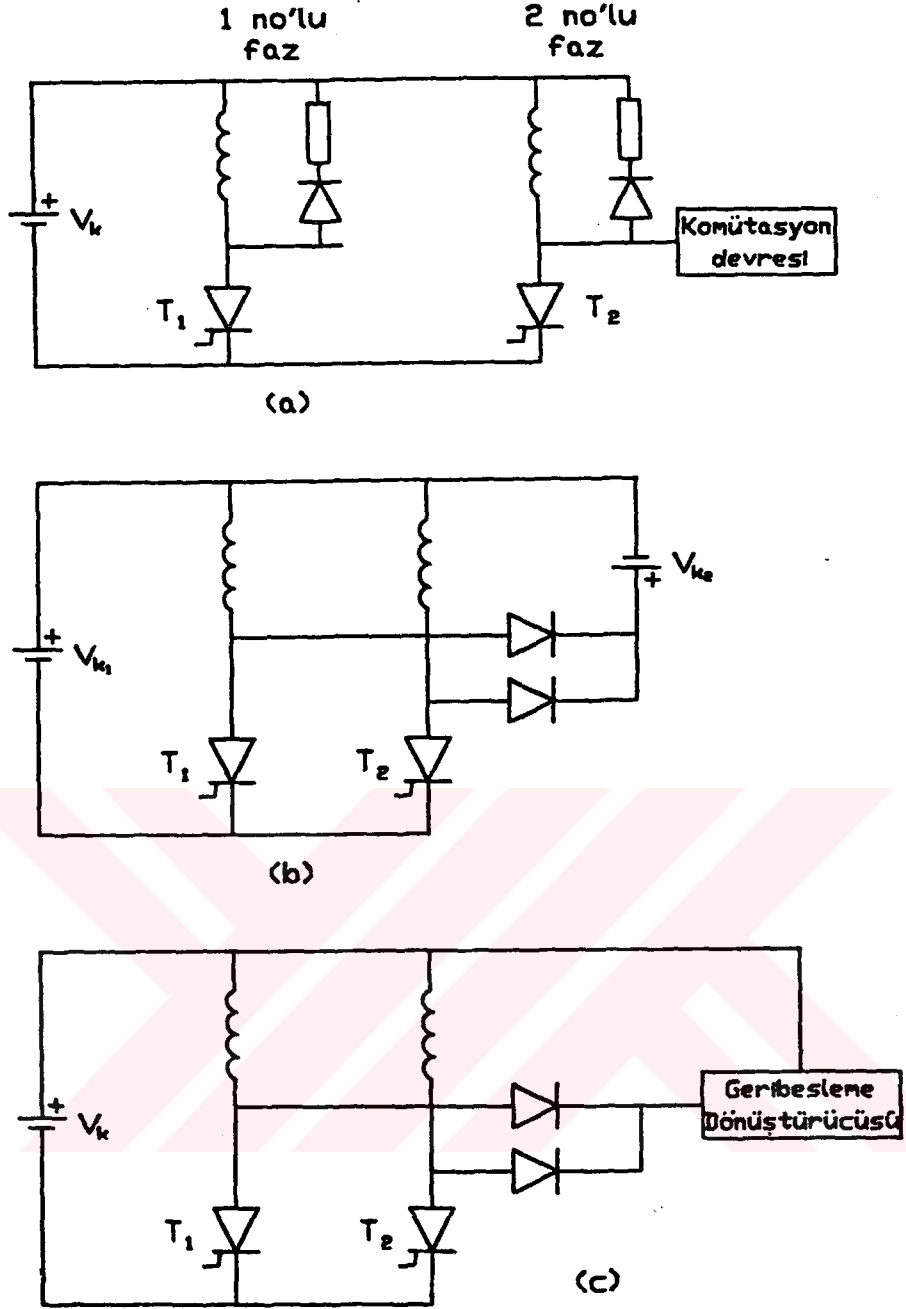
3.3.1.2. FAZ BAŞINA BİR ANAHTARLAMA ELEMANININ KULLANILDIĞI GÜÇ KONVERTER DEVRESİ

Uygulamalara bağlı olarak, güç dönüştürücüsü farklı şekillerde tasarlanmaktadır. Moment üretimi için gerekli olan akım kontrolunda tek yönde akım yeterli olduğu için faz başına tek anahtarlama elemanı içeren dönüştürücü devresi 3.8 no'lu şekilde gösterilmektedir.

Şekilde karmaşıklığa neden olmamak için, motorun sadece, iki fazına ait devre şeması verilmektedir. Ayrıca, şekillerde güç elektroniği anahtarı olarak tristör elemanı gösterilmektedir. Bir motor fazı için, tek anahtarlama elemanının kullanıldığı devre yapıları farklı şekillerde olabilmektedir. Şekil (a)'da verilen yapıda, motor sargısına paralel, diyot ve direnç elemanı bağlıdır. 1 no'lu motor fazı iletime sokulduğu zaman, sargıya kaynak gerilimi uygulanır ve sargıda akım oluşarak artmaya başlar. Tristör, komütasyon devresi ile kesime sokulduğunda, akım, diyot elemanı üzerinden akar ve akım değeri düşer. Magnetik devrede depolanan enerji dirençte azalır ve motor akısını düşürmek için uygun gerilim, akımın azalmasına bağlıdır. Ancak, bu devrede kullanılan direnç nedeni ile azaltma (resistive dumping) çok verimli bir yöntem değildir. Bunu iyileştirmek için, iki adet gerilim kaynağının kullanıldığı devre yapısı (b)'de gösterilmektedir.

İkinci bir besleme kaynağı yardımı ile, motordan enerjinin kaynağı geri dönüşü mümkündür ve motor akısını düşürmek için sabit gerilim bu şekilde sağlanır. Ancak, bu sistemde enerjinin birinci besleme kaynağından alınıp, kalan enerjinin de ikinci kaynağa verilmesi nedeni ile pratik değildir. İdeal olarak, tristör kesimdeyken, motor sarımlarında depolanan enerji ana besleme kaynağına dönmelidir. Bu, (c)'de gösterildiği gibi tasarlanan bir dönüştürücü yardımı ile yapılabilir. Burada enerji kaynağa dönüştürücü yolu ile çevrilir. Yukarıdaki (a) ve (c) şekillerinde tanımlanan devreler düşük güçlü ve düşük maliyetli uygulamalarda tercih edilmektedirler. [1]



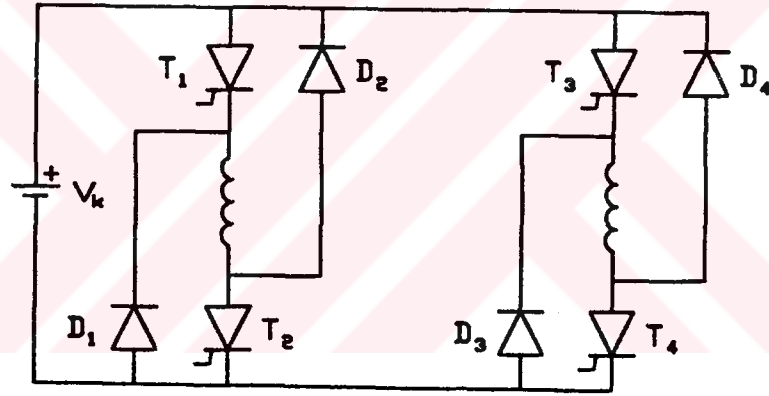


- a- Diyot elemanına seri bağlı dirençli devre,
 b- İki adet besleme kaynağı içeren devre,
 c- Motorda enerji dönüşümü için geri besleme dönüştürücüsünün kullanıldığı devre.

Şekil 3.8- Faz başına bir adet anahtarlama elemanının kullanıldığı ve sadece iki fazı gösterilen kontrol devre yapıları.

3.3.1.3. FAZ BAŞINA İKİ ADET ANAHTARLAMA ELEMANI BULUNAN KONTROL DEVRESİ

Magnetik alanda depolanan enerjinin kaynağa dönüşünü sağlayan bir diğer yol da, faz başına anahtarlama elemanı kullanılmaktadır, bu da sadece iki faz için şekil 3.9 'da gösterilmektedir. bir faza ait her iki tristör de aynı anda ateşlenirler. Eğer her iki tristörde birlikte kesime götürülürse, akım her iki diyot elemanından kaynağa geri döner. Ayrıca, şekil 3.9'da gösterilen devrede bir faza ait tristörlerin sadece birisi kesime götürülürse , akım diğer tristör tarafından sağlanan ve diyotla birleştirilen yoldan akar. Tanımlanan devre, çalışma koşullarında çok esnekler.

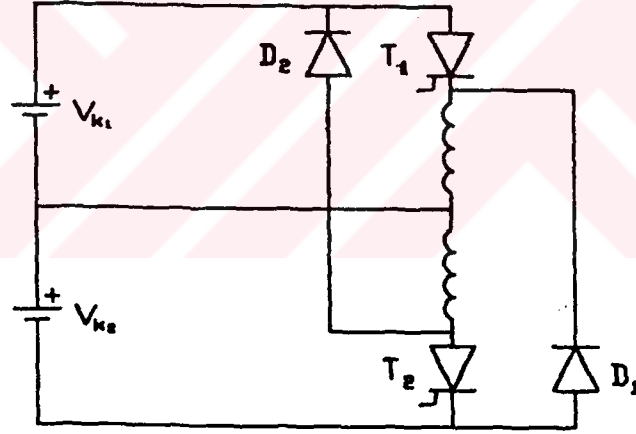


Şekil 3.9. Motorun bir fazında iki anahtarlama elemanının bulunduğu dönüştürücü devresi.

Ancak her fazda iki adet anahtarlama elemanı ve diyot kullanıldığı için pahalıdır ve iki anahtarlama elemanının seri olarak bağlı olmasından dolayı verimi biraz daha düşüktür. Her iki tristörün iletim ve kesime götürülmesi ile iletim süresince akım sınırlanabilir.

3.3.1.4. BİR ADET ANAHTARLAMA ELEMANI OLAN BÖLÜNÜMÜŞ KAYNAKLI A.R. MOTORU KONTROL DEVRESİ

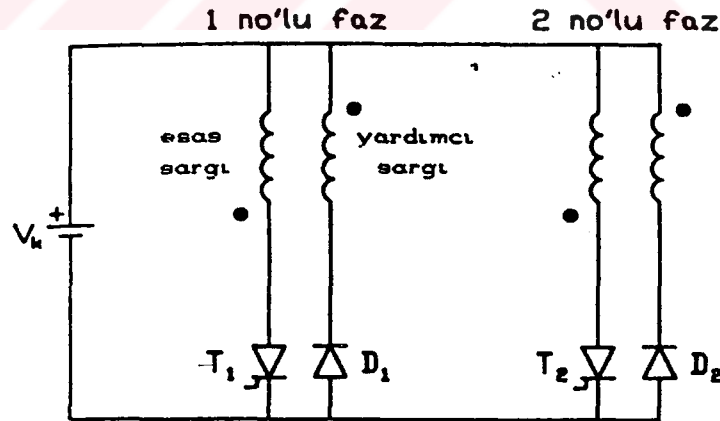
Faz başına bir adet anahtarlama elemanını kullanabilmek için bir başka alternatif bölünmüş kaynak kullanılmaktadır. Bu şekilde tanımlanan bir devre şekil 3.10'da gösterilmektedir. Bu durumda motor sargısı besleme geriliminin yarısı ile enerjilenir ve depolanan enerji diyot yardımı ile kaynağın öteki yarısına geri döner. Devrenin, bölünmüş kaynak gereksinimi ve anahtarlama elemanlarının akım değerlerinin iki katı olması olumsuz faktörlerdir. [1]



Şekil 3.10. Faz başına tek anahtarlama elemanının kullanıldığı bölünmüş kaynaklı iki fazlı devre.

3.3.1.5. İKİ KATLI STATOR SARGISI OLAN A.R. MOTORUNUN KONTROL DEVRESİ

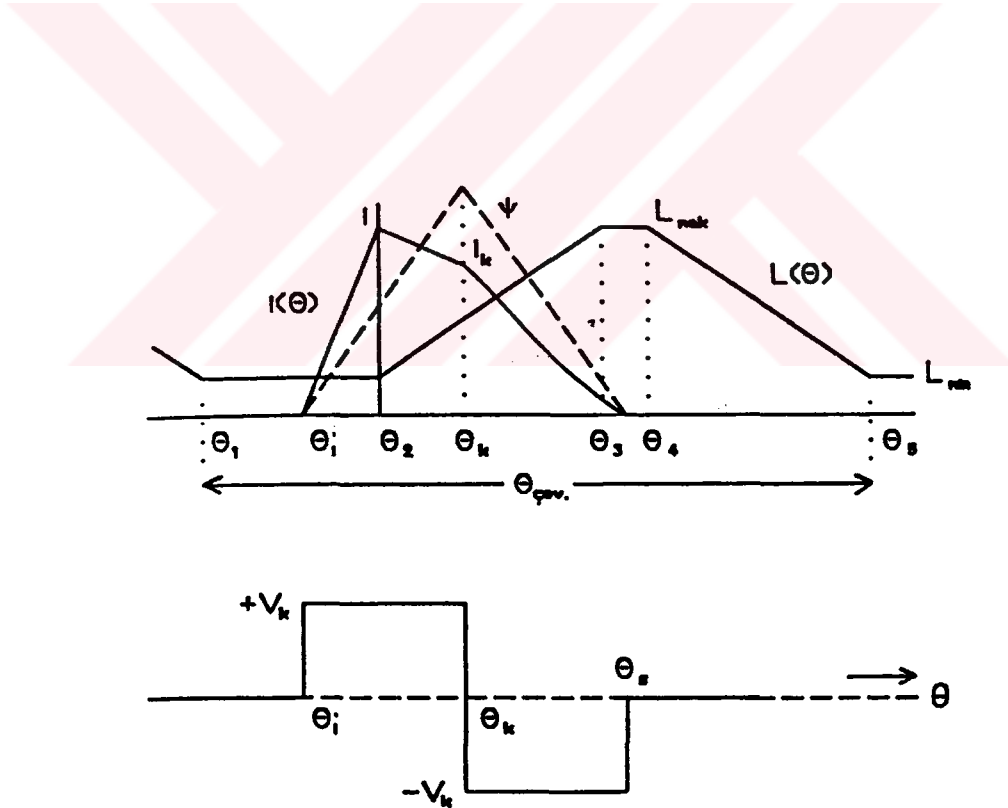
Faz başına bir anahtarlama elemanına sahip bir başka devrede, Anahtarlı Relüktans Motorunun çift katlı stator sargısına (bifilar wound stator coil) sahip olduğu durum, şekil 3.11'de gösterildiği gibidir. Bu devrede kaynak geriliminin tamamı faza bağlı tristör yardımı ile motor sargısına uygulanır. Tristör kesime götürüldüğü zaman, akımın yardımcı sargıya diyot yoluyla akışı sağlanır. Her iki faz sarımı oranının da aynı olduğunu kabul edersek, kaynak geriliminin tamamı motor akısını düşürmek için yeterlidir. Çift katlı stator sargısından biri esas , diğeri ise yardımcı sargı olarak tanımlananlar birbirine karşı yönde bulunan stator kutuplarına birleştirilerek , akımın akışı sağlanır. Bu sistemde motor ile dönüştürücü arasında çok sayıda bağlantı olması ve sargılar ile tristörlerin gerilim oranlarının yüksek olması olumsuz faktörlerdir. Bu tipteki devre yapısı, özellikle düşük gerilimde bazı uygulamalar için verimli ve çok ekonomiktir. Yukarıda tanımlanan devre bir tek gerilim kaynağı ile dönüşüm yapabilmesi açısından uygundur.



Şekil 3.11. İki katlı stator sarımı bulunan bir A.R. motorunun sadece iki fazının gösterildiği dönüştürücü devresi.

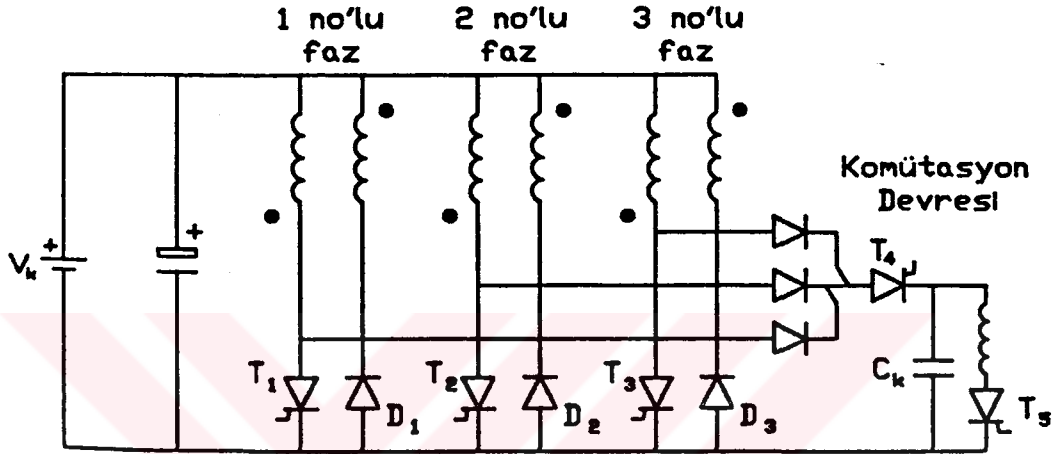
Şekil 3.12'de gösterildiği gibi faz akımını sargıda oluşturmak için indüktansın minimum olduğu konumda, θ_i noktasında T_1 tristörü ateşlenir ve sargı kaynaklı gerilimi, olan V_k değerini görür. Akımın tepe değerinde iken θ_2 'de tristorun kesime götürülmesi ile akım yardımcı sargıya geçer ve gerilim $-V_k$ olur. Bununla birlikte θ_3 noktasında akım sıfıra düşer. θ_i ve θ_2 noktaları istenilen akım dalga şeklini oluşturmak için belirlenen kontrol girişleridir ve burada $\theta_2 - \theta_i = \theta_3 - \theta_2$ eşitliği yazılabilir. Maksimum indüktans değerine karşılık gelen rotor açısı ile minimum indüktans değerine karşılık gelen rotor açısının farkına $\Delta\theta$ birim açısı olarak tanımlarsak; birim değerler cinsinden akım ω açısal hızına bağlı olarak şu şekildedir.

$$I = \frac{V_k \cdot \Delta\theta}{\omega \cdot \Delta L} \quad (3.2)$$



Şekil 3.12. Orta değerlerde hızlar için akım darbesi ve faz gerilimi.

İki katlı sarımı olan Anahtarlı Relüktans Motoru için düzenlenen kontrol devresi, komütasyon devresi ile birlikte üç fazlı sistem şekil 3.13'de gösterilmektedir.

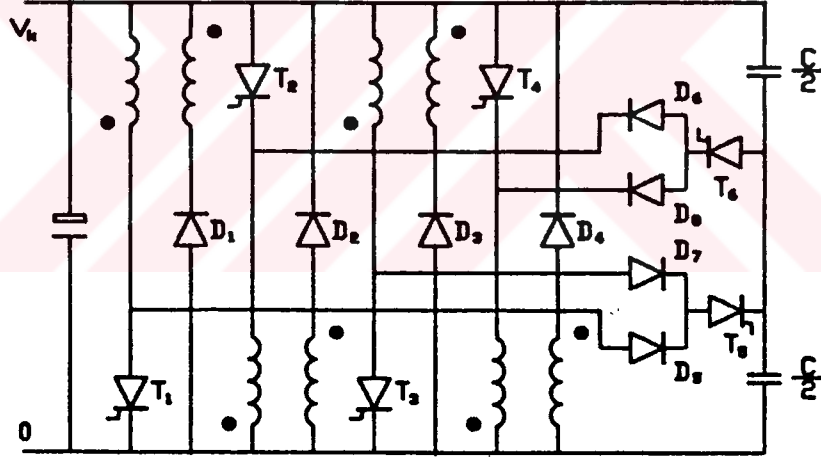


Şekil 3.13. Üç fazlı çift katlı stator sargısı bulunan A.R. motorunun kontrol devresi.

Şekilde gösterilen T_1 tristörü iletimdeyken oluşan akım i_1 , kapasite gerilimi ise $V_c = -(2V_k + \Delta V)$ değerindedir. T_4 komütasyon tristörü ateşlendiğinde, T_1 kesime gider ve $V_c = 2V_k$ değerinde C kapasitesi, şarj olacaktır. İndüktansa bağlı olarak akım, $V_c = 2V_k + \Delta V$ 'de transfer tamamlanana kadar yardımcı sarıma akarken C kapasitesi şarj olmaya devam eder. ΔV darbe gerilimi esas ve yardımcı sarımların birleştirilmiş indüktans bağlantısı ile orantılı ve $\Delta V = \dot{I}_m \cdot 2 / C$ değerindedir. T_1 tristörü için ters gerilim zamanı $t_{tgz1} = I_m (2V_k + \Delta V) / C$ olarak tanımlanır. Pratikte I çok düşüktür. (yaklaşık $I = L_{min} /$

800). 3.13 nolu şekildeki birleşenler için gerekli gerilim değerleri 1 nolu tabloda kısaca özetlenmektedir.

Eğer sistem dört fazlı ise, komütasyon tristörlerin yer değiştirdiği bağlantı şekli 3.14'de verilmektedir. 1 nolu tabloda da görüldüğü gibi, komütasyon tristörlerinin ve yardımcı diyotların gerilim değerleri azalmaktadırlar. Bu şekilde yapılan komütasyon ile devrenin frekansı yarıya iner ve böylece verim iyileşir. T_1 tristörü için ters yönde gerilim zamanı ise, $t_{gz1} = I_m (V_k + \Delta v) / C$ şeklindedir ve kapasite değerinin yüksek olması gerekir.



Şekil 3.14. Dört fazlı ve çift katlı motor kontrol devresinde komütasyon kapasitesinin farklı bir devre yapısı

TABLO 3.1 GERİLİM DEĞERLERİ

	Şek.3.13	Şek.3.14
Ana tristörler	$2V_k + \Delta V$	$2V_k + \Delta V$
Komütasyon tristörleri	$4V_k + \Delta V$	$3V_k + \Delta V$
Ters yön. tristörleri	$2V_k + \Delta V$	-
Ana diyodlar	$4V_k + \Delta V$	$3V_k + \Delta V$
Kom. diyodları	$2V_k + \Delta V$	$2V_k + \Delta V$
Kom. kapasiteleri	$2V_k + \Delta V$	$2V_k + \Delta V$

Yukarıda tanımlanan devrelerde komütasyon devrelerine dikkat edecek olursak, A.R. motoru kontrolünde komütasyon için sadece iki adet tristörün kullanılması yeterlidir. Oysa, üç fazlı asenkron motor kontrolünde komütasyon için altı adet tristör elemana gereksinim vardır.

BÖLÜM 4 : ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUNUN ULAŞIM UYGULAMALARINDA KULLANILABİLMESİ İÇİN ELDE EDİLEN KAREKTERİSTİKLERİN İRDELENMESİ

4.1. GENEL

Anahtarlı Relüktans Motorlarının dizayn özelliklerinin iyileştirilmesi ile birlikte değişken hız tahrikli endüstri uygulamalarında, motora artan bir ilgi gözlenmektedir. Uygulama alanlarının bir kısmını oluşturan kompresör fan, pompa ile tekstil endüstrisinde kullanılan tahrik sisteminin , ulaşımdaki yeri ve kullanılabilirliğinin araştırılması bu çalışmanın özünü oluşturmaktadır.

Dünyadaki hızlı kentleşme ve kent nüfusunun önlenmeyen artışı ulaşımın verimli, süratli ve en önemlisi ekonomik olması gerekmektedir. Bu amaçla, kısa mesafede akülü araçlar ile hafif raylı sistemler,uzun mesafede kullanılan ulaşım araçları için ise çekici (lokomotif) uygulamalarında kullanılabilecek tahrik sistemlerinde Anahtarlı Relüktans motorların uygulanabilirliği hedef seçilmiştir. Bu bölümde örnek oluşturan bir Anahtarlı Relüktans Motorunun lineer olmayan magnetik yapısına ait karakteristikleri tanımlanmış ve çalışma davranışını incelemek için kontrol edebilirliği konusunda da detaylı bir inceleme yapılmıştır.

Bütün bu temel çalışma karakteristiklerinin ışığında, endüstrinin özel bir uygulama alanı olan ulaşımda kullanılabilirliği için parametrelerin karşılaştırılmasıyla birlikte ekonomik üstünlüğünde bu bölümde detayları ile sunulacaktır. Teknik ve ekonomik açıdan kısacası, optimum çözümleri belirleyebilmek için farklı boyutlardaki A.R. motoruna ait incelemeler de bu bölümde verilmektedir. [1]

4.2. ULAŞIM TAHRİĞİNDE KULLANILAN ALTERNATİF AKIM VE DOĞRU AKIM MOTORLARININ PARAMETRELERİNİN ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

4.2.1. GENEL BİR KARŞILAŞTIRMA

Bilindiği gib, doğru akım motorları ulaşım sistemlerinde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bilhassa, Doğru Akım Seri Uyarımalı Motorun tercih edilmesinde en büyük etken, büyük yük momentlerinde düşük devir sayıları, düşük momentlerde ise, büyük hızlar elde edilebilen karakteristiğe sahip olmasıdır. Bu niteliği ile Doğru Akım Motoru, özellikle ulaşım uygulamalarında tercih edilmektedir. Ayrıca, doğru akım kıyıcı sistemlerinin, yol alma ve frenleme durumlarında kayıpsız olarak kullanılabilmesiyle faydalı frenleme yaparak enerjinin yeniden kazandırılması gibi üstünlükleri sıralanabilir. Özellikle doğru akım kıyıcı sistemleri kontrol esnekliğinin ve verimlerinin artması ile birlikte olumsuz etkilerine rağmen tercih edilen düzenlerdir. Oysa doğru akım makinalarını güç koşullarda komütasyona sokmak zordur ve soğutma havasında bulunan toz ve kirler endüvi izolasyonuna zarar vermektedir. Bundan başka , fırçaların aşınması ve komütatör yüzeyinin kalitesinin bozulması gibi olumsuz etkiler araştırmacıları yeni alternatif arayışlara götürmektedir.

Ulaşım uygulamalarında, alternatif akım motorları olan sistemleri cazip kılan en büyük etken, komütasyon problemlerinin olmayışıdır. Fırçasız tahrik sistemleri arayışı içinde alternatif bir sistem olan Anahtarlı Relüktans Motorları güçlü bir rakiptir. Aynı çıkış gücüne sahip olan bir Asenkron Motor ile A.R. Motoru mukayese edildiğinde, A.R. motorunun boyutları daha küçüktür. Rotorun sanırsız olması ile ağırlık, aşın yüklenme ve soğutma avantajları da A.R. motorunun asenkron motorlarının karşısında üstünlüklerinden bazıları olarak sayılabilir.

Ulaşım sistemleri tahriği açısından alternatif akım sistemlerinin doğru akım ile kıyaslandığında, tercih edilmelerinin başlıca nedeni, kollektör ve fırçalarının olmayışından dolayı bakım giderlerinin daha az olması ve boyut avantajıdır. Bununla birlikte Anahtarlı Relüktans Motorlarında bu özelliklerin de dışında kontrol elektroniğinde sağlanan dizayn üstünlükleri ulaşım uygulamaları için, bu tahrik sistemini cazip kılmaktadır. [1,4,7]

4.2.2. DOĞRU AKIM MOTORU İLE ASENKRON MOTORUNUN ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORU İLE BENZERLİĞİ

Burada, sistemin ulaşım uygulamalarında kullanılabilirliği açısından bir inceleme yapabilmek için, ulaşımında yaygın bir biçimde kullanılan sistemlere benzerlik ve üstünlüklerini incelemek gereklidir. Bu amaçla değişken hız tahriğinde güçlü bir rakip olan D.A. ve A.A. motorların ile kıyaslamak gereklidir. [1]

4.2.2.1. A.R. MOTORUNUN D.A. MOTORLARINA YAKLAŞTIRAN MOMENT SABİTİNİN HESABI İLE KAREKTERİSTİKLERİNİ GENEL OLARAK KARŞILAŞTIRILMASI

Bilindiği gibi sabit besleme gerilimi ile kaynak akımının doğrudan kontrol edilebilirliği bu sistemleri doğru akım seri motorlarına yaklaştırmaktadır. Anahtarlı Relüktans Motorunun magnetik alan akısının rotorun yer değiştirme açısına bağlılığını k_e parametresi doğru akım motorunda endüvi sabiti veya ters elektromotor kuvveti olarak tanımlanabilir.

$$k_e = \frac{d\psi}{d\theta} \text{ (Vs / rad)} \quad (4.1)$$

Sabit akım değerinde açısal hız ile çarpıldığı zaman motorun elektromotor kuvvetini tanımlayan bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$e = \omega \cdot \frac{d\psi}{d\theta} = \omega \cdot k_e \text{ (Volt)} \quad (4.2)$$

Doğru akım motorlarında tanımlanan "endüvi reaksiyonu" k_e , Anahtarlı Relüktans Motorlarında da benzer etki yaratmaktadır. Bu düşünce ile çeliğin ideal olarak (B_d) akı yoğunluğu ile doymuş olduğu kabul edilirse, motorun faz akısı, kutupların üst üste çakışık olduğu durumda aşağıdaki şekildedir.

$$\psi = S_{\text{faz}} \cdot r_1 \cdot l' \cdot B_{\text{doy}} \cdot \beta \quad (V_s) \quad (4.3)$$

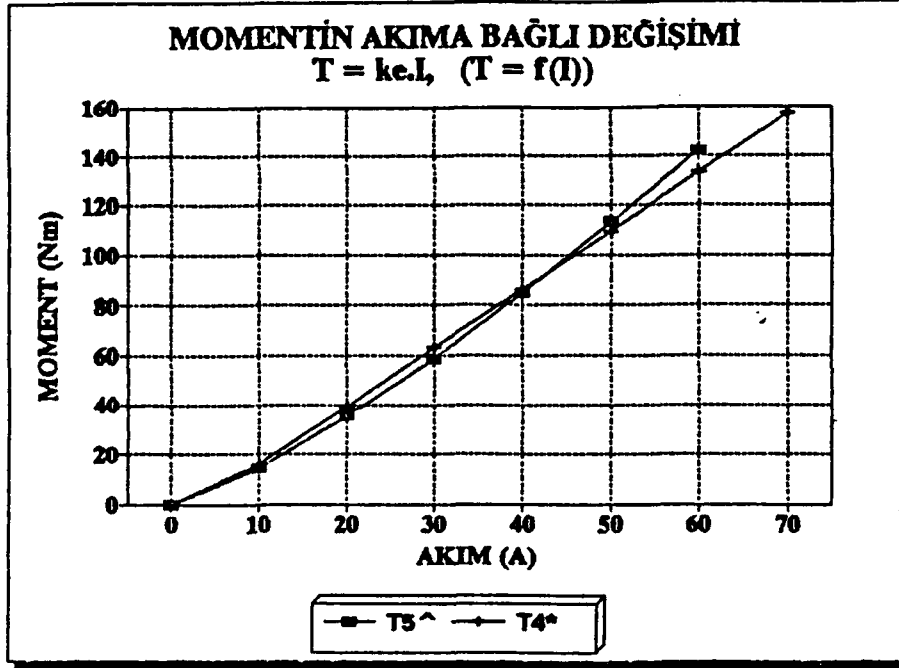
- S_{faz} = Her fazın seri sarım sayısı,
 r_1 = Rotor yarıçapı (mm),
 B_{doy} = Çeliğin doymuş olduğu akı yoğunluğu değeri (T),
 β = Kutupların üst üste bindiği açı değeri (derece),
 l' = Çekirdek genişliği (mm),

β açısı rotor yer değiştirme açısı olan θ değeri ile lineer olarak değiştiği için ifade , aşağıdaki gibi çıkartılabilir.

$$k_e = \frac{d\psi}{d\theta} = S_{\text{faz}} \cdot r_1 \cdot l' \cdot B_{\text{doy}} \quad (V_s / \text{rad}) \quad (4.4)$$

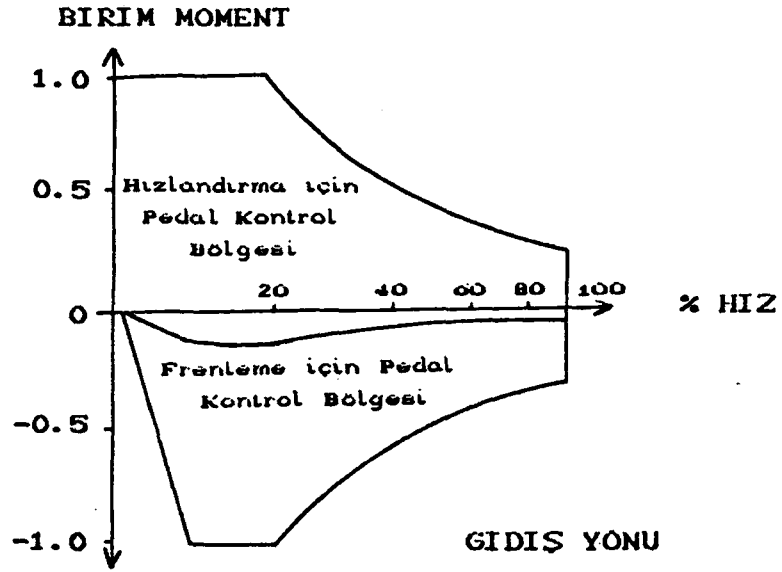
k_e değerine bağlı kalarak Anahtarlı Relüktans Motoru tamamen doğru akım motoruna benzer şekilde davranır. Doğru akım motorunda olduğu gibi sabit k_e değeri her akımdaki momentin değerine eşittir. Bu da analizini yapılan test motoru için şekil 4.1 'de gösterildiği gibi hesaplanarak elde edilmiştir. 4.1 no'lu bağıntıdan elde edilen $M = f(I)$ eğrisinin doğru akım seri motorundaki momentin akıma bağlı değişimine benzerliği gözlenmektedir.

$$T = k_e \cdot I = S_{\text{faz}} \cdot r_1 \cdot l' \cdot B_{\text{doy}} \cdot I \quad (N_m) \quad (4.5)$$



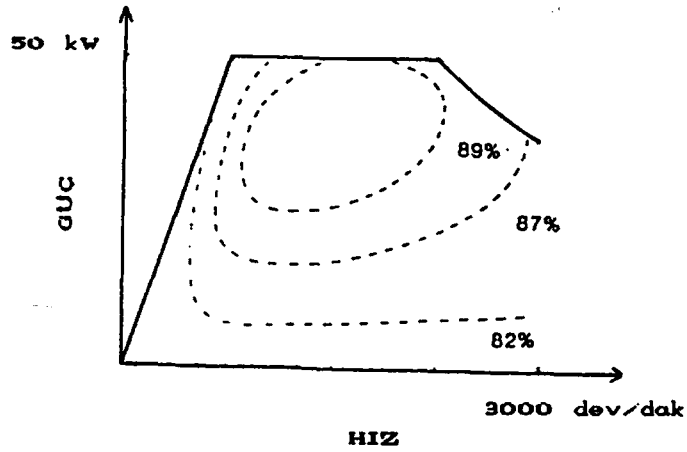
Şekil 4.1. Moment sabitine bağlı olarak 7.5 kW değerindeki motorun tanımlanan akı fonksiyonu kullanılarak elde edilen $M = f(I)$ değişimi.

Bunun dışında Anahtarlı Relüktans Motorlarının ulaşım uygulamalarında cazip kılacak en belirgin diğer özellikleri de çok iyi dinamik performansı ile 4 bölgede çalışabilmesinden dolayı tam kontrollü doğru akım motoruna benzerliğidir. Özellikle şekil 4.2 'de hafif raylı taşıma sistemi için tasarlanan 22 kW gücündeki, Oulton tahriğine ait moment hız karakteristiği gösterilebilir. Çalışmasından gözlemlenebilen en çarpıcı özelliği de, motorda hızlandırmanın çok düzgün olması ve düşük hızlara yüksek kalkış momentine sahip olmasıdır.



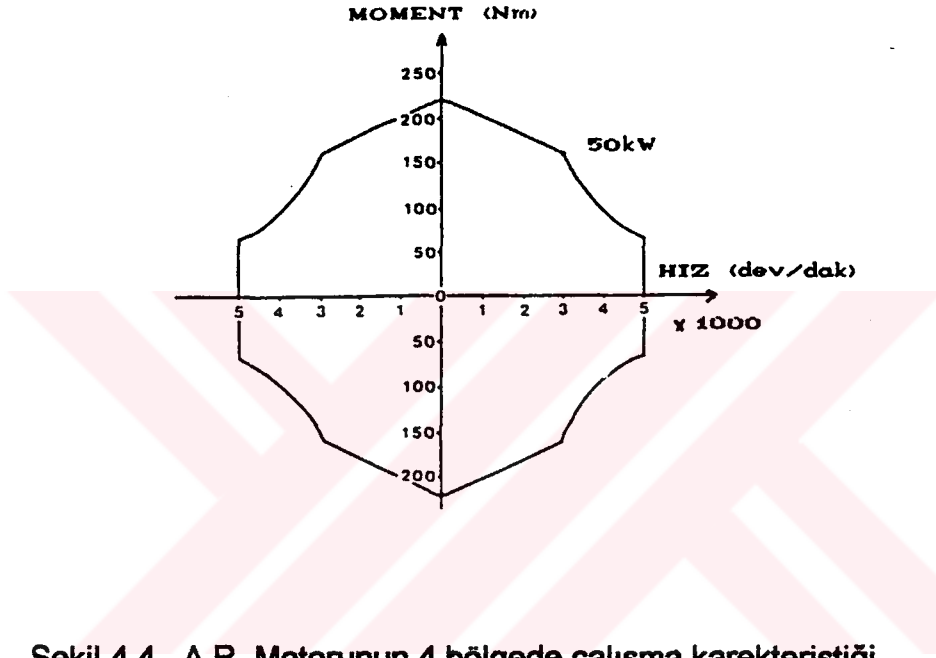
Şekil 4.2. Ulaşım amacı için tasarlanan 22 kW değerindeki Anahtarlı Relüktans Motoruna ait moment hız karakteristiği.

Ulaşım tahriği uygulamaları için geliştirilen 50 kW gücünde 750 dev / dak hızında olan Anahtarlı Relüktans Motoruna ait sabit verim eğrileri ile güç karakteristiği şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Ulaşımında kullanılması amacıyla tasarlanan 50 kW değerindeki A.R. motorunun güç karakteristiği ve ölçülen verim eğrileri

Anahtarlı Relüktans Motorunun 4 bölgede çalışma özelliği de Doğru Akım Motorlarına benzemektedir. Özellikle, ulaşım uygulamaları için şebekeye enerjinin geri kazandırılması enerji ekonomisi açısından önemli bir özelliktir. 4.4 no'lu şekilde de 50 kW gücünde ve 3000 dev / dak nominal hıza sahip motorun 4 bölgede çalışma şeklini tanımlayan moment hız değişimi gösterilmektedir. [1]



Şekil 4.4. A.R. Motorunun 4 bölgede çalışma karakteristiği.

4.2.2.2. ASENKRON MOTORLARIN RELÜKTANS MOTORLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Alternatif akım makinalarının moment üretme kabiliyeti toplam elektromagnetik alan gücü dikkate alınarak kolayca karşılaştırılabilir ve tahmin edilebilir. Bu da magnetik alan akısının üretimine bağlıdır. Alternatif akım motorunun elektromagnetik alan gücü şu şekilde tanımlanabilir.

$$P_{\alpha} = q \cdot f \cdot \int i \cdot d\psi \quad (4.6)$$

Burada; q : Motorun faz sayısı
 f : Motorun faz frekansı (Hz)
 i : Faz akımı (A)
 ψ : Motor fazına ait toplam alan akısı (Vs)

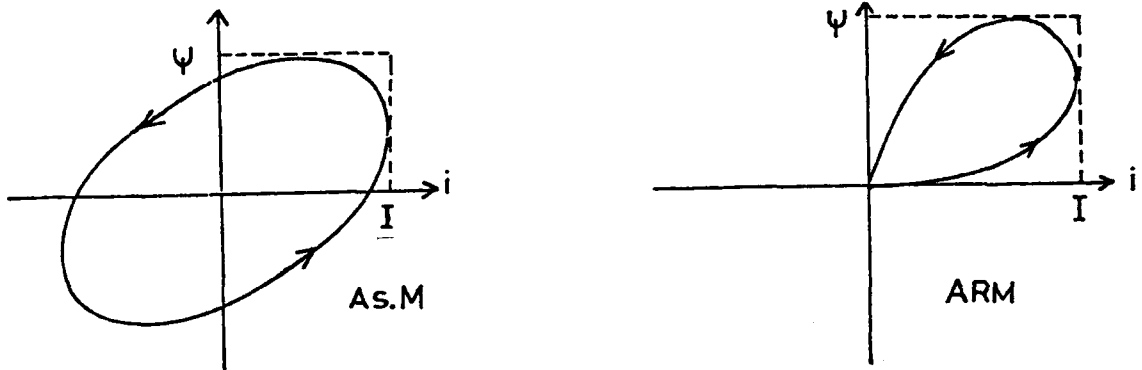
Motorların verimini yüksek olduğu varsayımla çıkış gücü P ve dev / s olarak motor hızı v olarak gösterilirse çıkış momenti $P / (2\pi v)$ biçimindedir. 3 fazlı ve 4 kutuplu bir asenkron motorda faz frekansı dev / s olarak verilen rotor hızının iki katıdır.

$$(q \cdot f)_{AS} \cong 6 \cdot v \quad (4.7)$$

Dört fazlı, 8 / 6 kutuplu bir Anahtarlı Relüktans Motorunda faz frekansı rotor hızının altı katıdır.

$$(q \cdot f)_{AR} \cong 24 \cdot v \quad (2.8)$$

Asenkron motoru evirici yerine A.A. kaynağından beslediği kabul edersek demir mıknatıslığı 4 bölgeyi içerdiği şekil 4.5 a 'da gösterilmektedir. Ayrıca, şebekenin güç faktörü de $\cos \phi$ olarak tanımlanmaktadır. (b) de ise Anahtarlı Relüktans Motorunun mıknatıslanma eğrisi sadece tek bölgede tanımlandığı gibidir.



Şekil 4.5. Sırası ile asenkron ve anahtarlı relüktans motorlarına ait mıknatıslanma eğrileri.

Asenkron Motor için;

$$\int i \cdot d\psi = \pi \cdot l_t \cdot \psi_t \cdot \cos\phi = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \psi_t \cdot I_{\text{eff}} \cdot \cos\phi \quad (4.9)$$

Anahtarlı Relüktans Motoru için

$$(l_t / l_{\text{eff}} = k_c)$$

$$\int i \cdot d\psi = k \cdot \psi_t \cdot l_t = k \cdot k_c \cdot \psi_t \cdot l_{\text{eff}} \quad (4.10)$$

k ve k_c değerleri geometrisi belirli bir motor için lineer olmayan eşitliklerden detaylı olarak hesaplamadan teorik olarak belirlemek güçtür. Maksimum güçte ve hızda çalışma için bu değerler yaklaşık olarak ölçülür. Genelde $k \cdot k_c = 1.0$ alınır.

$$\left[\int i \cdot d\psi \right]_{\text{AS}} \cong 4 \cdot \left[\int i \cdot d\psi \right]_{\text{AR}} \quad (4.11)$$

Bu durumda birbirine eşit akı-akım çevriminde A.R. motoru 4 kez daha fazla moment üretmektedir. Ayrıca, AR motorunda rotor bakır kayıpları olmadığı için mekanik güce dönüşen elektromagnetik alan gücü dolayısı ile verimi daha yüksektir. 4 fazlı 7.5 kW gücündeki Anahtarlı Relüktans Motoru ile 3 fazlı bir Asenkron Motor arasında stator sarımındaki bakır kayıpları açısından yapılan bir karşılaştırmada , Asenkron Motorun stator bakır kaybı A.R. Motorun kaybindan 1.4 katı daha fazla olduğu gözlenmektedir. Ventilasyon , sürtünme gibi diğer kayıpların toplamı ise Asenkron Motorda A.R. Motorundan 1.3 katı daha fazladır. Anahtarlı Relüktans Motorunun Asenkron Motor ile karşılaştırılmasında daha yüksek verime ve daha düşük sıcaklık artışına sahip olduğu belirtilmektedir. [1]

4.3.A.R. MOTOR TAHRİKLİ SİSTEMLER İLE DİĞERLERİNİN MALİYET VE PERFORMANS BAKIMINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Buraya kadar olan kısımda, hem alternatif hem de doğru akım motorları ile Anahtarlı Relüktans Motorları arasında yapılan analizler yardımı ile bazı kriterleri karşılaştırma olanağı yaratıldı. Ancak, araştırmacılar tarafından yapılan dört farklı tahrik tipi arasındaki karşılaştırmada genel anlamda A.R. Motorlu tahrik sisteminin kabiliyetini açıkça göstermektedir. Tablo 4.1 'de verilen bu karşılaştırma 7.5 kW gücünde ve 1500 dev / dak hızında sabit momentte çalışma koşulları için yapılmıştır. Tablo farklı motor tiplerine fiyat ve performans açısından genel bir karşılaştırmasını göstermektedir.

Bilindiği gibi, darbe genişlik modülasyonlu eviricilerin kullanıldığı asenkron tahrik sistemi, diğerlerine nazaran oldukça yüksek maliyetlidir. Aynı güce sahip olan motorlar arasında boyut açısından en avantajlı olan sistem A.R. Motor tahrikli olanıdır. Tablodan da görüldüğü gibi verim açısından oldukça üstün durumda bulunan A.R. motorlu tahrik sistemi, özellikle tam yükte ve nominal hızın yarısında çalışma koşullarında verimi çok yüksektir. Özellikle gürültü açısından A.R. motorlu sistemin problem yaratacağı düşüncesinin burada olumsuzluk olarak değerlendirilemeyeceği açıkça görülmektedir. [1]

Tablo 4.1. BAZI TAHRİK SİSTEMLERİNİ MALİYET VE PERFORMANS AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI

Kriterler	TAHRİK ŞEKLİ			
	Kaymalı Kavrama	D.A	A.A PWM	ARM TAHRİKLİ
Maliyet	0.8	1.0	1.5	1.0
Verim % (Tam yük ve tam hızda çalışma)	75	76	77	83
(Tam yük, yarım hızda çalışma)	38	65	65	80
Boyutlara göre güç	0.80 ⁺	1.00 ⁺	0.90 [*]	1.02 [*]
Kontrol karmaşıkl.	0.2	1.0	1.8	1.2
Kontrol edilebil.	0.3	1.0	0.5	0.9
Güvenirliliği ve servis edilebil.	1.3	1.0	0.9	1.1
Gürültü (dB)	69	65	74	74

(+ Ventilasyon ile soğutmalı motor)

(* Tamamı çevrili fan soğutmalı motor)

Alternatif akım motorları doğru akım motorundan daha ucuz olmasına rağmen kontrol devresi ile birleştirilmiş fiyatı daha fazladır. Bununla birlikte A.R. motoru bu açıdan her ikisine de güçlü bir rakiptir. Sistemin ekonomik olmasının önemli olduğu ulaşım gibi maliyeti yüksek tesislerde, sadece karşılaştırmaya

yapabilmek için yapılan fizibilite çalışmalarında 337 ve 450 kW gücündeki asenkron motor tahrik sistemi esas alınmıştır. Karşılaştırmanın sonucunda , 337 kW gücündeki A.R. Motor tahrikli olandan güç başına toplam maliyeti, iyileştirilmiş bir tasarımla % 25 ile % 30 daha avantajlı olduğu belirtilmektedir. Ulaşım uygulamaları için kullanılan motorun, soğutma sistemi etkili olmalıdır. Asenkron Motorun tersine A.R. Motorunda rotorun çıkıntılı yapısından ve sarımsız oluşundan dolayı soğutma işlemi için hava dolaşımı yalnızca stator sarımlarında yani stator yüzeyinde gerçekleşmesi yeterli olacaktır. Verimi, maliyeti ve performansının yüksek oluşu A.R. Motorlu tahrik sistemlerini ulaşım uygulamalarında kullanım için cazip kılmaktadır. [1]



BÖLÜM 5 : ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORLARININ DEMİRYOLLARINDA KULLANILMASI

5.1. GENEL

Anahtarlı Relüktans Motoru son yıllarda değişik tiplerde geliştirilip, ticari alanda bir çok uygulama alanı bulmuştur. Son zamanlarda demiryolu uygulamalarında DC ve indüksiyon motorlarına ciddi bir rakip olarak ortaya çıkmıştır.

A.R Motorunun Demiryollarında yaygın olarak kullanım alanı bulması için daha birçok gelişmelere ihtiyaç duyulmasına rağmen; DC motor, indüksiyon motoru ve inverter sistemi ile karşılaştırıldığında teknik özellikler ve ekonomik yönden daha avantajlı bir duruma gelmiştir.

A.R. Motoru hızlı transit demiryolu taşımacılık uygulamalarında kullanılabilir bir güç seviyesine gelmiştir. Bu seviye nispeten düşük olmasına rağmen (100-200 kW) diğer sistemlere karşı çok önemli bir adımdır.

Dizayn edilen bir sistemin, elde bulunan bir sistemle karşılaştırılmasında daima zorluklar vardır. Değişken faktörlerin göz önünde bulundurulması ve sonuçların yorumlanması ile sisteme son şeklinin verilmesi gerekir. A.R. Motorunun dizaynı, standart 140 kW'lik motorun iç boşluğuna dayanılarak yapılmıştır. A.R. Motoru için gerekli güç elemanları 12 tristörlü inverter sinüs dalga modülasyonu ve yarı-kare dalga modunda çalışabilen standart bir Mc Murray devresine karşı dizayn edilmiştir. Regüle edilmiş kaynak inverteri ve transistörlü inverterler daha pahalı elemanlardır. Bu yüzden McMurray daha geniş bir alanda kullanılan standart bir rakiptir. [2,3]

5.2. ARM'İN SAĞLADIĞI YARARLAR

DC seri motorları genellikle demiryollarında kullanılan problemlili makinalardır. Bu makinalarda toz ve kir yüzünden soğutma havası yalıtım malzemesine zarar verir. Ayrıca komitasyonun zor olması nedeniyle elektriksel ve mekanik gücün elde edilmesinde zorluklar meydana getirir. Fırçalardaki toz birikmesi, komitatör yüzeyindeki bozulma ve yalıtımındaki yetersizlik nedeniyle bu makinaların 5 seneden daha az sürelerde tekrar bakıma alınması gerekir.

AC motorların demiryollarında kullanılmasında komitasyon problemi ortadan kalkmıştır. Bobinlerdeki yalıtım sınırlanması Sincap kafesli motorların kullanılmasıyla yalıtım sisteminin güvenilirliğini artırır.

A.R. Motorlarında statorda az sayıda ve basit şekilde bobin bulunur. (Genellikle 8) Bu özellik yalıtım sisteminin güvenilirliğinde önemli bir gelişmedir ve gerektiğinde sistemin bakımında büyük bir basitleştirme sağlar. Rotorun üzerinde sarımların bulunmaması motorun sağlamlığını önemli ölçüde artırır. A.R. Motorunun bir diğer önemli özelliği ise geniş bir hız aralığında ve tam gücün üzerinde bakımının yapılabilmesidir. Oysa tam gücün üzerindeki DC seri motorda, güçte bir düşme karakteristiği gösterir.

AC motorların eşit tipteki bir DC motora göre daha ucuz olmasına rağmen AC motorların ilk maliyetleri daha yüksektir. Çünkü kontrol sistemlerinin fiyatları çok daha pahalıdır. A.R. Motoru bu maliyeti en aza indirmek üzere tasarlanmıştır. Özellikle bu motorun elektriksel elemanlarının fiyatları, aynı tipteki motorlara göre çok daha ucuzdur. [2,3]

5.3. MOTOR DİZAYNI

5.3.1. GENEL

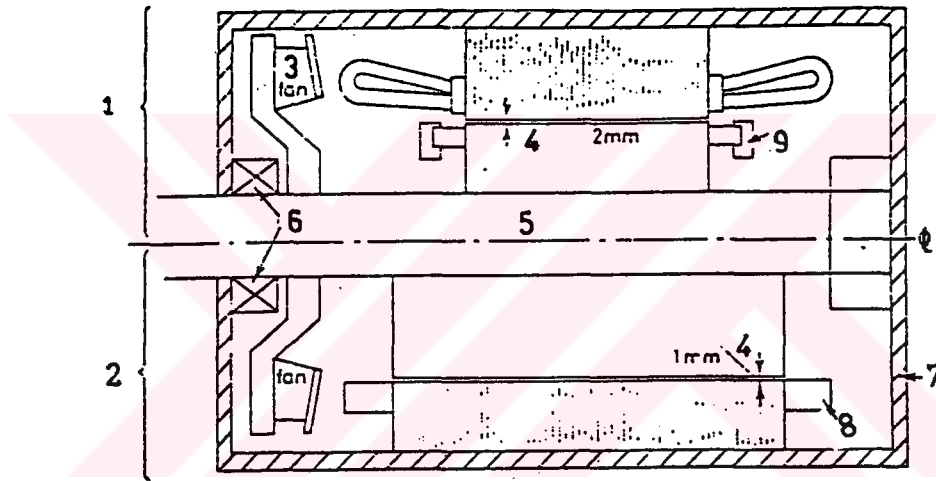
Çıkık kutuplu rotor ve statorlu A.R. Motorunun çalışması ve dizayn prensipleri Lawrenson tarafından açıklanmıştır. Bu bölümde anlatılacak olan motor, British Rail Research ile Leeds Üniversitesindeki çalışmalardan derlenmiş olan 8 stator ve 6 rotor kutuplu motor içindir. Kutup sayıları için diğer kombinezonlarda mümkündür. Her stator kutbuna bir bobin sarılmış ve karşılıklı sarımlar birbirine seri olarak bağlanmıştır. Böylece birbirinden bağımsız 4 tane faz oluşturulmuştur. Her bir kutup dikdörtgen şeklindedir.

Kullanılan iletken kesiti 25 mm²'dir ve birçok ince telden meydana gelmiştir. Bu yüzden kayıp-girdap akımları sınırlandırılmıştır. Rotor, şarf ile lamineleri ve sürüş devresine rotorun açısal değerini bildiren bir diskten oluşur. Rotorun bir turu esnasında her bir stator sarımı 6 tane rotor kutbunu karşılar. Bu yüzden 6 adet darbe sağlanmaktadır. Bu yüzden anahtarlama frekansı dönüş frekansının 6 katı olmak zorundadır. Motorun temel hızı 1390 d / dak ve maksimum hızı 3475 d / dak' dır. Stator anahtarlama frekansı 139 Hz ile 347,5

Hz arasındadır. Yüksek frekanslarda göbekteki magnetik malzemenin kayıpları daha az olur. [2,3]

5.3.2. BOYUTLAR

Motor 480 mm çapında ve 710 mm uzunluğundadır. Yaklaşık ağırlığı ise 900 kg'dir. Laminelerin boyutları ise indüksiyon motorundan elde edileb tecrübelerle göre aynı biçimde yapılırlar. Şekil 5.1. de ise aynı uzunluktaki indüksiyon motoru ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Eşit çıkış gücü elde etmek için A.R. Motorunun stator hacmi daha büyüktür.



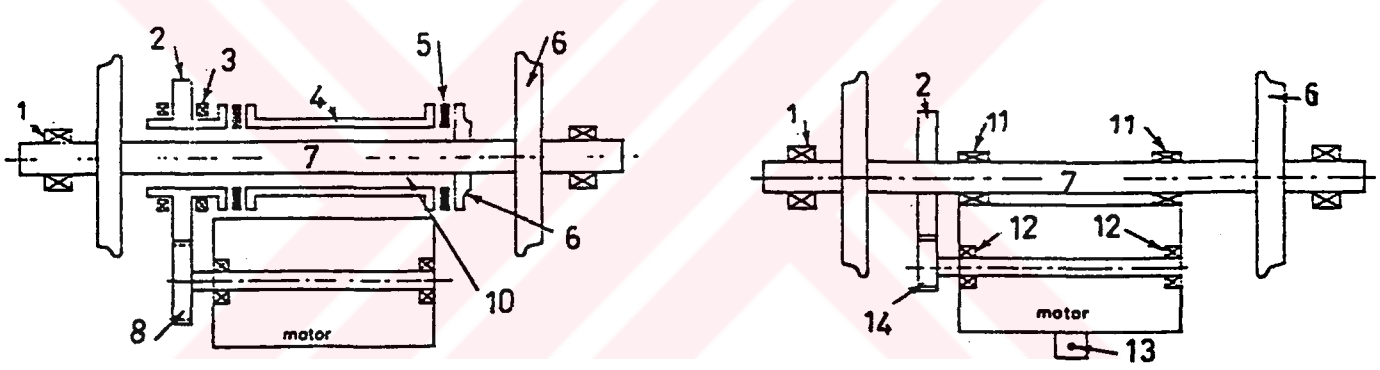
- 1- İndüksiyon motoru
- 2- Relüktans motoru
- 3- Fan
- 4- Hava aralığı
- 5- Şaft
- 6- Yataklar
- 7- Motor zırhı
- 8- Sarım sonu
- 9- Kafes

Şekil 5.1. Özdeş boyutlardaki anahtarlı relüktans ve indüksiyon motorlarının kesiti

5.3.3. MEKANİK DİZAYN

Demiryolu uygulamalarında mekaniksel olarak A.R. Motorunun iki tür bağlantı şekli vardır. Bunlar Bogie ve Axle-Hung motorlarıdır. Bogie tip bağlantıda, ani yüklenmelere karşı süspansiyonlar ile mil korunmuştur. Bu tip motorlarda dişli kutusu ve sürme elemanları daha pahalıdır. Axle-Hung tip bağlantıda ise motor, yataklar ve basit bir dişli ile mile doğrudan bağlanmıştır. Bu yüzden motor mili darbelerden daha çok etkilenir. Buradaki rotor ivmelenmesi 300 m/s^2 , rotor ağırlığı 150 kg ve çıkış kuvveti 15 kN'dir.

Aşağıdaki şekilde Bogie ve Axle-Hung tipi bağlantıları verilmiştir.



- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1- Temel Aks yatakları | 8- Dişli |
| 2- Ana dişli | 9- Motor |
| 3- Dişli kutusu yatakları | 10- Şaft boşluğu |
| 4- Oyuk şaft | 11- Süspansiyon yatakları |
| 5- Esnek bağlantı | 12- Motor yatakları |
| 6- Tekerlek | 13- Axle-Hung motor |
| 7- Aks | 14- Motor dişlisi |

Şekil 5.2. a- Bogie tip bağlantı
b- Axle-Hung tip bağlantı

5.3.4. HAVA ARALIĞI

Şu anki uygulamalarda kullanılan 140 kW'lık indüksiyon motorunda hava aralığı 2mm'dir. Daha büyük bir hava aralığının kullanılması magnetik akımı artıracağından sakıncalıdır. Demiryolu uygulamalarında ise 2.5 mm'nin altındaki hava aralığının kullanılmasında problemler ortaya çıkmıştır. Hava aralığının büyük olması mekanik yönden başka elektromagnetik yönden de yararlar getirdiği DC motor uygulamalarındaki deneyimlerden elde edilmiştir.

A.R. motordan en iyi performansı elde etmek için rotor pozisyonuna göre, stator endüktansını büyütmek için stator sargı uzunluklarını mümkün olan en büyük değerde tutmak gerekir. Bu nedenle stator ile rotor arasındaki hava aralığının 0.5 mm'ye (yada daha az) indirilmesi gerekir. Ancak bu hava aralığı, meydana gelebilecek sapmalardan dolayı mekanik olarak sakıncalar doğurur. Hava aralığındaki 1 mm'lik artış motor çıkış gücünü %6 oranında azaltır. Mekanik ve elektromanyetik mahsurları düşünüldüğünde 1 mm'lik hava aralığı relüktans motoru için ideal bir hava aralığıdır.

5.3.5. PERFORMANS

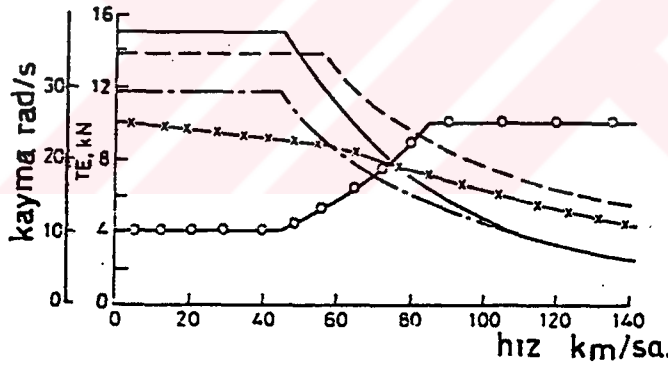
Belli bir hızın üzerinde, iletim süresinin uzatılması motora gerekli olan etkin gerilimi artırır. Buda motora sabit bir güç bölgesi sağlar. Hemen hemen bütün elektromanyetik makinalar gerilim artışının hızın kareköküyle orantılı olduğu yerlerde sabit bir güç verir. Bu günümüzde kullanılan dizel/elektrik lokomotiflerde görülen bir karakteristiktir. Aşağıdaki şekilde A.R. Motoru ile indüksiyon motoruna ait moment-hız karakteristiği gösterilmektedir.

A.R. Motorunun 180°'de maksimum hızındaki gerilim 120°'deki gerilimin 1,5 katıdır. Buradaki hız değişimi ise 2 katıdır. İndüksiyon motorunda ise sabit güç bölgesi rotor kayma hızının veya stator geriliminin 2:1 oranında artmasıyla elde edilir. Sabit güç bölgesinin büyüklüğü motor ve güç elemanlarının değerlerine göre artar yada azalır. Maksimum hızı 145 km/s için seçilen banliyö trenlerinde 12.8 kN'luk moment yeterlidir. (%2 dişlilerdeki kayıp) Bu DC motora göre belirli bir üstünlük göstermemektedir. Şekil 5.3'deki ivmelenme karakteristiği elektromanyetik sınırlamaya ve sabit gerilime göredir. A.R. Motorunun ivmelenme karakteristiği indüksiyon motoruna göre daha iyidir.

Bu eğrilerde verilen 5 A/mm²lik akım yoğunluğu indüksiyon motoru için düşük bir değerdir. Gerçekte bu değer 6-7 A/mm²'dir. A.R. Motorunda ise DC motoru ile aynı olan sargılarında bu 3-4 A/mm²'dir. Düşük hızlarda indüksiyon motoru daha yüksek bir moment vermesine karşın indüksiyon motorundaki kaymanın kısıtlı olmasından dolayı yarı hızdan sonra A.R. Motorunun çıkışı indüksiyon motorundan daha fazla olmaktadır.

Genel olarak ivmelenmede ve yüksek hızlarda taşımacılıkta A.R. Motoru çok daha uygun bir motor tipidir. Düşük hızlarda, ağır yük taşımacılığında ve dur-kalk anlarında ise indüksiyon motorunun karakteristiği daha iyidir. Ancak demiryolu uygulamalarında 2. durum daha çok arzu edilir.

Yüksek hızlarda A.R. Motorundan elde edilen moment düzensizdir. Çok düşük hızlarda ise kıyılmış gerilimde moment dalgalanmasının tepe-tepe değeri düşer ve hemen hemen sıfıra yaklaşır. Dalgalanma frekansı dönüş frekansının 24 katı kadar yani 0-1390 Hz kadardır. Dalgalanma büyük bir problem olarak görülmesede motor dizaynında göz önünde bulundurulması gereken bir unsurdur. [2,3]



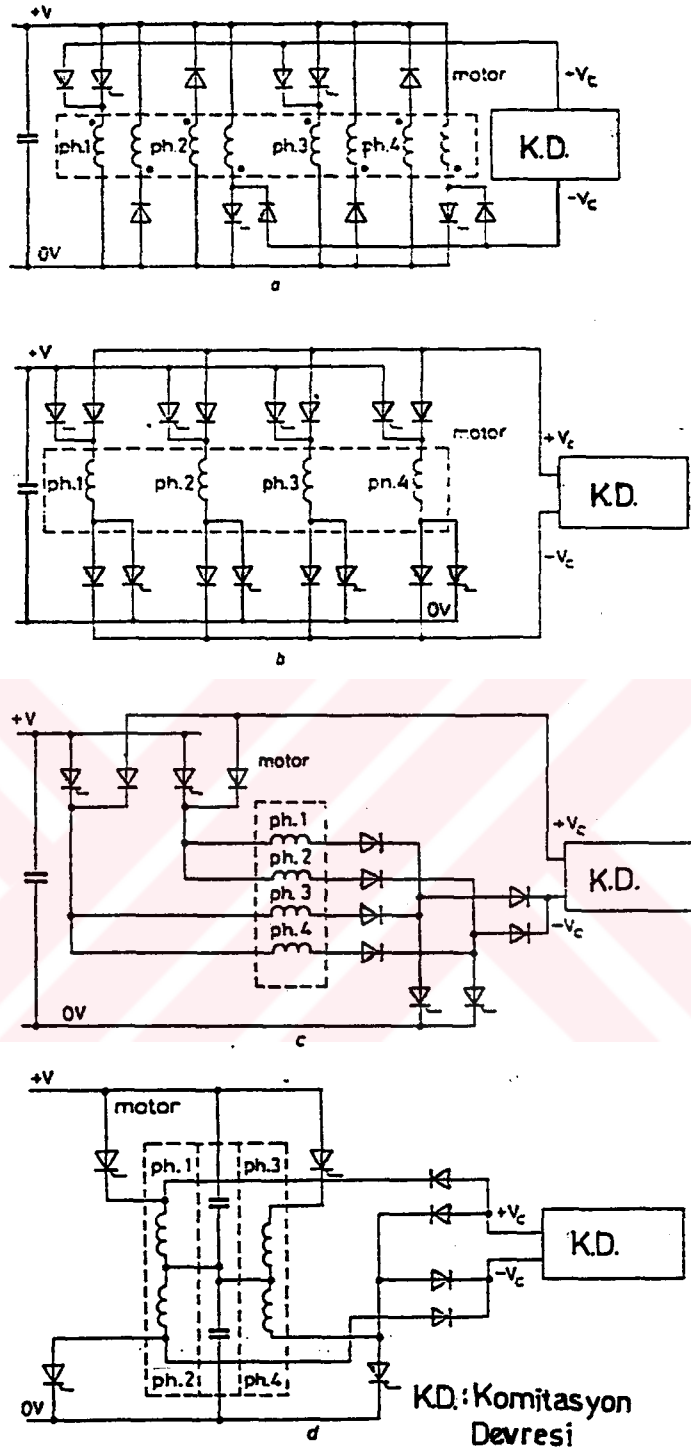
- Anahtarlı Relüktans motoru
- İndüksiyon motoru
- .-.-.- Uygulamada kullanılan indüksiyon motoru
- x-x-x Anahtarlı Relüktans motoru (5 A/mm² akım yoğunluğu için)
- o-o-o-o- Kayma frekansı

Şekil 5.3. Anahtarlı Motoru ve indüksiyon motorunun performans karakteristiği

5.4. SÜRME DEVRESİ

5.4.1. DEVRE ŞEKİLLERİ

Şekil 5.4.'de A.R. Motorunun sürülmesinde kullanılan devrelerden dördü gösterilmiştir. İstenilen değerlere ulaşmak için seri ve paralel devreler kullanılmıştır. 5.4. a'daki şekil temel devredir. Bu devrede gerilim yüksek kullanılmıştır. Ayrıca British Rail Research tarafından b, c ve d'deki devrelerde tasarlanmıştır. A.R. Motorunun 4 fazının sürülmesi için c'deki şekil en basit devredir. Bu devrede minimum sayıda yarı iletken anahtarlama elemanı kullanılmış ve bu da normal hızın altındaki devrelerde yarı iletken güç elemanlarından daha iyi yararlanma olanağı sağlamıştır. Bu yüzden bir darbede herbir tristör iki kez ilettime girer. Buda herbir tristörün 180°'lik iletimini sağlar. Ancak bu devre 90°'ye kadar olan darbe genişliğine izin vermediğinden uygulama alanları kısıtlıdır.

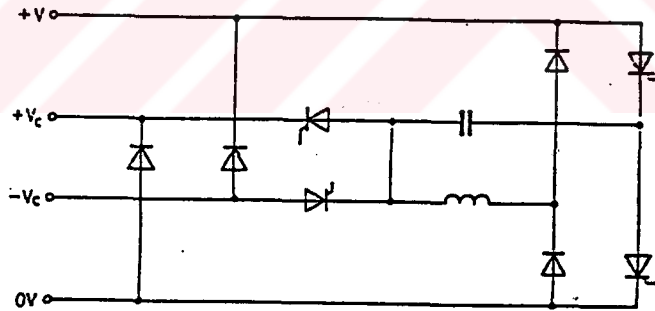


Şekil 5.4. 4 fazlı A.R. Motorunun sürme devreleri

Yukarıdaki d devresinin çıkış gerilimi, aynı giriş gerilimine göre b devresinin yarısı olmasına rağmen paralel tristörler aynı çıkış gücünü üretirler. Burada devrenin karmaşıklığının azalmasına rağmen komitasyon akımı da artmıştır. Bu 4 devre içinde b'deki devre demiryollarında kullanılan en iyi devredir.

A.R. Motorunun sürülmesinin en büyük avantajı komitasyon devresidir. Bütün fazların sürülmesi için bir tane komitasyon devresi kullanmak mümkündür. Bu da devrenin ekonomik olarak büyük bir avantaj sağlar. Aynı tekniğin 3 fazlı inverterlerde kullanılması da mümkündür. Ancak bu daima net bir yarar sağlamayabilir.

Grup komitasyonda, diyot köprüsü kullanılarak aynı polariteli elemanlar ve tristörler komitasyon devresine bağlanabilir. Aynı olarakta pozitif ve negatif polariteli tristörler anahtarlanabilir. Şekildeki a devresinde negatif ve pozitif polariteli tristörler anahtarlanabilir. Şekildeki b ve c devrelerinde komite edilecek inverterlerin a devresine göre daha az şart istemektedir. Bu da maksimum gerilimin daha iyi bir denetim sağlamasına neden olur. Şekil 5.5'de A.R. Motoru için komitasyon devresi verilmiştir. [2,3]



Şekil 5.5. A.R. Motoru için komitasyon devresi.

Komitasyon devresi için bir kapasitör ve 4 tristör yeterlidir. İki tristör komitasyonu başlatmak ve rezonans akımının başlamasını sağlamak için kullanılır. Diğer ikisi ise $+V_c$ ve $-V_c$ 'yi darbe noktalarında motorun sınımlarından doğabilecek ters gerilimlerden korumak için kullanılır.

5.4.2. ANAHTARLAMA ELEMANLARI

Özellikle düşük hızlardaki yük dalga şeklinin tepe/ortalama değerine bakıldığında A.R. Motorunun en önemli anahtarlama elemanlarının tristörler olduğu görülmektedir. Bununla beraber gelecekte tristörlerin tepe akım kapasitelerinden dolayı anahtarlama elemanı olarak uygulama alanı bulabileceğidir. Bu değerlendirme ana anahtarlama elemanı olarak kullanılan tristörlerin maliyetine bağlıdır. Özellikle 600 V tan sonra kullanılan tristör fiyatları büyük artışlar göstermektedir. Bu yüzden gerilim değerinin artmasıyla (özellikle 1000 V'un üzerinde) kullanılacak elemanların maliyetlerinin çok iyi değerlendirilmesi gerekir.

5.4.3. PASİF ELEMANLAR

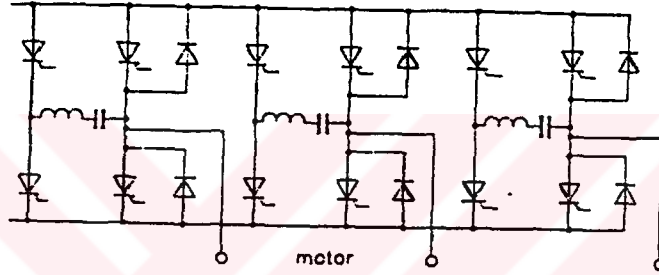
Inverter ve demiryolu uygulamalarında, filtre ve komitasyon kapasitesi yarı iletkenlerle birlikte maliyetin önemli bir kısmını teşkil eder. Bu yüzden maliyeti azaltmak için devre elemanlarını en aza indirerek iyi kullanım sağlanması gerekir. Ağır yük şartlarında giriş filtresi yüksek kaliteli olmalıdır. Performansın iyi olması için bu eleman, bütün sistem maliyetinin üzerine ek bir yük getirmektedir. Bu nedenle sistemin sürüş şeklinin seçimi ve kullanımı kullanılacak filtre maliyetini de etkileyecektir. Bu eleman genellikle güç devresinde en pahalı elemandır. AC sürme devresinde kullanılan filtre, DC gerilim dalgalanmalarını aynı seviyede düşürebilecek şekilde tasarlanır.

Komitasyon kapasitesi ise sürme devresinde pahalı olan bir diğer elemandır. Bu elemanın maliyeti de ; en az elemanı bulunan devre seçimi ve en iyi RMS sağlayan devre ile azaltılabilir.

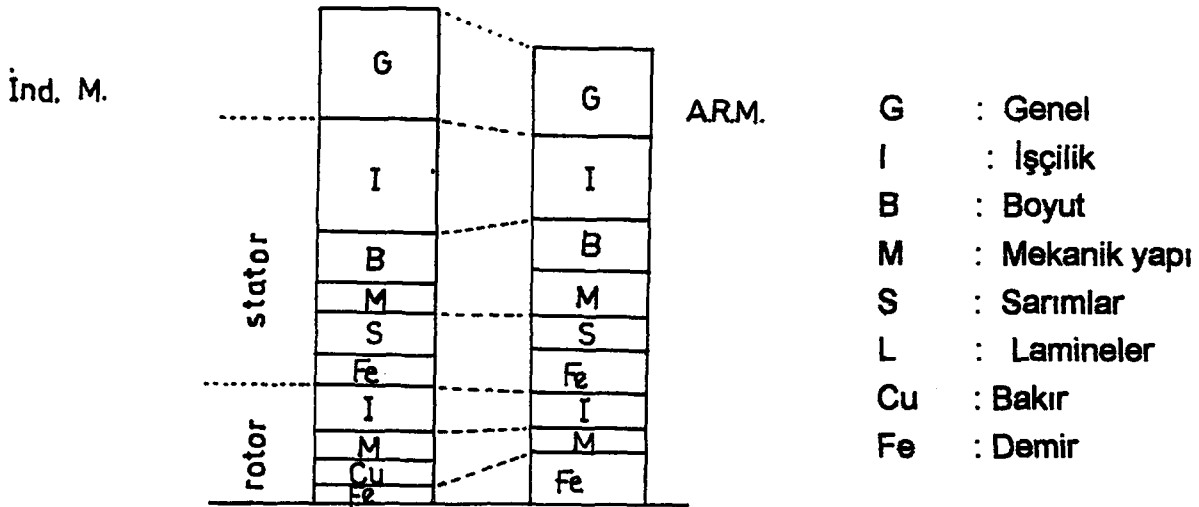
Devrede kullanılan eleman sayısı, devrenin karmaşıklığı ve ısıdan dolayı kaybolan enerjide sistem maliyetine etki eden diğer önemli faktörlerdir. Ayrıca tüm sistemin üretim sırasında mekanik dizayn bilgisi, işçilik ve kullanılan elemanların ısıdan dolayı kayıplarında eleman seçiminde önemli rol oynar. [2,3]

5.5. SİSTEM MALİYETİ

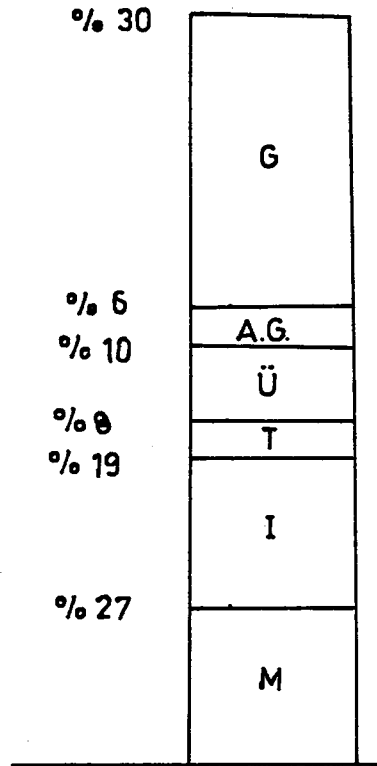
Bu bölümde verilen maliyetler şekil 5.4. b'deki 4 fazlı A.R. Motoru içindir. Mc Murray inverteri şekil 5.6'da bir karşılaştırma yapılmak üzere verilmiştir. yapılan maliyet karşılaştırmaları; her ne kadar indüksiyon motoru ile A.R. Motorunun çalışma prensipleri farklı da olsa; aynı boyutlardaki motorlar için yapılmıştır. (Kullanılan eleman fiyatları İngiliz Sterlini (£) baz alınarak yapılmıştır.)



Şekil 5.6. Mc Murray inverter devresi.



Şekil 5.7. Motor maliyet karşılaştırması.



- G : Genel harcama
A.G : Araştırma - Geliştirme
Ü : Üretim
T : Test
I : İşçilik
M : Malzeme

Şekil 5.8. Tristörli PWM indüksiyon motorunun maliyeti.

Tablo 5.1. 350 k indüksiyon Motorunun temel güç devresi eleman maliyetleri

Eleman	Özellik	Adet	Birim fiyatı (₺)	Toplam (₺)
Yük anahtarlama tristörleri	$I_{Aan} = 480 \text{ A}$ $V_{RRM} = 1.8 \text{ kV}$ $t_q = 36 \mu\text{S}$	6	165	990
Komitasyon tristörleri	$I_{Aan} = 480 \text{ A}$ $V_{RRM} = 1.8 \text{ kV}$ $t_q = 35 \mu\text{S}$	6	165	990
Diyotlar	$I_{Aan} = 380 \text{ A}$ $V_{RRM} = 1.5 \text{ kV}$	6	29	174
Tristör sürme devreleri		12	8	98
Akım sınırlayıcı endüktans	$4 \mu\text{H}$	6	13	78
Komitasyon kapasitesi	$15 \mu\text{F}$ 850 V 61 A RMS	54	29	1566
Komitasyon endüktansı	$8.6 \mu\text{H}$ 560 A RMS	3	120	360
Filtre kapasitesi	$850 \mu\text{F}$ 125 A RMS 1700 V	2	290	580
Komitasyon enerji kontrolü				
Diyot		6	18	108
Resistör		3	80	240
				5182

Tablo 5.2. Anahtarlı Relüktans motorunun temel güç devresi eleman maliyetleri (450 kw)

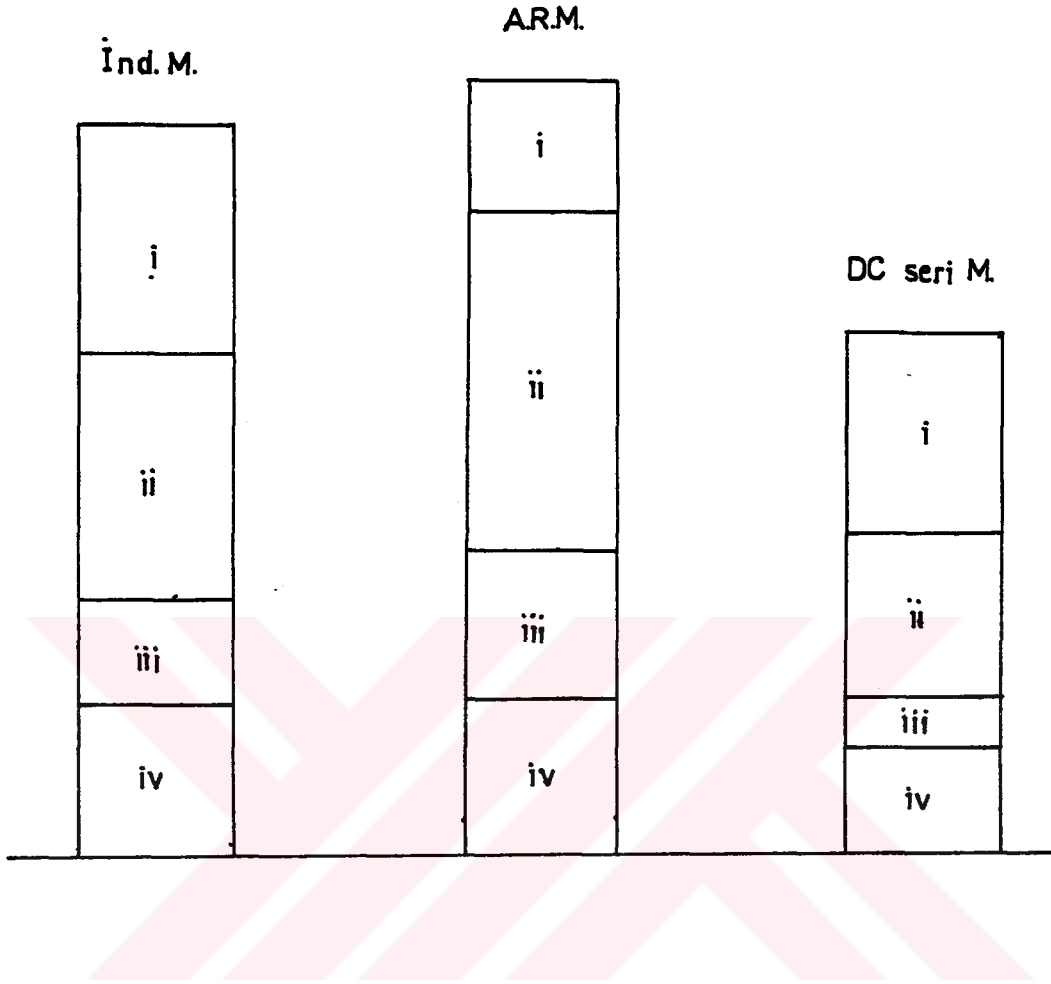
Eleman	Özellik	Adet	Birim fiyat (₺)	Toplam (₺)
Yük anahtarlama tristörleri	$I_{Aan} = 480 \text{ A}$ $V_{RRM} = 1.8 \text{ kV}$ $t_q = 35 \mu\text{S}$	8	165	1320
Komitasyon tristörleri	$I_{Aan} = 480 \text{ A}$ $V_{RRM} = 1.8 \text{ kV}$	4	165	660
Yardımcı komitasyon tristörleri	$I_{Aan} = 350 \text{ A}$ $V_{RRM} = 1 \text{ kV}$	4	48	192
Yardımcı devre		16	8	128
Akım yükselme hızını kesen endüktans	$4 \mu\text{H}$	2	13	26
Komitasyon darbe diyotları	$I_F = 320 \text{ A, V}$ $V_{RRM} = 1.8 \text{ kV}$	8	36	288
Komitasyon diyotları	$I_F = 800 \text{ A}$ $V_{RRM} = 1.8 \text{ kV}$	4	60	240
Komitasyon kapasiteleri	$15 \mu\text{F}, 850 \text{ V}, 61 \text{ A}$	52	29	1508
Komitasyon endüktansı	$11 \mu\text{H}$	1	43	43
Filtre kapasite	$1000 \mu\text{F} 100 \text{ A RMS}$ 1700 V	6	274	1640
				6045

Tablo 5.3 İndüksiyon motoru ile Anahtarlı Relüktans Motorunun temel güç devresi elemanlarının öaliyet karşılaştırılması

	İndüksiyon motor (350kw)		Anahtarlı Relüktans motoru (450kw)			
	Fiyat (₺)	Fiyat/kw (₺)	Fiyat (₺)	Fiyat/ kw (₺)	Fiyat (₺)	Fiyat/kw (₺)
Yük devresi anahtarlama elemanları	1290	3.7	1672	3.7	1672	3.8
Aktif komitasyon elemanları	1146	3.3	1182	2.6	1044	2.3
Pasif komitasyon elemanları	2166	6.2	1551	3.5	1243	2.8
Filtre kapasitesi	580	1.7	1640	3.6	1120	2.5
Toplam maliyet	5182		6045		5079	
Toplam maliyet/kw		14.9		13.4		11.3

Tablo 5.4. Temel güç devresindeki elemanların güç kayıpları

eleman	ad.	güç kaybı		W/kW	
		W	W		
Anahtarlı Relüktans Motoru (450kw)	Yük tristörleri	8	480	3840	8.5
	Komitasyon tristörleri	4	790	3160	7.0
	Yardımcı komitasyon tristörleri	2	426	852	1.9
	Komitasyon darbe tristörleri	8	400	3200	7.1
	Komitasyon diyotları	2	720	1440	3.2
		2	330	660	1.5
	Toplam				29.2
İndüksiyon Motoru (350 kW)	Yük tristörleri	6	480	2880	8.2
	Komitasyon tristörleri	6	640	3840	8.5
	Diyotlar	6	370	2220	6.3
	Toplam				23.0



- (i) Motor
- (ii) Genel Maliyet ve dizayn
- (iii) İşçilik
- (iv) Malzeme

Şekil 5.9. 200 kw'lik motorların maliyet karşılaştırması.
(sürme devrelerine ait)

5.6. BAKIM

Demiryolu uygulamalarında Anahtarlı Relüktans Motorunun kuruluş maliyetinin diğer motorlara göre biraz fazla olmasına rağmen tamir ve bakım masrafları sisteminin basit olmasından dolayı çok daha düşüktür. Aşağıdaki

tabloda bu farkı açıkça görülmektedir. (maliyet İngiliz Sterlini baz alınarak yapılmıştır.)

TABLO 5.5. Bakım Giderleri

Sistem	Dc Motor ve kıyıcı (£)	İndüksiyon Motoru ve inverter (£)	Anahtarı relüktans Motoru ve sürme devresi (£)
Motor	650	510	100
Güç kontrol	19	29	38
Toplam yıllık	669	541	138
Eşit sermaye	5630	4560	1160

5.7. ENERJİ

Bu bölümde verilen değerlendirmeler İngiltere'deki demiryolu uygulamalarından derlenmiştir. Kullanılan herbir tren motorların yıllık enerji tüketimi 410 MWh ile 640 MWh arasındadır. Bir karşılaştırma yapmak üzere enerji tüketimleri yıllık 530 MWh olarak alınmıştır. Aşağıdaki tabloda bu motorlara ait verim ve enerji tüketimi ile ilgili bilgiler verilmiştir. (Enerji birim fiyatı 2.5 İngiliz pence 'i olarak verilmiştir.)

Tablo 5.6. 4 akslı 4 vagonlu trenlere ait verim ve enerji tüketim karşılaştırmaları

	İndüksiyon motoru	Anahtarı Relüktans motoru	DC motor ve kıyıcı
Verim %			
Dişli	98	98	98
Motor	93	94	93
Güç ve filtre	92	94	96
Toplam	84	87	87
Enerji			
Toplam enerji kayıp Mwh	100	81	81
Yıllık maliyet (her 4 vagon için)	2500	2030	2030
Her bir motor			
Yıllık maliyet (₺)	625	507	507
Eşit sermaye (₺)	5260	4270	4270

SONUÇ

Son yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda bir asenkron motor kadar sağlam ve basit yapılı olan, buna karşın DA motor kadar kolay denetlenebilen bir motor tipi önem kazanmış ve ticari kullanıma sunulmuştur. Anahtarlı Relüktans Motoru-ARM (Switching Reluctance Motor-SRM) olarak adlandırılan bu motor tipi henüz ülkemizde yeterince tanınmamaktadır. Bu yazından Anahtarlı Relüktans Motorlarının temel yapıları, çalışma ilkeleri, temel özellikleri tanıtılmıştır.

1960'lı yılların sonlarına kadar, geniş bir aralıkta motor denetimi gerektiren uygulamalarda, Doğru Akım (DA) motorları o günkü teknoloji içinde tek çözüm olarak görülmüşlerdir. Bu konunun yaygınlaşmasında en önemli pay DA motorunun pasif elemanlarla kolayca denetlenebilir olmasıdır. Ancak bu motorlarda fırça ve komütatörün varlığı özellikle tozlu ve patlayıcı gazların bulunduğu ortamlarda önemli bir dezavantaj oluşturmuş, işletme maliyeti açısından problemler yaratabilmiştir. Buna karşın Alternatif Akım (AA) motorları, düşük maliyet ve küçük hacimleriyle, sağlam ve basit yapılarıyla endüstri için cazip motor tipleridir. Ancak 60'lı yıllarda bile AA motorlarının denetimini gerçekleştirecek devreler ekonomik olmayacak kadar karışık ve pahalı, gücü anahtarlacak elemanlar ise çok sınırlı akım ve gerilim değerlerindedir. Ancak 60'lı yılların sonlarına doğru yarı iletken teknolojilerden ortaya çıkan hızlı gelişmeler, asenkron motorun denetimi konusundaki araştırma ve geliştirme çalışmalarının yoğunlaşmasına neden olmuştur. Bu çalışmaların sonucunda çıkış gerilimi ve frekansı değişken evirgeçler asenkron motorun denetimi amacıyla kullanıma sunulmuştur. Asenkron motor denetimi için ilk yıllardaki uygulamalarda gerçekleştirilmesi nisbeten kolay olan yarı kare dalga (quasi square wave) çıkış gerilimi üretim evirgeçler kullanılmıştır. Sonraları darbe genişliği modüleli evirgeçler geliştirilmiştir. Darbe modüleli evirgeçlerin, yarı kare dalga çıkış gerilimi üreten evirgeçlere oranla en önemli avantajları, daha az anahtarlama elemanından oluşmalarıdır. Ayrıca bu tür evirgeçlerle sürülen motorlarda faz akımının harmonikleri daha azdır. Evirgeçlerde anahtarlama elemanı olarak transistör ya da tristörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda kapıdan susturulabilen tristörler de (Gate Turn off Thyristor-GTO) kullanım alanı bulunmaktadır. Tristörlü evirgeçlerin yapıları tristörlü evirgeçlere oranla çok daha basittir. Bunun başlıca nedeni tristörü kesime sokmak için komutasyon devrelerine gereksinim olmamasıdır. Bu sayede gerek denetleyici

fiyatı, gerekse büyüklüğü açısından avantajlar sağlanabilmektedir. Ancak günümüzde transtörlerin akım, gerilim ve güç seviyelerinin tristörlere oranla oldukça düşük olması , güç seviyesi yüksek uygulamalarda tristörlü evirgeç kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bir kaç yılda bir önemli gelişmelerin gözleendiği bu alanda şu anda gücü 30-50 kw'a kadar olan uygulamalarda, hızları evirgeçlerle denetlenen asenkron motorlu tahrik sistemlerinin, DA tahrik sistemleri karşısında fiyat avantajı olduğunu söylemek mümkündür.

Son 15-20 yıl içerisinde yürütülen akademik ve endüstriyel amaçlı araştırmalar ortaya bir üçüncü seçeneği, Anahtarlı Relüktans Motorlu (ARM) tahrik sistemini çıkarmıştır. Bu tür tahrik sistemlerinin DA ve AA tahrik sistemlerine oranla, temel olarak ARM ve sürücü devrenin yapılarının basitliğinden kaynaklanan bazı üstünlükleri vardır. Bu üstünlükler şöyle sıralanabilir.

Motorun manyetik yapısı son derece basittir. Rotor üzerinde herhangi sargı bulunmaz. Stator kutupları üzerinde ise basit yapıli konsantre sargılar vardır. Motorun basitliği nedeniyle tahrik sisteminin güvenilirliği yüksek, bakım sorunları azdır. Sürücü devrenin yapısı da oldukça basittir. Bunun başlıca nedeni motor fazlarının tek yönlü akımla enerjileniyor olmasıdır. Bu nedenle sürücü devrede motorun her fazı için bir anahtarlama elemanı bulunması prensip olarak yeterlidir. Ancak pratikte, tahrik sisteminin verimini yükseltebilmek amacıyla ikinci bir denetlenebilir anahtar kullanılarak sargılarda depolanan enerji güç kaynağına aktarılır. Alternatif olarak motorun her kutbu üzerinde ikinci bir sargı kullanılması mümkündür. Sürücü devre açısından dezavantaj olarak motor performansının optimize edilebilmek amacıyla rotor konusunda bir işaret alınmasına duyulan gereksinimden bahsedilebilir. Belirtilen özelliklerin daha iyi anlaşılabilmesi için Relüktans Motoruna ait çeşitli karakteristikleri vermiş şekil ve tablolarla bu özellikler daha da pekiştirilmiştir. Anahtarlı Relüktans Motorunun ticari alanda büyük güçlerde kullanılması için daha çok gelişmelere ihtiyaç duyulmasına rağmen günümüzde demiryollarında kullanımına ilişkin uygulamalar verilmiş, diğer tip motorlarla karşılaştırma yapılarak avantajlı ve dezavantajlı yanları ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

- 1- Erfan F. 1992 Anahtarlı Relüktans Motorunun statik ve dinamik davranışı ile ulaşımda uygulanabilirliğin denetimi, Doktora tezi, İstanbul.
- 2- Frech, J.R., September 1984. Switched reluctance motor drives for rail traction: relative assessment, IEE proceedings, Vol. 131, pt. B, No.5
- 3- Blake, R.J., Davis, R. M., Fultan, N.N., Laweranson, P.J., Ray, W.F.S. Stephenson, J.M., september 1984. Switched Reluctance motor drives for rail traction : a second view, IEE proceedings, Vol. 131, B. No. 5.
- 4- Blenkinsop, P.T., Corda, J., Fultan, N.N., Lawerenson, P.J., Stephenson, J.M., Julay 1980. Variable-speed switched reluctance motors, IEE Proc., Vol. 127 pt. B, No.4
- 5- Blake, R.J., Chappel, P.H., Ray, W.F., March 1984. Microprocessor control of a variable reluctance motor, IEE Proceedings, Vol. 131, Pt. B., No.2.
- 6- Arumugam, R., Lindsay, F.J., Krishnan, R., June 1988. Desing Procedure for switched Reluctance Motors, IEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No.3
- 7- Blake, R.J., Davis, R.M., Ray, W.F., 1981. Inverter Drive for switched Relüktance Motor: Circuits and component ratings, Proc. IEE, Electrical Power Applications, Vol. 128, No. 2 : 126-136.
- 8- Erfon, F., Ural, A., 1989. Relüktans Motorlarındaki gelişmeler ve bu motorların kontrolünün incelenmesi, Elektrik Mühendisliği III. Ulusal kongresi, Ankara: 162-165.
- 9- Ertan, H.B., Tohumcu, M., 1987. Anahtarlı Relüktans Motorlarının performansının tasarım amacıyla hesaplanması, Elektrik Mühendisliği II. Ulusal kongresi, Ankara: 743-746.
- 10- Ertan, H.B., Tohumcu, M., 1987. Anahtarlı Relüktans Motorlarının moment hız eğrilerinin denetimi, Elektrik Mühendisliği II. Ulusal kongresi, Ankara : 739-742.
- 11- Ertan, H.B., Tohumcu, M., 1987. Anahtarlı Relüktans Motorlu Tahrik Sistemlerinin yapıları ve temel özellikleri, Elektrik Mühendisliği II. Ulusal kongresi, Ankara : 735-738.
- 12- Ertan, H.B., 1986. Analytical Prediction of Torgue and Permeance Displacement Characteristics of Asymetrical Tooth Pairs, International Conference on Electrical Machines, Münih : 97-100.

13- Tohumcu, M., 1985. Optimum Desing of Switching Reluctance Motors, Doktora tezi, ODTÜ EE Müh. Bölümü, Ankara.

14- Ertan, H.B., 1985. Asimetrik çift taraflı çıkık kutuplu magnetik yapılarda kuvvet ve endüktans analitik olarak hesaplanması için bir yöntem, Elektrik Mühendisliği I. Ulusal kongresi, Adana : 587-594.

15- Ertan, H.B., Tohumcu, M., 1985 çift taraflı çıkık kutuplu magnetik yapılarda momenti denetleyen parametreler ve optimum boyutlar, Elektrik Mühendisliği I. Ulusal kongresi, Adana : 583-586.



ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi : 26 Temmuz 1970

Doğum Yeri : Sivas

Ortaöğretim : Haydarpaşa Teknik Lisesi, 1988

**Yükseköğretim : Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü, 1992**

