

ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLARIN HIZ KONTROLUNDAKİ TİTREŞİMLERİN AZALTILMASI

Mustafa YAĞCI¹

M.Emin GÜVEN²

¹ Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu KONYA

² Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi ANKARA

Özet

Bu çalışmada anahtarlamaalı relüktans motorlar (ARM) için en uygun çalışma şartlarını sağlayan bir hız kontrol devresi geliştirilmiştir. ARM'ın özellikle düşük hızlarında karşılaşılan titreşimler ve tork dalgalanmaları giderilmeye çalışılmıştır. Motoru sürmek için üçgen ve trapez olmak üzere iki farklı dalga şekli kullanılmıştır. Söz konusu dalga şekilleri EPROM'a yazılan bir program aracılığıyla elde edilmiştir. Motoru sürmek için kullanılacak bir adım dalga şekli onaltı parçacığa bölünmüştür. Ayrıca iki faz enerjili tam adım modu dalga şekli de tasarlanan devreden elde edilerek motorun hız kontrolunda kullanılmış ve her bir dalga şekliyle ayrı ayrı sürülen motorun titreşim, gürültü, tork dalgalanma seviyeleri ve performansları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Anahtarlamaalı relüktans motorları, hız kontrolü, tork dalgalanmaları, tam adım sürme

THE MINIMIZATION OF VIBRATIONS IN SPEED CONTROL OF SWITCHED RELUCTANCE MOTORS

Abstract

In this study, an appropriate speed control circuit for switched reluctance motors has been designed and implemented in such a way as to eliminate vibrations encountered in low speeds. In doing so, triangular and trapezoidal wave forms dividing

one step of the motor into sixteen have been generated by means of an EPROM and the wave forms obtained in this way have been employed to drive motor. Full step mode with two phases has been obtained and used to control the speed of motor. A comparison has also been between this technique and the full step mode driving.

Keywords : Switched reluctance motors, speed control, torque ripples, full step drive

1. Giriş

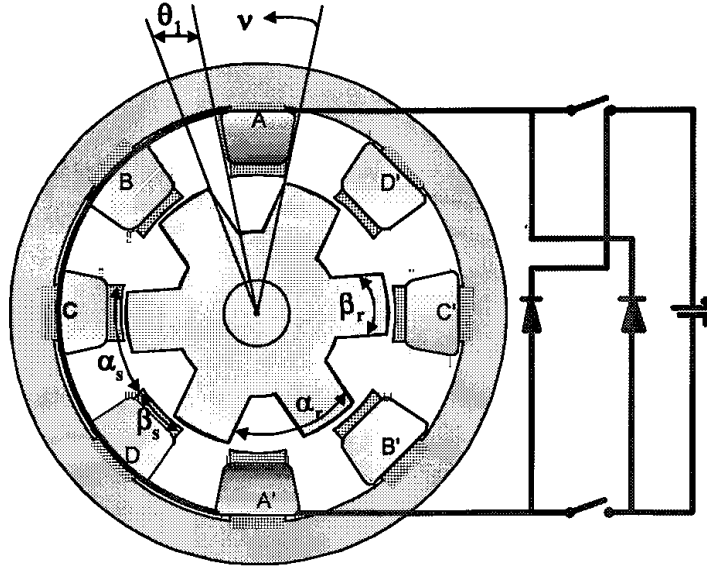
Anahtarlamaalı relüktans motorları (ARM) problemleri çözüldüğü taktirde basit yapıları, kolay kullanımları, ucuz imalatı, yüksek hızı ve verimi nedeniyle hız kontrolünde diğer motorlar için ciddi bir alternatif olabilir. [1,2] ARM’de sadece stator da sargı bulunur, rotorda sargı yoktur. Stator sargıları karşılıklı kutuplara sarılmış ve birbirlerine seri bağlanmıştır. ARM, alternatif akım motorları gibi fırçasız bir motordur ve her alanda kullanılabilir. Günümüzde ARM’ler 100W-300 kW güçleri arasında ve 250 d/d-50000 d/d hız aralığında değişik alanlarda kullanılmaktadır. Uygulamalar arasında uzay araçları, otomobil endüstrisi, radar, madencilik, dikiş makineleri, çiziciler bulunmaktadır.

Rotor da sargı bulunmadığı için yüksek hız gerektiren uygulamalarda kullanmak için elverişlidir. İlk kalkınmada fazla akım çekmeden yüksek tork üretebilmesi ve çok yüksek hızlarda çalışabilmesi, anahtarlamaalı relüktans motorları diğer motorlara göre üstün kılmaktadır. Ancak çıkıntılı kutuplu yapılarından dolayı özellikle düşük hızlarda aşırı tork dalgalanmalar meydana gelmektedir [1]. Ayarlanabilir hız sürücüleri piyasasında ARM’ler için bu tork dalgalanmaları hala önemli bir sorundur[3]. Bu tork dalgalanmaları, motorun doğal adımları ve akustik gürültü üreten yatak sisteminin arzu edilmeyen etkilerinden meydana gelir [4].

ARM'lerin performansı, kendi karakteristik değerleri dışında sürücü devrelerine ve kontrol yöntemlerine de bağlıdır. Bu sebepten dolayı ARM'lerin uygun işaret ve yöntemlerle sürülmeleri, kontrol edilmeleri, motordan maksimum verim alınması için önemli bir faktördür[5].

Bu çalışmada [5] anahtarlamalı relüktans motorların optimum çalışma şartlarını sağlayan bir kontrol devresi tasarlanmıştır. ARM'in düşük devirlerinde karşılaşılan titreşimler giderilmeye çalışılmıştır. Bunun için motorun bir adımı 16 basamağa bölünerek rotorun geçiş hareketleri küçültülmüş dolayısıyla moment dalgalanmaları azaltılmıştır. Bu işlemler sırasında motor; tam adım modu, trapez ve üçgen dalga şekilleriyle sürülmüştür. Bu dalga şekilleri, bir konum değiştirici anahtar vasıtasıyla ayrı ayrı motora uygulanmış ve karşılaştırmaları da yapılmıştır.

ARM'ler girişlerine uygulanan her hareket darbesi için sadece bir adım atarlar. Bu sebeple kontrol sistemlerinde duyarlılık gerektiren yerlerde diğer elektrik motorlarına göre avantajlıdır. Adım büyüklükleri sabit ve uygun kontrol edildiklerinde attıkları adım sayısı girişlerine uygulanan darbe sayısına eşit olduğundan hareket miktarları kolaylıkla belirlenir.



Şekil 1. 8/6 kutuplu bir ARM'nin basit çalışma şekli

Anahtarlamalı relüktans motorlar oldukça basit bir yapıya sahiptir. Geometrik yapıları step motorlara benzer. Step motorlardan farkı rotorlarında sabit mıknatısın olmamasıdır.

Stator ve rotorları sıkıştırılmış paket saçlardan çıkıntılı kutuplu olarak üretilirler. Rotorda sargı yoktur. Stator ise doğru akım makinelerinin alan sargısına benzeyen basit yapıda sargılar vardır. Aynı faza ait sargılar karşılıklı olarak ters alan oluşturacak şekilde enerjilendirilirler. Şekil 1'de görüldüğü gibi statordaki A sargıları enerjilendirildiğinde en yakın rotor kutupları statora doğru minimum magnetik direnç(relüktans) oluşturacak şekilde çekilirler. Daha sonra sırasıyla B, C ve D fazları enerjilendirilerek motorun hareketi devamlı hale getirilir. Anahtarlama hızına bağlı olarak motorun değişik hızlarda çalıştırılması mümkündür. Faz uyarma sırası değiştirilirse rotor ters yönde hareket edecektir. Bu tür motorlarda, stator magnetik alanının, rotorun dönme yönünün tersine hareket ediyor olması, dikkati çeken bir noktadır. Motorun çalışmasına bağlı olarak uygun fazlar sırasıyla enerjilendirildiği

zaman motorda oluşan tork rotorun pozisyonuna bağlıdır. Bu nedenle motorun tek yönde uygulanan akımla çalışabilmesi mümkündür. Bu da çalışma için gerekli anahtarlama elemanı sayısının azaltılmasını sağlamaktadır. Fakat rotor pozisyonu bilgisi çalışma açısından önemli olduğundan motora ek bir maliyet getirmekte zor çalışma ortamlarında motorun çalışmasını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle motorun çalışma alanlarının genişletilmesi ve maliyetin düşürülmesi için algılayıcısız çalıştırılması daha çok tercih edilmektedir.

ARM'lerde rotor ve stator kutup sayısı aynı değildir. Bu durum, motorun en belirgin özelliğidir. Stator ve rotor kutup sayılarının çeşitli tasarımları mevcuttur. Ancak rotor kutup sayısı 2 ve stator kutup sayısı 2 veya 4 olan tasarımlarda stator ve rotor kutupları tam çakışık duruma geldiklerinde kalkış momenti üretmek mümkün olmamaktadır. Bu sebeple 4/2 ve 2/2 kutuplu motorlar kullanılmamaktadır. Motorun stator ve rotor kutup sayılarının fazla olması daha az moment dalgalanması sağlamasıyla birlikte hem bakır kayıplarının artması hem de daha fazla anahtarlama elemanı ve daha karmaşık sürücü devreleri gerektirdiğinden çok tercih edilmez.[6]

Anahtarlama relüktans motorlarında stator ve rotor kutupları arasında aşağıdaki ilişki vardır.

$$N_s = N_r + P$$

N_s : Stator kutup sayısı

N_r : Rotor kutup sayısı

P : Faz başına stator kutup sayısı

N ; rotorun bir devrindeki adım sayısı ise derece olarak adım açısı

$\Theta = 360/N$ bağıntısı ile bulunur. Bunlara göre

$$N = N_s \cdot N_r / (N_s - N_r)$$

m; faz sayısı ise

$$N_s = P \cdot m \quad \text{olur ve bu eşitliklerden}$$

$$P = N/m \cdot (m-1) \quad N_s > N_r \quad \text{olarak bulunur.}$$

Bu ifadelerde p tamsayı olmalıdır[7].

2. Materyal ve Metot

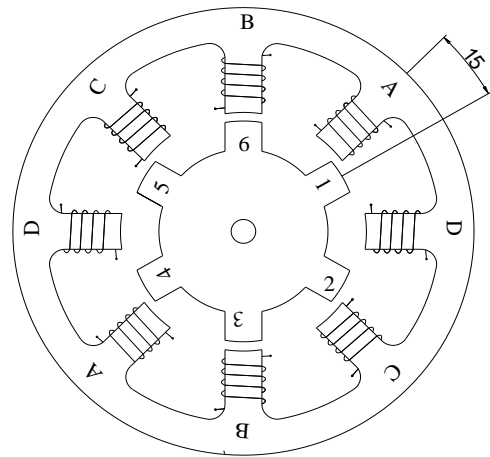
Deneyleerde kullanılan 4 fazlı anahtarlamalı relüktans motorun yapısı şekil 2’ de görülmektedir. Görüldüğü gibi motor 8 stator ve 6 rotor kutba sahiptir. Fazlara ait ikişer sargı bulunmaktadır.

Stator ve rotor kutup sayılarına göre adım açısı :

$$N_s = 8 \quad N_r = 5, \quad P = 2 \quad (\text{faz başına stator kutup sayısı}), \quad N = \text{Bir turdaki adım sayısı}$$

$$N = N_s \cdot N_r / N_s - \quad N_r = 8 \cdot 6 / 8 - 6 = 24$$

$$\text{Adım açısı da } \Theta = 360 / N = 360 / 24 = 15^\circ$$

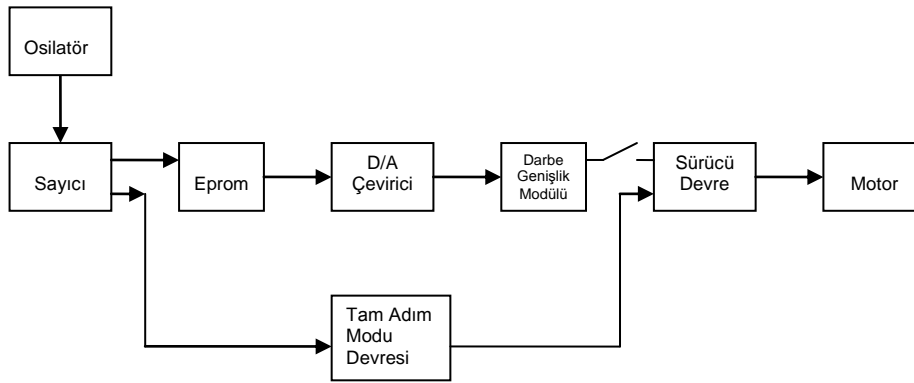


Şekil 2. Dört fazlı anahtarlamalı relüktans motorun yapısı

Kullanılan anahtarlamalı relüktans motorun etiket değerleri ise şöyledir:-

Adım genişliği	: 15°
Faz sayısı	: 4
Faz direnci	: 28 ohm
Çalışma gerilimi	: DC 24 V

Çalışmamızda; hem tam adım modu dalga şekli, hem de mini adımlardan oluşan üçgen ve trapez dalga şekilleri elde edilerek ARM sürülmesinde kullanılmıştır. Böylece tasarlanan devrenin her üç modda da (tam adım, üçgen ve trapez) çalıştırılması konum değiştirici bir anahtar vasıtasıyla sağlanmıştır.



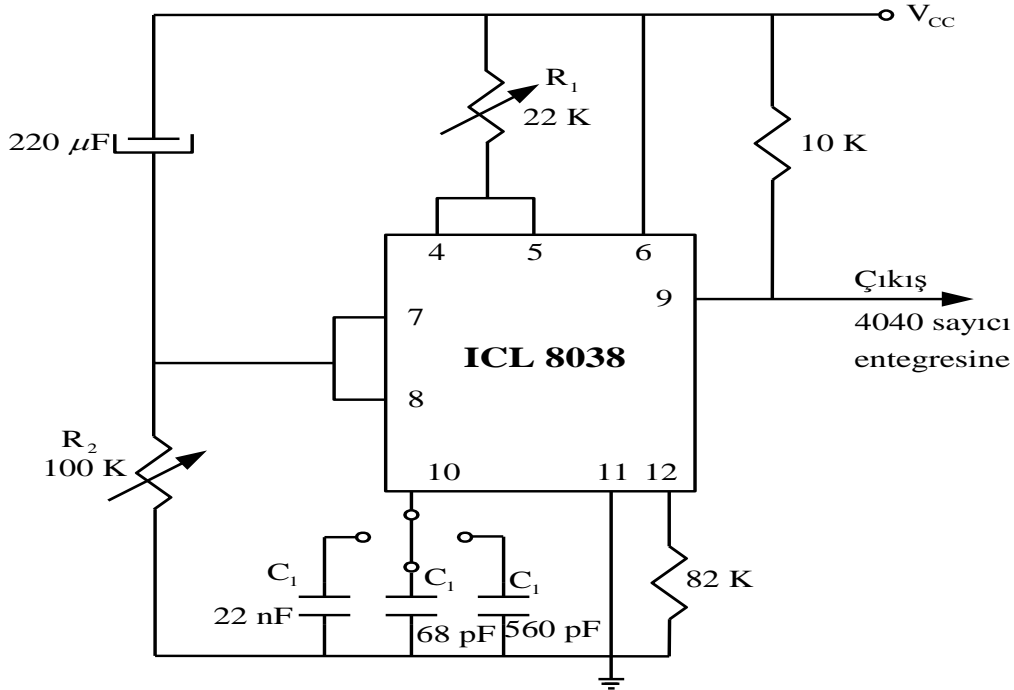
Şekil 3. Tasarlanan devrenin blok şeması

Şekil 3.'deki blok şemadan da görüldüğü gibi devre kare dalga üreten osilatör, ikili sayıcı, trapez ve üçgen dalga şekillerinin elde edildiği eprom, epromun dijital çıkışlarını analoga dönüştüren dijital-analog çevirici, darbe genişlik modülatörü ve sürücünden oluşmaktadır.

Güç kaynağı biri kontrol devresi beslemesi, diğeri de motor sargıları besleme devresi olmak üzere iki kısımdan oluşmuştur. Kontrol devresinde kullanılan elemanların

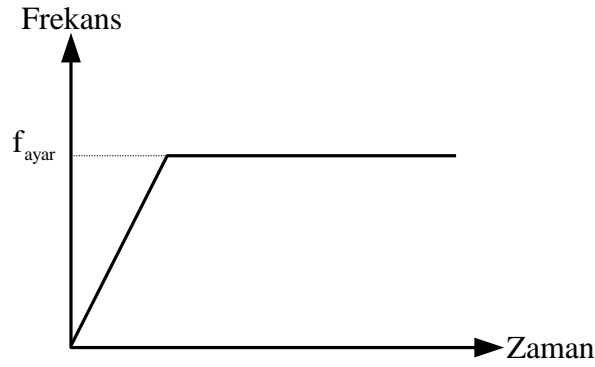
çalışma gerilimlerinin farklı olması nedeniyle, güç kaynağından regüleli 5 ve 12 V'luk gerilim elde edilmiştir. Motor devresi güç kaynağında ise 2x24 V'luk gerilim kullanılmıştır.

Osilatör devresi 8038 tümdevresiyle oluşturulmuştur. Bu osilatör devresi az miktarda harici elemanla sinüs dalga, kare dalga, üçgen dalga şekillerini üretir. 8038 tümdevresinin 10 numaralı ucuna bağlı kondansatör ile 4 ve 5 numaralı uçlara bağlanan ayarlı direnç, frekansı tayin eder. Frekans $f=0.165/R.C$ formülü ile hesaplanır.



Şekil 4. Osilatör devresi

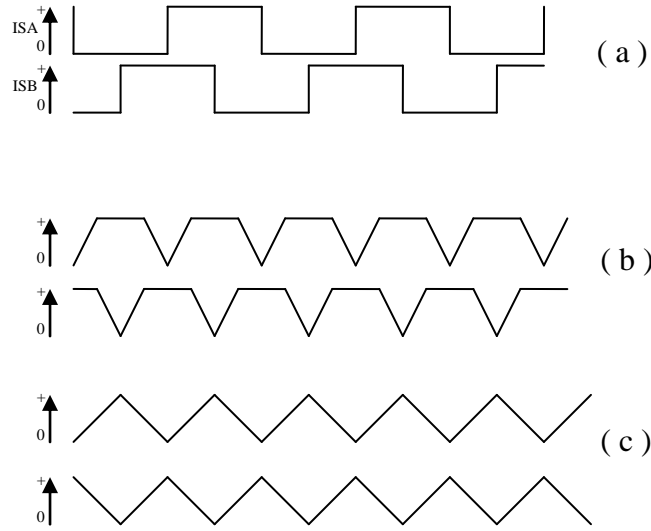
4 ve 5 numaralı uçların ortak noktasına bağlı ayarlanabilir R direncinin değeri değiştirilerek çıkışta frekansın değiştirilmesi sağlanmakta ve böylece motorun hızı değiştirilmektedir. Şekil 4'te osilatör devresinin ayrıntılı şeması görülmektedir.



Şekil 5. 8038 entegresinin frekans rampa fonksiyonu

Ayrıca 8038 entegresinin 8 nolu ucuna bağlı olan 220 μF 'lık kondansatör ve 100 k Ω 'luk ayarlı bir dirençle rampa devresi oluşturulmuştur. Bu devre fonksiyon generatörü frekansını zamanla doğrusal olarak istenen değere kadar arttırır. Böylece motor, enerji verildiğinde düşük devirlerden başlayarak kendiliğinden istenen hıza kadar yumuşak bir şekilde yol alır.Şekil 5'te rampa fonksiyonu görülmektedir. Rampanın eğimi 100 k Ω 'luk ayarlı dirençle değiştirilebilir.

Sayıcı devresinde ise sayıcı, osilatörden gelen saat işaretini alarak epromun adreslerini sırayla taramakta ve böylece bu adreslere karşılık gelen bilgiler epromdan kumanda işareti olarak okunup motor sürülmesinde kullanılmaktadır. Tasarlanan devrede sayıcı olarak 4040 tüm devresinden faydalanılmıştır.



Şekil 6. Stator akımının değişik zaman diyagramları

ARM'lerin çalışmasında önemli işlemlerden biri stator faz akımlarının zamanlamasıdır. Şekil 6'da ARM'in kontrolünde kullanılan stator akımının çeşitli zaman diyagramları görülmektedir. Şekil 6. a'da stator akımı tam adım modu dalga şekilleri verilmiştir.

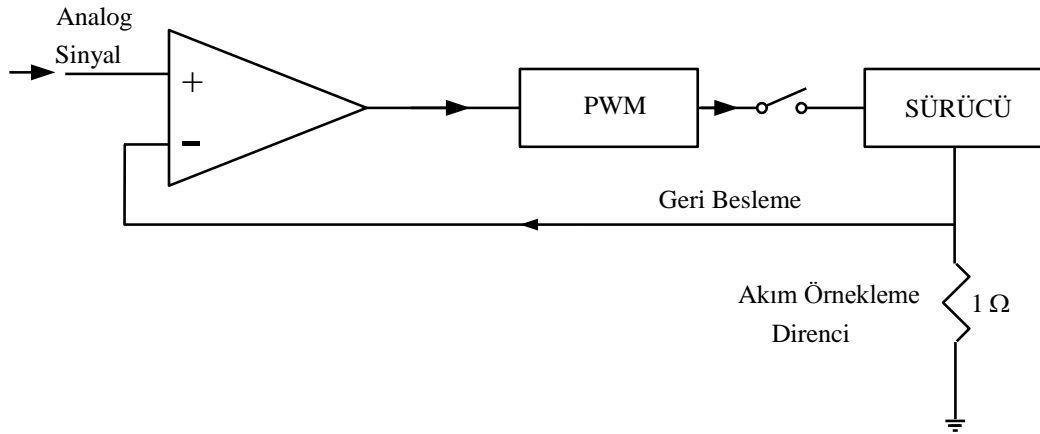
I_{SA} A fazı stator akımı, I_{SB} ise B fazı stator akımıdır. A fazı stator akımı ile B fazı stator akımı arasında 90 derece faz farkı vardır. Şekil 6.b'de trapez dalga şekilleri görülmektedir. Bu dalga şeklinde motor, etiketinde belirtilen 15° lik bir adımı 16 basamakta tamamlamış, stator faz akımının sıfır değerine inmesi de yine 16 basamakta gerçekleşmiştir.

Şekil 6.c'de ise, şekil 6.b'de olduğu gibi yine çoklu adımlardan meydana getirilen üçgen dalga şekli elde edilmiştir. Üçgen dalga şeklinde de stator akımı 15° tam adım açısını 16 kademede tamamlamıştır. Stator faz akımlarından biri azalırken rotor kutupları, stator faz akımı artan diğer fazın etkisi altına girmeye başlayacaktır.

Böylece dizaynında bir adımı 15° olarak imal edilen motorun, trapez ve üçgen dalga elde etmek için tasarlanan kontrol devresi sayesinde bir adımı 0.937° lik bir açıya

düşürülerek sürülen motorun tam adım moduna göre tork dalgalanmalarının azalacağı, daha yumuşak ve sarsıntısız döneceği düşünülmüştür.

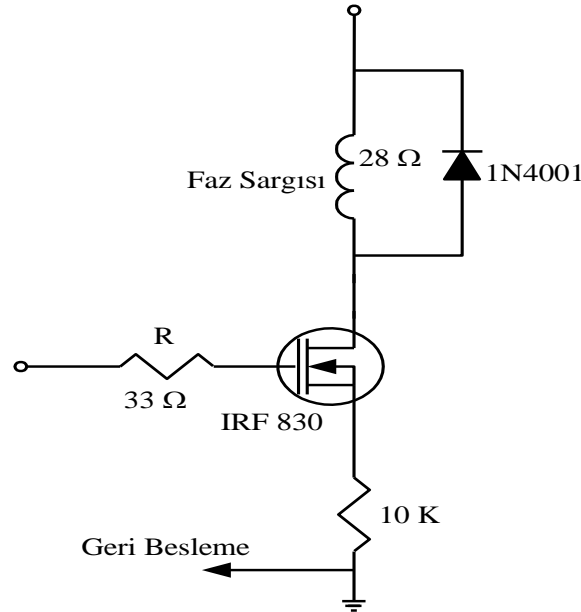
Gerekli sinyal şekillerini elde edebilmek için en kolay ve en ekonomik yolun bir eeprom üzerinde kodlanmış sinyallerin dijital-analog çeviriciye uygulanmasıyla gerçekleştirilmesi düşünülmüştür. Bu amaçla eeprom olarak 2716 tüm devresinden faydalanılmıştır. Relüktans motorun sürülmesinde eeprom çıkışından gönderilen 8(2x4) bitlik bilgiler kullanılmaktadır. Bunun içinde tüm işlem periyodu için gerekli veriyi içinde tutan bir dizin oluşturulmuştur. Eeprom çıkışındaki dijital işaretler bir dijital-analog çeviriciden geçirildikten sonra karşılaştırıcı olarak çalışan işlemsel yükseltece uygulanmıştır. Dijital-analog konvertörde R-2R metodu kullanılmıştır. Dirençler aynı toleranslarda seçilmiştir.



Şekil 7. Darbe genişlik modülatörü blok şeması

Darbe genişlik modülatörü, genel olarak stator akımının istenen değeri ile ölçülmüş gerçek değer arasındaki farkla çalışır. Bu iki devre, dijital-analog çevirici ve karşılaştırıcı olarak çalıştırılan işlemsel yükselteçten elde edilir. Şekil 7’de darbe genişlik modülatörü blok şeması görülmektedir. Devrede iki adet 555 tümdevresi

multivibratör ,üçüncü bir 555 tümdevresi de ana osilatör (tetikleyici) olarak 33 kHz sabit frekans üretmek amacıyla kullanılmıştır.Burada birinci multivibratör, voltaj kontrollü darbe genişlik modülatörü olarak görev yapmaktadır. Böylece sürücü güç çıkışının girişle bağlantılı olmasını sağlamak için oluşturulan geri besleme direncinde akım örnekleme direnci (1Ω), stator akımını taşır ve orantılı bir gerilim düşümü gerçekleştirilir. Bu gerilim işlemsel yükselteçte karşılaştırılır ve buna göre birinci multivibratörün frekans modülasyonu girişine kumanda eder. Bu işlem iki değer eşit olacağı noktaya kadar devam eder. PWM çıkışına bağlanan konum değiştirici anahtarla tam adım modu veya epromdan elde edilen trapez veya üçgen dalga şekillerinden birisiyle motor çalıştırılmaktadır.



Şekil 8.MOSFET transistorle sürülmüş bir faz sargısı

Sürücü devresinde epromdan elde edilen trapez ve üçgen dalga sinyalleri ile tam adım modu sinyalleri bulunmaktadır. Bu sinyaller bir sürücü katına uygulanarak yükseltilir. Sürücü devresinde klasik transistörler kullanılmakla birlikte alan etkili transistörlerin de verimli olması nedeniyle son yıllarda yaygınlaşmıştır. Tasarlanan devrede motor, MOSFET transistörle sürülmüştür. Bu amaçla N kanallı IRF 830 transistörü kullanılmıştır. Şekil 8’de görüldüğü gibi MOSFET transistörlerin kaynak(S) uçları 1Ω ’luk akım örnekleme direncine bağlanarak geri besleme devresi oluşturulmuştur.

3.Araştırma Bulguları

Tasarımı yapılan sürücü devrede, rotor hareketlerinin yumuşatılması, moment dalgalanmalarının azaltılması için tam adım modu sürme metodu dışında, küçük adımlardan oluşmuş trapez ve üçgen dalga şekilleriyle motor sürülmüş ve bilinen tam adım sürme metodu ile karşılaştırılmıştır. Tam adım modu dalga şekliyle motor sürüldüğünde düşük devirlerde moment dalgalanması ve gürültü ortaya çıkmıştır. Bu sürme şeklinde moment, trapez ve üçgen dalga sürme şekillerine göre oldukça yüksektir.

Mini adımlardan oluşan trapez dalga şekliyle motor sürüldüğünde moment dalgalanmaları ve gürültü azalmış fakat tam giderilmemiştir. Momentte, tam adım modu sürme şekline göre düşme görülmüştür.

Üçüncü olarak yine mini adımlardan oluşmuş üçgen dalga şekli ile motor sürüldüğünde düşük devirlerde karşılaştırılan rotorun sarsıntılı dönüşleri ve gürültü hemen hemen giderilmiş, yumuşak hareketler yapması sağlanmıştır. Ancak momentte, tam adım modu ve trapez dalga sürme şekline göre daha fazla düşme olduğu gözlemlenmiştir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Anahtarlamalı relüktans motorlar düşük hızlarda çalışırken rotorun hareketi darbelidir. Bu darbeler tork dalgalanmaları ve gürültü olarak ortaya çıkarlar. Rotorun bu darbeli hareketini düzgünleştirmek için mekanik sönümleyici araçlar kullanılabilir. Ancak motor miline bağlı olan bu mekanik araçlar Anahtarlamalı relüktans motorları için ek bir yük oluştururlar.

Tasarlanan hız kontrol devresinde kullanılan dalga şekillerinin amacı darbeli rotor hareketlerini gidermek veya minimum düzeye indirmektir.

Sonuç olarak yüksek momentin gerekmediği, motorun düşük devirlerde çalışma süresinin daha fazla olduğu çalışma şartlarında trapez ve üçgen dalga sürme şekli önerilebilir. Yüksek momentin gerekli olduğu yüksek hızlarda ise tam adım modu şekli uygulanabilir.

Kaynaklar

1. P.J. Lawrenson, J.M. Stephenson, P.T. Blenkinsop, J. Corda, N.N. Fulton, Variable speed switched reluctance motors, IEE Proceedings, 1980, Part B 127 (4) 253–265.
2. G.S. Buja, M.I. Valla, Control characteristics of the SRM drives—Part I: Operation in the linear region IEEE Transactions on Industrial Electronics 1991,38 (5) 313–321.
3. N. Matsui, N. Akao, T. Wakino, High-precision torque control of reluctance motors, IEEE Transactions on Industry Applications,1991, 27 (5) 902–907.

4. D.E. Cameron, J.H. Lang, S.D. Umans, The origin and reduction of acoustic noise in doubly salient variable-reluctance motors, IEEE Transactions on Industry Applications 1992, 28 (6) 1250-1255
5. Yağcı,M., Relüktans motorların hız kontrolü, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1994
6. Ehsani M.,Fahimi B.,Suresh G., Mahdavi J., A New approach to model Switched Reluctance Motor Drive;Application to Dynamic Performance Prediction Control and Design, 1998,Power Electronics Specialist Confrence, 2097-2102
7. Kuo, B.C., 1979, Step motors and control systems; Incremental Motion Control Volume 2, SRL Pub. Company, İllinois,.
8. İnanç N.,2002, Phase current modulation of switched reluctance motor to minimize torque ripple,Electric Power systems Research,(61), 51-55