



Anahtarlama Frekansının Anahtarlama Relüktans Motorda Tork Dalgalanmasına Etkisinin İncelenmesi

Mithat ÖNDER*1, Muhsin Uğur DOĞAN, Murat ARSLAN

¹Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Bolu

(Alınış Tarihi: 13.03.2019, Kabul Tarihi: 03.05.2019)

* İlgili yazar: mithatonder@ibu.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Anahtarlama Relüktans Motor,
Tork Dalgalanmasının Azaltılması,
Anahtarlama Frekansı.

Özet: Bu çalışmada anahtarlama relüktans motorun (ARM) torkunda meydana gelen dalgalanmaya, anahtarlama frekansının etkisi incelenmiştir. Anahtarlama frekansı sistemlerin tasarımında önemli bir parametredir. Anahtarlama frekansların yüksek tutulması kontrol edilen elektromekanik ya da elektronik sistemlerin performanslarının belirlenmesinde önemli bir faktördür. Şöyle ki elektromekanik sistemlerin hem elektriksel hem de mekanik zaman sabitleri vardır. Bu zaman sabitleri düşük olan sistemlerde kontrol sisteminin sağlıklı ve gürbüz çalışabilmesi için anahtarlama frekansının da aynı oranda yüksek olması gerekir. Anahtarlama frekansının tork dalgalanmasına etkisini görebilmek için ARM 10kHz-100kHz arasında farklı anahtarlama frekansları ile sürülmüştür. Farklı hızlarda gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ile ARM'nin anahtarlama frekansının tork dalgalanması üzerine etkisi incelenmiş ve genel olarak anahtarlama frekansı arttıkça tork dalgalanmasında azalma meydana geldiği ve belirli anahtarlama frekansından sonra ise çok fazla değişmediği görülmüştür.

An Investigation Of The Effect Of Switching Frequency On Torque Ripple In Switched Reluctance Motor Drives

Keywords
Switched Reluctance Motor,
Torque Ripple Minimization,
Switching Frequency.

Abstract: In this study, the effect of the switching frequency on the torque ripple of the switched reluctance motor (SRM) is investigated. The switching frequency is important parameter in the design of the systems. High switching frequency is an important factor for determining the performance of electromechanical or electronic systems. Namely, the electromechanical systems have both electrical and mechanical time constants. The switching frequency must be the high same rate with time constants for healthy and robust control in systems. The SRM is driven at different switching frequencies from 10kHz to 100kHz to see the effect of switching frequency on torque ripple. The effect of switching frequency of the SRM on torque ripple are performed with simulation studies at different speeds and it is seen that as the switching frequency increases, torque ripple decreases and torque ripple is nearly same after the specific switching frequency.

1. Giriş

Anahtarlama relüktans motorlar dayanıklı ve basit yapıları ile imalat ve bakım maliyetleri ucuz olan, herhangi bir soğutma sistemine ihtiyaç duymayan ve yüksek güvenilirlik ile geniş bir hız aralığında çalışabilen motorlardır (Lawrenson vd, 1980). Rotorunda paketlenmiş saclardan yekpare biçimde oluşturulmuştur. Rotorda herhangi bir indüksiyon oluşturacak sargı vb eleman bulunmaz. Bu özelliği hem rotor kayıplarının olmamasını hem de yüksek hızlı çalışmalarda kullanılması imkânını sağlar. Rotorda enerjilendirilecek herhangi bir malzeme gerektirmemesi DC ve sargılı indüksiyon makinalarındaki gibi bir fırça kolektör yapısını gerektirmez. Böylece

daha uzun ömürlü olarak kullanılabilirler. Aynı zamanda DC makinalarda ki kollektör düzeneğinde karşılaşılan kıvılcım etkisi yoktur bu nedenle yangın ihtimali olan yerlerde rahatlıkla kullanılabilirler. Bunun yanında rotorun çıkıntılı yapısından dolayı fan etkisi oluşturduğu için motorun soğutulması için indüksiyon makinalarda olduğu gibi ek bir aparat gerektirmezler. Bütün bu avantajlar göz önüne alındığında endüstriyel uygulamalarda ARM kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

ARM'lerin avantajlarının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. DC ve indüksiyon makinalarda olduğu gibi hat başlatmalı yapısı yoktur. Mutlak pozisyon geri beslemesi ve özel sürme sistemi gerektirir. ARM ler çıkıntılı kutup yapısından dolayı doğrusal olmayan bir akı karakteristiğine buna paralel olarak da tork karakteristiğine sahiptirler. Bu motorun modellenmesi ve kontrolü açısından oldukça sıkıntılı bir durumdur. Aynı zamanda çıkıntılı kutup yapısı tork profilinin aşırı titreşimli olmasına da sebep olmaktadır. Torkun titreşimli olması aşırı gürültü ve mekanik malzemelerde çabuk aşınmaya neden olacaktır. Rotorun çıkıntılı kutuplu yapıda olması aynı zamanda rüzgâr ve sürtünme kayıplarının da artmasına neden olur.

ARM'lerin tork dalgalanmasının azaltılmasına yönelik literatürde birçok çalışma mevcuttur. Rotor veya stator yapısını değiştirerek, kullanılan kontrol tekniklerini geliştirerek veya kullanılan sürme devresini geliştirerek ve optimizasyon yöntemleri ile sistemi en optimum hale getirip tork dalgalanması azaltılmaya çalışılmıştır. Husain ve Ehsani yeni bir darbe genlik modülasyonu (PWM) akım kontrol stratejisi ile motor torkundaki dalgalanmaları azaltmışlardır (Husain ve Ehsani, 1996). Mir vd. adaptif bulanık mantık kullanarak tork dalgalanmalarını en aza inmesini sağlamışlardır (Mir vd, 1999). Shang vd. tork dalgalanmasını azaltabilmek için yeni bir algoritma geliştirmişlerdir (Shang vd, 1999). Rodrigues vd. bulanık mantık tabanlı kesme kompensatörü tasarlayarak tork dalgalanmalarını azaltmayı başarmışlardır (Rodrigues vd, 2001). Lee vd rotor yapısını sonlu elemanlar yöntemi (FEM) analizini kullanarak değiştirmiş ve tork dalgalanmalarını azaltmışlardır (Lee vd, 2004). Choi vd. motorun kutup yapısını değiştirerek tork dalgalanmalarını en aza indirmişlerdir (Choi vd, 2007). Xue vd. tork paylaşım fonksiyonlarını kullanarak gerekli açıları ayarlayarak tork dalgalanmalarını en aza indirmişlerdir (Xue vd, 2009). Ye vd. yeni bir tork paylaşım fonksiyonu metodu ortaya koyarak tork dalgalanmalarını azaltmışlardır (Ye vd, 2015). Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar da anahtarlama frekansı genel olarak 50-15kHz aralığında seçilmiştir ve farklı frekanslar seçilerek gerçekleştirilen çalışmalar olsa da frekans etkisine bağlı olarak tork dalgalanması irdelenmemiştir (Colby vd, 1996; İnanç ve Ozbulur, 2003; Ye vd, 2015).

Bu çalışmada 8/6 kutuplu 4 fazlı ARM kullanılarak farklı frekans aralıklarında 10kHz-100kHz anahtarlama frekansları ile ARM sürülmüş ve anahtarlama frekansının tork dalgalanmasına etkisi incelenmiştir. Benzetim çalışmaları farklı hızlarda ve farklı referans tork değerlerinde gerçekleştirmiştir. Tork dalgalanmasının yüzdesi, ortalama tork, motor faz akımı ve faz akımı/ortalama tork verileri elde edilmiştir. Anahtarlama frekansı arttıkça belirli frekanslara kadar tork dalgalanmasının azaldığı gözlemlenmiştir.

Çalışmanın kalan bölümleri şu şekildedir. İkinci bölümde anahtarlama relüktans motorun yapısı ve sürme sisteminden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde anahtarlama frekansının tork dalgalanması üzerine etkisinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde benzetim çalışmaları anlatılmış ve son bölümde ise sonuçlar verilerek genel bir değerlendirme yapılmıştır.

2. ARM Sürme Sistemi

ARM akı karakteristiği rotor pozisyonu ve akımına bağlı olarak doğrusal olmayan bir değişim gösterir. Genel elektrik makinaları teorisine göre faz gerilimi aşağıda olduğu gibi ifade edilir (Ustun, 2009; Ustun, 2014).

$$v_j = R_j i_j + \frac{d\lambda_j(i, \theta)}{dt} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

Burada m motorun toplam faz sayısını gösterir. Her bir fazda üretilen elektromanyetik tork ko- enerjinin kısmi türevine bağlı olarak aşağıda olduğu gibi verilebilir,

$$T_j(i, \theta) = \left. \frac{\partial W_j^c(i, \theta)}{\partial \theta} \right|_{i=\text{sabit}} \quad (2)$$

Ko-enerji aşağıda olduğu gibi ifade edilir,

$$W_j^c(i, \theta) = \int_0^{i_j} \lambda_j(i, \theta) di_j \Big|_{\theta=\text{sabit.}} \quad (3)$$

Toplam elektromanyetik tork aktif olan fazların üretmiş olduğu torkların toplamıdır ve aşağıda olduğu gibi elde edilir,

$$T_e(i, \theta) = \sum_{j=1}^m T_j(i, \theta) \quad (4)$$

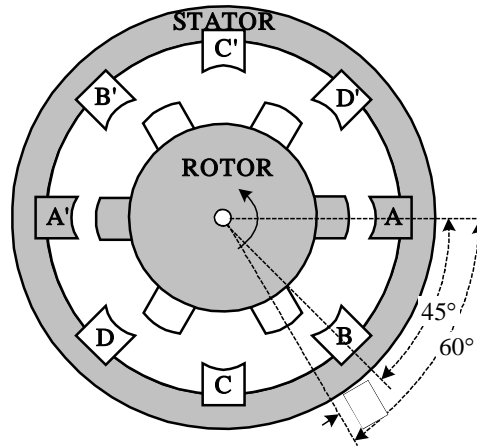
Ortalama tork ifadesi aşağıda olduğu gibi elde edilir,

$$T_{\text{ortalama}} = \frac{1}{\theta_r} \int_0^{\theta_r} T_e d\theta \quad (5)$$

Burada I_j bir faz akımı etkin değeri ve θ_r rotor kutup aralığıdır ve değeri 60° dir.

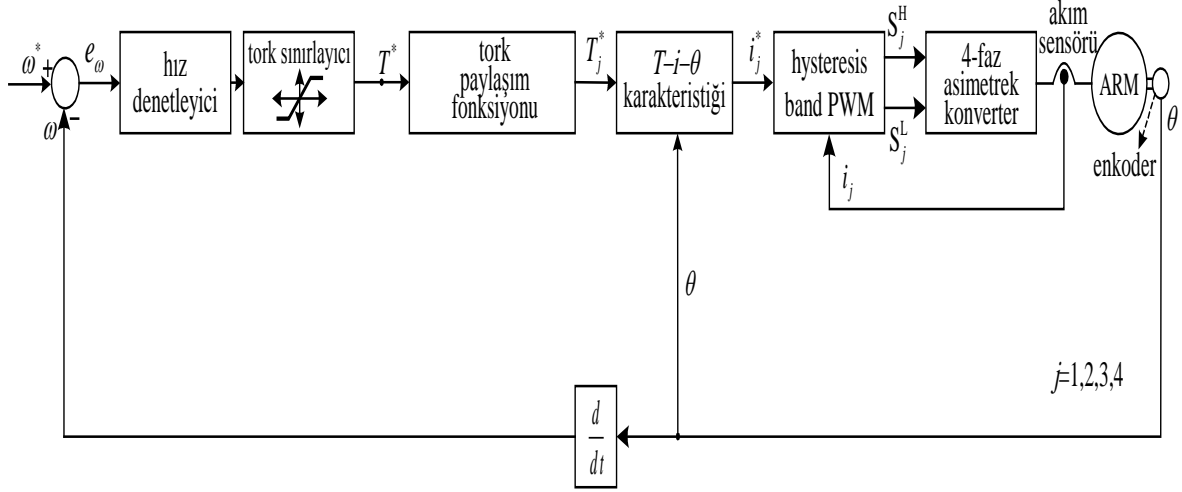
$$I_j = \sqrt{\frac{1}{\theta_r} \int_0^{\theta_r} i_j^2 d\theta} \quad (6)$$

Bu çalışmada Şekil 1' de gösterilen 8/6 kutuplu 4 fazlı anahtarlama relüktans motor kullanılmıştır. ARM'nin kutup aralığı 60° , stator kutup aralığı 45° ve bunların arasındaki fark olan adım açısının 15° olmaktadır. Dolayısıyla akı ve endüktansın değişimi 60° lik açılarla periyodik olarak değişmektedir ve bir periyot da 4 faz iletim kesim durumu oluşmaktadır (Ustun vd, 2018).



Şekil 1. 8/6 ARM motor

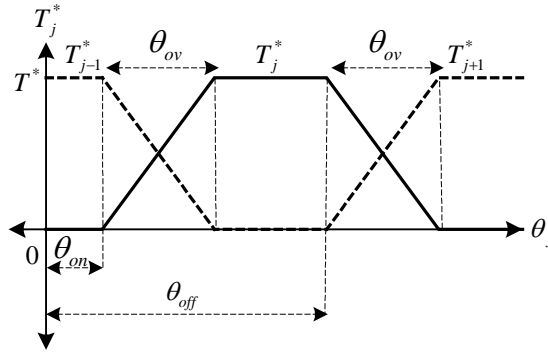
Benzetim çalışmalarında kullanılan ARM sürme sistemi Şekil 2.'de verilmiştir (Onder, 2016). Sürme sisteminin güç ünitesi 4-fazlı, 8/6 kutuplu ARM, 4 fazlı asimetrik konverter ve ayarlı DC güç kaynağından oluşturulmuştur. Pozisyon ve akım bilgileri sensörlerden elde edilmiştir. Sürme sisteminin kontrol tarafında ise PI gürbüz hız denetleyici, tork sınırlayıcı, sabit anahtarlama açıları içeren doğrusal tork paylaşım fonksiyonu (TPF), referans akımın elde edildiği T-i- θ karakteristiklerinin bulunduğu look-up table, histeresiz band PWM den oluşmaktadır. Şekil 2'de ω^* referans hız, ω mekanik hız, e_ω hız hatası, T^* referans tork, θ rotor pozisyonu, i_j^* referans faz akımları, i_j faz akımları, s_j^H ve s_j^L anahtarlama sinyallerini göstermektedir. Her bir faz için s_j^H üst ve s_j^L alt 2 anahtar kullanılmıştır.



Şekil 2. ARM sürme sistemi

3. ARM'de Anahtarlama Frekansının Tork Dalgalanmasına Etkisi

Bu çalışmada referans tork değerinin daha kolay izlenebilmesi için, doğrusal tork paylaşım fonksiyonu kullanılmıştır ve kullanılan TPF'nin grafiği Şekil 3.'de gösterilmiştir (Onder,2016).

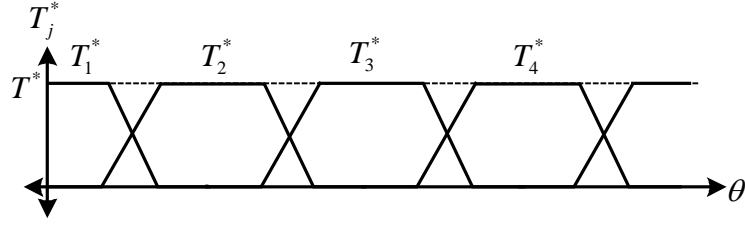


Şekil 3. Doğrusal tork paylaşım fonksiyonu

Geleneksel TPF yapıları iletme geçme, kesişim ve kesim bölümleri olmak üzere üç aralıktan oluşturulmuştur. Bu çalışmada TPF'nin açıları sabit kabul edilmiştir. Buna göre bir faz için tork paylaşım fonksiyonları yukarıda sıralanan 3 pozisyon için aşağıda olduğu gibi verilebilir.

$$T_j^* = \begin{cases} T^* \cdot f_{rise}^{TPF} & , (\theta_{on}) \leq \theta_j < (\theta_{on} + \theta_{ov}) \\ T^* & , (\theta_{on} + \theta_{ov}) \leq \theta_j < (\theta_{off}) \\ T^* \cdot f_{fall}^{TPF} & , (\theta_{off}) \leq \theta_j < (\theta_{off} + \theta_{ov}) \\ 0 & , \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (7)$$

Motorda ayrı ayrı fazlarda üretilen torkların toplamı toplam motor torkunu vermektedir ve Şekil 4.' de gösterilmiştir (Onder,2016).



Şekil 4. 8/6 ARM faz torkları

Şekil 4.'de T_1^* , T_2^* , T_3^* ve T_4^* sırasıyla faz torklarını ve T^* toplam torku göstermektedir.

Çalışmada 2n topolojiye sahip dört-fazlı bir asimetrik klasik konverter kullanılmıştır. Bu tip konverterler hem bipolar hem de unipolar PWM uygulamalarına imkân sağladığı için tercih edilmiştir. Her bir faz için üst ve alt 2 anahtar kullanılmıştır. Bununla birlikte histeresis band pwm fonksiyonu ile anahtarların iletim ve kesim durumları belirlenir (Onder, 2016; Ustun, 2015).

Bipolar durumda,

$$S_j^H, S_j^L = \begin{cases} 1, & i_j^* - i_j \geq h_b \\ 0, & i_j^* - i_j \leq -h_b \end{cases} \quad \theta_{on} < \theta_j < \theta_r / 2 - \theta_{off}, \quad j = 1, \dots, 4 \quad (8)$$

Unipolar durumda,

$$S_j^H = \begin{cases} 1, & i_j^* - i_j \geq h_b \\ 0, & i_j^* - i_j \leq -h_b \end{cases} \quad \theta_{on} < \theta_j < \theta_r / 2 - \theta_{off}, \quad j = 1, \dots, 4 \quad (9)$$

$$S_j^L = \begin{cases} 1, & \theta_{on} < \theta_j < \theta_r / 2 - \theta_{off} \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad j = 1, \dots, 4 \quad (10)$$

Böylece pozisyon ve akım geri beslemesi kullanılarak istenen referans akıma bağlı olarak konvertör anahtarları iletime ve kesime götürülür. Bunun sonucu olarak da motor fazlarında istenen akım değerleri elde edilir.

Günümüz mikro-denetleyicilerinde donanımsal olarak PWM üretilmesinde bu tip sinyallerin elde edilmesi kolaydır. Anahtarlama frekansı sistemlerin tasarımı için önemlidir. Anahtarlama frekansı elektromekanik sistemin mekanik ve elektrik zaman sabitine bağlıdır. Anahtarlama frekansının yüksek olması kontrol edilen elektromekanik ya da elektronik sistemlerin performanslarının belirleyen önemli bir faktördür. Bu zaman sabitleri düşük olan sistemlerde kontrol sisteminin gürbüz çalışabilmesi için aynı oranda sistemin elverdiği ölçüde anahtarlama frekansı yüksek tutulmalıdır. Anahtarlama frekansı düşük tutulursa mekanik sistemden istenen kontrol çıkışları üretilemez ya da yetersiz performansa sebep olur. Elektriksel sistemlerde de belirlenen akım değerini aşma ve devrenin zarar görmesi gibi sorunlar karşımıza çıkar. Bu nedenle anahtarlama frekansının sistemlerin zaman sabiti dikkate alınarak belirlenmesi zorunlu bir kuraldır. Bunun yanında anahtarlama frekansının yüksek tutulması özellikle filtre elemanlarının değerinin dolayısıyla boyutlarını da düşürmesine katkıyı yüksektir. Anahtarlama frekansının yüksek olmasının dezavantajlı tarafları da mevcuttur. Özellikle işlemcilerin çalışma frekansının düşük olduğu mikro-denetleyicilerde bağımsız PWM üretme (histeresis PWW gibi) durumunda program çalışma döngüsü süresi anahtarlama periyodundan aşağıda tutulmak zorunda olduğu için çok fazla işlem süresi kullanmamıza en büyük engeldir. Bu nedenle hem işlem yükünün fazla olduğu hem de yüksek frekanslı sistemler için farklı çözümler üretmek zorunluluğu doğacaktır. Bir önemli dezavantajı da anahtarlama kayıplarının artmasıdır. Bu hem tasarlanan devrenin veriminin düşmesine aynı zamanda elektronik anahtarların soğutulması için daha büyük yapıda soğutucuların kullanılmasını gerektirecektir. Bunun dışında frekans yükseldikçe kullanılan elektrik elemanlarının özellikle trafo ve kondansatör tarzı devre elemanlarının yapılarında değişiklik yapmayı gerektirecektir. (Ustun,2014).

Tork dalgalanması, maksimum ve minimum torkun farkının, ortalama torka oranının yüzdesi olarak ifade edilmektedir (Husain, 2002).

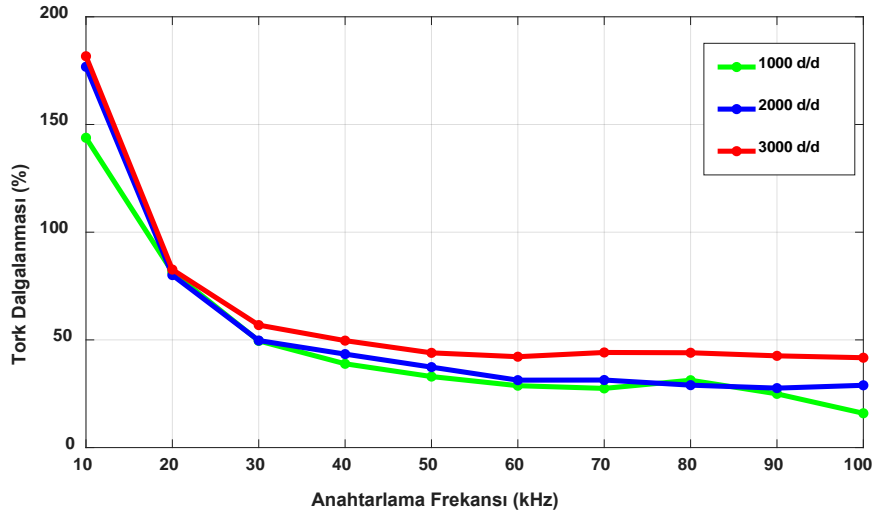
$$\text{Tork Dalgalanması} = \left| \frac{T_{anlık}(\max) - T_{anlık}(\min)}{T_{ortalama}} \right| \times 100\% \quad (11)$$

Benzetim çalışmalarında da elde ettiğimiz verilere göre sistemin elverdiği ölçüde anahtarlama frekansının artırılması üretilen tork dalgalanmasının azalmasını sağlamaktadır. Belirli bir frekandan sonra sistemin tork dalgalanması hemen hemen aynı kalmaktadır.

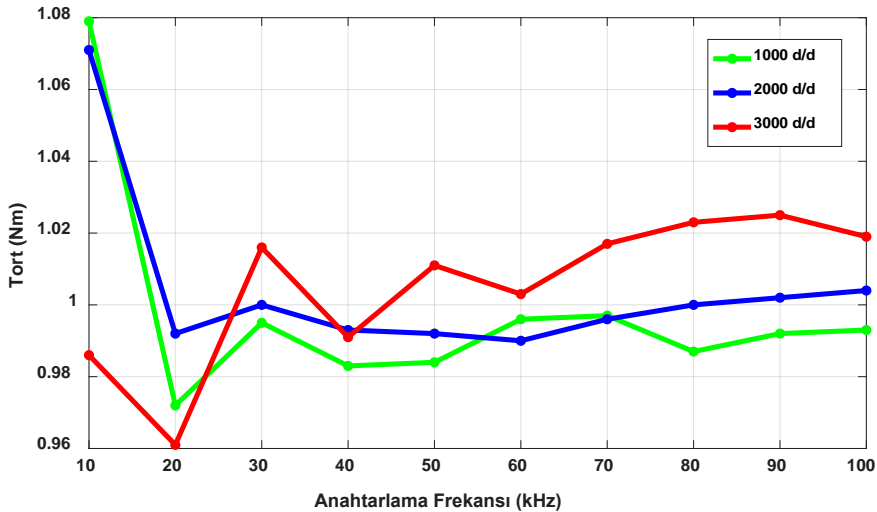
4. Benzetim Çalışması

İkinci bölümde anlatılan ARM sürme sistemini kullanarak üçüncü bölümde anlatılan anahtarlama frekansının tork dalgalanmasına etkisini incelemek ve test etmek için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları C/C++ programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları için 2 farklı tip test düzeneği oluşturulmuştur. Testler gerçekleştirilirken geniş hız ve anahtarlama frekansı aralığında ve farklı referans torkunda gerçekleştirilmesine dikkat edilmiştir. Böylece gerçek sistemlerde ARM'nin tork dalgalanmasının azaltılmasında rahatlıkla kullanılabilmesi amaçlanmıştır.

Şekil 5.'de ve Şekil 6'da 1Nm referans tork değeri için gerçekleştirilen testler verilmiştir. Test sonuçları 10kHz-100kHz aralığında 10 farklı frekans değerinde alınmıştır ve testler 1000 d/d, 2000 d/d ve 3000 d/d için tekrarlanmıştır. Şekil 5(a) da anahtarlama frekansı arttıkça tork dalgalanması oranının azaldığı görülmektedir. Düşük devirlerde tork dalgalanmasının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 50kHz anahtarlama frekansından sonra tork dalgalanmasının çok fazla değişmediği görülmüştür. Şekil 5(b)'de ortalama tork grafiği verilmiştir ve 3 farklı referans hızda da bütün frekanslar için referans torkun yakalandığı görülmüştür. Şekil 6(a)'da bir faz akım değeri ve Şekil 6(b)'de akım/ortalama tork değerleri verilmiştir.

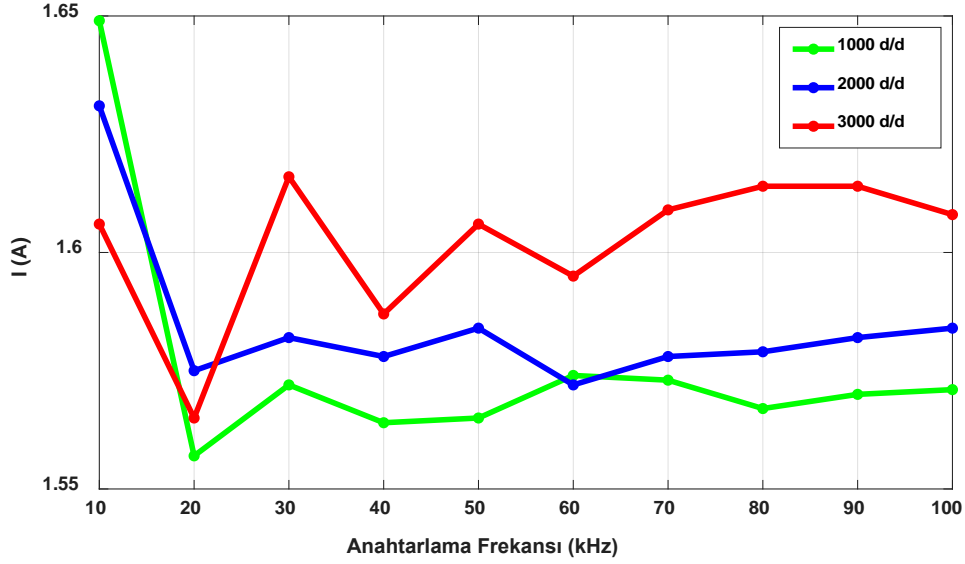


(a)

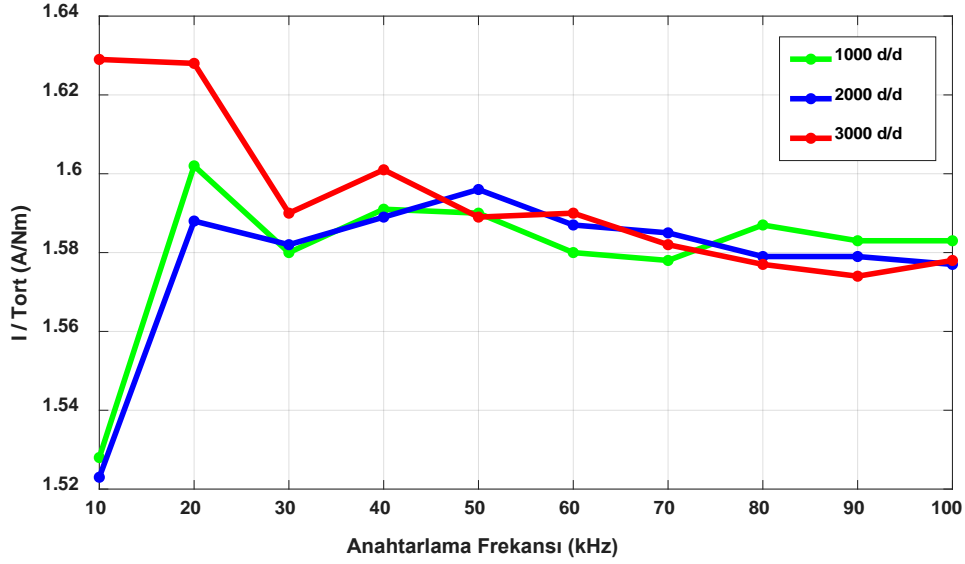


(b)

Şekil 5. 1Nm referans tok için benzetim sonuçları a) Tork dalgalanması b) Ortalama tork



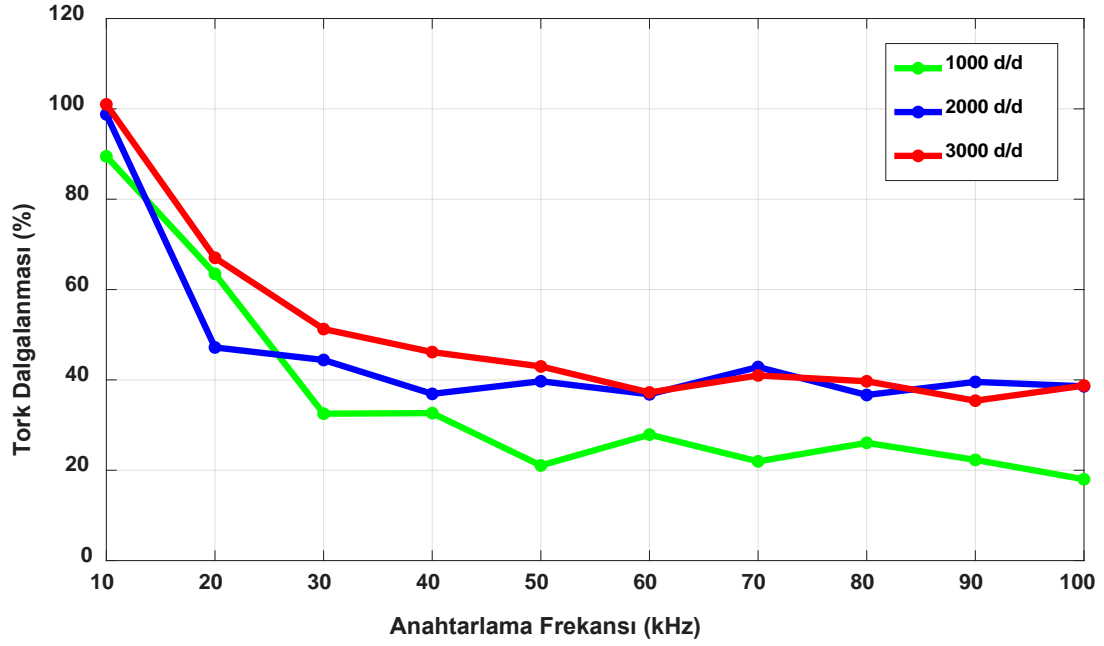
(a)



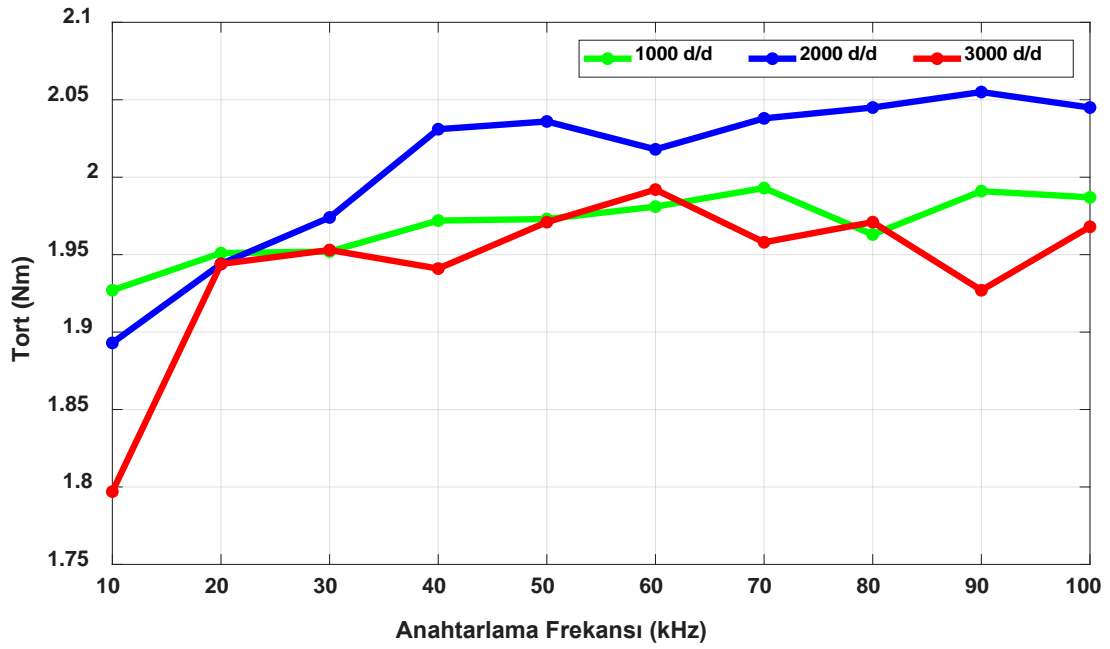
(b)

Şekil 6. 1Nm referans tok için benzetim sonuçları a) Faz akımı b) Faz akımı/Ortalama tork

Şekil 7.'de ve Şekil 8'de 2Nm referans tork değeri için gerçekleştirilen testler verilmiştir. Test sonuçları 10kHz-100kHz aralığında 10 farklı frekans değerinde alınmıştır ve testler 1000 d/d, 2000 d/d ve 3000 d/d için tekrarlanmıştır. Şekil 7(a) da anahtarlama frekansı arttıkça tork dalgalanması oranının azaldığı görülmektedir. Düşük devirlerde tork dalgalanmasının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 50kHz anahtarlama frekansından sonra tork dalgalanmasının çok fazla değişmediği görülmüştür. Şekil 7(b)'de ortalama tork grafiği verilmiştir ve 3 farklı referans hızda da bütün frekanslar için referans torkun yakalandığı görülmüştür. Şekil 8(a)'da bir faz akım değeri ve Şekil 8(b)'de akım/ortalama tork değerleri verilmiştir.

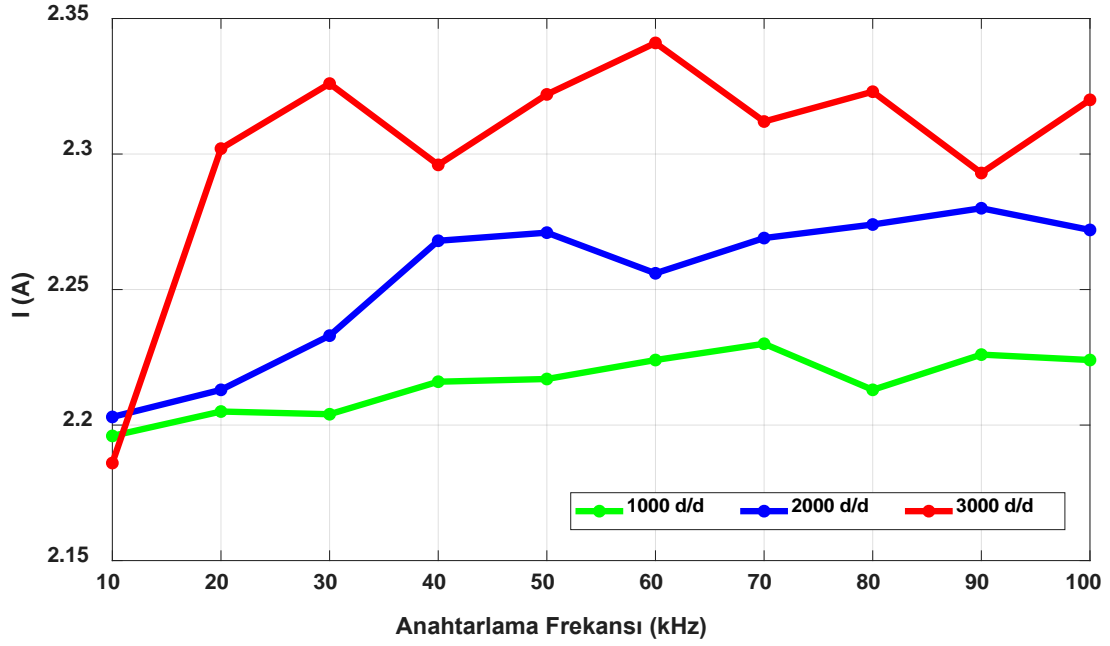


(a)

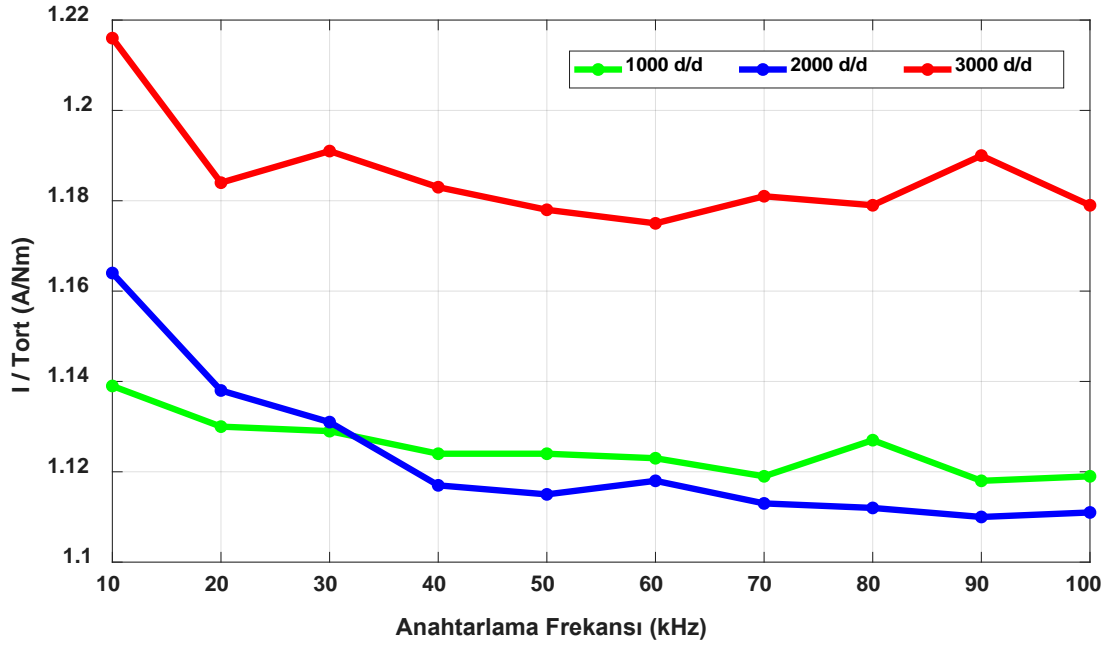


(b)

Şekil 7. 2Nm referans tok için benzetim sonuçları a) Tork dalgalanması b) Ortalama tork



(a)



(b)

Şekil 8. 2Nm referans tok için benzetim sonuçları a) Faz akımı b) Faz akımı/Ortalama tork

Her iki çalışma durumunda da anahtarlama frekansı 50Khz'e kadar arttırıldığında tork dalgalanması değerinin azaldığı daha sonrasında ise çok fazla değişim olmadığı gözlenmektedir. Anahtarlama frekansı elektromekanik sistemin mekanik ve zaman sabiti göz önüne alınarak ve sistemin elverdiği ölçüde maksimum olacak şekilde seçilmelidir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada ARM için büyük bir dezavantaj olan tork dalgalanmasına, anahtarlama frekansının etkisi incelenmiştir. Farklı frekanslarda gerçekleştirilen benzetim çalışmaları sonucunda tork dalgalanması değerinin belirli bir frekansa kadar azaldığı sonra ise hemen hemen aynı değerde olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla elektromekanik sistemin mekanik ve elektrik zaman sabiti elverdiği ölçüde anahtarlama frekansı yüksek seçilmelidir. Böylece gerçek sistemlerde ARM'nin tork dalgalanmasının azaltılabilmesi için mümkün olduğunca yüksek anahtarlama frekansının kullanılması gerektiği anlaşılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışma sırasında bize sağlamış olduğu katkılarından ve yönlendirmelerinden dolayı Sayın Prof. Dr. Oğuz ÜSTÜN'e teşekkürü bir borç biliriz.

Kaynaklar

- Choi, J. Y. K., Yoon, H. S., Koh, C. S. (2007). Pole-Shape Optimization of a Switched- Reluctance Motor for Torque Ripple Reduction., IEEE Transactions on Magnetics., 43(4), 1797-1800.
- Colby, R. S., Mottier, F. M., Miller, T. J. E. (1996). Vibration Modes and Acoustic Noise in a Four-Phase Switched Reluctance Motor., IEEE Transactions on Industry Applications., 32(6),1357-1364.
- Husain, I., Ehsani, M. (1996). Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control., IEEE Transactions on Power Electronics., 11(1), 83-88.
- Husain, I. (2002). Minimization of torque ripple in SRM drives., IEEE Transactions Industrial Electronics., 49(1), 28-39.
- İnanç, N., Ozbulur, V. (2003). Torque ripple minimization of a switched reluctance motor by using continuous sliding mode control technique., Electric Power Systems Research., 66(3), 241-251.
- Lawrenson, P. J., Stephenson, J. M., Blenkinsop, P.T., Corda, J., Fulton, N. N. (1980). Variable-Speed Switched Reluctance Motors. IEE Proceedings B- Electric Power Applications., 127(4), 253-265.
- Lee, J. W., Kim, H. S., Kwon, B. I., Kim, B. T. (2004). New Rotor Shape Design for Minimum Torque Ripple of SRM Using FEM., IEEE Transactions on Magnetics., 40(2), 754-757.
- Mir, S., Elbuluk, M.E., Husain, I. (1999). Torque-Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors Using Adaptive Fuzzy Control. IEEE Transactions on Industrial Electronics., 35(2), 461-468.
- Onder, M. (2016). Anahtarlamalı Relüktans Motorun Tork Rıplı Minimizasyonu. Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 125 s., Bolu.
- Rodrigues, M., Branco, P. J. C., Suemitsu, W. (2001). Fuzzy Logic Torque Ripple Reduction by Turn-Off Angle Compensation for Switched Reluctance Motors., IEEE Transactions of Industrial Electronics.,48(3), 711-714.
- Shang, C., Reay, D., Williams, B. (1999). Adapting CMAC Neural Networks with Constrained LMS Algorithm for Efficient Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics., 7(4), 401-413.
- Ustun, O. (2009). A nonlinear full model of switched reluctance motor with artificial neural network., Energy Conversion and Management.,50 (9), 2413-2421.
- Ustun. O. (2014). Elektrik Makinalarının Modellenmesi ve Simülasyonu Ders Notları. Abant İzzet Baysal Üniversitesi. Bolu.
- Ustun. O. (2015). Elektrik Makinalarının Gerçek Zamanlı Kontrolü Ders Notları. Abant İzzet Baysal Üniversitesi. Bolu.
- Ustun. O., Onder, M., Sefa, İ. (2018). Identification of Mechanical Parameters for the Switched Reluctance Motor., 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), 1-8, Kızılcahamam, Ankara.
- Xue, X. D., Cheng, K. W. E., Ho, S. L. (2009). Optimization and Evaluation of Torque-Sharing Functions for Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives., IEEE Transactions on Power Electronics., 24(9), 2076-2090.
- Ye, J., Bilgin, B., Emadi, A. (2015). An Offline Torque Sharing Function for Torque Ripple Reduction in Switched Reluctance Motor Drives”, IEEE Transactions on Energy Conversion., 30(2), 726-735.

Ye, J., Bilgin, B., Emadi, A. (2015). An Extended-Speed Low-Ripple Torque Control of Switched Reluctance Motor Drives., IEEE Transaction on Power Electronics., 30(3),1457-1470.