

Reduction of EMI by Using Chaotic Sinusoidal PWM on Vector Controlled PMSM

Mehmet Emin Asker

Dicle University, Vocational Schools of Technical Sciences
21280 Diyarbakir, Turkey
measker@dicle.edu.tr

Hasan Kurum

Firat University, Department of Electrical and Electronics Engineering
23119 Elazig, Turkey
hkurum@firat.edu.tr

Ahmet Bedri Ozer

Firat University, Department of Computer Engineering
23119 Elazig, Turkey
bedriozer@firat.edu.tr

Abstract

In that paper have been studied about using chaotic sinusoidal pulse width modulation (CSPWM) to reduce Electromagnetic Interference (EMI) on vector control driver of permanent magnet synchronous motor (PMSM). KSPWM had gotten, constant switching frequency of SPWM transforms to switching frequency that changes chaotically in specific interval with helping of chaotic maps. The simulation shows that in PMSM under vector control using CSPWM reduces acoustic noise and EMI. In addition to investigate different chaotic maps effect to EMI result of three different chaotic maps have been compared.

Keywords: Chaotic Switching Frequency, Elektromagnetic interference (EMI), Acoustic Noise, PMSM, Vektör Kontrol, Chaotic Map

SMSM Vektör Kontrolünde Kaotik Sinüsoidal DGM Kullanarak EMI'nin Azaltılması

Özet

Bu çalışmada sürekli mıknatıslı senkron motor'un (SMSM) vektör kontrol sürücüsünde kaotik sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu (KSDGM) kullanılarak Elektromanyetik Girişim'in (EMI) düşürülmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Sinüsoidal darbe genişlik modülasyonunda (SPWM) sabit anahtarlama frekansı, kaotik haritalar yardımı ile belli aralıkta kaotik olarak değişen bir anahtarlama frekansına dönüştürülerek KSDGM elde edilmiştir. SMSM vektör kontrollünde KSDGM kullanmakla EMI'nın ve akustik gürültülerin azaldığı yapılan simülasyonlarla gösterilmiştir. Ayrıca farklı kaotik haritalar kullanmanın EMI'ya etkilerini incelemek için üç ayrı kaotik harita kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kaotik Anahtarlama Frekansı, Elektromanyetik Girişim, Akustik Gürültü, PMSM, Vektör Kontrol, Kaotik Harita

1. Giriş

Rotorunda sargı yerine mıknatıs kullanarak yapılan PMSM; düşük hacim, düşük kayıp, yüksek verim, kolay soğutma, esnek rotor yapısı, düşük atalet ve yüksek moment-akım oranı gibi avantajlara sahip bir motordur. Bu önemli özelliklere sahip olan bu motor endüstriyel uygulamalarda şimdilerde oldukça popülerdir. Bu motor ömür boyu maliyette asenkron motorla ciddi rekabet edecek duruma gelmiştir. SMSM'ler gelişmiş hareket kontrol sistemlerin için ideal motorlardır. Ayrıca vektör kontrol yöntemi SMSM'a kolayca uygulanabilir [1-4]

Güç dönüştürücülerinde yüksek anahtarlama frekanslarında meydana gelen baskın harmonikler bazı elektromanyetik kirliliğe ve akustik gürültüye sebep olur. Işınım veya iletkenlik yolu ile yayılan elektromanyetik kirlilik olan EMI, hem elektrik-elektronik cihazlara olan olumsuz etkisi hem de insan sağlığı üzerine olan etkisinden dolayı sınırlandırılması gereken bir etkidir.

Yüzeysel tip PMSM'nin faz indüktansı asenkron motorunkinden daha küçüktür. Böylece EMI'nin etkisi SMSM'de asenkron motora göre daha fazladır [5].

Elektriksel sürücü sistemlerinde EMI için sınırlar vardır. Eviriciler AC sürücü sistemlerinde EMI'nın başlıca kaynaklarıdır. Bir sistemde mevcut EMI'ı azaltmak için; filtre kullanma veya kaplama yapılır. Ancak bu durum fazladan boyut ve ağırlık ile maliyet getirir. Özellikle iletim yolu ile oluşan EMI için en iyi çözüm, EMI'ı üretildiği kaynağından engellemektir [6].

Klasik Sinüsoidal DGM yönteminde yüksek anahtarlama frekansında, akım ve gerilimde meydana gelen ani değişimlerden dolayı baskın harmonikler meydana gelir. Bu harmonikler hem elektromanyetik kirliliğe hemde akustik gürültüye sebep olurlar. Anahtarlama frekansının belli aralıkta rastgele veya kaotik değişmesi durumunda, anahtarlama frekansı ve katlarında meydana gelen bu etki, belli aralıkta düşürülerek yayılır. Böylece 9-150 KHz aralığı için sınırlamalar getirilen EMI düşürülmüş olur. Ayrıca baskın harmoniklerde gürültüye sebep olan harmonikler küçüldüğü içinde gürültüde azaltılmış olur.

Sürücü sistemlerinde EMI nin etkisini azaltmak çok sayıda çalışma vardır [5, 7-12]. Rastgele darbe genişlik modülasyonu (RDGM) yöntemi güç konverterlerinde EMI'ı azaltmak için geliştirilmiştir. Bu yöntemle ayrıca akustik gürültü ve mekanik titreşimler de azaltılmış olur [8-12]. RDGM; rastgele anahtarlama frekanslı, rastgele darbe konum tekniği ve rastgele anahtarlama tekniği gibi farklı şekillerde gerçekleştirilmiştir [8].

Rastgele veya kaotik DGM gibi değişken anahtarlama frekansına sahip yöntemler genellikle asenkron motora uygulamıştır. Ancak bu yöntemlerin SMSM sürücüsüne uygulanması üzerine yapılan sınırlı çalışmalar vardır [5,7].

Kaotik DGM teknikleri rastgele DGM tekniklerine alternatif olarak geliştirilmiş yöntemlerdir. Kaotik sinyallerin bir kaotik harita veya kaotik osilatörden elde edilmesi, rastgele sinyal elde etmekten daha kolaydır. Aynı zamanda uygulanması da daha basittir [13].

Literatürde sürücü sistemlerine uygulanmak üzere geliştirilen kaotik DGM yöntemleri; KSDGM, kaotik darbe konumu tekniği, karma kaotik SDGM ve kaotik uzay vektör modülasyonlu DGM' dir [14-17].

PMSM vektör kontrol sürücüsü için, belirli bir aralıkta kaotik olarak değişen anahtarlama frekansına sahip KSDGM yöntemi geliştirilmiştir. SDGM yönteminde sabit anahtarlama frekansı kaynaklı elektromanyetik ve akustik gürültülerin azaltıldığı evirici ortak mod ve diferansiyel mod gerilimleri (PSD) güç yoğunlukları üzerinden gösterilmiştir. Ayrıca vektör kontrol sisteminde KSDGM yöntemi için farklı kaotik haritalar kullanılarak EMI açısından kıyaslanma yapılmıştır.

2. SMSM' nin Matematiksel Modeli

SMSM'un $d - q$ modeli aşağıdaki eşitliklerle verilmektedir;

$$V_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \quad (1)$$

$$V_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_m \quad (2)$$

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_m \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

$$T_e = 1.5P(\psi_m I_q + (L_d - L_q)I_d L_q) \quad (5)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e - T_y - B\omega_r}{J} \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (7)$$

$$\omega_e = \omega_r * P \quad (8)$$

Burada $d - q$ dönen eksen takımında L_d ve L_q endüktansları, R stator sargı direnci, I_d ve I_q akımları, V_d ve V_q gerilimleri, ψ_d ve ψ_q akıları, ψ_m sabit mıknatıs akısı, T_e elektriksel moment, T_y yük moment, B manyetik akı yoğunluğu, ω_r rotor hızı, ω_e elektriksel hız, θ_r rotor açısını göstermektedir.

Yüzeysel tip PMSM $d - q$ modelinde L_d , L_q bir birine eşittir.

3. AC Sürücü Sistemlerinde Elektromanyetik Girişim (EMI)

Elektromanyetik girişim (EMI), elektrik-elektronik cihazların performansında azalmalara, bozulmalara veya hatalı çalışmasına sebep olan yüksek frekanslardaki her türlü bozucu etki veya işaret olarak tanımlanabilir.

Güç anahtarlarının yüksek frekanslarda açılıp kapanması esnasında akım ve gerilimde meydana gelen dalgalanmalar büyük enerji seviyelerinde harmonikler içerir. Bu etki EMI olarak bilinir.

Elektromanyetik uyumluluk (EMC) ise bir cihaz veya sistemin, bulunduğu elektromanyetik ortamda, bu ortamı veya diğer cihazları olumsuz etkileyecek düzeylerde elektromanyetik gürültü oluşturmadan ve ortamdaki diğer sistemlerin oluşturduğu girişimden etkilenmeden, kendisinden beklenen görevleri yerine getirme yeteneği olarak ifade edilebilir.

Saçılarak yayılan EMI'dan korunmak için uygun mesafe aralıklarını kullanma ve ekranlama (shielding) yapılmalıdır. İletkenlik yoluyla yayılan girişimlerde ise verimli topraklama (grounding), doğru bağlama (bonding) ve filtreleme (filtering) yaparak korunabilir. Ancak hem maliyet hem boyut hem de zaman açısından en iyi çözüm, cihaz veya sistemlerin tasarımları aşamasında bu soruna çözüm bulmaktır.

İletim yolu ile yayılan EMI, ortak-mod (Common-mode: CM) ve fark-mod (differential-mode: DM) olarak bilinen iki kategoriden oluşur. CM akımlar faz ile toprak arasında, DM akımlar ise eviricinin farklı fazları arasında ölçülen akımlardır. Bu akımlar kuvvetli EMI kaynağıdır[18].

CM akımları ile DM akımları etkileri gerilim cinsinden ifade edilebilir[11,13].

$$V_{CM} = \left(\frac{V_{A0} + V_{B0} + V_{C0}}{3} \right) \quad (9)$$

$$V_{DM} = V_{i0} - V_{j0}, (i, j = A, B, C) \quad (10)$$

EMI için üst sınırları belirleyen uluslararası IEC, VDE, CISPR, FCC gibi çeşitli standartlar vardır. Ayrıca güç elektroniği cihazları tarafından yayılan EMI standartlarını belirleyen ve bunları sertifikalanan çeşitli kurumlar bulunmaktadır.

4. Kaotik Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (KSDGM)

Sinüzoidal DGM yönteminde çıkışta elde edilmek istenen frekanstaki bir referans sinüzoidal dalga ile anahtarlama frekansındaki taşıyıcı bir üçgen dalga karşılaştırılarak kesişme noktalarında darbeler üretilmektedir.

KSDGM yöntemi taşıyıcı üçgen dalganın frekansı kaotik olarak değiştirilerek elde edilir. KSDGM yönteminin blok diyagramı Şekil 1a)'da verilmiştir. Kaotikleştirme işlemi için denklem (14) ile verilen frekansta lojistik harita değişkeni kullanılarak kaotik bir değişim elde edilmiştir[13,15]. Lojistik harita denklemleri denklem (11)'de verilmiştir. Diğer incelenen kaotik haritalardan sinüsoidal ve tent haritalar denklem.(12)- (13)'te verilmiştir. Bu sinüsoidal haritanın denklem.(12b)'de verilmiş olan basitleştirilmiş modeli kullanılmıştır[19].

Literatürde bilinen birçok kaotik harita vardır. Bu haritalarda parametrelere bağlı olarak sistem periyodik davrandığı gibi bazı durumlarda kaotik davranış sergilemektedir. Bu çalışmada lojistik harita kullanılmıştır. Şekil 1b)'de simulink modeli, Şekil 2 a) ve b)'de faz uzayı ve çatallaşma diyagramı verilen lojistik harita, $A = (3,57 - 4)$ aralığında kaotik davranış göstermektedir. Burada $A = 3,9$ alınmıştır.

$$X_{n+1} = AX_n(1 - X_n) \quad (11)$$

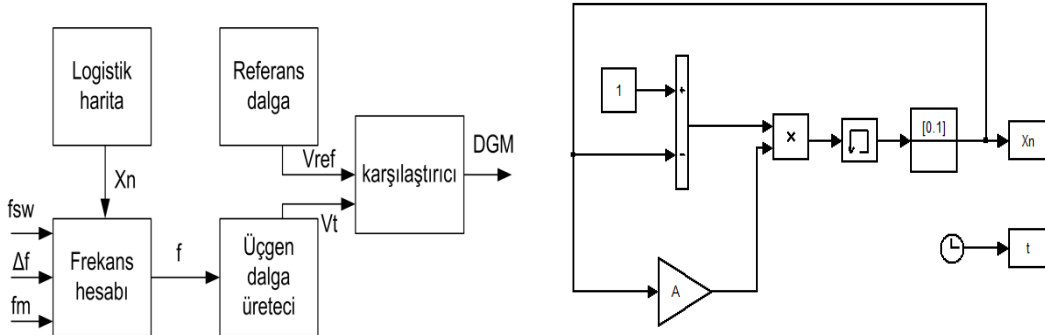
$$X_{n+1} = aX_n^2 \sin(\pi X_n) \quad (12a)$$

$$X_{n+1} = \sin(\pi X_n) \rightarrow \{a = 2.3, X_0 = 0.7\} \quad (12b)$$

$$X_{n+1} = \begin{cases} X_n / 7 \rightarrow X_n < 0.7 \\ (10/3)X_n(1 - X_n) \rightarrow X_n \geq 0.7 \end{cases} \quad (13)$$

$$f = f_{sw} + X_n \Delta f \sin(2\pi f_m t) \quad (14)$$

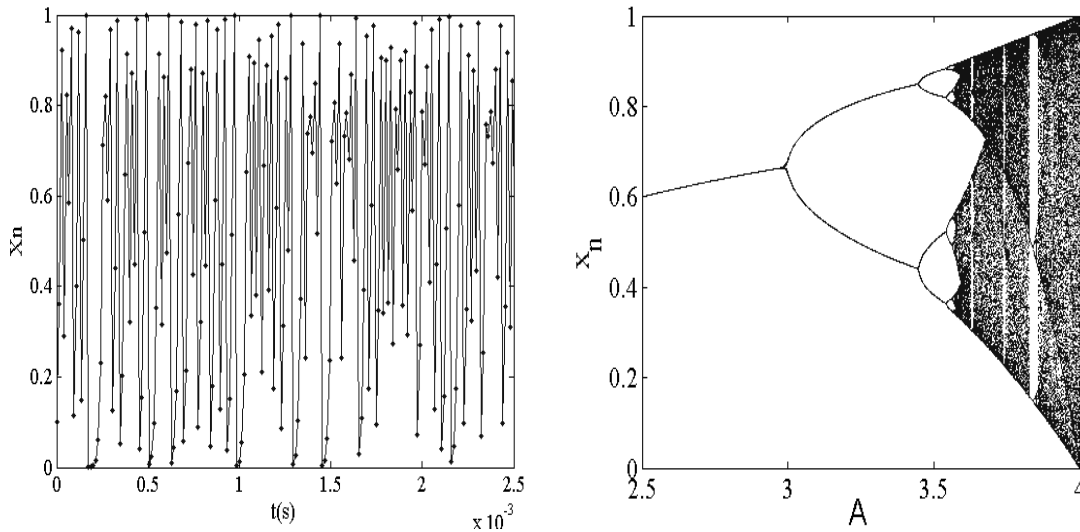
Burada f gerçek anahtarlama frekansı, f_{sw} sabit anahtarlama frekansı, Δf değişim miktarı, f_m modülasyon frekansdır. X_n ise lojistik harita değişkenidir.



Şekil 1. a) KSDGM blok diyagramı[13] b). Lojistik harita simulink modeli

5. Kaotik Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu Vektör Kontrol Yöntemi (KS-FOC)

Yüksek performanslı kontrol uygulamalarında hız, moment ve konum kontrolü için çok iyi dinamik performans, vektör kontrol (FOC) veya doğrudan moment kontrolü (DTC) ile elde edilebilir. Vektör kontrolde genliği, fazı ve frekansı ile tanımlanan akım vektörünün kontrol edilmesi esasına dayanır. İlk zamanlarda asenkron motor için düşünülen vektör kontrol yöntemi daha sonra diğer döner alan esaslı alternatif akım (AA) motorlarına da uygulanmıştır. Bütün AA motorları için bu yöntemin uygulanma amacı aynıdır. Yani AA motoru doğru akım (DA) motoruna benzeterek kontrolünü sağlamaktır. Yüzeysel tip PMSM’de vektör kontrol, motorun stator akımının, rotor referans düzlemindeki bileşenlerinin kontrol edilmesi ile sağlanır. Motor akısı ile aynı yönde olan akım bileşeni (I_d) sayesinde akı sabit tutulup, buna 90° dik açıda olan diğer akım bileşeni (I_q) ile moment doğrusal olarak kontrol edilir. PMSM’de uyarım akısı, rotor üzerindeki sürekli mıknatıslardan sağlandığı için genliği sabit ve rotor ile birlikte hareket etmektedir. Bu yüzden nominal hızın altındaki hızlarda, yani sabit moment bölgesinde I_d bileşenine gerek yoktur ve sıfır alınır.



Şekil 2 a) Lojistik Haritada X_n zamana göre değişimi b) Lojistik Harita çatallaşma diyagramı

Bu vektör kontrol yönteminin esasını momentin I_q akımına bağlı olarak kontrol edilmesidir. Stator akımı I_q bileşeni hızlı bir şekilde kontrol edildiğinde moment hızlı olarak kontrol edilmiş olur. Vektör kontrol yöntemi SMSM’a kolayca uygulanabilir [1 yüksek tez].

KS-FOC yönteminde temel farklılık taşıyıcı üçgen dalganın frekansının kaotik olarak değiştirilmesidir. Bu çalışmada SDGM ile yapılan vektör kontrolle S-FOC, KSDGM ile yapılabana KS-FOC, RDGM ile yapılabana ise R-FOC isimlendirilmiş olup simülasyonlar aynı şartlarda her yöntem için ayrı ayrı yapılmıştır. KSDGM yöntemi, RDGM yöntemine alternatif olarak geliştirilen bir yöntemdir. Bu yüzden R-FOC de gerçekleştirilmiştir.

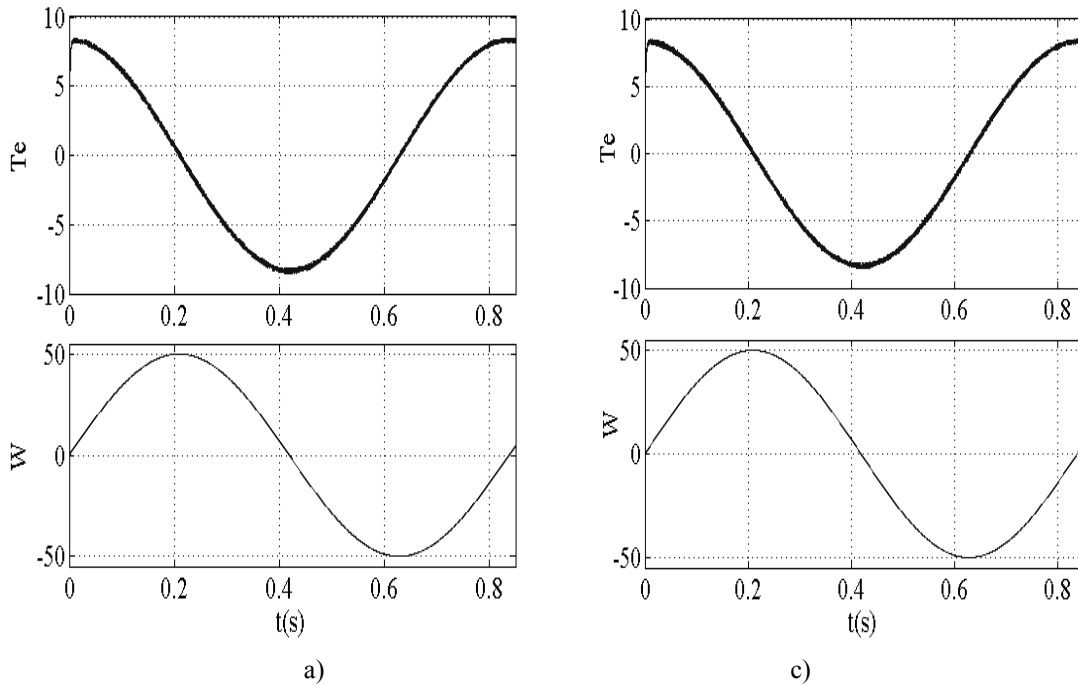
KSDGM yöntemi, lojistik harita, tent ve sinüzoidal harita kullanılarak ayrı ayrı gerçekleştirilerek KS-FOC yöntemi için simülasyonları yapılmıştır.

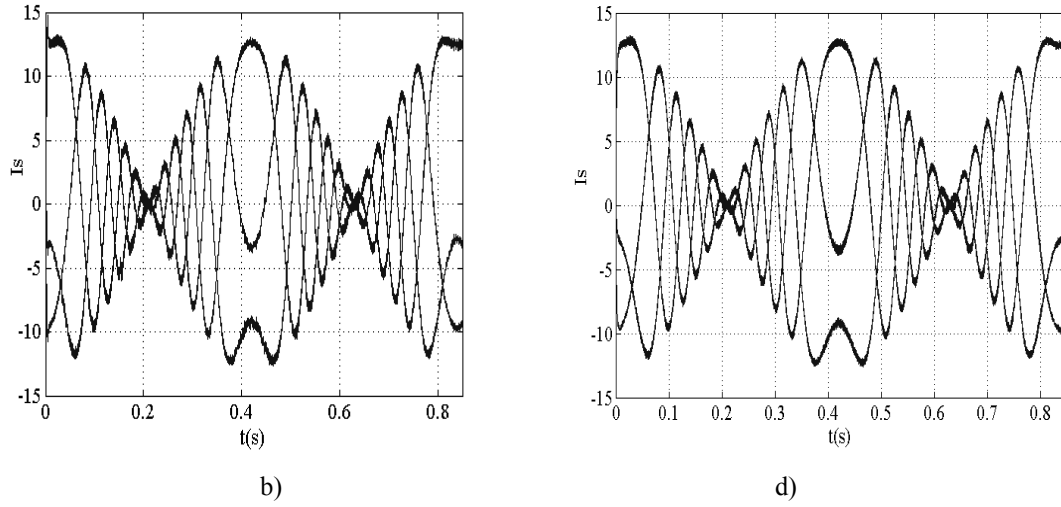
Çalışmada Yüzeysel tip SMSM motor kullanılmış olup, motor parametreleri tablo1 de verilmiştir. Ayrıca $f_{sw}=7500$ Hz, $\Delta f=2200$ Hz, $f_m=100$ Hz alınmıştır.

6. Simülasyon Sonuçları

Simülasyonlar Matlab-simulink ile yapılmıştır. Güç yoğunluğu için matlab'ta periodogram programı kullanılmıştır.

Yapılan simülasyonlarda S-FOC, R-FOC ve KS-FOC kontrol yöntemleri EMI ve akustik gürültü üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. EMI değeri ile akustik gürültü için V_{CM} ve V_{DM} 'nin güç yoğunluğu (PSD) değerlerine bakılmıştır. EMI değeri için PSD üzerinden yapılan inceleme birçok ülkede ilgili uluslararası kurumlar tarafından sınırlama getirilen 9-150 KHz aralığıdır. Akustik gürültü için ise $(f - \Delta f)$ ile $(f + \Delta f)$ aralığındaki güç yoğunluğu en yüksek değerlerine bakılarak fikir edinilebilir [15-19]. KS-FOC yönteminde farklı kaotik haritaların etkilerinin incelenmesi için lojistik, tent ve sinüzoidal harita kullanılarak farklı farklı sonuçlar elde edilmiştir.





Şekil 3. S-FOC için a) Moment ile hızın zamana göre değişimi, b) Stator akımlarının zamana göre değişimi, KS-FOC (Lojistik harita) için c) Moment ile hızın zamana göre değişimi, d) Stator akımlarının zamana göre değişimi

Ayrıca dört bölgeli çalışma için sinüzoidal dalga şekline sahip bir referans hız ile S-FOC ve KS-FOC yöntemleri için moment, hız ve hat akımlarına ait dalga şekilleri elde edilmiştir. Bu sonuçlarla vektör kontrolde KSDGM yöntemi etkinliği sistem değişkenleri üzerinden gözlenmiştir.

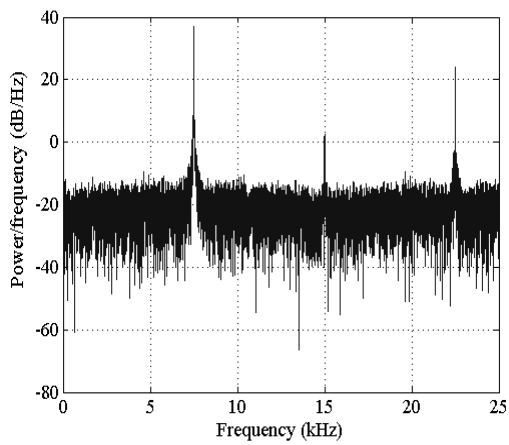
Şekil.3 de verilen sistem değişkenlerinin zamana göre değişimleri incelendiğinde dört bölgeli çalışma için KS-FOC yönteminin performansının S-FOC gibi iyi olduğu görülmektedir.

EMI için 9-150 KHz aralığında maksimum PSD değeri üzerinden incelenmiştir. PSD değerinin yüksekliği EMI'nın yüksekliğini göstermektedir. Bütün yöntemler için, şekil.4'de verilen VCM ile VDM güç yoğunlukları sonuçları incelendiğinde, R-FOC yöntemi ile KS-FOC yöntemlerinin bir birine yakın sonuçlar verdiği, ancak bu yöntemlerin S-FOC yöntemine göre çok daha etkin olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

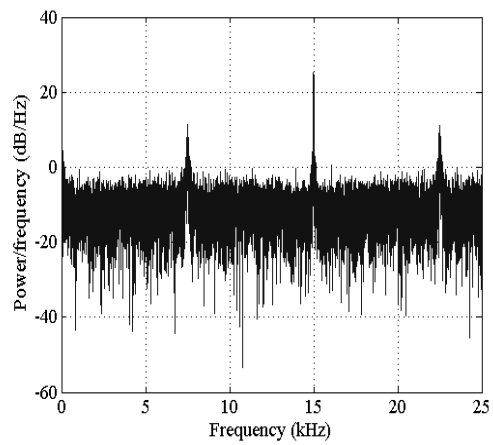
Böylece S-FOC yönteminde yüksek görülen EMI değerinin, KS-FOC ile R-FOC yöntemlerinde oldukça düşürüldüğü gösterilmiştir.

Ayrıca şekil.4 c), d) ve h) incelendiğinde VCM, şekil.4 h),ı) ve j) incelendiğinde de VDM için verilen farklı kaotik haritaların etkisi incelenmiştir. Lojistik harita ile sinüzoidal harita bir birine çok yakın ve tent haritadan daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

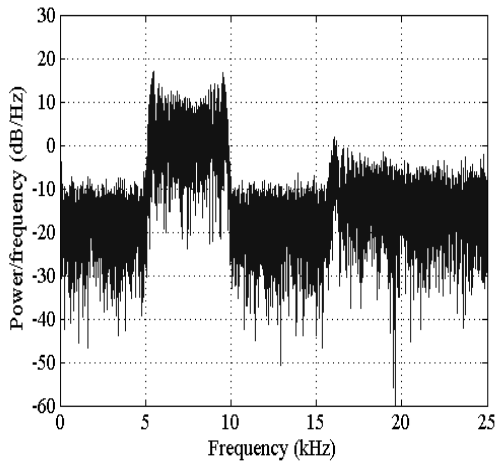
Akustik gürültü için şekil.4'de (4.5-7.5) KHz aralığındaki değerlere incelenmiştir. Bu aralık incelendiğinde de KS-FOC yönteminin diğer yöntemlere göre daha etkin olduğu görülmektedir.



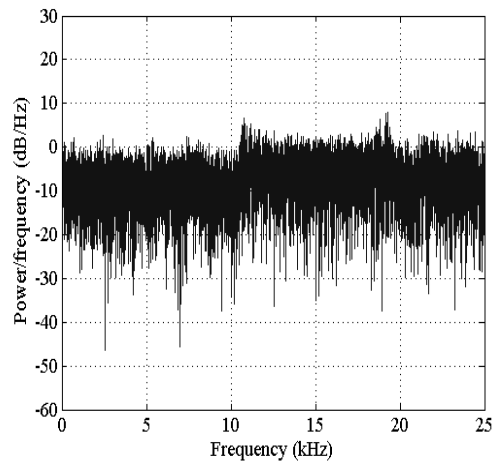
a)



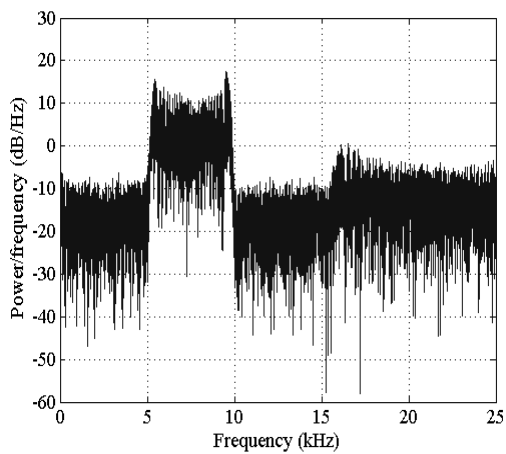
f)



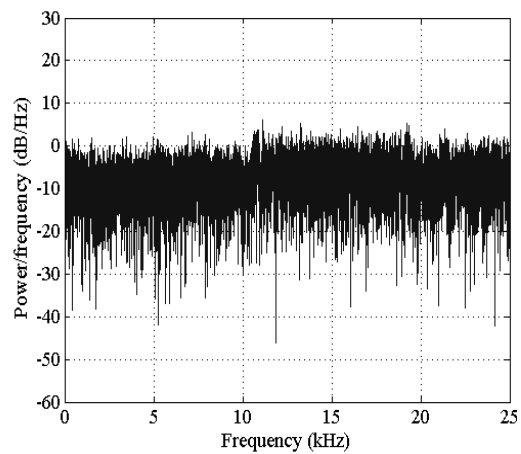
b)



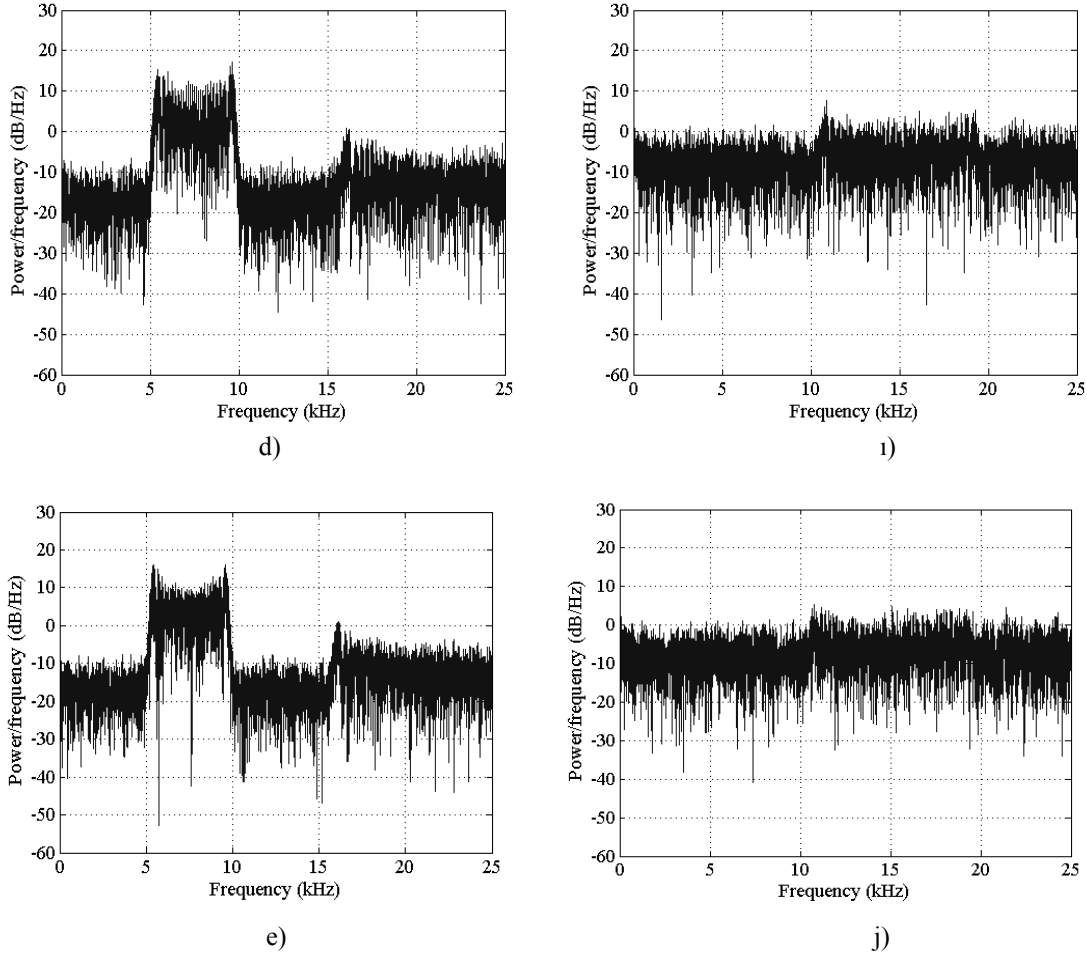
g)



c)



h)



Şekil 4. VCM için güç yoğunlukları (PSD) a) S-FOC, b) R-FOC, c) KS-FOC(lojistik), d) KS-FOC(tent), e) KS-FOC(sinüzoidal), VDM için güç yoğunlukları (PSD) f) S-FOC, g) R-FOC, h) KS-FOC(lojistik), i) KS-FOC(tent), j) KS-FOC(sinüzoidal)

7. Sonuçlar

Yapılan çalışmada anahtarlama frekansı kaotik olarak değişen KS-FOC yönteminin performansı, EMI ve akustik gürültü etkileri incelenmiştir. Bunun için KS-FOC yöntemi için elde edilen sonuçlar, R-FOC ve S-FOC yöntemleri ile eşit şartlarda karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde S-FOC yönteminde yüksek değerlerde olan EMI ve gürültü, KS-FOC ile R-FOC yöntemleri ile etkin bir şekilde azaltılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda KS-FOC yönteminin, R-FOC yöntemine yakın fakat azda olsa daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak rastgele bir sinyali elde etme ve uygulama zorluğu düşünüldüğünde KS-FOC yöntemler tercih edilir. Kaotik sinyali kaotik bir haritadan veya kaotik bir osilatörden elde etme oldukça basittir. Bu yüzden kaotik yöntemin diğer yöntemlere göre daha verimli ve kullanışlı olduğu söylenebilir.

Ayrıca KS-FOC yöntemi için farklı kaotik haritalardan, sinüzoidal haritanın en az lojistik harita kadar daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Table 1. Kullanılan motor parametreleri

| | | | |
|----|---------------|----|-------------------------|
| Rs | 0.41 Ω | J | 0.0222 Kgm ² |
| Ld | 6.8 mH | B | 0 Nms/rad |
| Lq | 6.8 mH | UN | 220 V |
| P | 2 | KT | 0.653 Nm/A |

Kaynaklar

- [1]. B. K. Bose, Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends, USA, elsevier, 2006
- [2] S. Sünter, and H., Altun, "Control of a permanent magnet synchronous motor fed by a direct AC-AC converter", *Electrical Engineering*, Vol.7, no. 2, pp. 83-92,2005
- [3] E. Öksüztepe, H. Kürüm, Sürekli mıknatıslı Senkron motorun Moment Dalgalanmalarının sonlu elemanlar yöntemi ile Oluşturulan Akı modelinin Kullanılmasıyla Azaltılması, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Vol.1-2, no.25, pp. 120-133, 2009
- [4] E. Oksuztepe, Z. Omac, H. Kurum "Sensorless vector control of PMSM with non-sinusoidal flux using observer based on FEM" *Electrical Engineering*, Vol.3, no. 96, pp. 83-92,2014
- [5]. Y. Xu , Q. Yuan , J. Zou and Y. Li "Analysis of triangular periodic carrier frequency modulation on reducing electromagnetic noise of permanent magnet synchronous motor" *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 4424-4427, 2012
- [6]. A. Fardoun Abbas, and H. Ismail Esam, "Reduction of EMI in AC Drives Through Dithering Within Limited Switching Frequency Range" *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 3, pp. 804-811, 2009
- [7] J.-Y. Chai, Y.-H. Ho, Y.-C. Chang, and C.-M. Liaw, "On acoustic noise reduction control using random switching technique for switchmode rectifiers in PMSM drive," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 3, pp. 1295–1309, 2008.
- [8] R. L. Kirlin, S. Kwok, S. Legowski, and A. M. Trzynadlowski, "Power spectra of a PWM inverter with randomized pulse position," in *Proc. Power Electron. Special. Conf.*, , pp. 1041–1047, 1993
- [9] K.S. Kim, Y.G. Jung, and Y.C. Lim, "A New Hybrid Random PWM Scheme" *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 1, pp.192-200, 2009
- [10] S. Kaboli, J. Mahdavi, and A. Agah "Application of Random PWM Technique for Reducing the Conducted Electromagnetic Emissions in Active Filters" *IEEE Trans. Ind. Electron.*;vol. 54, no. 4, pp.2333-2343,2007
- [11] A. M. Hava, E Ün, "Performance Analysis of Reduced Common-Mode Voltage PWM Methods and Comparison With Standard PWM Methods for Three-Phase Voltage-Source Inverters" *IEEE Trans. Power Electron* ;vol. 24, no. 1, pp.241-252,2009
- [12], Y.C. Lim, S.O. Wi, J.N. Kim, and Y.G. Jung "A Pseudorandom Carrier Modulation Scheme" *IEEE Trans. Pow. Electron* ;vol. 25, no. 4, pp.797-805,2010
- [13] K. T. Chau and Z. Wang, *Chaos in Electric Drive Systems-Analysis, Control and Application*. Singapore: Wiley, 2011.
- [14] H. Li, Y.Liu, J.Lü, T. Zheng, and X. Yu, "Suppressing EMI in Power Converters via Chaotic SPWM Control Based on Spectrum Analysis Approach" *IEEE Trans. Ind. Electron.*, VOL. 61, NO. 11, pp.6128-6136,2014.
- [15] Z. Wang, K. T. Chau, and C. H. Liu, "Improvement of electromagnetic compatibility of motor drives using chaotic PWM," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, pp. 2612–2614, 2007.
- [16] Z. Zhang, K. T. Chau, Z. Wang, and W. Li, "Improvement of electromagnetic compatibility of motor



drives using hybrid chaotic pulse width modulation," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 4018-4021, 2011.

[17] H. Li, Z. Li, B. Zhang, F. Wang, N. Tan, and W. A. Halang, "Design of analogue chaotic PWM for EMI suppression," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 52, no. 4, pp. 1001–1007, 2010.

[18] N. Mohan, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3rd Edition, Wiley, 2003

[19] A. B. ÖZER, "CIDE: Chaotically Initialized Differential Evolution", *Expert Systems with Applications*, Vol.37, no.6, pp. 4632-4641, 2010.