

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Uzak Vektör Modülasyonlu Doğrudan Moment Kontrolünün Benzetimi

Hakan ÇELİK^{1,*}, Hasan KÜRÜM²

¹Fırat Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği, 23119, Elazığ

²Fırat Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 23119, Elazığ

*hakancelik@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 15.01.2013; Kabul/Accepted: 15.02.2013)

Özet

Günümüzde mikroişlemci teknolojisindeki gelişmeler ve güçlü mıknatısların üretilmesine bağlı olarak Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların (SMSM) kullanımı giderek artmaktadır. Önceleri endüstriyel sürücü sistemlerde yaygın olarak kullanılan asenkron motorların yerini artık SMSM'ler almıştır. SMSM'ler günümüzde asansörler, çamaşır makineleri, elektrikli araçlar, fanlar, pompalar, otomasyon teknolojileri vb. birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. SMSM'lerde vektör kontrol yöntemleri olarak Alan Yönlendirmeli Kontrol ve Doğrudan Moment Kontrolü (DMK) kullanılmaktadır. DMK'da stator akısı ve moment, inverter için uygun bir anahtarlama stratejisinin kullanılması ile doğrudan kontrol edilmektedir. Sürücü sistemlerde DMK'nın kullanılması ile modern sürücü sistemlerden istenen iyi bir dinamik cevap ve esnek bir kontrol yapısı elde edilmektedir. DMK, histerezis ve uzak vektör modülasyonlu olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. Uzak vektör modülasyonlu DMK yöntemi inverterin sabit anahtarlama frekansında çalışmasına imkân sağlaması nedeniyle yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada SMSM'nin uzak vektör modülasyonlu DMK'sının Matlab/Simulink benzetimi yapılmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Benzetim sonuçlarından, uzak vektör modülasyonlu DMK ile kontrol edilen SMSM'nin, modern sürücü sistemlerden istenen geniş bir hız aralığında kararlı çalışma ve değişken yük durumları için hızlı moment cevabına sahip olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Sabit mıknatıslı senkron motor, Uzak vektör modülasyonlu doğrudan moment kontrolü, Gerilim kaynaklı inverter, Benzetim.

The Simulation of Space Vector Modulated Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor

Abstract

In parallel to the recent developments in microprocessors technology and production of strong magnets the interest on Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSM) increases continuously. PMSM are begun to be used in industrial driver set ups instead of asynchronous motors which were used commonly before. Today PMSM are used in different applications such as elevators, washing machines, electrical vehicles, fans, pumps and automation technologies. In PMSM, Field Oriented Control and Direct Torque Control (DTC) are used as vector control methods. In DTC, stator flux and torque are directly controlled using a suitable switching strategy for the inverter. With the use DTC in driver systems, a better dynamic response and a flexible control which are expected in modern driver systems is obtained. DTC is realized in two ways namely hysteresis and space vector modulation. DTC method with space vector modulation is commonly used since it gives an opportunity for inverter to work at a constant switching frequency. In this study, the simulation of PMSM's DTC with space vector modulation is generated with Matlab/Simulink and the results are discussed. According to the simulation results, it is observed that PMSM controlled by DTC with space vector modulation has stable action in a wide speed range which is requested from modern drivers systems and fast torque response for variable load states.

Key words: Permanent Magnet Synchronous Motor, Space vector modulated direct torque control, Voltage source inverter, Simulation.

1. Giriş

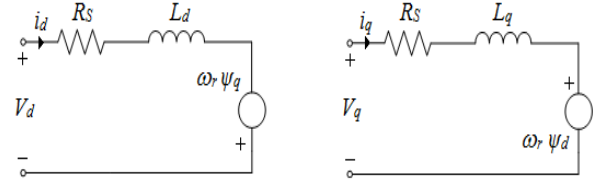
Günümüzde mikroişlemci teknolojisindeki gelişmeler ve güçlü mıknatısların üretilmesine bağlı olarak Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların (SMSM) kullanımı giderek artmaktadır. SMSM'ler yüksek verim değerleri, basit yapıları, uyarım için ayrı bir kaynak gerektirmemeleri, düşük atalet momentleri ve birim hacim başına elde edilen yüksek güç yoğunluğu nedeniyle diğer motorlardan daha fazla tercih edilmektedirler. SMSM'ler dişli sistemlerine gerek kalmadan düşük hızlarda da verimli bir çalışabilmesi nedeniyle doğrudan tahrik sistemlerinde tercih edilmektedirler. Özellikle asansörler ve elektrikli araçlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1-4].

Skaler kontrol yöntemlerinin kullanıldığı SMSM'li sürücü sistemlerde istenilen performansı sağlayamamışlar ve günümüzde bu kontrol yöntemlerinin yerini vektör kontrol yöntemleri almıştır. SMSM'nin vektör kontrol yöntemlerinden biri olan DMK'da stator akısı ve moment bir histerezis bandı içinde kontrol edilir. Böylece sürücü performansı Doğru Akım motorlarından elde edilen performansa yaklaşır. Mikroişlemci ve güç elektroniği alanlarındaki gelişmelere paralel olarak DMK'nın kullanımı da artmıştır. Modern bir sürücü sistemden geniş bir hız aralığında, hızlı moment cevabı ve esnek bir kontrol yapısı istenmektedir. SMSM'li sürücü sistemlerde DMK'nın kullanımı ile bu özellikler elde edilebilir [4-6].

Literatürde DMK için yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu akı ve moment dalgalılığının azaltılması, sabit bir anahtarlama frekansının elde edilmesi ve DSP (Sayısal İşaret İşlemci) ile gerçekleştirilen deneysel uygulamalardaki sorunların çözümüne yöneliktir [3,7-9]. Ayrıca yapay zekâ tekniklerinden faydalanılarak, DMK'dan elde edilen performansın artırılmasına yönelik çalışmalar da yapılmıştır [10-13].

2. SMSM'nin Matematiksel Modeli

SMSM'nin üç fazlı matematiksel modelinin yerine, d-q eksenindeki modelin kullanılması ile denklemler daha basit hale gelir. Bu model ile SMSM'nin hem geçici hem de sürekli durumdaki davranışı incelenabilmektedir. SMSM'nin d-q eşdeğer devreleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. SMSM'nin d-q eşdeğer devreleri

Bu eşdeğer devrelerden,

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega_r \psi_q \quad (1)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \psi_q + \omega_r \psi_d \quad (2)$$

olur. Burada; V_d ve V_q d-q eksen gerilimlerini, ψ_d ve ψ_q d-q eksen akılarını, i_d ve i_q d-q eksen akımlarını ve ω_r elektriksel rotor açısal hızını göstermektedir.

ψ_d ve ψ_q d-q eksen akıları,

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

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

olarak ifade edilebilir. Burada, ψ_M mıknatıs akısını, L_d ve L_q ise d-q eksen indüktanslarını temsil etmektedir. Denklem (3) ve (4), Denklem (1) ve (2)'de yerine yazılırsa d-q eksen gerilimleri,

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_r L_q i_q \quad (5)$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_M \quad (6)$$

olur. q-d eksen büyüklüklerine göre moment denklemi,

$$T_e = \frac{3p}{2} [\psi_d i_q - \psi_q i_d] \quad (7)$$

olur. Bu denklemde p , motorun çift kutup sayısıdır. Denklem (3) ve (4)'de verilen Ψ_d ve Ψ_q akıları, Denklem (7)'de yerine yazılırsa moment denklemi,

$$T_e = \frac{3p}{2} [\psi_M i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (8)$$

olarak ifade edilebilir. Denklem (8)'de, birinci terim mıknatıs tarafından üretilen momentini ikinci terim ise relüktans momentini temsil eder. Yüzey mıknatıslı SMSM'lerde L_d ve L_q indüktansları birbirine eşit olduğundan, relüktans momenti sıfır olur. Bu durumda moment denklemi,

$$T_e = \frac{3p}{2} [\psi_M i_q] \quad (9)$$

olur. Hareket denklemi ise,

$$T_e - T_y = J \cdot \left(\frac{1}{p} \right) \frac{d\omega_r}{dt} + B \cdot \left(\frac{1}{p} \right) \cdot \omega_r \quad (10)$$

olarak yazılabilir. Burada J atalet momentini, B sürtünme katsayısını temsil etmektedir.

3. SMSM'nin Uzak Vektör Modülasyonlu Doğrudan Moment Kontrolü

DMK genel olarak histerezis ve uzak vektör modülasyonlu olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Histerezis DMK'da sabit anahtarlama frekansının elde edilmesindeki güçlükler yaşanmakta ve yüksek anahtarlama frekansına gerek duyulmaktadır. Bu nedenle histerezis DMK'nın gerçekleştirilmesi için çok hızlı mikroişlemciler ve yüksek anahtarlama frekansında çalışacak güç elektroniği elemanlarına ihtiyaç vardır [4,6,7]. Uzak vektör modülasyonlu DMK'da ise yüksek anahtarlama frekansına gerek duyulmaz ve sabit anahtarlama frekansı elde edilebilir. Bu üstünlükleri nedeniyle uzak vektör modülasyonlu DMK motor kontrol uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [9,14,15].

Şekil 2'de SMSM'nin uzak vektör modülasyonlu DMK'sının blok diyagramı verilmiştir. Bu blok diyagramında da görüldüğü gibi, ω_r^* referans hızı ile motordan ölçülen ω_r gerçek hızı karşılaştırılır ve elde edilen $\Delta\omega_r$ hız

hatası, PI (Oransal-İntegral) hız kontrolörünün girişine uygulanır. PI hız kontrolörünün çıkışından referans moment değeri T_e^* elde edilir. Motordan ölçülen üç faz stator akımları Clarke dönüşümü kullanılarak önce α - β eksenine, daha sonra Park dönüşümleri kullanılarak d - q eksenine dönüştürülür. Akı hesaplayıcı bloğunda bu akımlar kullanılarak Denklem (3) ve (4)'de verildiği gibi Ψ_d ve Ψ_q akıları hesaplanır. Moment hesaplayıcı bloğunda ise Denklem (7) kullanılarak gerçek moment değeri T_e hesaplanır. Gerçek moment değeri T_e ile referans moment değeri T_e^* 'nin karşılaştırılması ile elde edilen moment hatası ΔT_e , PI moment kontrolörünün girişine uygulanır. PI moment kontrolörünün çıkışından yük açısının değişimi olan $\Delta\delta$ elde edilir.

Denklem (8)'de verilen moment ifadesi DMK için yeniden düzenlenirse,

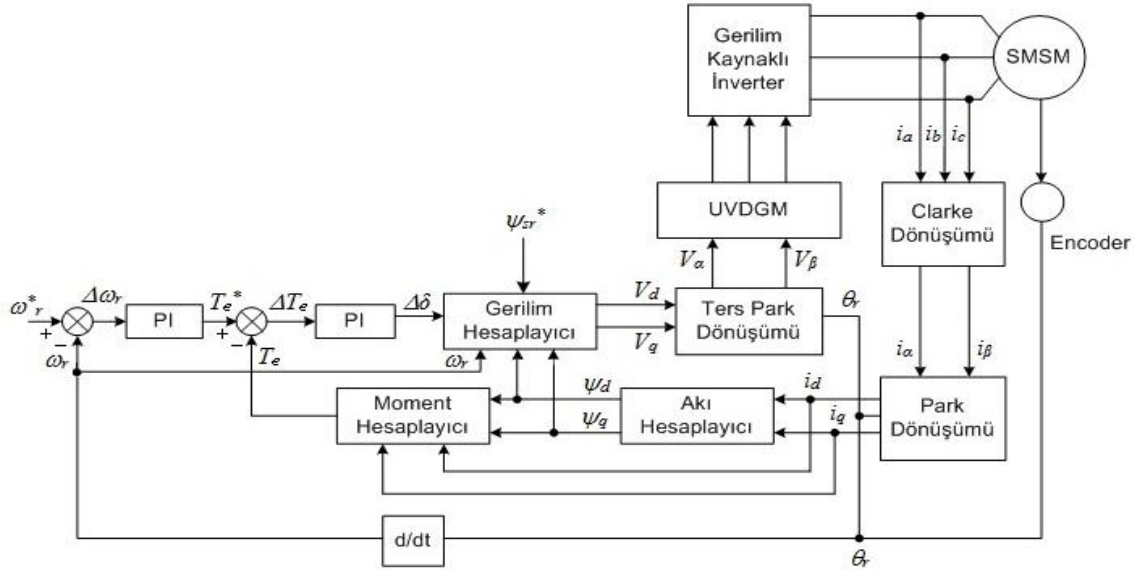
$$T_e = \frac{3}{2} \frac{1}{L_s} p |\psi_s| \psi_M \sin \delta \quad (11)$$

olur. Burada $|\psi_s|$ stator manyetik akısının genliği, δ yük açısını, L_s ise yüzey mıknatıslı SMSM'nin stator indüktansını temsil etmektedir. Moment değişimi ΔT_e ile yük açısı değişimi $\Delta\delta$ arasındaki ilişkiyi bulmak için Denklem (11)'deki moment ifadesinin türevi alınır,

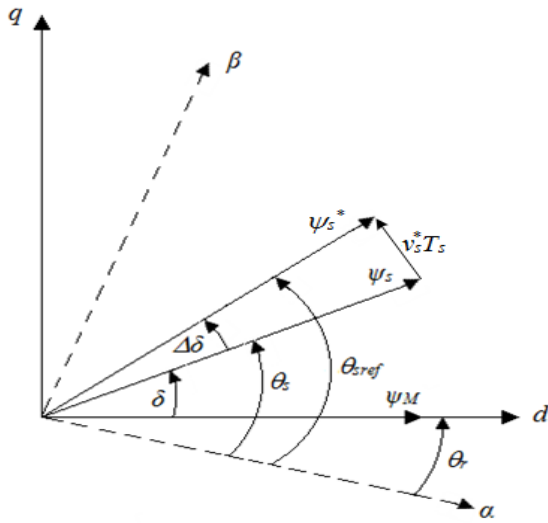
$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{3}{2} \frac{1}{L_s} p |\psi_s| \psi_M \sin \delta \frac{d\delta}{dt} \quad (12)$$

Denklem (12) elde edilir. Bu denklemden görüldüğü gibi momentin değişimi, yük açısı δ 'nın değişimi ile doğru orantılıdır. δ 'nın hızlı bir şekilde değiştirilmesiyle hızlı bir moment cevabı elde edilebilir. Aynı şekilde δ belli bir bant genişliğinde kontrol edilebilirse motor momentinde de bir bant genişliğinde kontrol edilebilir [4,9,14,15].

Uzak vektör modülasyonlu DMK'nın vektör diyagramı Şekil 3'te verilmiştir. Bu diyagramdan görüldüğü gibi yük açısında $\Delta\delta$ kadarlık bir değişim olduğunda stator akısında da $\Delta\Psi_s$ kadar bir değişim meydana gelir ve sonuçta yeni stator akısı Ψ_s^* olur. Burada T_s sabit anahtarlama periyodunu, v_s^* ise uzak vektör modülasyon tekniği kullanılarak elde edilen stator gerilimini göstermektedir.



Şekil 2. SMSM'nin uzay vektör modülasyonlu DMK'sının blok diyagramı



Şekil 3. Uzay vektör modülasyonlu DMK'nın vektör diyagramı

Genel olarak stator manyetik akısı,

$$\vec{\psi}_s = \int_t^{t+\Delta t} (\vec{u}_s - R_s \vec{i}_s). dt \quad (13)$$

olarak ifade edilmektedir. Denklem (13)'de stator direnci olan R_s ihmal edilirse, stator manyetik akısı,

$$\overrightarrow{\psi}_s = \int_t^{t+\Delta t} \overrightarrow{u}_s . dt \quad (14)$$

olur. Denklem (14)'de Δt değeri sabit anahtarlama frekansında çalışmak için T_s olarak alınırsa, stator akısındaki değişim miktarı $\Delta\Psi_s$ statora uygulanan gerilim v_s ile T_s 'in çarpımı olur. Stator akısının d eksenindeki değişim $d\Psi_d$ ve q eksenindeki değişim $d\Psi_q$, vektör diyagramına göre,

$$d\Psi_d = \psi_{sr}^* \cos(\delta + \Delta\delta) - |\psi_s| \cos(\delta) \quad (15)$$

$$d\Psi_q = \psi_{sr}^* \sin(\delta + \Delta\delta) - |\psi_s| \sin(\delta) \quad (16)$$

olarak ifade edilebilir. Burada Ψ_{sr}^* stator akısının referans değerini göstermektedir. Stator akısının genliği $|\Psi_s|$,

$$|\Psi_s| = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2} \quad (17)$$

olur. Yük açısı δ ise,

$$\delta = \arctan \frac{\Psi_q}{\Psi_d} \quad (18)$$

olur. Denklem (1) ve (2)'de verilen V_d ve V_q gerilim ifadelerinde sabit anahtarlama frekansında çalışmak için dt yerine, anahtarlama periyodu T_s yazılırsa,

$$V_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{T_s} - \omega_r \psi_q \quad (19)$$

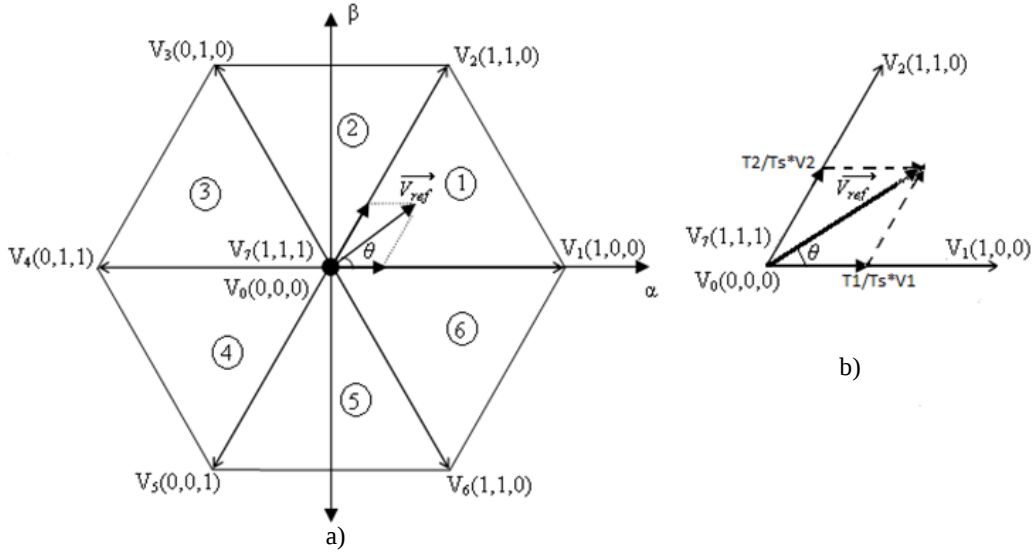
$$V_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{T_s} + \omega_r \psi_d \quad (20)$$

ifadeleri elde edilir. Ters Park dönüşümü ile V_d ve V_q gerilimlerinden V_α ve V_β gerilimleri bulunabilir. Şekil 2'deki blok diyagramında görüldüğü gibi V_α ve V_β gerilimleri kullanılarak uzak vektör modülasyonu ile, Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) işaretleri üretilir ve gerilim kaynaklı invertere uygulanır.

Uzak vektör DGM'de kullanılan altıgen formundaki uzak vektörler ve referans gerilim vektörü Şekil 4'de verilmiştir. Bu ayrık uzak vektörler,

$$\vec{V}_k = \frac{2}{3} V_{dc} e^{j(k-1)\frac{\pi}{3}} \quad (k=1, \dots, 6) \quad (21)$$

olarak ifade edilebilirler. Burada V_{dc} gerilim kaynaklı inverterin Doğru Akım giriş gerilimini, k ise referans gerilim vektörünün bulunduğu bölgeyi göstermektedir.

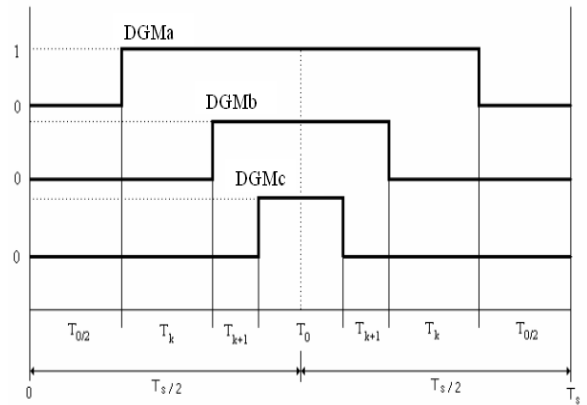


Şekil 4. a) Altıgen formunda uzak vektörler, b) referans gerilim vektörü

Uzak vektör DGM'de, her bir T_s anahtarlama periyodundaki ortalama uzak gerilim vektörü $\vec{V}_{ref}$, durağan çatıda komşu iki sıfır olmayan vektör ve iki sıfır vektörü ile Denklem (22)'de verildiği gibi ifade edilmektedir. T_s 'in yeteri kadar küçük olduğu düşünülürse, $\vec{V}_{ref}$ bu sürede yaklaşık olarak sabit kabul edilir ve bu vektörün hareketi makinenin temel davranışını tanımlar [5,9,16].

$$\vec{V}_{ref} = \vec{V}_k \frac{T_k}{T_s/2} + \vec{V}_{k+1} \frac{T_{k+1}}{T_s/2} \quad (22)$$

Şekil 5'te referans uzak gerilim vektörünün 1. Bölgede olması durumunda küçük, orta ve büyük DGM işaretleri gösterilmiştir.



Şekil 5. Referans uzak vektörün 1. bölgede olması durumunda DGM işaretleri

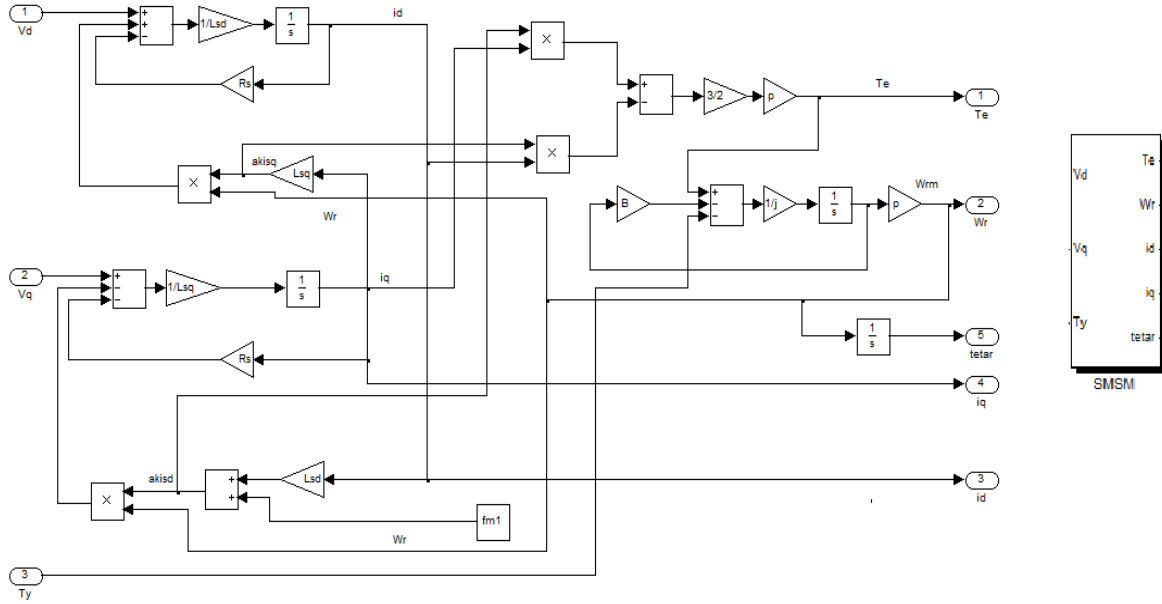
T_k ve T_{k+1} sürelerinin hesaplanması için,

$$\begin{bmatrix} T_k \\ T_{k+1} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{T_s}{V_{dc}} \begin{bmatrix} \sin \frac{(k\pi)}{3} & -\cos \frac{(k\pi)}{3} \\ -\sin \frac{(k-1)\pi}{3} & \cos \frac{(k-1)\pi}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (23)$$

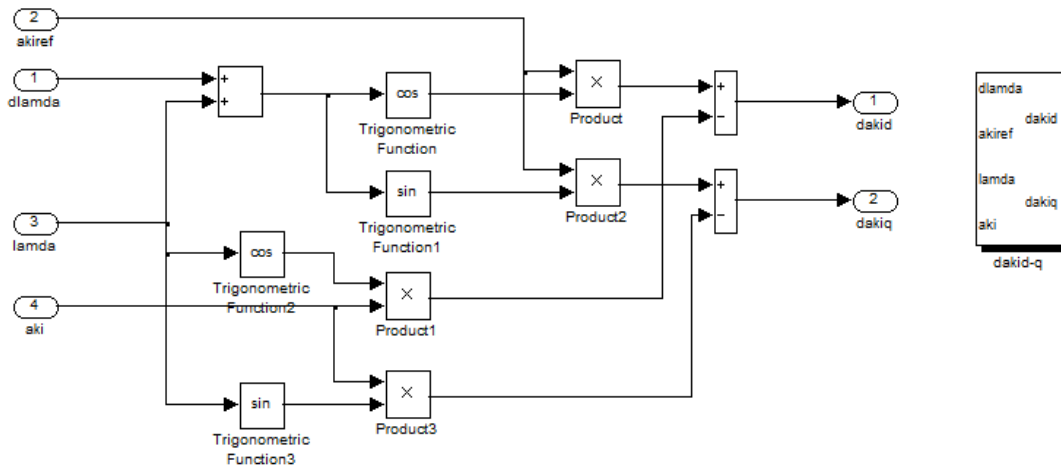
ifadesi kullanılmaktadır. Bu süre hesaplamalarından sonra mikroişlemci temelli sistemlerde uzay vektör DGM işaretlerinin sayısal olarak gerçekleştirilmesi kolaydır. Bu nedenle uzay vektör DGM, özellikle sayısal tabanlı sistemlerde gerilim kaynaklı inverterin kontrolünde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [5,9,16].

4. SMSM'nin Uzay Vektör Modülasyonlu Doğrudan Moment Kontrolünün Benzetimi

SMSM'nin uzay vektör modülasyonlu DMK'sına ait benzetim çalışmaları Matlab/Simulink'te yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında ilk olarak daha önce SMSM'nin matematiksel modelinde verilen denklemler kullanılarak SMSM'nin benzetimi yapılmıştır. SMSM benzetim bloğunun içeriği Şekil 6'da verilmiştir. d-q eksenindeki akı değişimlerinin hesaplandığı benzetim bloğunun içeriği ise Şekil 7'de verildiği gibidir.



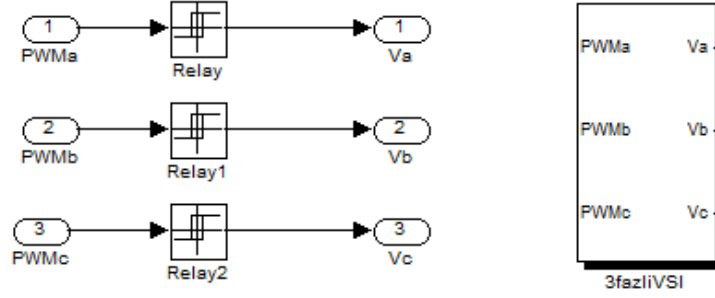
Şekil 6. SMSM Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği



Şekil 7. Akı değişimlerinin hesaplandığı Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği

[illegible]

121



Şekil 11. 3 fazlı gerilim kaynaklı inverter Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği

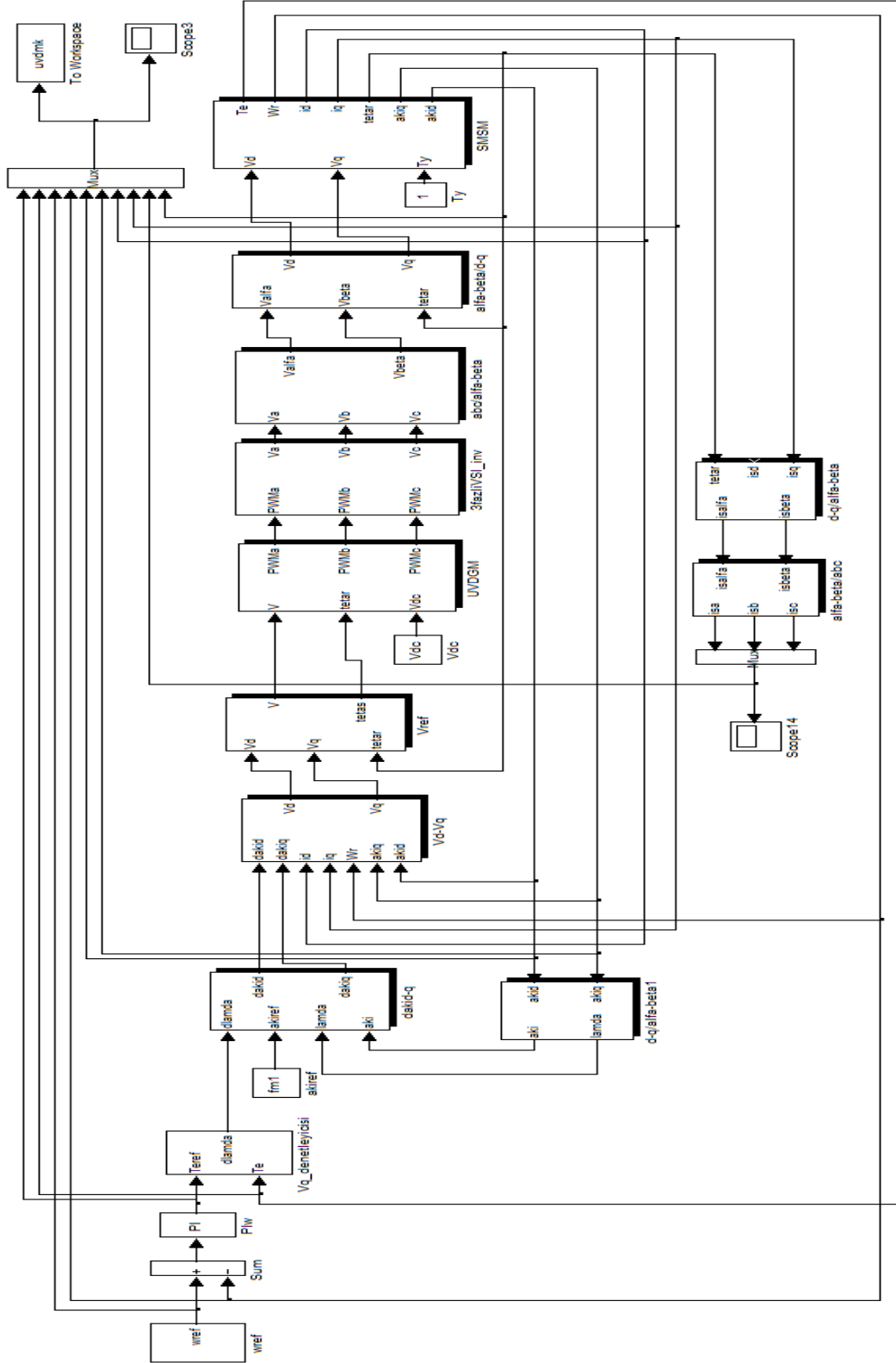
V_d ve V_q gerilimlerinin hesaplandığı benzetim bloğunun içeriği Şekil 8’de, V_{ref} geriliminin hesaplandığı benzetim bloğunun içeriği ise Şekil 9’da verilmiştir. Uzak vektör DGM işaretlerinin üretildiği benzetim bloğunun içeriği Şekil 10’da, üç fazlı gerilim kaynaklı inverter benzetim bloğunun içeriği ise Şekil 11’de verilmiştir. Bu benzetim bloklarının birleştirilmesi ile oluşturulan SMSM’nin uzak vektör modülasyonlu DMK’sının Matlab/Simulink benzetimi Şekil 12’de verilmiştir. Bu benzetimde, gerçek hız ile motor modelinden elde edilen hız değeri karşılaştırılarak elde edilen hız hatası PI hız kontrolörüne girilir ve hız kontrolörünün çıkışından referans moment değeri elde edilir. Bu referans moment değeri ile motor modelinden elde edilen gerçek moment değeri karşılaştırılarak elde edilen hata değeri PI moment kontrolörüne girilir. PI moment kontrolörü çıkışından yük açısı değişimi elde edilir. Yük açısı değişimi kullanılarak Denklem (15) ve (16)’da verilen ifadeye göre d-q eksenindeki akı değişimleri hesaplanır. d-q eksenindeki akı değişimleri kullanılarak Denklem (17) ve (18)’de verilen ifadelerle göre V_d ve V_q gerilimleri hesaplanır. Daha sonra V_d ve V_q gerilimleri kullanılarak V_{ref} referans gerilim değeri elde edilir. Bu gerilim değeri kullanılarak uzak vektör DGM işaretleri üretilir ve gerilim kaynaklı invertere uygulanır. Böylece SMSM’nin uzak vektör modülasyonlu DMK’sı gerçekleştirilir.

5. Benzetim Sonuçları

Benzetim çalışmalarında EK’de parametreleri verilen SMSM kullanılmıştır.

Çalışmalarda gerilim kaynaklı inverterin Doğru Akım giriş gerilimi olan V_{dc} 75 V, anahtarlama frekansı ise 5 kHz alınmıştır. EK’de verilen motor parametrelerine göre mıknatıs akısı olan Ψ_M değeri 0.0946 Weber olduğundan stator akısının referans değeri 0.0946 Weber alınmıştır. Kullanılan PI hız ve PI moment kontrolörlerinin katsayıları Kök Yer Eğrisinden bulunmuştur. Hızı süzmek için 200 Hz kesim frekanslı alçak geçiren süzgeç, akımları süzmek için ise 1500 Hz kesim frekanslı alçak geçiren süzgeç kullanılmıştır. Ayrıca Matlab/Simulink’te yapılan benzetim çalışmalarında çalışma adımı 10^{-5} alınmıştır. Benzetim çalışmalarında SMSM’ye referans hız olarak elektriksel açısal hız değerleri verilmiştir.

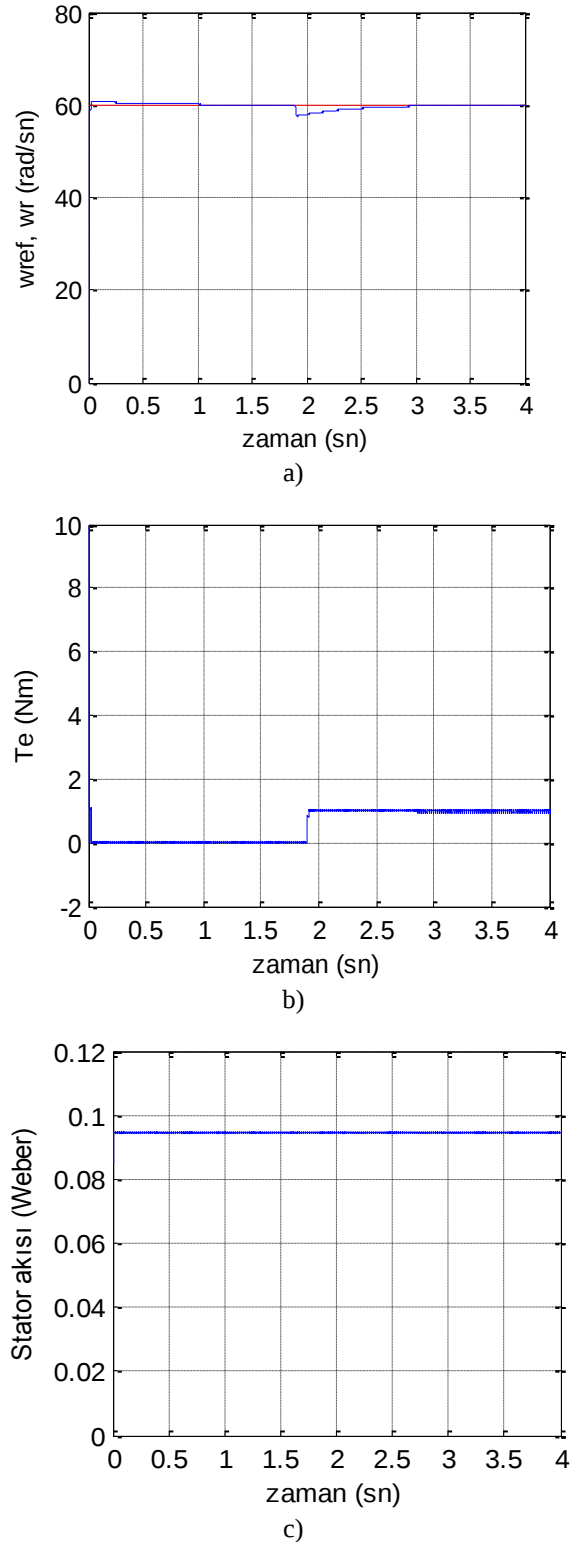
Genellikle düşük hızlarda SMSM’lerin hızında ve momentinde dalgalanmalar olmakta ve dalgalanmalar sonucunda da kararsız çalışma durumları ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle SMSM’nin düşük hızlardaki performansını incelemek için benzetim sonuçları 60 rad/s elektriksel hız değeri için alınmıştır. Şekil 13, Şekil 15 ve Şekil 17’de verilen sonuçlarda SMSM başlangıç anında yüksüz olarak yol almış ve yaklaşık 1.9 s sonra $T_y=1$ Nm ile yüklenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde başlangıç anında SMSM’nin hızlı bir moment cevabı ile referans hızı kısa sürede yakaladığı görülmektedir. Yüklenme anında SMSM’nin hızında kısa bir süreliğine düşüş olduğu görülmüş fakat daha sonra yeniden referans hız yakalanarak kararlı çalışmanın devam ettiği görülmektedir. Üç faz stator akımları için verilen sonuçlar incelendiğinde yüksüz durumda yaklaşık sıfır olduğu, yüklü durumda ise yüke bağlı olarak arttığı görülmektedir.



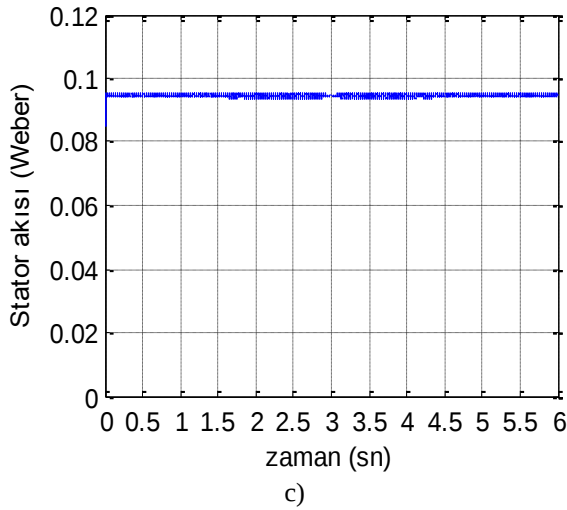
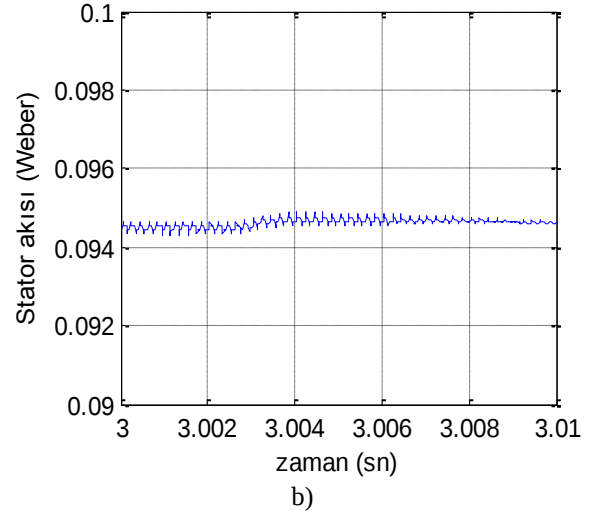
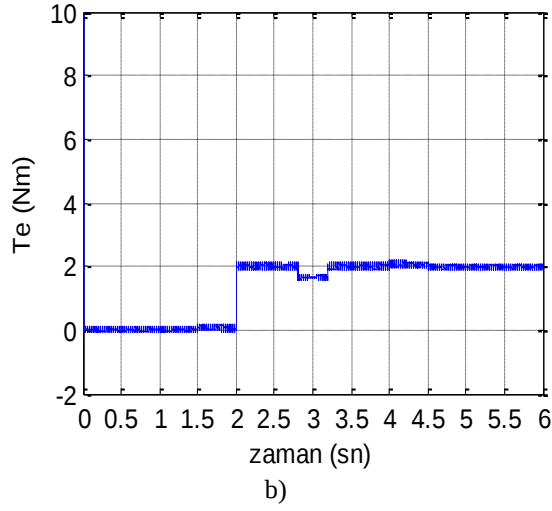
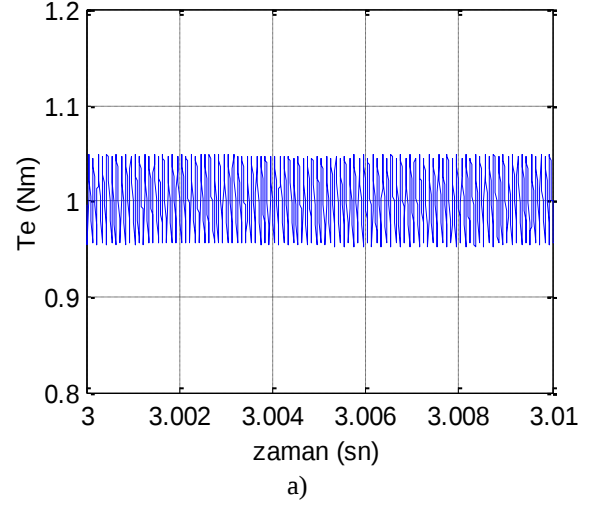
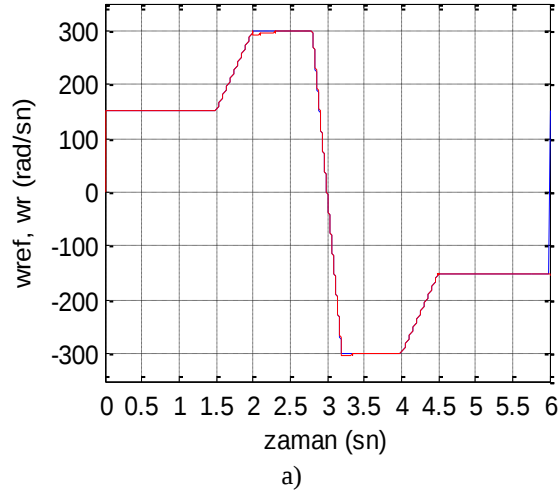
Şekil 12. SSM'nin uzak vektör modülasyonlu DMK'sının Matlab/Simulink benzetimi

İvmelenme anlarında DMK'nın hızlı dinamik cevabı nedeniyle üç faz stator akımlarının uzun süre yüksek değerlere çıkmadığı görülmektedir. Yine hem yüklü hem de yüksüz çalışmada moment ve akının küçük bir bant genişliğinde dalgalanarak referans değerleri takip ettikleri verilen sonuçlardan görülmektedir. 60 rad/s'lik düşük bir referans hız değeri için SMSM'nin DMK'sına ilişkin verilen sonuçlar incelendiğinde, moment ve hız değerlerinde büyük dalgalanmalar görülmemektedir. Bunun sonucunda da genellikle düşük hız uygulamalarında ortaya çıkan kararsız çalışma durumu SMSM'nin DMK'sında görülmemiştir. Şekil 14, Şekil 16 ve Şekil 18'de verilen sonuçlar ise modern sürücü sistemlerde sıklıkla kullanılan bir referans hız eğrisi içindir. SMSM başlangıç anında yüksüz olarak yol almış ve yaklaşık 2 s sonra $T_y=2$ Nm ile yüklenmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi SMSM hızlı bir moment cevabı ile referans hızı kısa sürede yakalamış ve takip etmiştir. Yüklenme anında motor hızında kısa bir süreliğine düşüş olmuş ancak daha sonra yeniden referans hız değerine ulaşarak yüklü bir şekilde referans hız değeri takip edilmiştir. Moment değerinin ivmelenme anlarında hızlı bir şekilde tepki vererek dört bölgeyi çalışmaya uygun olarak değiştiği görülmektedir. Ayrıca sürekli çalışma durumlarında ise yük momentini karşıladığı görülmektedir. Üç faz stator akımları incelendiğinde yüksüz iken yaklaşık olarak sıfır olduğu, yüklü durumda ise yüke bağlı olarak arttığı görülmektedir. İvmelenme durumlarında DMK'nın yüksek dinamik cevabı nedeniyle üç faz stator akımlarının uzun süre yüksek değerlere çıkmadığı görülmektedir. Moment ve stator akıları için verilen sürekli durum sonuçları incelendiğinde ise hem momentin hem de stator akısının küçük bir dalgalanma ile referans değerleri takip ettikleri görülmektedir.

Hem düşük sabit referans hız değeri hem de değişken referans hız değeri için verilen i_d ve i_q akım sonuçları incelendiğinde, DMK'da olması gerektiği i_q akımının moment ile doğru orantılı olarak değiştiği i_d akımının ise momente bağlı olarak negatif değerler aldığı görülmektedir.

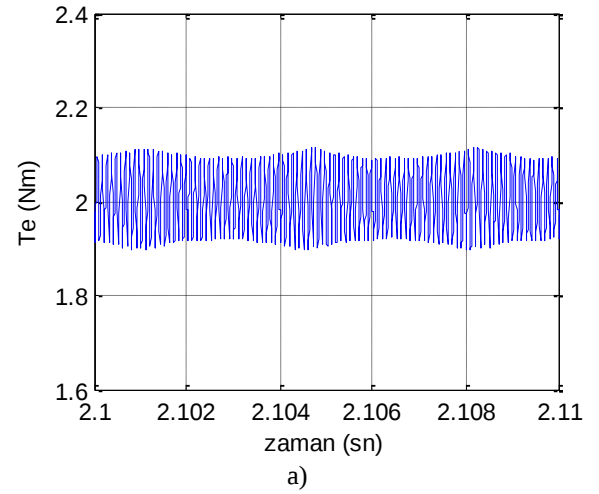


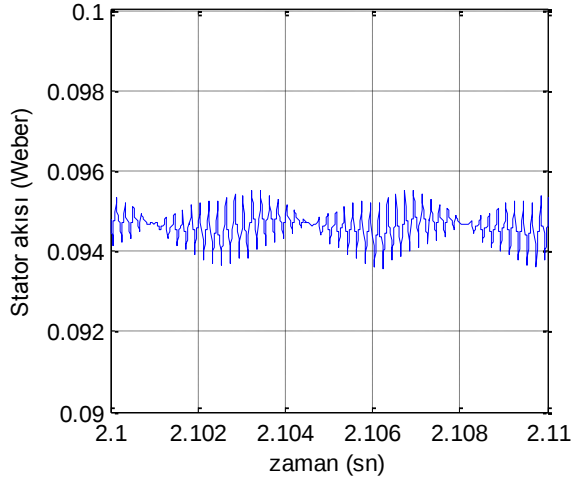
Şekil 13. 60 rad/s'lik referans hız ve $T_y=1$ Nm'lik yük için benzetim sonuçları; a) hız, b) moment, c) stator akısı



Şekil 14. Değişken referans hız ve $T_y=2$ Nm'lik yük için benzetim sonuçları; a) hız, b) moment, c) stator akısı

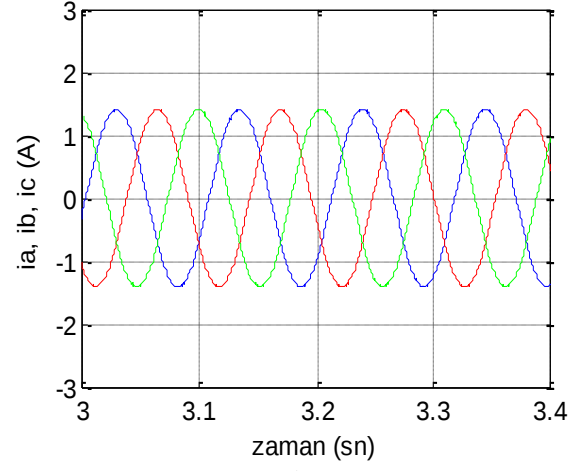
Şekil 15. 60 rad/s'lik referans hız ve $T_y=1$ Nm'lik yük için sürekli durumdaki benzetim sonuçları a) moment, b) stator akısı





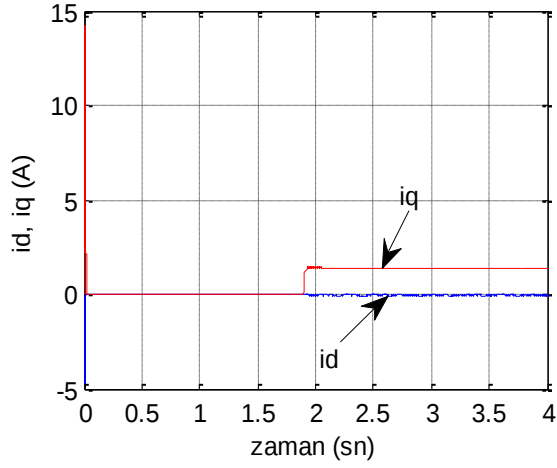
b)

Şekil 16. Değişken referans hız ve $T_y=2$ Nm'lik yük için sürekli durumdaki benzetim sonuçları
a) moment, b) stator akısı

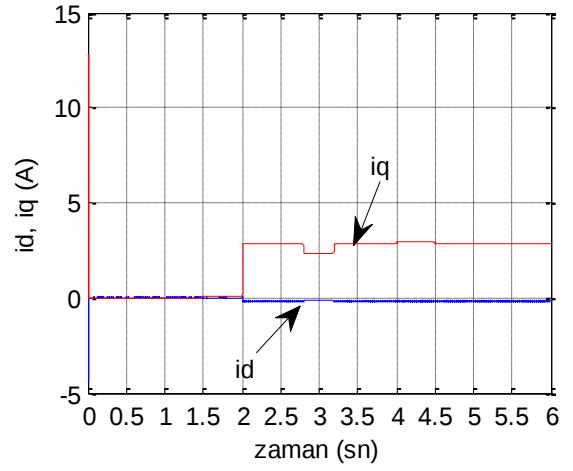


c)

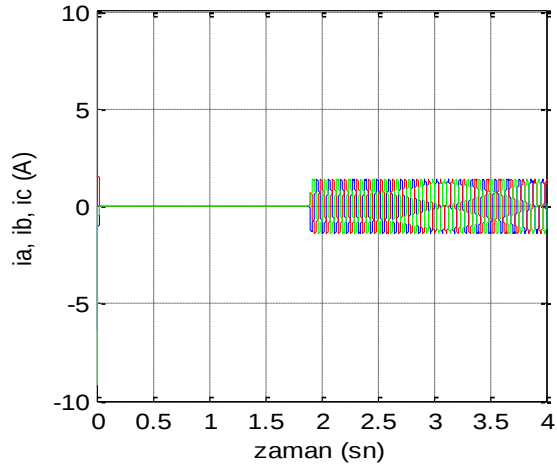
Şekil 17. 60 rad/s'lik referans hız ve $T_y=1$ Nm'lik yük için benzetim sonuçları; a) d-q eksen akımları, b) üç faz stator akımları, c) sürekli durumdaki üç faz stator akımları



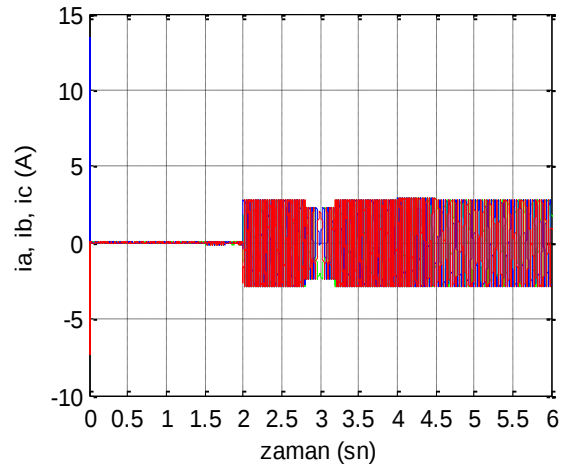
a)



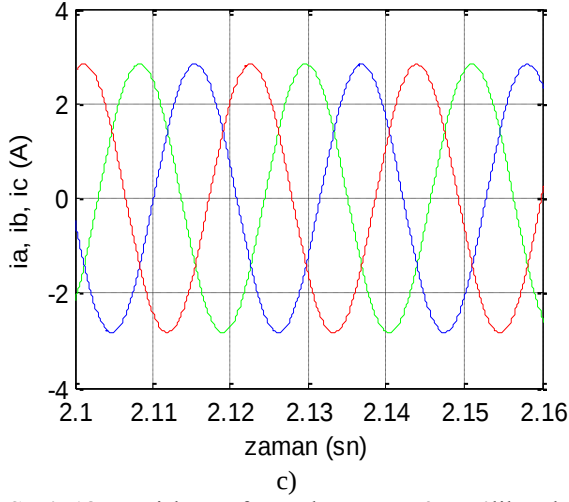
a)



b)



b)



Şekil 18. Değişken referans hız ve $T_y=2$ Nm’lik yük için benzetim sonuçları; a) d-q eksen akımları, b) üç faz stator akımları, c) sürekli durumdaki üç faz stator akımları

6. Sonuçlar

Bu makalede son zamanlarda sürücü sistemlerde yaygın bir şekilde kullanılan SMSM’nin uzak vektör modülasyonlu DMK’sının Matlab/Simulink benzetimi yapılmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

SMSM’nin uzak vektör modülasyonlu DMK’sı için Matlab/Simulink ortamında oluşturulan benzetim programı, düşük sabit referans hız değeri ve değişken referans hız değeri için çalıştırılmıştır. Böylece hem düşük hız uygulamalarında hem de modern sürücü sistemlerde sıklıkla kullanılan değişken hız uygulamalarında elde edilecek performans incelenmiştir. Her iki durumda da motor yüksüz olarak yol almış ve belirli bir süre sonra yüklenmiştir. Böylece hem yüklü hem de yüksüz çalışma durumu incelenebilmiştir.

Benzetim sonuçlarından, uzak vektör modülasyonlu DMK ile kontrol edilen SMSM’nin, modern sürücü sistemlerden istenen geniş bir hız aralığında kararlı çalışma ve değişken yük durumları için hızlı moment cevabına sahip olduğu görülmektedir. Sonuç olarak bu kontrol yönteminin SMSM’li sürücü sistemlerde kullanılması ile sürücü sisteminden elde edilen performans arttırılabilir.

7. Not

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (FÜBAP) tarafından 1869 no’lu proje olarak desteklenen “Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun DSP Tabanlı Doğrudan Moment Kontrolü” isimli doktora tezinden türetilmiştir.

EK. Benzetimde kullanılan SMSM’nin parametreleri

Benzetim çalışmalarında kullanılan SMSM’ye ait parametreler aşağıda verilmiştir;

Nominal gücü,	$P_N:1.5$ kW
Stator direnci,	$R_s:0.26$ Ω
Stator indüktansı,	$L_s:4.01$ mH
Atalet momenti,	$J:0.00119$ kgm ²
Sürtünme katsayısı,	$B:0.0000014161$ Nm.s
Mıknatıs akısı,	$\Psi_M:0.0946$ Weber
Kutup sayısı,	2p:10

8. Kaynaklar

1. Duru, H. T., Demiröz, R., (2008), Doğrudan Tahrikli Asansör Sistemlerinde Kullanılan Mıknatıs Uyarımlı Senkron Motorların Çalışma ve Boyutlandırma İlkeleri, *Asansör Sempozyumu*, İzmir.
2. Özçira, S., Bekiroğlu, N. and Ayçiçek, E., (2008), Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Direct Torque Control Method, *IEEE International Symposium on Power electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2008)*, 268-272, Italy.
3. Adam, A. A., (2007), Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Moment Dalgalanması ve Gürültünün Azaltılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
4. Swierczynski, D., (2005). Direct Torque Control with Space Vector Modulation (DTC-SVM) of Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronous Motor Drive, Doctor of Philosophy, Warsaw University of Technology, Warszawa.
5. Bal, G., Özgenel, M. C., Demirbaş, Ş., (2007), Vektör Denetimli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Uzak Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu ile Performans Analizi, *Politeknik Dergisi*, 1, 7-13.

6. Öztürk, S. B., (2008). Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motors with Non-Sinusoidal Back-EMF, Doctor of Philosophy, Texas A&M University, U.S.A.
7. Sutikno, T., Idris, N.R.N., Jidin, A., (2011). A New Fixed Switching Frequency Direct Torque Controlled PMSM Drives Low Ripple in Flux and Torque, *ITB J. Eng. Sci.*, **43**, No: 3, 173-190.
8. Romeral, L., Fabrega, A., Cusido, J., Garcia, A., Ortega, J.A., (2008). Torque Ripple Reduction in a PMSM Driven by Direct Torque Control, 39th IEEE Annual Power Electronics Specialists conference (PESC 2008), 4745-4751, Greece.
9. Swierczynski, D., Kazmierkowski, M. P., Blaabjerg, F., (2002)., DSP Based Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) Using Space Vector Modulation (DTC-SVM), *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'2002)*, Italy
10. Jiefan, C., Yue, F., Hui, W., (2009), Fuzzy Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor, *Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 107-111.
11. Noriega, G., Restrepo, J., Guzman, V., Gimenez, M., Aller, J., (2007). Direct Torque Control of PMSM Using Fuzzy Logic with PWM, *IEEE 42nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2007)*, Brighton.
12. Lin, H., Yan., W., Li, H., (2009). Fuzzy and PNN-Based Direct Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor, *IEEE 4th Conference on Industrial Electronics and Applications*, China.
13. Gülez, K., Adam, A. A., (2007), Adaptive Neural Network Based Controller for Direct Torque Control of PMSM with Minimum Torque Ripples, *International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology (SICE 2007)*, Japan.
14. Lin, W., (2006), Implementation of Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor with Space Vector Modulation Based on DSP, *8th International Conference on Signal Processing (ICSP 2006)*, China.
15. Ameer, A., Mokhtari, B., Essounbouli, N., Mokrani, L., (2012), Speed Sensorless Direct Torque Control of a PMSM Drive Using Space Vector Modulation Based MRAS and Stator Resistance Estimator, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **66**, 211-216.
16. Maamoun, A., Alsayed, Y. M., Shaltout, A., (2010), Space-Vector PWM Inverter Feeding a Permanent-Magnet Synchronous Motor, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **65**, 627-631.