



ISSN: 1306-3111/1308-7231
NWSA-Engineering Sciences
NWSA ID: 2013.8.2.1A0344

Status : Original Study
Received: September 2012
Accepted: January 2013

E-Journal of New World Sciences Academy

Hakan Çelik

Firat Univ. Mekatronik Engineering Department 23119 Elazig-Turkey

Hasan Kürüm

Firat Univ. Electric-Electronic Engineering Department
23119 Elazig-Turkey

hakancelik@firat.edu.tr - hkurum@firat.edu.tr

<http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2013.8.2.1A0344>

SABİT MİKNATISLI SENKRON MOTORUN HİSTEREZİS DOĞRUDAN MOMENT KONTROLÜNÜN BENZETİMİ

ÖZET

Güçlü mıknatısların üretilmesi ve mikroişlemci teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlara (SMSM) olan ilgi giderek artmaktadır. SMSM'lerin kullanılmasıyla birlikte doğrudan tahrik sistemlerinde geniş bir hız aralığında çalışma imkânı sağlanmıştır. SMSM'ler günümüzde asansörler, elektrikli araçlar, pompalar, uzay teknolojileri vb. birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. SMSM'lerin vektör kontrol yöntemlerinden olan Doğrudan Moment Kontrolünde (DMK) stator akısı, rotor akısı ve moment, inverter için uygun bir anahtarlama stratejisi kullanılarak doğrudan kontrol edilmektedir. DMK'nın kullanılması ile sürücü sistemlerde değişken hız uygulamalarında diğer kontrol yöntemlerine göre daha iyi bir dinamik cevap ve esnek bir kontrol elde edilmektedir. DMK, Histeresis ve uzay vektör modülasyonlu olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilir. Bu çalışmada SMSM'nin histeresis DMK'sının Matlab/Simulink benzetimi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan SMSM'nin kontrolü için histeresis DMK'nın kullanılması durumunda geniş bir hız aralığında değişken yük durumları için iyi bir dinamik cevap ve esnek bir kontrolün elde edileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sabit Mıknatıslı Senkron Motor, Histeresis Doğrudan Moment Kontrolü, Histeresis Bant Genişliği, Gerilim Kaynaklı İnverter, Hızlı Moment Cevabı

THE SIMULATION OF HYSTERESIS 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. With the use of PMSM it is now possible to work in a wide speed range in direct excitation systems. PMSM are widely used in different areas like elevators, electrical vehicles, pumps and space technology. In Direct Torque Control (DTC), one of the vector control methods of PMSM stator flux, rotor flux and torque are directly controlled using a suitable switching strategy for the inverter. Using DTC, a better dynamic response and a flexible control is obtained in variable speed applications in driver systems with respect to the other control methods. DTC is realized in two ways namely hysteresis and space vector modulation. In this study, the simulation of hysteresis DTC of PMSM is generated with Matlab/Simulink. According to the results obtained, it is observed that in the case that hysteresis DTC is used for the control of PMSM, a good dynamic response and flexible control can be obtained for variable load states in a wide speed range.

Keywords: Permanent Magnet Synchronous Motor, Direct Torque Control, Hysteresis Bandwidth, Voltage Source Inverter, Fast Torque Response



1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güçlü mıknatısların üretilmesi ve mikroişlemci teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlara (SMSM) olan ilgi giderek artmaktadır. SMSM'ler yüksek verim değerleri, basit yapıları, düşük atalet momentleri ve birim hacim başına elde edilen yüksek güç yoğunluğu nedeniyle diğer motorlardan daha fazla tercih edilmektedirler. Sürücü sistemlerde yaygın bir şekilde kullanılmakta olan asenkron motorlar özellikle düşük hızlarda verimli bir şekilde kullanılamazlar. Bu nedenle düşük hızlarda verimli bir şekilde çalışabilen SMSM'lere olan ilgi giderek artmaktadır. Asansör sistemlerinde SMSM'lerin kullanımı ile doğrudan tahrik mümkün olmaktadır. Böylece dişli sistemlerine gerek kalmadan düşük hızlarda da verimli bir çalışma mümkün olmaktadır. Asansör gibi birçok uygulamada artık asenkron motorların yerine SMSM'ler kullanılmaktadır [1, 2 ve 3].

Önceleri SMSM'nin kullanıldığı sürücü sistemlerde skaler kontrol yöntemleri istenilen performansı sağlayamamışlar ve günümüzde bu kontrol yöntemlerinin yerini vektör kontrol yöntemleri almıştır. SMSM'nin vektör kontrol yöntemlerinde biri olan DMK'da stator akısı ve momentin doğrudan kontrolü için, uygun bir anahtarlama stratejisine göre gerilim kaynaklı inverter anahtarlanır. Mikroişlemci ve güç elektroniği alanlarındaki gelişmelere paralel olarak DMK'nın kullanımı da artmıştır. SMSM'li sürücü sistemlerde DMK'nın kullanımı ile esnek bir kontrol ve hızlı moment cevabı elde edilmektedir [4, 5, 6 ve 7].

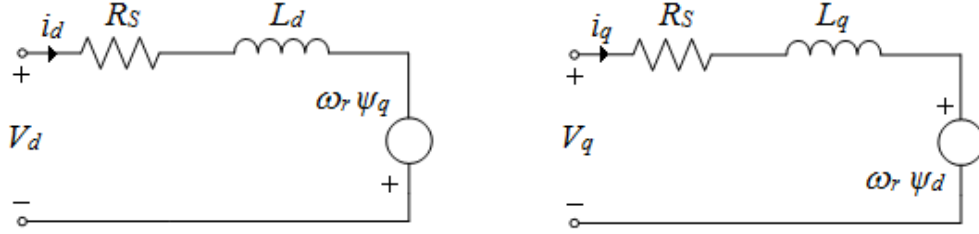
DMK için yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu akı ve moment hatalarının belli bir histerezis bant içinde tutulması, sabit bir anahtarlama frekansının elde edilmesi ve deneysel uygulamalardaki sorunların çözümüne yöneliktir [8, 9, ve 10]. Bunların yanında yapay zekâ teknikleri kullanılarak, DMK'dan elde edilen performansın arttırılmasına yönelik çalışmalar da yapılmıştır [11,12 ve 13].

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Histerezis DMK'nın deneysel uygulamasında çok yüksek anahtarlama ve örnekleme frekansı gerekmektedir. Bu nedenle literatürde SMSM'nin histerezis DMK'sının deneysel uygulamasına ait çok az çalışma yapılabilmektedir. Bu çalışmalarda da çok yüksek örnekleme frekansı ve anahtarlama frekansına erişilememesi nedeniyle çok büyük moment dalgalanmaları dolayısıyla kararsız çalışma durumları ortaya çıkmıştır. İlerleyen zamanlarda DSP hızlarının ve güç elektroniği elemanlarının anahtarlama frekansının artması ile birlikte histerezis DMK'nın deneysel uygulamaları da mümkün olacaktır. Bunu yanında günümüzde kullanılan bilgisayarların hızı SMSM'nin histerezis DMK'sının benzetim çalışmalarını yapmak için yeterlidir. Benzetim çalışmaları ile SMSM'nin histerezis DMK'sının hem geçici durum hem de sürekli durum davranışı izlenebilmektedir. Ayrıca yeni kontrol yöntemlerinin denenmesi ve sonuçlarının incelenmesi mümkün olmaktadır. Bu çalışmada SMSM'nin histerezis DMK'sının Matlab/Simulink benzetimi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlardan SMSM'nin histerezis DMK'sının esnek bir kontrol yapısı ve hızlı moment cevabına sahip olduğu görülmüştür.

3. SMSM'NİN MATEMATİKSEL MODELİ (MATHEMATICAL MODEL OF PMSM)

Bu kısımda SMSM'nin d-q eksenindeki matematiksel modeli ele alınacaktır. Üç fazlı modelin yerine, d-q eksenindeki modelin kullanılması ile SMSM'nin matematiksel modeli daha basit hale gelir. Bu model ile SMSM'nin hem geçici hem de sürekli durumdaki davranışı incelenebilmektedir. Şekil 1'de SMSM'nin d-q eşdeğer devreleri gösterilmiştir.



Şekil 1. SMSM'nin d-q eşdeğer devreleri
(Figure 1. d-q equivalent circuits of PMSM)

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, i_d ve i_q d-q eksen akımlarını, Ψ_d ve Ψ_q d-q eksen akılarını ve ω_r elektriksel rotor 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 yazılabilir. Burada, ψ_M mıknatıs akısını temsil eder. L_d ve L_q ise d-q eksenini indüktanslarıdır. 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. Moment denklemi q-d eksenini büyüklüklerine göre ifade edilirse,

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

olur. Bu denklemde p motorun çift kutup sayısıdır. Denklem 3 ve 4'te 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 elde edilir. Bu denklemde, birinci terim mıknatıs tarafından üretilen momentini ikinci terim ise relüktans momentini temsil eder. Yüzeysel mıknatıslı SMSM'lerde L_d ve L_q indüktansları birbirine eşit olduğundan, relüktans momentini sıfırdır. Bu durumda moment denklemi,

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

olur. Hareket denklemi ise,

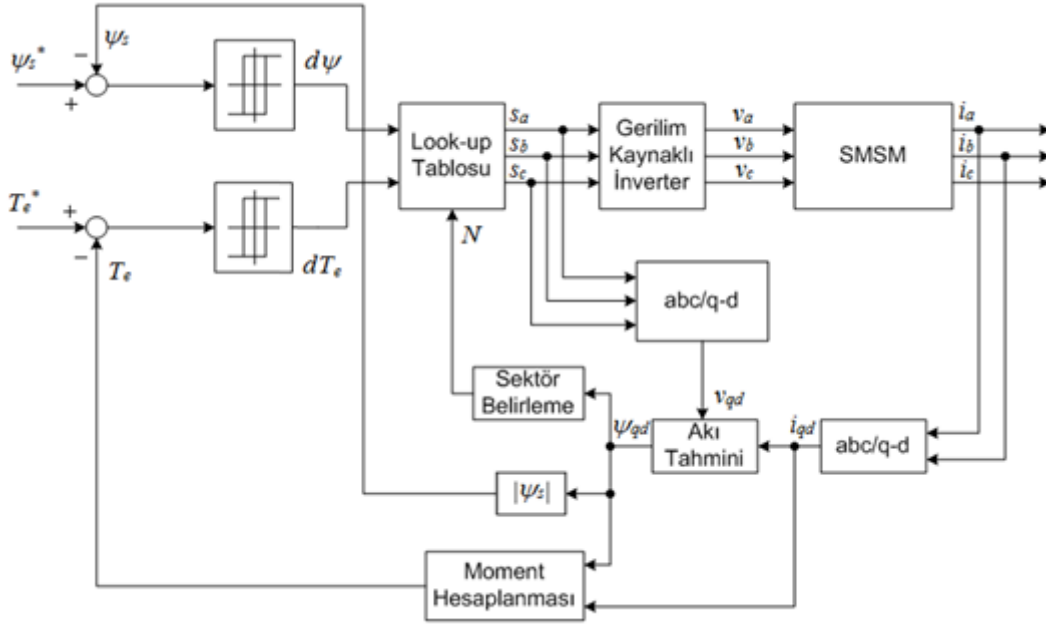
$$T_e - T_y = J \left(\frac{1}{p} \right) \frac{d\omega_r}{dt} + B \left(\frac{1}{p} \right) \omega_r \quad (10)$$

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

3. SMSM'İN HİSTEREZİS DOĞRUDAN MOMENT KONTROLÜ (HYSTERESIS DIRECT TORQUE CONTROL OF PMSM)

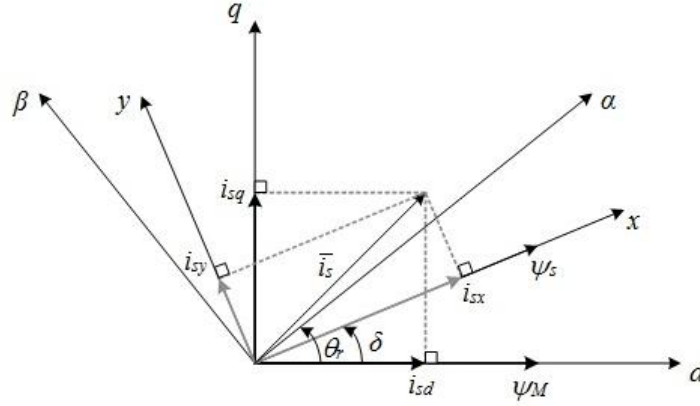
Histerезis DMK'da stator akısı ve momentin, referans değerleri ile gerçek değerleri arasındaki farka bakılarak statora uygulanan gerilim vektörü, uygun bir anahtarlama stratejisine göre seçilmektedir [2, 4 ve 5].

Şekil 2'de SMSM'nin histerезis DMK'sının blok diyagramı verilmiştir. Bu blok diyagramında da görüldüğü stator akım ve gerilimlerinin ani değerleri kullanılarak motorun akı ve moment değerleri hesaplanır ve referans değerler ile karşılaştırılır. Elde edilen sonuçlara göre moment ve akının histerезis bandının dışına çıkmaması için uygun gerilim vektörü seçilerek statora uygulanır [3, 4, 6 ve 8].



Şekil 2. SMSM'nin histerезis DMK blok diyagramı
(Figure 2. Hysteresis DTC block diagram of PMSM)

DMK'da stator akısı uzay vektörünün doğru tahmin edilmesi büyük bir önem taşır. İnverter kontrolü için DGM işaretleri kullanılmadığından, DGM için gereken süre hesaplamaları ve karşılaştırma işlemleri kullanılmaz. Böylece inverter sürücü performansı için kısıtlayıcı bir faktör olmaktan çıkar. Gerilim ve akım cevap süreleri tamamen motor tarafından belirlenir [3, 4, 6 ve 8].



Şekil 3. d-q ve x-y eksenlerinde vektör diyagramı
(Figure 3. Vector diagram in d-q and x-y axes)

Şekil 3'de SMSM'nin d-q ve x-y eksenlerindeki vektör diyagramı gösterilmiştir. Bu diyagramda Ψ_s stator akısını, Ψ_M ise rotora yerleştirilen sabit mıknatısların akısını göstermektedir.

Denklem 9'da verilen moment ifadesinde q eksenini akımı i_q çekilirse,

$$i_q = \frac{2T_e}{3p\Psi_M} \quad (11)$$

olur. Stator manyetik akısının genliği ise,

$$|\Psi_s|^2 = (\Psi_d)^2 + (\Psi_q)^2 \quad (12)$$

olur. Denklem 12'de Denklem 3 ve 4 yerlerine yazılırsa,

$$|\Psi_s|^2 = (L_d i_d + \Psi_M)^2 + (L_q i_q)^2 \quad (13)$$

ifadesi elde edilir. d-q eksenini ile x-y eksenini arasındaki dönüşüm için,

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & -\sin(\delta) \\ \sin(\delta) & \cos(\delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} \quad (14)$$

ifadesi kullanılır. Burada f , gerilim, akım ya da manyetik akı olabilir. Bu dönüşüm matrisi kullanılarak i_d ve i_q akımlarının yerine x-y eksenini bileşenleri yazılırsa moment denklemi,

$$T_e = \frac{3}{2} p [\Psi_d (i_x \sin(\delta) + i_y \cos(\delta)) - \Psi_q (i_x \cos(\delta) - i_y \sin(\delta))] \quad (15)$$

olur. Şekil 2'deki vektör diyagramına göre Ψ_d ve Ψ_q değerleri yerine yazılırsa,

$$T_e = \frac{3}{2} p |\Psi_s| i_y \quad (16)$$

olur. Burada $|\Psi_s|$, stator manyetik akısının genliğidir. Denklem 16'da görüldüğü gibi stator manyetik akısının genliğinin sabit tutulması durumunda, moment sadece stator akımının y eksenini bileşeni i_y ile değişir [2,4 ve 6]. Yine vektör diyagramını ve denklem 14'te verilen dönüşüm matrisi kullanılarak, stator akımının y eksenini bileşeni olan i_y ,

$$i_y = \frac{1}{L_s} \Psi_M \sin \delta \quad (17)$$

olarak ifade edilebilir. Denklem 17'deki akım değeri denklem 16'da yerine yazılırsa,

$$T_e = \frac{3}{2L_s} p |\psi_s| \psi_M \sin \delta \quad (18)$$

olur. Bu denklemdeki δ moment açısıdır. Denklem 18'de görüldüğü gibi stator manyetik akısı sabit tutulursa, SMSM'nin momentini stator manyetik akısının dönüş hızı ile kontrol edilebilir.

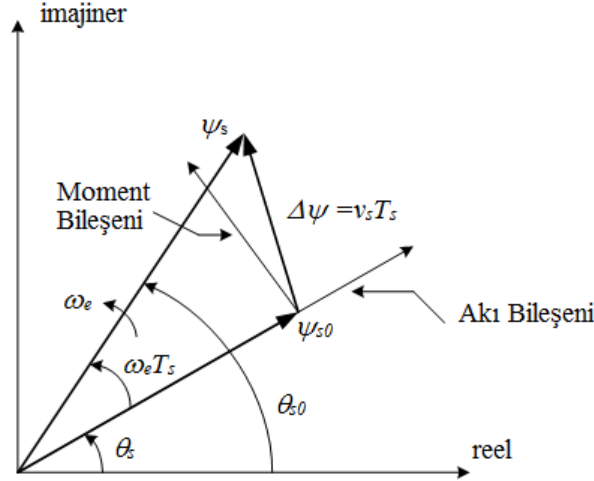
Stator manyetik akısının dönüş hızının ve genliğinin kontrolü için anahtarlama tablosundan uygun gerilim vektörünün seçilerek statora uygulanması gerekir. Stator manyetik akısı için genel olarak,

$$\vec{\psi}_s = \int_t^{t+\Delta t} (\vec{u}_s - R_s \vec{i}_s) dt \quad (19)$$

ifadesi kullanılmaktadır. Bu ifade de stator direnci R_s ihmal edilirse, stator manyetik akısı,

$$\vec{\psi}_s = \int_t^{t+\Delta t} \vec{u}_s dt \quad (20)$$

olur. Denklem 20'de gösterildiği gibi stator manyetik akısı uzay vektör geriliminin integralinden bulunabilir.



Şekil 4. DMK'nın vektör diyagramı
(Figure 4. Vector diagram of DTC)

Şekil 4'de DMK'nın vektör diyagramı gösterilmiştir. Bu diyagramda stator akısının başlangıç değeri Ψ_{s0} , stator akısının T_s anındaki değeri ise Ψ_s olarak gösterilmiştir. Stator akısına $\Delta\Psi$ akı vektörü ilave edilirse, Denklem 18'de verilen moment ifadesine göre momentte bir değişim olmaktadır. Yeni akı ve moment değerlerine göre histeresis kontrol algoritmasına göre yeni bir gerilim vektörü seçilerek statora uygulanmaktadır [5].

Moment ve akı histeresis kontrolü için kullanılan karşılaştırıcıların çalışması şu şekildedir:

$$T_e - T_e^* > H_{T_e} \text{ ise } dT_e = -1$$

$$T_e - T_e^* = 0 \text{ ise } dT_e = 0$$

$$T_e - T_e^* < H_{T_e} \text{ ise } dT_e = 1$$

$$\psi_s - \psi_s^* > H_{\psi} \text{ ise } d\psi = 0$$

$$\psi_s - \psi_s^* < H_{\psi} \text{ ise } d\psi = 1$$



Burada Ψ_s^* ve T_e^* akı ve momentin referans değerlerini, H_Ψ ve H_{T_e} ise akı ve moment histerezis bandını göstermektedir. dT_e moment histerezis karşılaştırıcısının çıkışını, $d\Psi$ ise akı histerezis karşılaştırıcısının çıkışını göstermektedir. Histerezis DMK yönteminde bu bant genişliklerinin seçimine çok önemlidir. Çünkü maksimum anahtarlama frekansı bu seçime göre değişmektedir. Bant genişlikleri büyük seçilirse histerezis bandı büyük olur, dolayısıyla moment ve akıda istenmeyen bir dalgalanma olur. Küçük seçilmesi durumunda ise anahtarlama frekansı büyük olur, dolayısıyla anahtarlama kayıpları artar. Ayrıca bu yüksek anahtarlama frekansları inverter anahtarlarının maksimum anahtarlama frekansını aşabilir [3,8,10 ve 9].

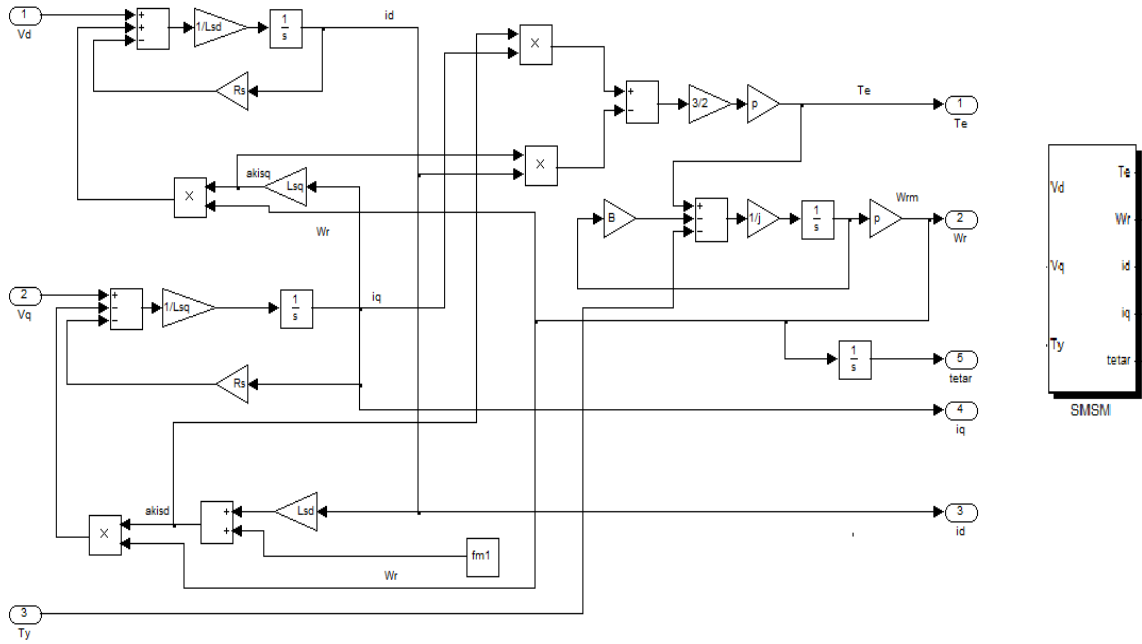
Moment ve akı histerezis karşılaştırıcısının çıkışına göre uygun gerilim kaynaklı inverter için uygun anahtarlama stratejisi Tablo 1'de verilmiştir. Burada θ altı ayrıık uzay vektör gerilimlerinin bulunduğu altıgen içinde, stator akısının bulunduğu bölgeyi göstermektedir.

Tablo 1. İnverter için anahtarlama stratejisi
(Table 1. Switching strategy for inverter)

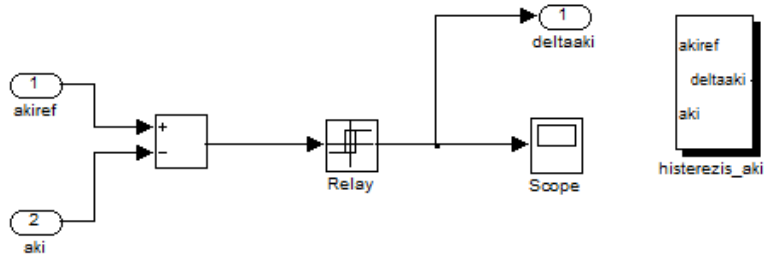
$d\Psi$	dT_e	θ					
		$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	$\theta(4)$	$\theta(5)$	$\theta(6)$
1	1	$V_2(110)$	$V_3(100)$	$V_4(101)$	$V_5(001)$	$V_6(011)$	$V_1(010)$
	0	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$
	-1	$V_6(011)$	$V_1(010)$	$V_2(110)$	$V_3(100)$	$V_4(101)$	$V_5(001)$
0	1	$V_3(100)$	$V_4(101)$	$V_5(001)$	$V_6(011)$	$V_1(010)$	$V_2(110)$
	0	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$
	-1	$V_5(001)$	$V_6(011)$	$V_1(010)$	$V_2(110)$	$V_3(100)$	$V_4(101)$

4. SMSM'İN HİSTEREZİS DOĞRUDAN MOMENT KONTROLÜNÜN BENZETİMİ (SIMULATION OF HYSTERESIS DIRECT TORQUE CONTROL OF PMSM)

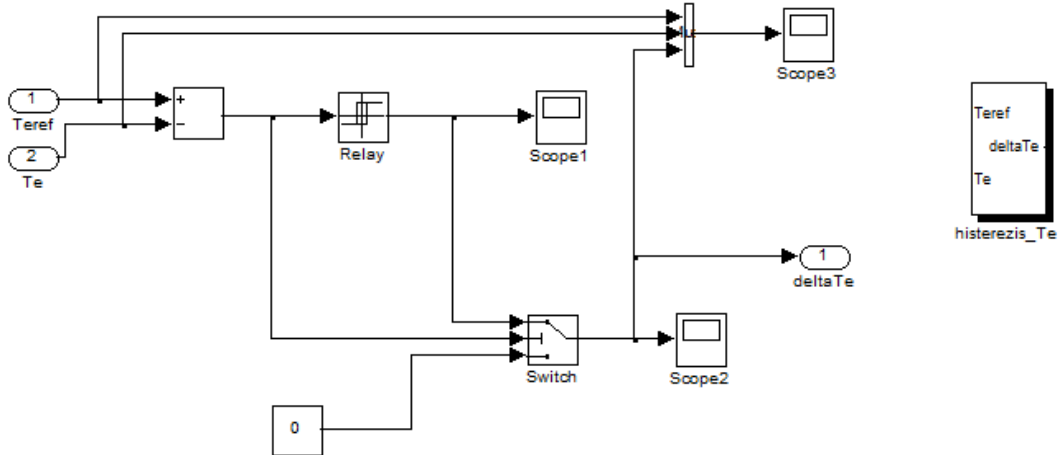
SMSM'nin histerezis DMK'sının benzetim çalışmaları Matlab/Simulink'te yapılmıştır. Bu benzetimde ilk olarak daha önce matematiksel modele ilişkin verilen denklemler kullanılarak SMSM'nin benzetimi yapılmıştır. SMSM'nin Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği Şekil 5'te verilmiştir. Akı histerezis karşılaştırıcısının bulunduğu Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği Şekil 6'da, moment histerezis karşılaştırıcısının bulunduğu Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği ise Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 8'de stator akısının bulunduğu sektörün belirlendiği Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği, Şekil 9'da ise statora uygulanacak gerilimin seçildiği Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği verilmiştir.



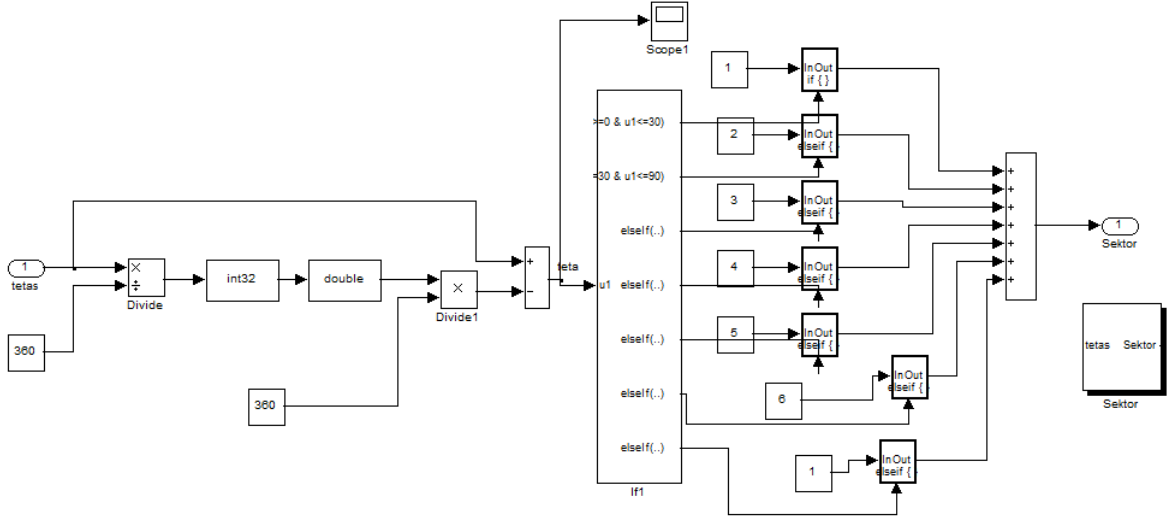
Şekil 5. SMSG Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği
(Figure 5. The content of PMSM Matlab/Simulink simulation block)



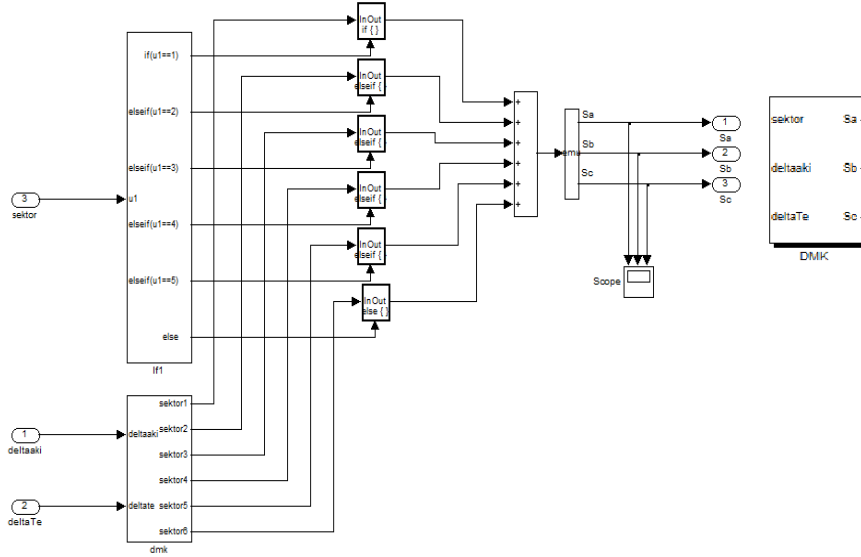
Şekil 6. Akı histeresis karşılaştırıcısı Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği
(Figure 6. The content of flux hysteresis comparator Matlab/Simulink simulation block)



Şekil 7. Moment histeresis karşılaştırıcısı Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği
(Figure 7. The content of torque hysteresis comparator Matlab/Simulink simulation block)

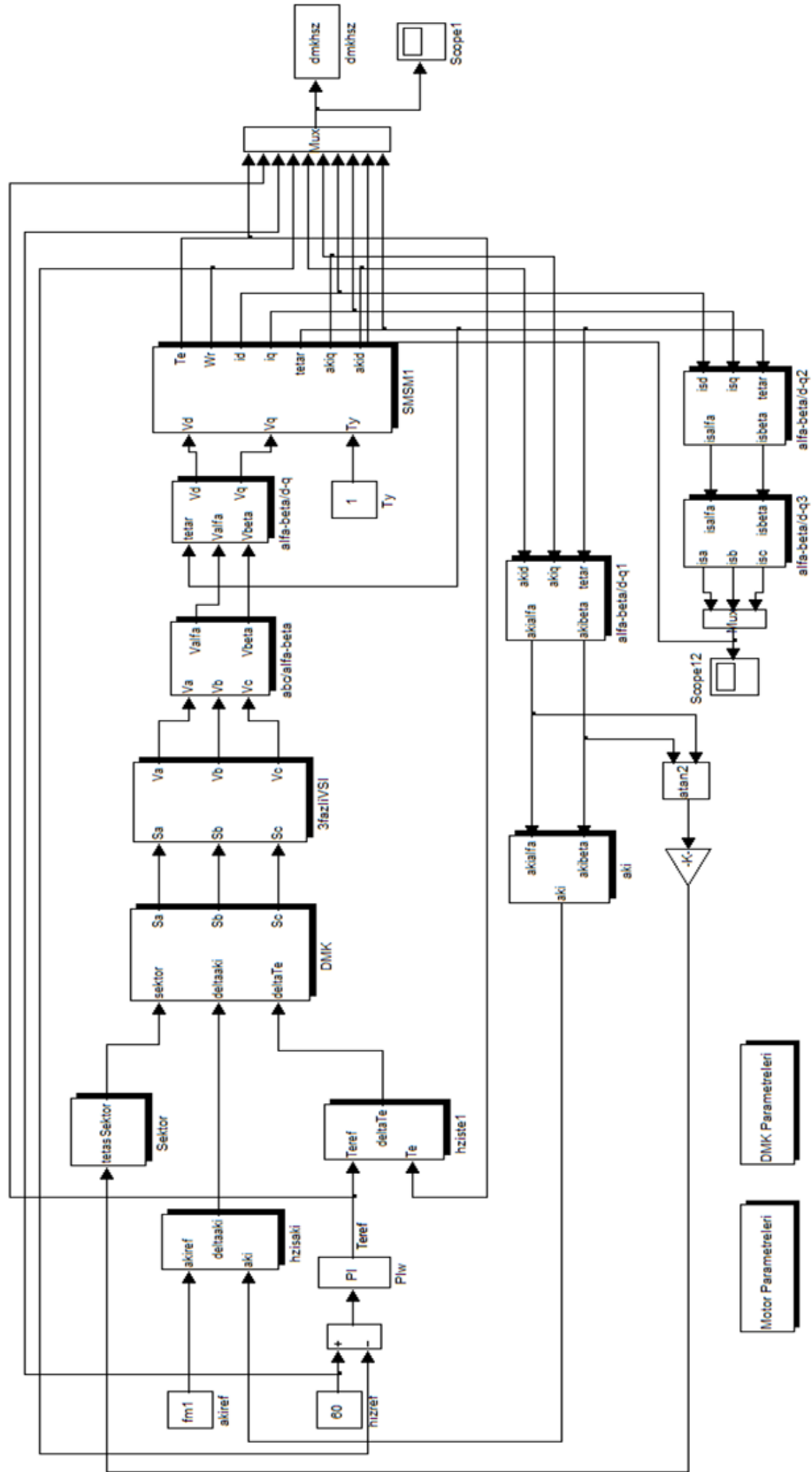


Şekil 8. Sektör Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği
(Figure 8. The content of sector Matlab/Simulink simulation block)



Şekil 9. DMK Matlab/Simulink benzetim bloğunun içeriği
(Figure 9. The content of DTC Matlab/Simulink simulation block)

Bu blokların birleştirilmesi sonucunda oluşan SMSM'nin histerezis DMK'sına ait Matlab/Simulink benzetimi Şekil 10'da verilmiştir. Bu benzetimde ilk olarak motor modelinden elde edilen akım değerleri kullanılarak stator akısının genliği ve bölgesi belirlenmektedir. Yine motor modelinden elde edilen q eksenli akımı i_q ve mıknatıs akısı Ψ_M kullanılarak gerçek moment değeri belirlenir. Daha sonra referans moment ve akı değerleri ile motor modelinden elde edilen gerçek moment ve akı değerleri histerezis karşılaştırmalarda karşılaştırılarak moment ve akı hataları belirlenmektedir. Bu akı ve moment hatalarına göre uygun stator gerilimi seçilerek gerilim kaynaklı invertere uygulamaktadır. Böylece SMSM'nin histerezis DMK'sının Matlab/Simulink benzetimi gerçekleştirilmektedir.



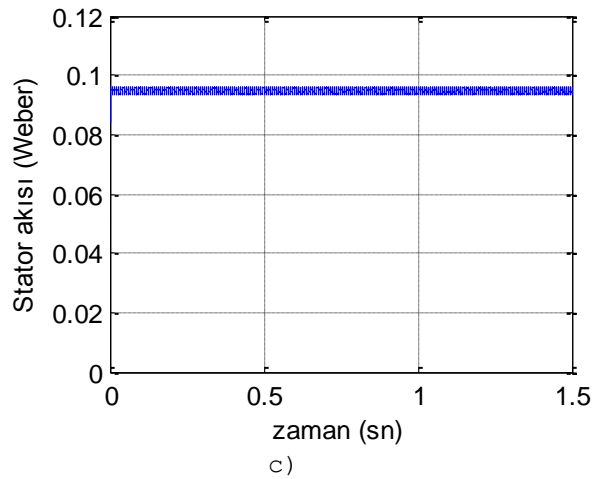
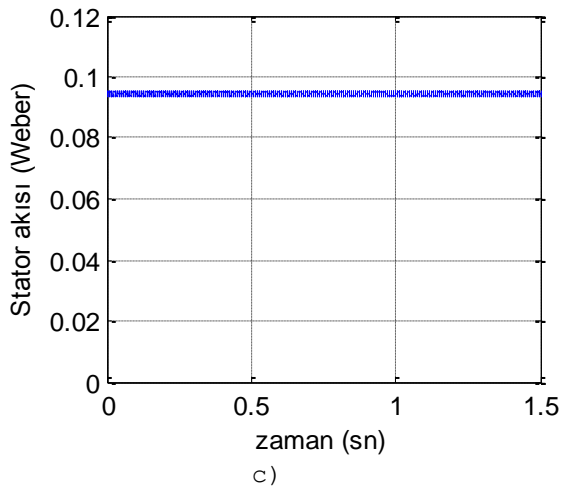
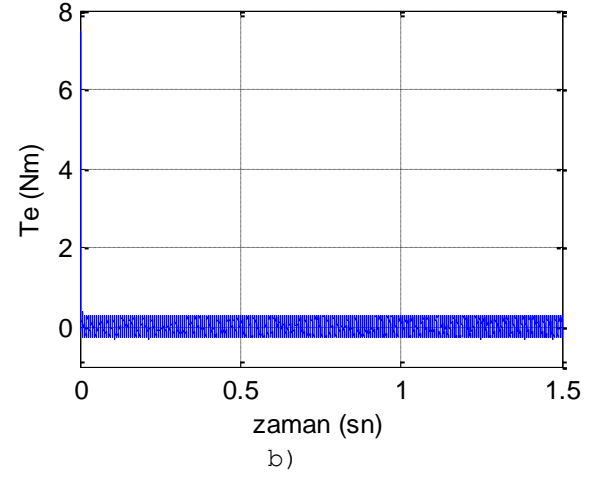
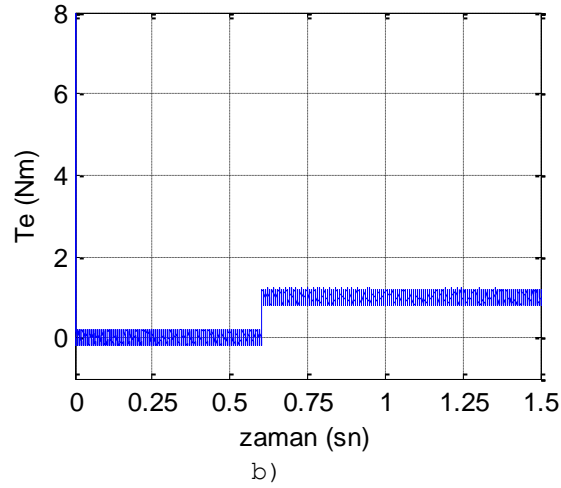
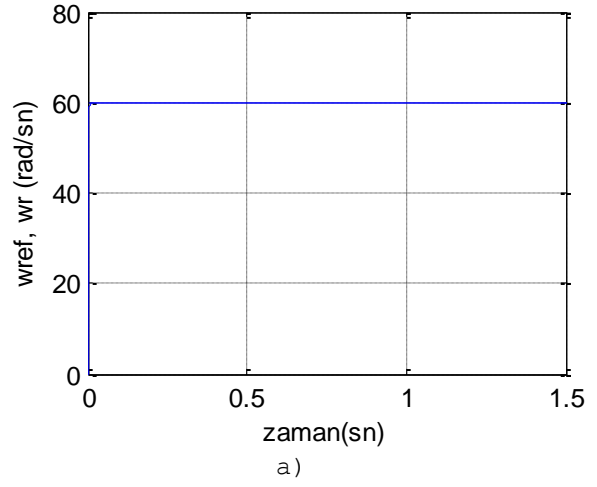
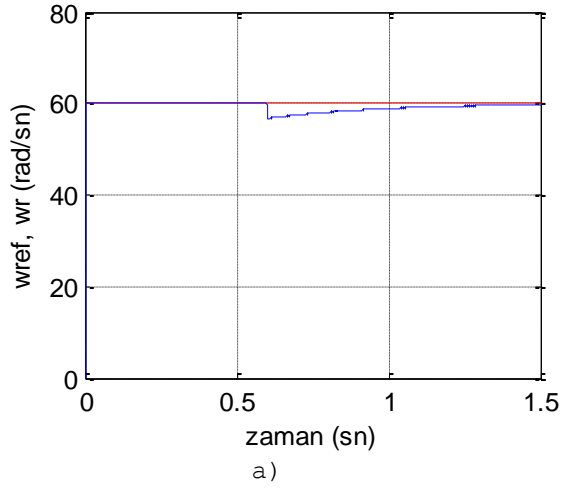
Şekil 10. SSM'nin histerezis DMK'sının Matlab/Simulink benzetimi
 (Figure 10. The content of hysteresis DTC of PMSM Matlab/Simulink simulation block)



4. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Benzetim çalışmalarında EK'de parametreleri verilen SMSM kullanılmıştır. Çalışmalarda gerilim kaynaklı inverterin DA giriş gerilimi olan V_{dc} 75 V, moment histerezis bant genişliği H_{Te} 0.2 ve akı histerezis bant genişliği H_{ψ} 0.001 olarak alınmıştır. Ek'de parametreleri verilen SMSM'nin mıknatıs akısı Ψ_M 0.0946 Weber olduğundan, stator akı referansı 0.0946 olarak alınmıştır. Kullanılan PI (Oransal-İntegral) hız kontrolörünün katsayıları Kök Yer Eğrisinden bulunmuştur. Hızı süzmek için kesim frekansı 200 Hz olan alçak geçiren süzgeç, akımları süzmek için ise kesim frekansı 1500 Hz olan alçak geçiren süzgeç kullanılmıştır. Ayrıca Matlab/Simulink'te yapılan benzetim çalışmalarında çalışma adımı 10^{-5} alınmıştır.

Genellikle düşük hızlarda SMSM'lerin hızında ve momentinde dalgalanmalar olmakta ve bunun sonucunda da kararsız çalışma durumları ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle benzetim sonuçları SMSM'nin düşük hızlardaki performansını incelemek için 60 rad/s elektriksel hız için alınmıştır. Şekil 11, Şekil 13 ve Şekil 15'de verilen sonuçlarda SMSM başlangıç anında yüksüz olarak yol almış ve yaklaşık 0.6 s sonra $T_y=1$ Nm ile yüklenmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde başlangıç anında SMSM'nin hızlı bir moment cevabı ile kısa sürede referans hızı yakaladığı görülmektedir. Yüklenme anında ise kısa süreli bir referans hız yakalanarak kararlı bir şekilde çalışma devam etmektedir. Üç faz stator akımlarının yüksüz durumda yaklaşık sıfır olduğu ve yüklenme anında yüklerle orantılı olarak arttığı görülmektedir. Şekil 12, Şekil 14 ve Şekil 16'da yüksüz duruma ilişkin verilen sonuçlardan da SMSM'nin referans hızı kısa sürede yakalayarak kararlı bir şekilde çalışmaya devam ettiği görülmektedir. Yüksüz durumda üç faz stator akımlarının yaklaşık sıfır olduğu görülmektedir. Şekil 13 yüklü çalışma için ve Şekil 14'de yüksüz çalışma için verilen sürekli durum sonuçları incelendiğinde, moment ve akının verilen histerezis bandı içinde kalarak referans değerleri takip ettikleri görülmektedir.

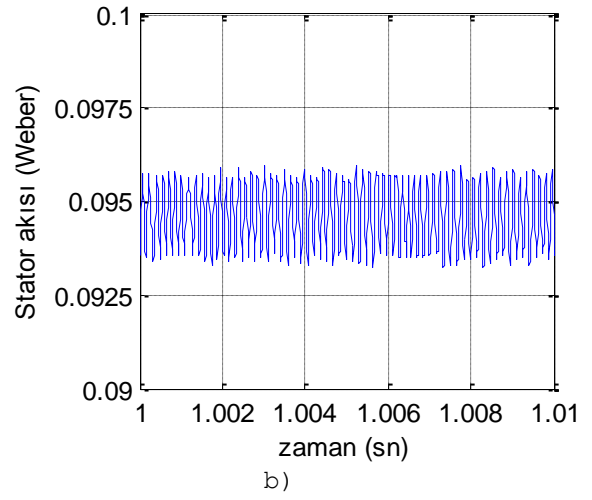
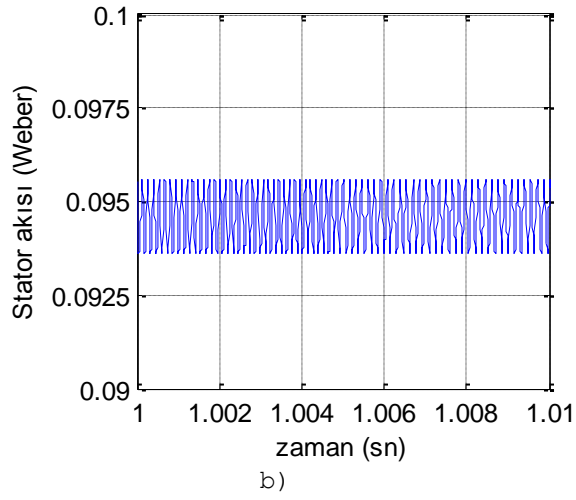
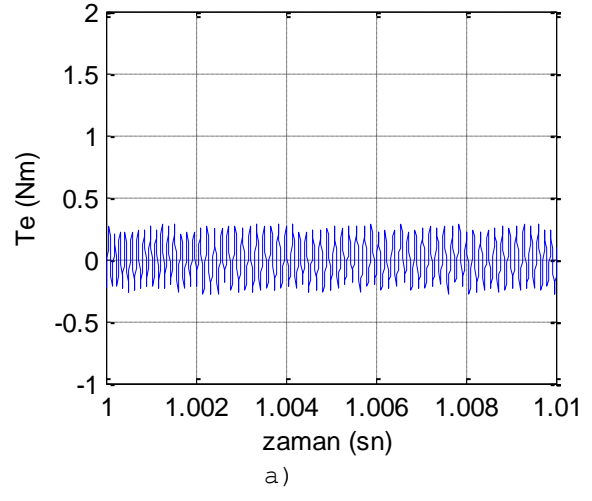
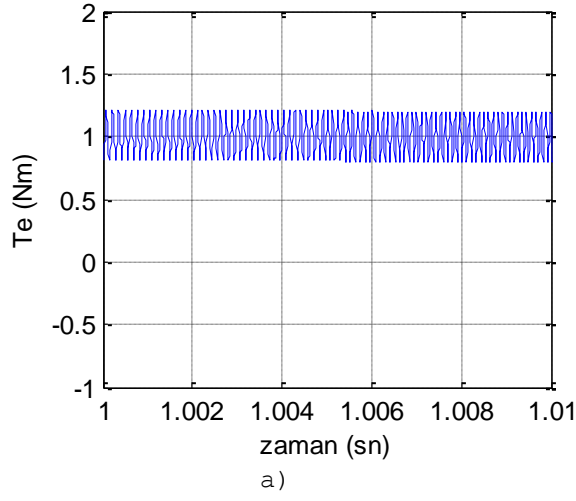


Şekil 11. 60 rad/s'lik referans hız ve $T_y=1$ Nm yük için benzetim sonuçları a) hız, b) moment, c) stator akısı

(Figure 11. Simulation results for a reference speed of 60 rad/s and $T_y=1$ Nm load a) speed, b) torque c) stator flux)

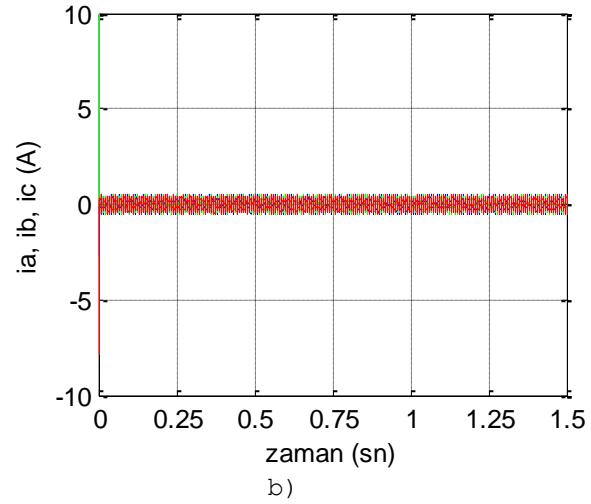
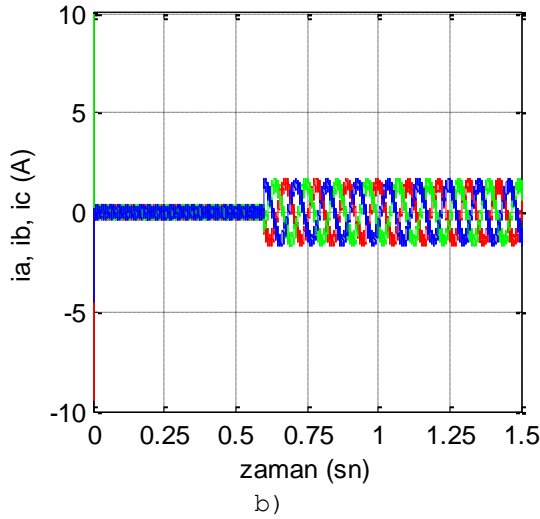
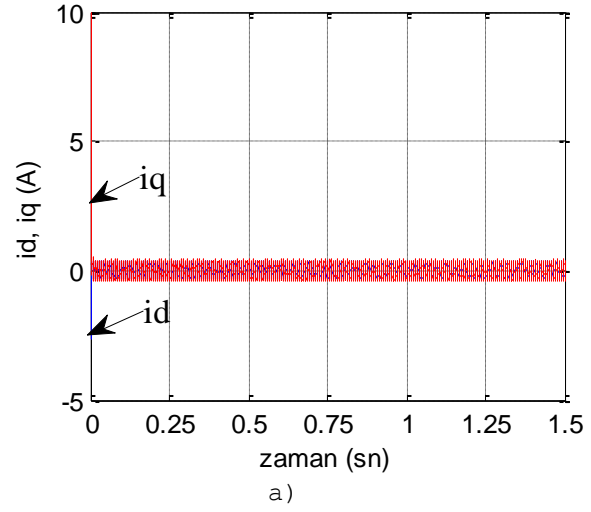
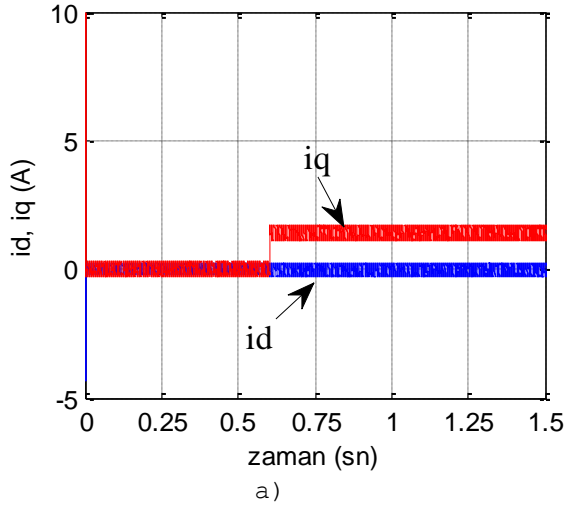
Şekil 12. 60 rad/s'lik referans hız ve yüksüz durum için benzetim sonuçları a) hız, b) moment, c) stator akısı

(Figure 12. Simulation results for a reference speed of 60 rad/s and no-load a) speed, b) torque, c) stator flux)



Şekil 13. 60 rad/s'lik referans hız ve $T_y=1$ Nm yük için sürekli durumdaki benzetim sonuçları
a) moment, b) stator akısı
(Figure 13. Simulation results for a reference speed of 60 rad/s and $T_y=1$ Nm load at continuous state
a) torque, b) stator flux)

Şekil 14. 60 rad/s'lik referans hız ve yüksüz durum için sürekli durumdaki benzetim sonuçları
a) moment, b) stator akısı
(Figure 14. Simulation results for a reference speed of 60 rad/s and no-load at continuous state
a) torque, b) stator flux)



Şekil 15. 60 rad/s'lik referans hız ve $T_y=1$ Nm yük için benzetim sonuçları a) d-q eksenli akımları, b) üç faz stator akımları (Figure 15. Simulation results for a reference speed of 60 rad/s and $T_y=1$ Nm load a) d-q axes currents, b) three phase stator currents)

Şekil 16. 60 rad/s'lik referans hız ve yüksüz durum için benzetim sonuçları a) d-q eksenli akımları, b) üç faz stator akımları (Figure 16. Simulation results for a reference speed of 60 rad/s and no-load a) d-q axes currents, b) three phase stator currents)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede son zamanlarda sürücü sistemlerde yaygın bir şekilde kullanılan SMSM'nin histerezis DMK'sından elde edilen performansın incelenmesi için Matlab/Simulink benzetimi yapılmıştır.

Benzetim sonuçlarından SMSM'li sürücü sistemlerde histerezis DMK'nın kullanımı ile modern sürücü sistemler için istenen hızlı moment cevabı ve esnek kontrol yapısının elde edileceği hem yüklü durum sonuçlarından hem de yüksüz durum için verilen sonuçlardan görülmüştür.

Benzetim çalışmaları düşük hız değerleri için yapılarak moment ve hız dalgalılığı ile kararsız çalışma durumları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan ve SMSM'nin histerezis DMK ile düşük hızlarda kararlı bir şekilde düşük moment ve hız dalgalılığında çalıştığını gösterilmiştir.



NOT (NOTICE) :

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.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Duru, H.T. ve Demiröz, R., (2008). Doğrudan Tahrikli Asansör Sistemlerinde Kullanılan Mıknatıs Uyartımlı 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), p. 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. 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.
6. Ocen, D., (2005). Direct Torque Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor, Master Thesis, Stockholm.
7. ABB Technique Guide No.1, (1999). Direct Torque Control.
8. Kadir, M.N.A., Mekhilef, S., and Hew, W.P., (2007). Comparison of Basic Direct Torque Control Designs for Permanent Magnet Synchronous Motor, 7 th International conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS 2007), Thailand.
9. Sutikno, T., Idris, N.R.N., and Jidin, A., (2011). A New Fixed Switching Frequency Direct Torque Controlled PMSM Drives Low Ripple in Flux and Torque, ITB J. Eng. Sci, vol. 43, no. 3, p. 173-190.
10. Swierczynski, D., Kazmierkowski, M.P., and 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
11. Jiefan, C., Yue, F., and Hui, W., (2009). Fuzzy Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor, Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, p. 107-111.
12. Noriega, G., Restrepo, J., Guzman, V., Gimenez, M., and Aller, J., (2007). Direct Torque Control of PMSM Using Fuzzy Logic with PWM, IEEE 42nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2007), Brighton.
13. Lin, H., Yan., W., and Li, H., (2009). Fuzzy and PNN-Based Direct Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor, IEEE 4th Conference on Industrial Electronics and Applications, China.



EK. ÇALIŞMALARDA KULLANILAN SMSM'İN PARAMETRELERİ
(PMSM PARAMETERS USED IN THE STUDIES)

Benzetim çalışmalarında kullanılan SMSM'ye ait parametreler aşağıda verilmiştir;

Nominal Gücü,	P_N	:1.5 kW
Stator Direnci,	R_s	:0.26 Ω
Stator İndüktansı,	L_s	:4.01 mH
Atalet Momenti,	J	:0.00119 kgm ²
Sürtünme Katsayısı,	B	:0.0000014161 Nm.s
Mıknatıs Akısı,	Ψ_M	:0.0946 Weber
Kutup Sayısı,	$2p$:10