



ISSN:1306-3111

e-Journal of New World Sciences Academy
2012, Volume: 7, Number: 1, Article Number: 1A0275

NWSA-ENGINEERING SCIENCES

Received: November 2011

Accepted: January 2012

Series : 1A

ISSN : 1308-7231

© 2010 www.newwsa.com

Abuzer Çalışkan

Ahmet Orhan

Firat University

acaliskan@firat.edu.tr

Elazig-Turkey

**AKIM KAYNAKLI İNVERTER BESLEMELİ SENKRON MOTORUN STATOR AKISI ALAN
YÖNLENDİRME KONTROLÜ**

ÖZET

Bu çalışmada, senkron motorun alan yönlendirme kontrol yöntemleri detaylı olarak ele alınmıştır. Özellikle verim ve güç faktörünün önemli olduğu yüksek güçlü uygulamalarda tercih edilen Senkron Motorun alan yönlendirme kontrolü ele alınmıştır. Senkron motorun altı adımlı akım kaynaklı inverterden beslenme durumu için stator akısı alan yönlendirme kontrolüne ilişkin Matlab/Simulink modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model birim güç faktörü çalışmaya olanak sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Senkron Motor, Alan Yönlendirme Kontrolü, Akım Kaynaklı İnverter

**STATOR FLUX FIELD ORIENTED CONTROL OF CURRENT SOURCE INVERTER FED
SYNCHRONOUS MOTOR**

ABSTRACT

In this study, field oriented control methods of synchronous motor were studied in detail and especially field oriented control of the synchronous motors preferred in high power applications where power factor and efficiency are important is focused on. A Matlab/simulink model for stator flux field oriented control for the six-step current oriented inverter fed. The model developed provides to work with unit power factor.

Keywords: Synchronous Motor, Field Oriented Control, Current Source Inverter

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Serbest uyarmalı bir doğru akım motorunun momenti Denk 1'den görüleceği üzere uyarma gerilimi ile kontrol edilen bir hava aralığı akısı ve endüvi gerilimi ile kontrol edilen endüvi akımının çarpımından oluşmaktadır. Dolayısıyla bu motorlar hızlı dinamik cevap özelliğine sahiptirler. Ancak doğru akım motorlarının bakım gereksinimi, tozlu ve patlamalı ortamlarda çalışmama, komutatörün getirdiği yüksek hız sınırı, hacim olarak büyük olmaları bu motorların sürücü düzeneklerde kullanımlarını sınırlar [1]. Bu nedenle sürücü düzeneklerde alternatif akım motorlarının kullanım zorunluluğu ortaya çıkar.

$$T_e = K_t \psi I_a \quad (1)$$

Alternatif akım motorlarının alan yönlendirme kontrolünde amaç moment ve akının birbirinden bağımsız şekilde kontrolüdür. Böylelikle alternatif akım motorlarından doğru akım motorlarının dinamik ve sürekli durum performansı elde edilebilir. Bu nedenle alan yönlendirme ilkesi genel olarak alternatif akım makineleriyle doğru akım makineleri arasında kurulan benzerliğe dayanır [2]. Senkron ve asenkron motorların alan yönlendirme kontrolü birbirinden farklıdır. Senkron motorda moment ve akının birbirinden bağımsız bir şekilde bulunduğu kontrol algoritmasını elde etmek oldukça zordur. Çünkü sönüm sargıları ve rotorun çıkık kutuplu olması kontrol dinamiğinde bazı karmaşık problemler ortaya çıkarır [2].

Son yıllarda gerilim kaynaklı darbe genişlik modülasyonlu inverterden beslenen senkron motorun vektör kontrolü ile ilgili çalışmalar ele alınmaya başlanmıştır. Yapılan çalışmalar güç faktörü kontrolüne olanak sağlamaktadır. Ancak bu çalışmalar oldukça düşük güçlü senkron motorlar göz önüne alınarak yapılmıştır. Senkron motorlar verim ve güç faktörü kontrolünün önemli olduğu yüksek güçlü sürücü düzeneklerde alternatifsizdir. Bu nedenle bu çalışmada özellikle çok yüksek güçlü çıkık kutuplu rotorlu sargılı bir senkron motor ele alınmıştır [3 ve 4].

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

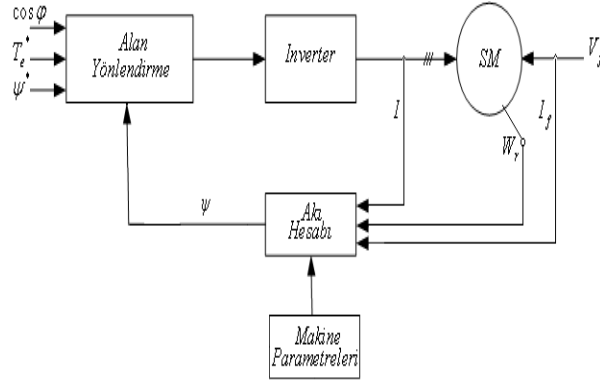
Bu çalışmada, senkron motorun alan yönlendirme kontrol yöntemleri detaylı olarak ele alınmıştır. Özellikle verim ve güç faktörünün önemli olduğu yüksek güçlü uygulamalarda tercih edilen Senkron Motorun alan yönlendirme kontrolü ele alınmıştır. Senkron motorun altı adımlı akım kaynaklı inverterden beslenme durumu için stator akısı alan yönlendirme kontrolüne ilişkin Matlab/Simulink modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model birim güç faktörü çalışmaya olanak sağlamaktadır.

3. DOĞRUDAN VE DOLAYLI ALAN YÖNLENDİRME YÖNTEMLERİ (DIRECT AND INDIRECT FIELD ORIENTATION METHODS)

Alan yönlendirmeli kontrolü gerçekleştirebilmek için yönlendirme akısının genlik ve pozisyonunun bilinmesi gerekir. Yönlendirme akısının genlik ve pozisyon bilgisi ya duyarlılar vasıtasıyla doğrudan makine üzerinden ölçülür yada makineden ölçülen büyüklükler yardımıyla dolaylı olarak hesaplanarak bulunur. Dolayısıyla alan yönlendirme kontrolü, doğrudan ve dolaylı alan yönlendirme olarak ikiye ayrılır [5 ve 6].

Dolaylı alan yönlendirme kontrolünde, yönlendirme akısının genlik ve pozisyonunun belirlenmesinde rotor açısı ve makine parametrelerine ihtiyaç vardır. Yönlendirme akısının hesabında akım modeli veya gerilim modeli kullanılabilir. Gerilim modelinde akı

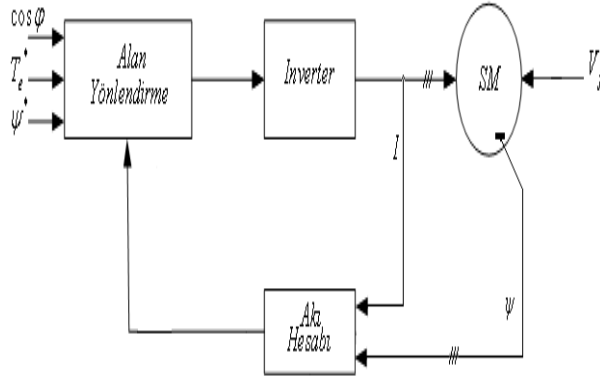
hesabında integral kullanıldığından dolayı nominal hızın %10'una kadar olan hızlarda integratör istenen cevabı veremeyebilir [2]. Eğer gerilim modeli kullanılacaksa hız bilgisine gerek yoktur. Dolaylı alan yönlendirme kontrolüne ilişkin blok diagram Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Dolaylı alan yönlendirme kontrolüne ilişkin blok diagram
(Figure 1. The block diagram for a method of indirect field orientation)

Bu yöntem, hesap algoritmalarının tükettiği zaman nedeniyle uzun yıllar tercih edilmemişlerdir. Ancak sayısal işaret işleyicilerindeki gelişmelerle, bu problem ortadan kalkmış ve günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Doğrudan alan yönlendirme kontrolünde ise yönlendirme akısı direkt olarak makine üzerine yerleştirilen duyargalar vasıtasıyla ölçülür. Motorun standart üretim motor olma özelliğini yitiriyor olması, yöntemin uygulanmasını genel olarak laboratuvar çalışmaları ile sınırlandırılmıştır [6 ve 8]. Doğrudan alan yönlendirme kontrolüne ilişkin blok diagramı Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Doğrudan alan yönlendirme kontrolüne ilişkin blok diagram
(Figure 2. The block diagram for a method of direct field orientation)

4. SENKRON MOTORDA KULLANILAN AKI TÜRÜNE GÖRE ALAN YÖNLENDİRME YÖNTEMLERİ (THE METHODS OF FIELD ORIENTATION ACCORDING TO THE TYPE OF FLUX USED IN SYNCHRONOUS MOTOR)

Senkron motorun alan yönlendirme kontrolü kullanılan referans akı büyüklüklerine göre dört ana başlık altında incelenebilir. Bunlar;

- Stator akısı alan yönlendirme
- Hava aralığı akısı alan yönlendirme
- Uyarma akısı alan yönlendirme
- Sönüm sargı akısı alan yönlendirme

Alan yönlendirme kontrolü için, bu akı alan yönlendirme türlerinin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları ortaya konmalıdır. Oryantasyonun hangi alana göre yapılacağı; stator akım karakterinin kontrolünün gerekli olup olmamasıyla saptanır. Yönlendirme yapılacak akı büyüklüğünün seçimindeki en önemli kriterlerden bir diğeri de güç faktörü kontrolüdür.

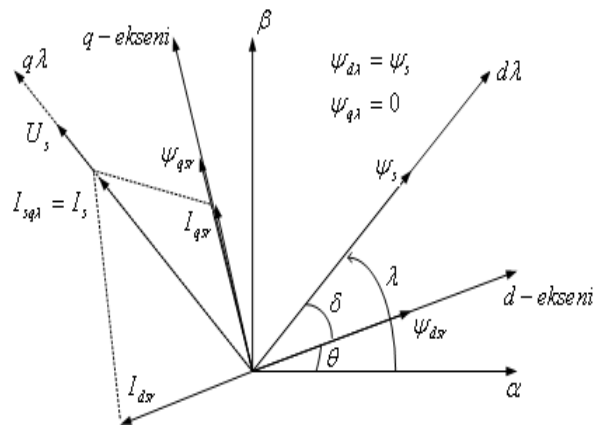
Stator akısı alan yönlendirme yöntemi, güç faktörü kontrolüne en uygun yönlendirme yöntemidir. Güç faktörü kontrolü stator değişkenleri içerdiğinden yönlendirme akısı olarak genelde stator akısı kullanılır. Stator akısına yönlendirme yönteminde, yönlendirme akısı hem doğrudan hem de dolaylı akı belirleme yöntemleriyle belirlenebilir. Bu durumda momentin hızlı bir şekilde kontrolü için akı sabit tutulup, moment stator akımı (I_s) ile ayarlanmalıdır [5 ve 9].

Hava aralığı akısı alan yönlendirme güç faktörü kontrolüne tam uygun bir yöntem olmamasına rağmen, kontrol değişken hesabındaki bazı basitliklerden dolayı tercih edilebilen bir kontrol yöntemidir. Yönlendirme akısının referans değeri, mıknatıslanma akımı ile orantılıdır. Stator kaçak akısı büyük olan makinalarda bu yöntem ile elde edilen moment stator akısı alan yönlendirmeye göre daha küçük olur [7 ve 10].

Uyarma akısı alan yönlendirme en basit alan yönlendirme yöntemidir. Kontrol kolay ve moment doğrusaldır. Ancak yük arttıkça giriş güç faktörü düşer. Uyarma akısı alan yönlendirme yönteminde moment ve akı arasında tam olarak ayrıştırılmış bir yapı elde edilebilir. Güç faktörü kontrolüne uygun bir yöntem değildir. Sabit uyarımlı makineler için en uygun yöntemdir. Kalıcı mıknatıs rotorlu (Permanet magnet) ve anahtarlamalı relüktans motoru gibi uyarım sargısı bulunmayan makinalarda kullanılan en yaygın yöntemdir. Genel olarak gerilim kaynağı inverterleriyle kullanılır [2 ve 9].

5. SENKRON MOTORUN STATOR AKISI ALAN YÖNLENDİRME KONTROLÜ (STATOR FLUX ORIENTATION CONTROL OF SYNCHRONOUS MOTOR)

Stator akımı reaktif bileşeni ve güç faktörü kontrolü en basit şekliyle stator akısı alan oryantasyonu ile sağlanır. Birim güç faktörü koşullarında stator gerilimi ve akımı aynı fazda, stator akı fazörü de akım fazörüne diktir. Stator akısı alan yönlendirmeye ilişkin fazör diagramı Şekil 3'de görülmektedir [9].



Şekil 3. Stator akısı alan yönlendirme fazör diagramı
(Figure 3. Phasor diagram of stator flux field orientation)

Stator akım fazörü I_s , stator akı eksenleri $d\lambda s$ ve $q\lambda s$ 'e göre bileşenlerine ayrılırsa; $I_{sd\lambda s}$ ve $I_{sq\lambda s}$ bileşenleri elde edilir. Burada $I_{sd\lambda s}$ akımın karakterini ve $I_{sq\lambda s}$ momenti belirleyen bileşenlerdir.

$$\underline{I}_s = I_{sd\lambda s} + jI_{sq\lambda s} \quad (2)$$

Stator akı oryantasyonlu değişkenlerle senkron makine momenti;

$$T_e = K_m \cdot \psi_s \cdot I_{sq\lambda} \quad (3)$$

olur.

Stator direnci ihmal edilirse, stator akım ve gerilimi arasındaki faz farkı φ olmak üzere;

$$\tan \varphi = \frac{I_{sd\lambda s}}{I_{sq\lambda s}} \quad (4)$$

olur. ψ_s akısını ve φ açısını istenen değerde tutmak için yük momenti değişimine bağlı olarak uyartım akımı ayarına da gereksinim duyulur. Uyartımın ayarlanabilmesi durumunda, sonuç(resultant) akı genliği ve hem de güç faktörü kontrol edilebilir.

Stator alan oryantasyondaki reaktif $I_{sd\lambda s}$ ve $I_{sq\lambda s}$ bileşenleri ile rotor oryantasyonlu akım bileşenleri elde edilir. Stator alan oryantasyonunda; reaktif akım bileşeni referans olarak girilir, aktif bileşen ise Denk. 3'den;

$$I_{sq\lambda s} = \frac{T_e}{K_m \psi_s} \quad (5)$$

olarak elde edilir.

Şekil 3'deki uzay fazör diagramından da görüleceği üzere birim güç faktörü koşullarında stator akısı alan yönlendirmede, alan yönlendirme eksen çatısının $d\lambda$ -ekseni üzerindeki stator akım bileşeni sıfırdır. Yani $I_{sd\lambda s}^* = 0$ olarak alınır ise $\cos \varphi = 1$ (birim güç faktörü) koşulu sağlanmış olur.

$$\lambda = \theta + \delta \quad (6)$$

$$\tan \delta = \frac{\psi_{qsr}}{\psi_{dsr}} \quad (7)$$

Oryantasyon akısının hesabında akım modeli veya gerilim modeli kullanılabilir. Oryantasyon akı hesabı için; stator gerilim modeli kullanıldığında, rotor pozisyonunun bilinmesi gerekli değildir. Sadece motor moment kontrolünde hız bilgisine ihtiyaç vardır.

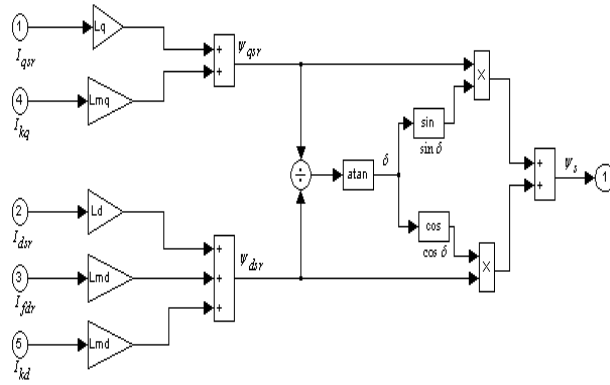
Oryantasyon akısı, rotor referans çatıdaki makine denklemleri kullanılarak hesaplanabilir. Bu durumda yönlendirme akısı;

$$\psi_s = \psi_{sd\lambda} = \psi_{dsr} \cdot \cos(\delta) + \psi_{qsr} \cdot \sin(\delta) \quad (8)$$

$$\psi_{dsr} = L_d \cdot I_{qsr} + L_{md} \cdot I_{fldr} + L_{md} \cdot I_{kd} \quad (9)$$

$$\psi_{qsr} = L_q \cdot I_{qsr} + L_{mq} \cdot I_{kq} \quad (10)$$

denklemlerinden hesaplanabilir. Buradan yönlendirme akısı hesabının blok diagram olarak gösterimi Şekil 4'deki gibi elde edilir.



Şekil 4. Akı hesap bloğuna ilişkin blok diagram
 (Figure 4. The block diagram of the flux account)

Uyartım akımı hesabı için; Denklem 9 ve 10, denklem 8'de yerine konursa

$$\psi_s = (L_d \cdot I_{qsr} + L_{md} \cdot I_{fdr} + L_{md} \cdot I_{kd}) \cdot \cos(\delta) + (L_q \cdot I_{qsr} + L_{mq} \cdot I_{kq}) \cdot \sin(\delta) \quad (11)$$

Akımın reaktif bileşeni Şekil 5.1'deki fazör diagramından;

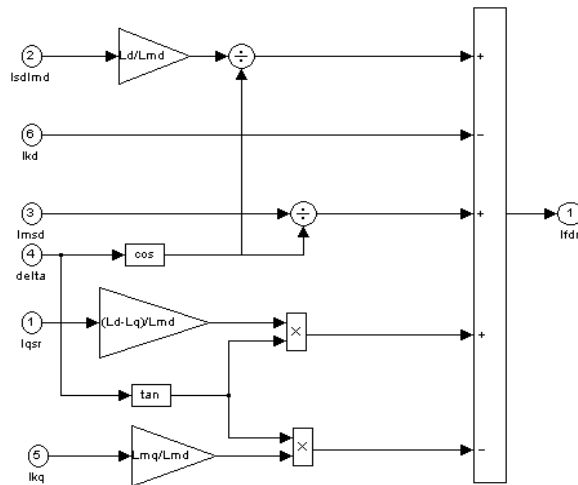
$$I_{sd\lambda} = -I_{qsr} \cdot \sin(\delta) - I_{dsr} \cdot \cos(\delta) \quad (12)$$

$$I_{fdr} \cdot \cos(\delta) = \frac{\psi_s}{L_{md}} - \frac{L_d}{L_{md}} \cdot I_{dsr} \cdot \cos(\delta) - I_{kd} \cdot \cos(\delta) - \frac{L_q}{L_{md}} \cdot I_{qsr} \cdot \sin(\delta) - \frac{L_{mq}}{L_{md}} \cdot I_{kq} \cdot \sin(\delta) \quad (13)$$

Buradan, uyarma akımı;

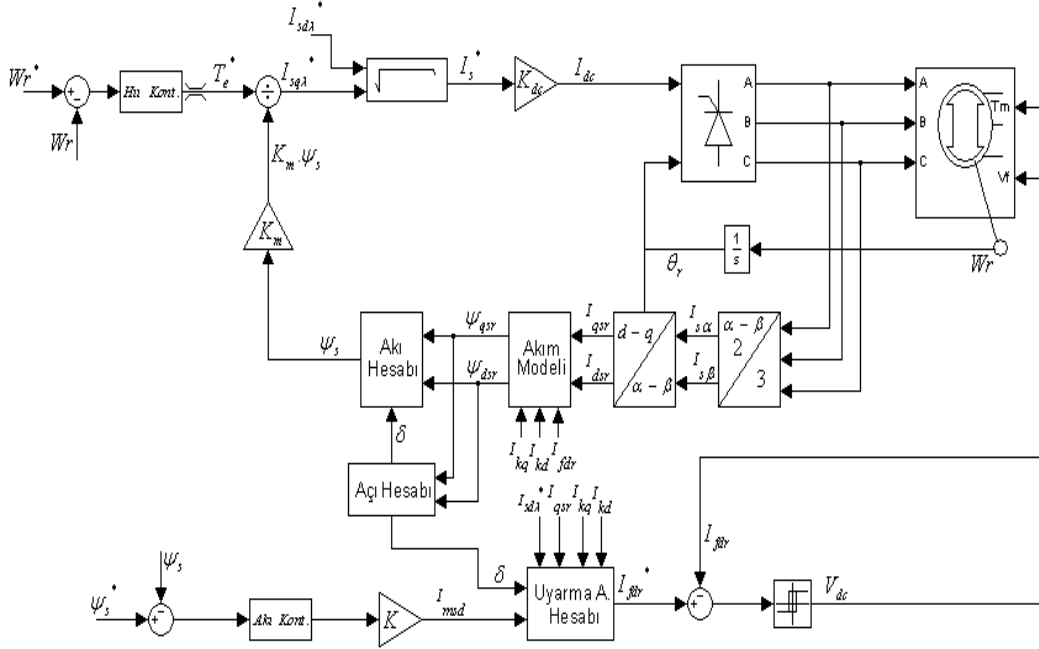
$$I_{fdr} = \frac{I_{msd}}{\cos(\delta)} + \frac{L_d}{L_{md}} \cdot \frac{I_{sd\lambda}}{\cos(\delta)} + \frac{(L_d - L_q)}{L_{md}} \cdot I_{qsr} \cdot \tan(\delta) - I_{kd} - \frac{L_{mq}}{L_{md}} \cdot I_{kq} \cdot \tan(\delta) \quad (14)$$

olarak elde edilir. Stator akısını ve güç faktörünü referans değerinde tutmak için yük momenti değişimine bağlı olarak uyartım akımı da ayarlanmalıdır. Çünkü moment artışı sadece yük açısını arttırmaz. Uyartım akımı da faz farkını sıfırda tutmak için arttırılmalıdır. Denklem 14, blok diagram olarak Şekil 5'deki gibi gösterilir.



Şekil 5. Uyartım akımı hesabına ilişkin blok diagram
 (Figure 5. The block diagram of the excitation current account)

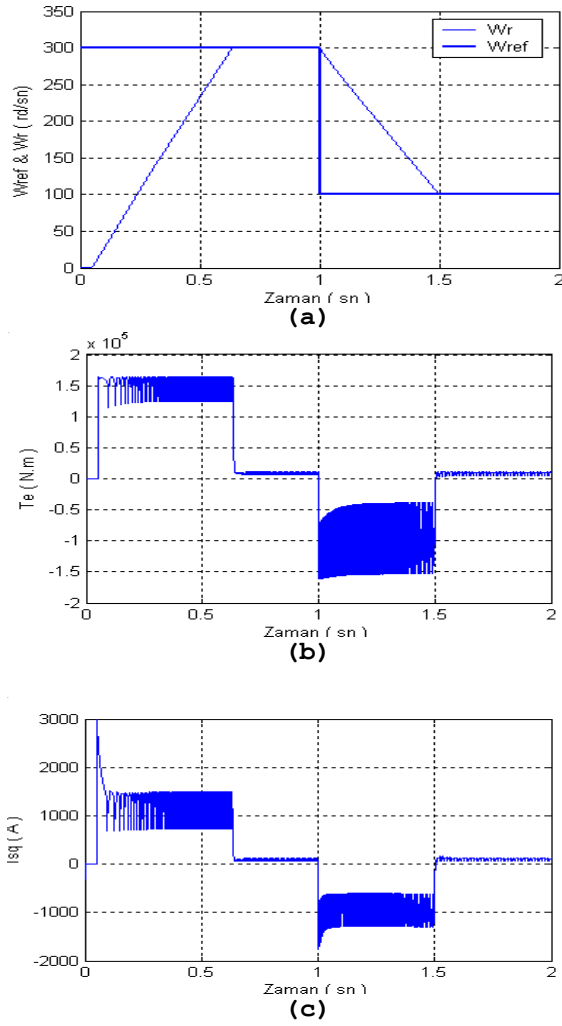
Stator akısına yönlendirme yönteminde, yönlendirme akısı hem doğrudan hem de dolaylı akı belirleme yöntemleriyle belirlenebilir. Bu durumda momentin hızlı bir şekilde kontrolü için akı sabit tutulup, moment I_s akımı ile ayarlanmalıdır. Şekil 6'da senkron motorun akım kaynaklı altı adımlı inverterden beslenme durumu için stator akısı alan yönlendirme kontrolüne ait blok diagramı görülmektedir.



Şekil 6. Stator akısı alan yönlendirmeye ilişkin blok diagramı
(Figure 6. The block diagram of stator flux orientation)

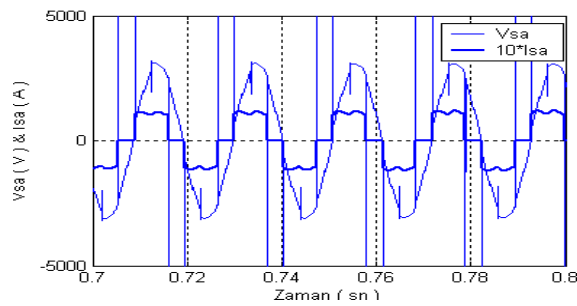
6. STATOR AKISI ALAN YÖNLENDİRME İÇİN OLUŞTURULAN BİLGİSAYAR BENZETİM PROGRAMI (COMPUTER SIMULATION PROGRAM CREATED FOR THE STATOR FLUX FIELD ORIENTATION)

Şekil 7'de senkron motorun altı adımlı akım kaynağı inverterinden beslenme durumu için ve güç faktörü kontrolüne olanak sağlayan stator akısı alan yönlendirmeye ilişkin Matlab/Simulink modeli görülmektedir.



Şekil 8. Senkron motor büyüklüklerinin değişimleri,
a) Hız, b) Moment, c) Stator Q-eksen akımı
(Figure 8. Changes in the size of the synchronous motor
a) Speed, b) Torque, c) Stator q-axis current)

Benzetim programında referans φ değeri, birim güç faktörünü sağlayacak şekilde sıfır olarak girilmiştir. Bu duruma Şekil 9'dan da açıkça görülüyor.



Şekil 9. Faz gerilimi ve faz akımının değişimi
(Figure 9. The change of phase voltage and phase current)

7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Senkron motorun alan yönlendirme kontrolü incelendiğinde, güç faktörü kontrolüne olanak sağlayan stator akısı alan yönlendirmenin senkron motor alan yönlendirme kontrolünde en uygun yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum birim güç faktörü kontrolüne olanak sağlayan senkron motorun stator akısı alan yönlendirmesine ilişkin benzetim programı oluşturularak sonuçları ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Huy, H.L., Jakubowicz, A., and Pacaut, R., (1982), "A self Controlled Synchronous Motor Drive Using Terminal Voltage System", IEEE Transactions on Ind.Appl., 18:1.
2. Orhan, A., (1999), "Büyük Güçlü Senkron Motorların Vektör Kontrolü İçin Yeni Bir Yöntem", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
3. Szabo C., Imecs M., and Incze I.I., (2007), "Synchronous Motor Drive with Controlled Stator-Field-Oriented Longitudinal Armature Reaction", The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Taipei, Taiwan.
4. Szabo C., Imecs M., and Incze I.I., (2008), "Vector Control of the Synchronous Motor Operating at Unity Power Factor", 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2008).
5. Bayer K.H. and Waldmann H., (1972), "Field Oriented Closed-Loop Control of a Synchronous Machine with the the Transvector Control System", Simens Rewiev, 5:220-223.
6. Blashchke, F., (1972), "The Principle of Field Orientation as Applied to the New Transvector Closed-Loop Control System For Rotating Field Machines", Simens Rewiev, 3:112-115.
7. Akın, E., (1994), "Stator Akısı Üzerinden Asenkron Motorun Rotor Akısı Alan Yönlendirmesi İçin Bir Yöntem", Doktora Tezi , Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Elazığ.
8. Ogasawara, S., Agaki, H., and Nabae, A., (1988), "The Generalized Theory of Indirect Vector Control for AC Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, 24:3:470-478.
9. Kelemen, A., (1993), Vector Control of AC Drives, Ecriture Ltd. Budapest
10. Vas, P., (1990), "Vector Control of AC Machine", Oxford Uni. Press. UK
11. Krause P.C., (1987), "Analysis of Electric Machinery", Mc Graw Hill Book Co., Singapore.

EK (APPENDIX)

Benzetim programında kullanılan senkron motor parametreleri aşağıda verilmiştir [11].

$$\begin{array}{ll} U_{f-f} = 4000 \text{ V} & P_b = 5265882 \text{ W} & f_n = 60 \text{ Hz} \\ R_s = 0.03663 \text{ ohm} & & R_{kq} = 0.118 \text{ ohm} \\ R_{kd} = 0.0914 \text{ ohm} & & R_{fd} = 0.00438 \text{ ohm} \\ L_{ls} = 1.24 \cdot 10^{-3} \text{ H} & & L_{lkq} = 9.23 \cdot 10^{-4} \text{ H} \\ L_{mq} = 6.02 \cdot 10^{-3} \text{ H} & & L_{md} = 8.27 \cdot 10^{-3} \text{ H} \\ L_{lkd} = 7.37 \cdot 10^{-4} \text{ H} & & L_{lfd} = 2.14 \cdot 10^{-3} \text{ H} \end{array}$$