

DOĞRUDAN TRANSFER FONKSİYONU YAKLAŞIMI İLE MATRİS DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Hulusi KARACA¹

Ramazan AKKAYA²

^{1,2}Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
Selçuk Üniversitesi, 42075, Kampüs, Konya

¹e-posta: hkaraca@selcuk.edu.tr

²e-posta: akkaya@selcuk.edu.tr

Anahtar sözcükler: Matris Dönüştürücüler, Simülasyon, Modelleme.

ABSTRACT

In this study, the basic working principles of the matrix converter that connects directly the three-phase AC source to the three-phase load have been analyzed. A simple power circuit has been used in implemented system. The control signals of the power switches have been produced using the direct transfer function approach (Venturini method). The modulation strategy of the converter has been explained mathematically in a clear form. Using PSIM that has important facilities in implementation of the power electronic circuits, modelling and numerical simulation of a matrix converter loaded with passive (RL) and active (induction motor) loads has been performed. As a result, input currents, output voltages and frequency spectrum of output voltages obtained from simulations performed in different output frequencies have been presented.

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin kontrol edilmesi ve dönüştürülmesi elektrik mühendisliğindeki en önemli işlemlerden birisidir. Güç elektroniği dönüştürücülerinde ve özellikle de yarı iletken güç elemanlarındaki hızlı gelişmelerle birlikte elektrik enerjisinin kontrolünde de büyük ilerlemeler sağlanmıştır. Güç dönüştürücü ailesinin en ilginç elemanlarından birisi de AC-AC güç dönüşümü sağlayan matris dönüştürücülerdir.

Temel prensibi 1976'da ortaya konulan matris dönüştürücülerdeki gerçek gelişme, 1980 yılında Venturini ve Alesina tarafından yayınlanan çalışmalar ile başlamıştır [1,2]. Bu çalışmalarda güç devresi, iki yönlü anahtarların matrisi olarak sunuldu ve bu sistemin adı matris dönüştürücü olarak tanıtıldı.

Geleneksel topolojilere göre matris dönüştürücülerin aşağıda sıralandığı gibi pek çok avantajı vardır:

- Herhangi bir genlik ve frekansa sahip yük gerilimi üretilebilir.

- İki yönlü anahtarlar kullanıldığından dolayı şebekeye enerji geri dönüşümü yapılmaktadır.
- Şebekeden sinüzoidal giriş akımları çekilmektedir.
- Modülasyon tekniğine bağlı olarak yükün kaynak tarafına yaptığı bozucu etki düzeltilebilir ve kaynak tarafındaki güç faktörü birim değere ayarlanabilir.
- Geleneksel tekniklerle karşılaştırıldığında, enerji depolamak için büyük kondansatörler ve bobinler kullanılmadığından boyut büyük ölçüde azaltılabilir.

Bu avantajlarından dolayı matris dönüştürücü topolojisine büyük ilgi duyulmaktadır [3].

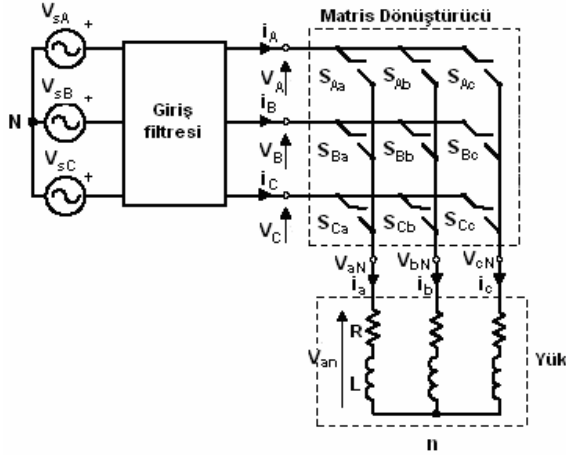
Bununla birlikte, matris dönüştürücülerde kullanılan tam kontrollü iki-yönlü anahtarların eş zamanlı komütasyonunu gerçekleştirmek çok zordur. Çünkü, komütasyon esnasında güç yarı iletkenlerinin hasar görmesine neden olan aşırı akım ve aşırı gerilimler oluşabilmektedir. Bu gerçek, anahtarların güvenli çalışmasını sağlayan yeni komütasyon stratejilerinin geliştirilmesine kadar matris dönüştürücülere olan ilgiyi olumsuz etkilemiştir.

Bu çalışmada, matris dönüştürücülerin temel kavramları anlatıldı ve matematiksel modeli açık bir şekilde verildi. İki-yönlü güç yarı iletkenlerine uygulanan kontrol sinyalleri doğrudan transfer fonksiyonu yaklaşımı (Venturini Metodu) kullanılarak üretildi. Sistemin simülasyonu, güç elektroniği devrelerinin kolayca tasarlanabildiği PSIM paket programı kullanılarak yapıldı.

2. MATRİS DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Matris dönüştürücü, m fazlı kaynağı n fazlı yüke doğrudan (DC ara devre olmaksızın) bağlayan m×n matris şeklinde yerleştirilmiş kontrollü iki-yönlü yarı iletken anahtarlar dizisidir. Araştırmalar çoğunlukla Şekil 1'de görüldüğü gibi 3×3 matris şeklinde yerleştirilmiş anahtarlardan oluşan üç fazlı gerilim

kaynağını 3 fazlı yüke bağlayan matris dönüştürücüler üzerine yoğunlaşmıştır. Sistemde, DC ara devre olmadığından, enerji depolayan büyük kapasitör ve indüktör gibi elemanların kullanılmasına gerek kalmamıştır.



Şekil 1 Matris Dönüştürücülerin Temel Güç Devresi

Şekil 1'deki sistemde;

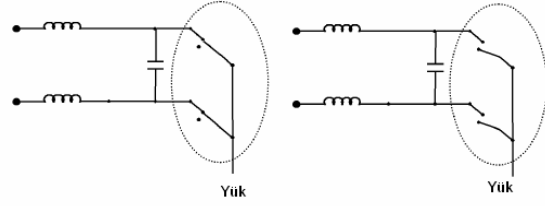
V_{sA}, V_{sB}, V_{sC} : kaynak gerilimlerini,
 V_A, V_B, V_C : matris konverter giriş gerilimlerini,
 i_{sA}, i_{sB}, i_{sC} : kaynaktan çekilen akımlarını,
 i_A, i_B, i_C : matris konverter giriş akımlarını,
 V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : n noktasına göre yük gerilimlerini,
 V_{aN}, V_{bN}, V_{cN} : şebekenin nötr noktasına göre yük gerilimlerini,
 i_a, i_b, i_c : yük akımlarını ifade etmektedir.

Matris dönüştürücülerin güç devresi her iki yöndeki gerilimi bloklayabilen dokuz adet iki-yönlü anahtardan (S_{ij} , $i=\{A,B,C\}$, $j=\{a,b,c\}$) oluşmaktadır. Bu anahtarların iletim durumlarının uygun kombinasyonlarıyla çıkış gerilimi elde edilmektedir. Anahtarların durumları şöyle ifade edilebilir:

$$S_{ij}(t) = \begin{cases} 0 & S_{ij} \text{ anahtarı açıkta} \\ 1 & S_{ij} \text{ anahtarı kapalıysa} \end{cases} \quad (1)$$

Matris dönüştürücülerde komütasyon, tüm zamanlarda iki temel kurala göre kontrol edilmek zorundadır. Bu kurallar, dönüştürücünün çıkış fazlarından birinde kullanılan iki anahtar düşünülerek gösterilebilir.

İlk kural olarak; dönüştürücünün girişi, gerilim kaynağı olduğundan Şekil 2a'da görülen giriş hattında kısa devreden kaçınmak gereklidir. İkinci kural olarak; indüktif yük durumunda, yük akımının aniden kesilmemesi gerektiği için Şekil 2b'de görülen matris dönüştürücünün çıkış hattında açık devreden kaçınmak gereklidir.



Şekil 2 Kaçınılması Gereken Durumlar

Şekil 1'de verilen matris dönüştürücünün matematiksel modeli, Kirchhoff'un gerilim ve akım kanunu uygulanarak aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\begin{bmatrix} v_{aN}(t) \\ v_{bN}(t) \\ v_{cN}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ba}(t) & S_{Ca}(t) \\ S_{Ab}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Cb}(t) \\ S_{Ac}(t) & S_{Bc}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_A(t) \\ v_B(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ab}(t) & S_{Ac}(t) \\ S_{Ba}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Bc}(t) \\ S_{Ca}(t) & S_{Cb}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Denklem (2) ve (3)'ten de anlaşılacağı gibi çıkış gerilimleri, sinüzoidal üç giriş gerilimi kullanılarak giriş akımları ise, üç çıkış akımı kullanılarak elde edilmektedir.

3. DÖNÜŞTÜRÜCÜ MODÜLASYON MATRİSİNİN ÇIKARTILMASI

Modülasyon, dokuz anahtarın her biri için uygun anahtarlama sinyallerini üretmek amacıyla kullanılan bir işlemdir. Burada modülasyon matrisinin doğrudan transfer fonksiyonu yaklaşımı metoduyla üretilmesinden bahsedilecektir. Modülasyonun amacı, sabit frekans ve sabit genlikli giriş gerilimlerinden değişken frekans ve değişken genlikli sinüzoidal çıkış gerilimleri üretmektir.

t_{ij} : S_{ij} anahtarının iletimde kalma süresi,

T_s : örnekleme süresi ve

$m_{ij}(t) = t_{ij}/T_s$: S_{ij} anahtarının iş süresi (duty cycle) olmak üzere modülasyon matrisi (düşük frekanslı transfer matrisi) şöyle ifade edilebilir:

$$M(t) = \begin{bmatrix} m_{Aa}(t) & m_{Ba}(t) & m_{Ca}(t) \\ m_{Ab}(t) & m_{Bb}(t) & m_{Cb}(t) \\ m_{Ac}(t) & m_{Bc}(t) & m_{Cc}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Buna göre, her bir çıkış faz gerilimleri

$$\begin{bmatrix} v_{aN}(t) \\ v_{bN}(t) \\ v_{cN}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{Aa}(t) & m_{Ba}(t) & m_{Ca}(t) \\ m_{Ab}(t) & m_{Bb}(t) & m_{Cb}(t) \\ m_{Ac}(t) & m_{Bc}(t) & m_{Cc}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_A(t) \\ v_B(t) \\ v_C(t) \end{bmatrix}$$

olur ve denklem (5)'teki gibi daha basit bir ifadeyle gösterilebilir.

$$[v_o(t)] = [M(t)][v_i(t)] \quad (5)$$

Benzer şekilde giriş akımları da denklem (6)'daki ifadeye karşılık gelmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{Aa}(t) & m_{Ab}(t) & m_{Ac}(t) \\ m_{Ba}(t) & m_{Bb}(t) & m_{Bc}(t) \\ m_{Ca}(t) & m_{Cb}(t) & m_{Cc}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}$$

$$[i_i(t)] = [M(t)]^T [i_o(t)] \quad (6)$$

Aynı anda sadece bir giriş hattı, matris dönüştürücünün herhangi bir çıkışına bağlanabilir[3]. Bu kısıtlama denklem (7) ile ifade edilebilir.

$$\sum_{i=A,B,C} m_{ia}(t) = \sum_{i=A,B,C} m_{ib}(t) = \sum_{i=A,B,C} m_{ic}(t) = 1 \quad (7)$$

Matris dönüştürücünün giriş gerilimleri:

$$[v_i(t)] = V_{im} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) \\ \cos(\omega_i t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega_i t + 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (8)$$

dir ve yükün alçak geçiren karakteristiğinden dolayı çıkış akımları sinüzoidaldir [4].

$$[i_o(t)] = I_{om} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t + \phi_o) \\ \cos(\omega_o t + \phi_o + 2\pi/3) \\ \cos(\omega_o t + \phi_o + 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (9)$$

İstenilen çıkış gerilim vektörü ve istenilen giriş akım vektörünün sırasıyla denklem (10) ve (11)'deki gibi olduğu varsayılabilir.

$$[v_o(t)] = qV_{im} \begin{bmatrix} \cos(\omega_o t) \\ \cos(\omega_o t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega_o t + 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[i_i(t)] = qI_{om} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t + \phi_i) \\ \cos(\omega_i t + \phi_i + 2\pi/3) \\ \cos(\omega_i t + \phi_i + 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (11)$$

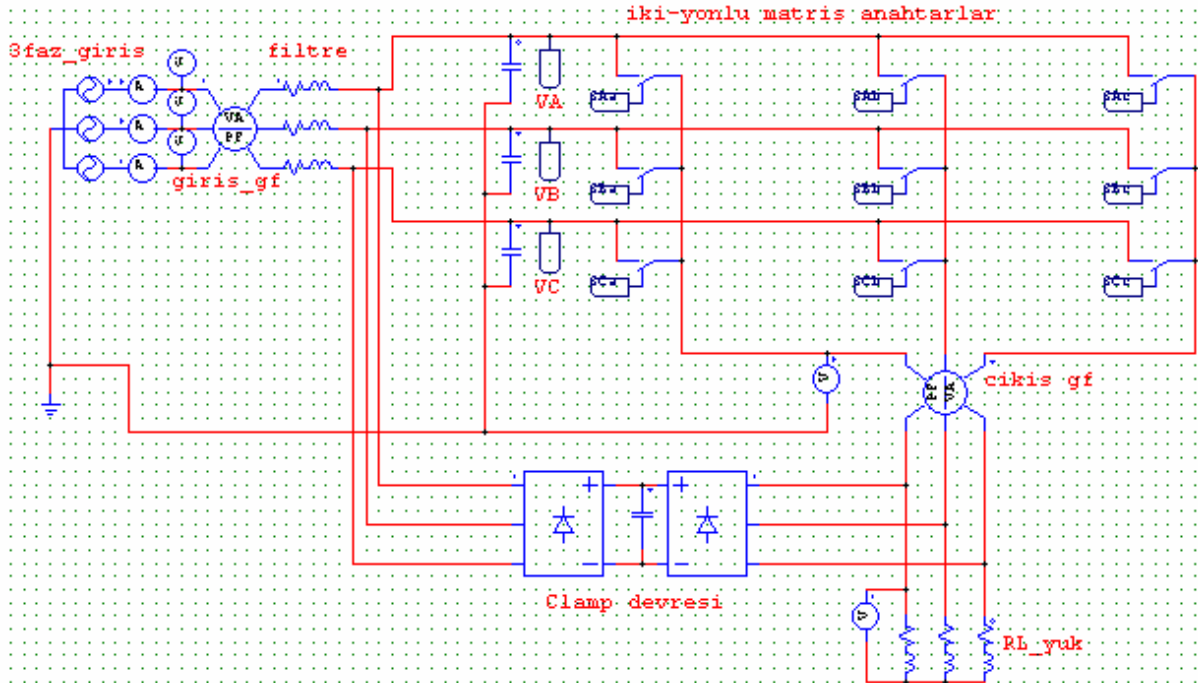
Venturini tarafından ortaya atılan modülasyon matrisinin iş süreleri denklem (12)'deki ifade ile çok basit ve anlaşılır bir şekilde hesaplanabilir [5].

$$m_{ij} = \frac{t_{ij}}{T_s} = \frac{1}{3} \left[1 + \frac{2v_i v_j}{V_{im}^2} \right] \quad (12)$$

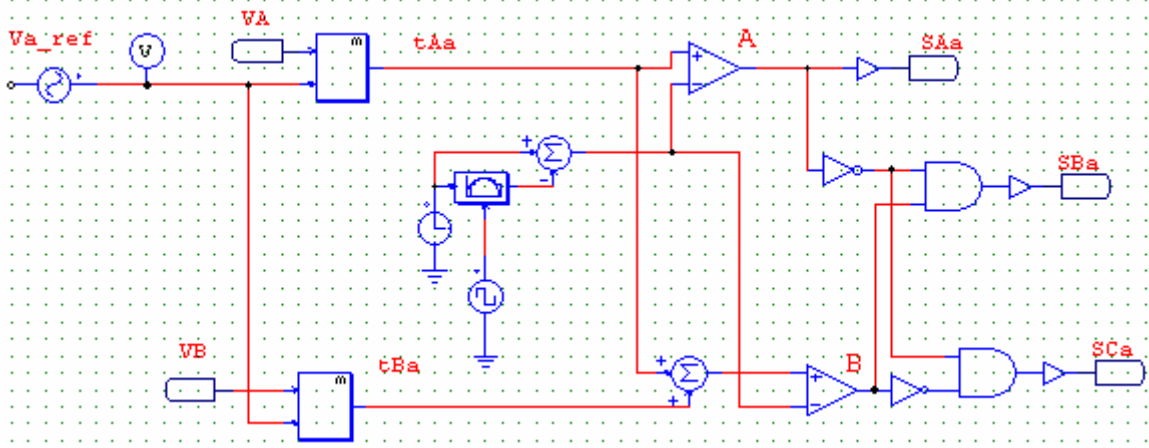
$$i = \{A, B, C\}, j = \{a, b, c\}$$

4. SİSTEMİN SİMÜLASYONUNUN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Sistemin simülasyonu, PSIM paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önce Şekil 3'te görülen dokuz adet iki-yönlü anahtarlardan oluşan güç devresi tasarlandı ve oluşması muhtemel aşırı gerilimlerin anahtarlara hasar vermesini engellemek için bir clamp (bastırıcı) devresi ilave edildi.



Şekil 3 Matris Dönüştürücünün Güç Devresi Simülasyon Modeli



Şekil 4 Bir Çıkış Fazı için Anahtarların Sürme Sinyallerinin Elde Edilmesi

Simülasyonun en önemli kısmı iki-yönlü anahtarların anahtarlama fonksiyonlarının ($S_{ij}(t)$) üretilmesidir. Bu fonksiyonlar, gerçek dönüştürücüdeki güç anahtarlarının kapı sürme sinyallerine karşılık gelmektedir. PSIM'deki matematiksel fonksiyon bloğu ile bu anahtarların iletim süreleri denklem (13)'e göre hesaplandı ve daha sonra $S_{ij}(t)$ değerleri üretildi.

$$t_{ij} = \frac{1}{3} T_s \left[1 + \frac{2v_i v_j}{V_{im}^2} \right] \quad (13)$$

$$i = \{A, B, C\}, j = \{a, b, c\}$$

Bu anahtarlama fonksiyonlarının sadece üçünün üretilmesi Şekil 4'te açık bir şekilde verilmiştir. Geriye kalan iletim süreleri aynı şekilde kolayca elde edilebilir. Ancak diğer anahtarlama fonksiyonlarını elde etmek için çok daha kolay bir yol vardır. Aşağıdaki mantıksal ifadelerle diğer anahtarlama fonksiyonları bulunabilir [6].

$$S_{Bj} = \text{not}(A) \text{ and } B \quad (14)$$

$$S_{Cj} = \text{not}(A) \text{ and } \text{not}(B)$$

5. SİMÜLASYON SONUÇLARI

$R = 10 \Omega$ ve $L = 0.03 \text{ H}$ değerlerine sahip bir RL yük için aşağıdaki parametreler kullanılarak farklı çıkış frekanslarında ayrı ayrı simülasyonlar gerçekleştirildi.

Fazlararası kaynak gerilimi: 380 V, 50 Hz

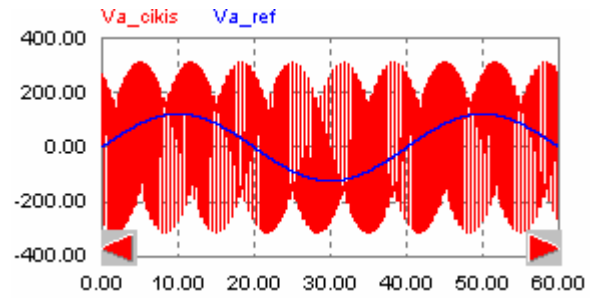
Gerilim kazancı (q): 0.486

Anahtarlama frekansı (f_f): 2 kHz

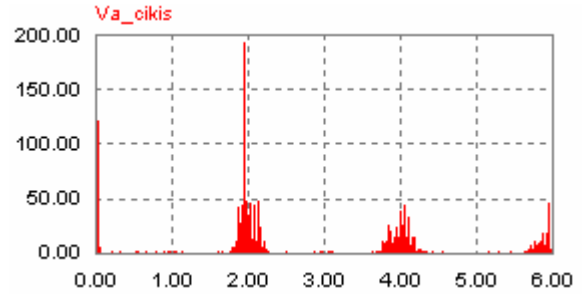
Filtre direnci (R_f): 0.1Ω

Filtre indüktansı (L_f): 0.03 H

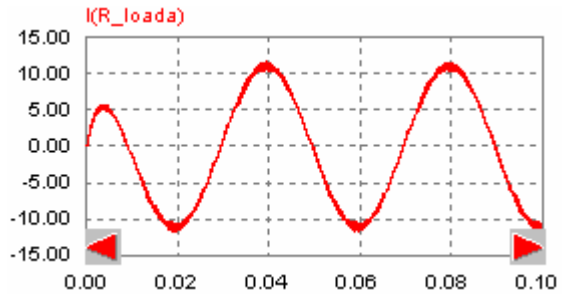
Filtre kapasitansı (C_f): 10 μF



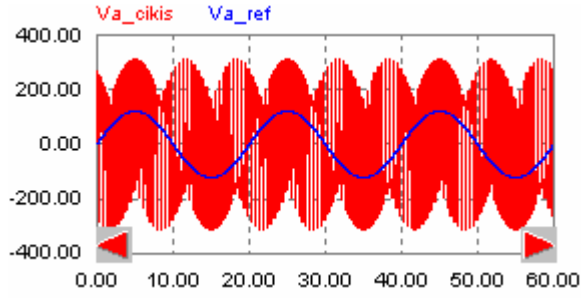
Şekil 5 Çıkış Gerilimi (25 Hz) ve Referans Gerilimi (RL yük altında)



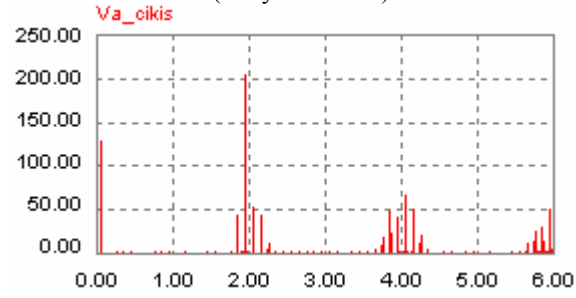
Şekil 6 Çıkış geriliminin FFT Dalga Şekli (RL yük altında)



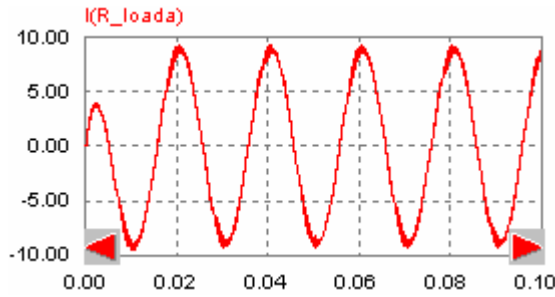
Şekil 7 Yük akımı (25 Hz) (RL yük altında)



Şekil 8 Çıkış Gerilimi (50 Hz) ve Referans Gerilimi (RL yük altında)

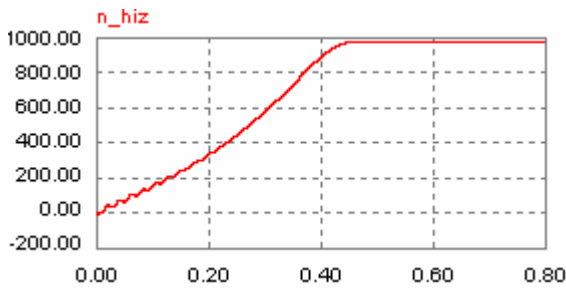


Şekil 9 Çıkış geriliminin FFT Dalga Şekli (RL yük altında)

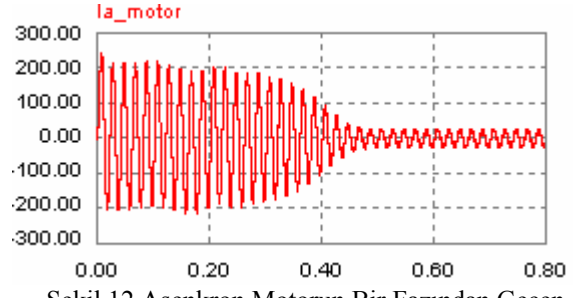


Şekil 10 Yük akımı (50 Hz) (RL yük altında)

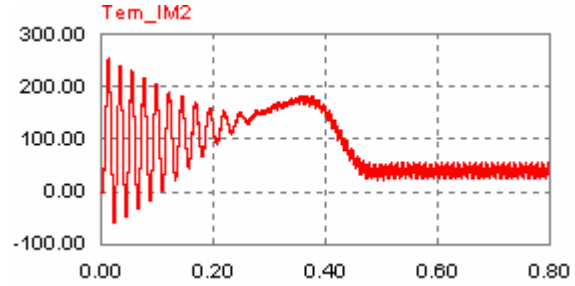
6 kutuplu, $R_s=0.294 \Omega$, $L_s= 1.39 \text{ mH}$, $R_r= 0.156 \Omega$, $L_r= 0.74 \text{ mH}$, $L_m= 41 \text{ mH}$ değerlerine sahip bir asenkron motor için aşağıdaki parametreler kullanılarak 50 Hz çıkış gerilimine sahip simülasyonlar gerçekleştirildi
 Fazlararası kaynak gerilimi: 380 V, 50 Hz
 Gerilim kazancı (q): 0.5
 Anahtarlama frekansı (f_f): 5 kHz
 Filtre direnci (R_f): 0.1 Ω
 Filtre indüktansı (L_f): 0.03 H
 Filtre kapasitansı (C_f): 10 μF



Şekil 11 Asenkron Motorun Yol Alma Eğrisi



Şekil 12 Asenkron Motorun Bir Fazından Geçen Akım



Şekil 13 Asenkron Motorun Moment Eğrisi

6. SONUÇLAR

Doğrudan transfer fonksiyonu yaklaşımı ile üç-fazlı kaynağı üç-fazlı yüke bağlayan matris dönüştürücünün modellenmesi ve simülasyonu gerçekleştirildi ve matris dönüştürücünün temel çalışma prensiplerinden bahsedildi. Simülasyonun gerçekleştirilmesi için gereken denklemler açık ve anlaşılır bir şekilde verildi.

Gerçekleştirilen modelin çeşitli yük koşulları altında çok iyi sonuçlar ürettiği gözlemlendi.

KAYNAKLAR

- [1] Venturini M., A New Sine Wave in Sine Wave out, Conversion Technique Which Eliminates Reactive Elements, PROCEEDINGS OF POWERCON 7, pp. E3/1-E3/15, 1980.
- [2] Venturini M., Alesina A., The Generalized Transformer: A New Bidirectional Sinusoidal Waveform Frequency Converter with Continuously Adjustable Input Power Factor, IEEE PESC'80, pp.242-252, 1980.
- [3] Wheeler P.W., Clare J.C., Empringham L., Bland M., Matrix Converters: The Technology and Potential for Exploitation.
- [4] Rodriguez J., Silva E., Blaabjerk F., Modelling, Analysis and Simulation of Matrix Converters.
- [5] Wheeler P.W., Rodriguez J., Clare J.C., et al. Matrix Converters: A Technology Review, IEEE TRANSACTION ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol. 49, No.2, pp.276-288, 2002.
- [6] Rodriguez J., Silva E., Blaabjerk F., et al. Matrix Converter Controlled with The Direct Transfer Function Approach: Analysis, Modelling and Simulation, INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRONICS, Taylor & Francis, Vol.92, 2005.