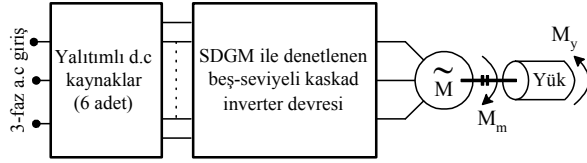


simülasyonlar sistemi görev tanımlayan kesin kontrol deyimleriyle oluştururlar. Oldukça karmaşık bir kullanıma sahiptirler. Prosedürel olmayan simülasyonlar ise sistemi primitifler ve parametre değerlerini birbirine bağlayarak oluşturulmaktadır. Bu simülasyonlar kullanıcı açısından daha basit ve kullanışlı olduğundan daha fazla kullanılır.

Fiziksel seviye simülasyonlarından en çok kullanılanlara örnek olarak ADAMS (Genel Amaçlı Mekanizma Analiz Programı), PSPICE (Analog Elektrik-Elektronik Devre Simülasyonu) ve SpeedUp (Kimyasal Prosesler için) verilebilir (3-6). PSPICE fiziksel tasarım seviyesinde elektrik-elektronik gibi tek bir bilim dalı için simülasyon olarak kullanılmakla beraber, fonksiyonel tasarım seviyesinde de birçok matematiksel model bloklarının oluşturulmasıyla birden fazla bilim dalını barındıran sistemlerin modellenmesi ve simülasyonu için kullanılabilir.

Bu makalede; çok disiplinli (elektrik, mekanik) bir sistemin modellenmesi ve simülasyonu için PSPICE kullanımı ve kütüphane oluşturulması konuları, çok seviyeli bir inverterle beslenen bir asenkron motorun davranışlarını simüle eden bir sistem üzerinde açıklanacaktır. Sistemin blok şeması Şekil.1’de verilmiştir. Sistemde inverter simüle edilerek, çıkış işaretleri asenkron motoru ve yükü modelleyen fonksiyonel matematiksel modele uygulanıp analizler sonuçları verilecektir.



Şekil 1. Sistemin blok şeması

2. ÇOK SEVİYELİ İNVERTERİN PSPICE MODELİ

Çok seviyeli kaskad bağlı inverterler tek fazlı tam köprü inverterlerin seri bağlanmasından oluşturulmaktadır (7). Beş seviyeli bir kaskad bağlı inverter devresi Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 3’te ise tam köprü devresinin PSPICE modeli görülmektedir. Köprüde kullanılan anahtarlar üretici firma International Rectifier (IR)’nin IRG4PC40UD IGBT’lerinin PSPICE modelidir (8). Model için her bir fazı oluşturan tam köprü inverter yapısının PSPICE kodlaması aşağıda verilmiştir. Bu şekildeki köprülerin Şekil 2.’deki gibi bağlanmasıyla kaskad beş-seviyeli inverter devresinin güç devresi modellenmiş olmaktadır.

V1 71 29 100V DC

**1.KÖPRÜNÜN SAĞ KOLU

V11 71 711 0

V12 74 779 0

x11 711 72 74 IRG4PC40UD; C G E

x12 779 76 20 IRG4PC40UD; C G E

**1.KÖPRÜNÜN SOL KOLU

V21 71 811 0

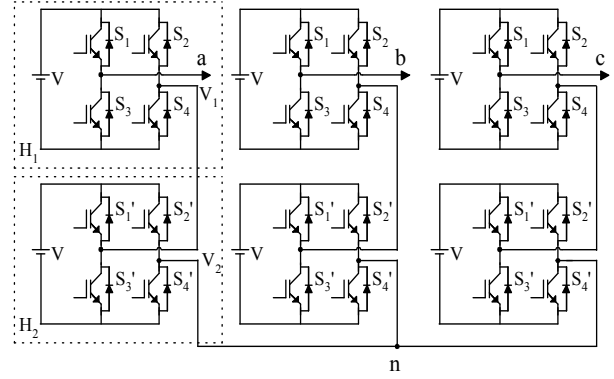
V22 73 789 0

x13 811 76 73 IRG4PC40UD; C G E

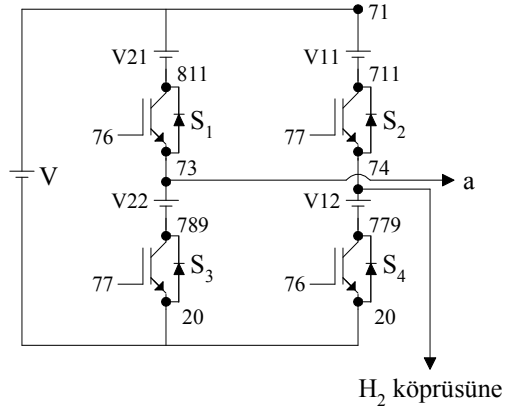
x14 789 77 20 IRG4PC40UD; C G E

.SUBCKT IRG4PC40UD 1 2 3 ; C G E

.ENDS

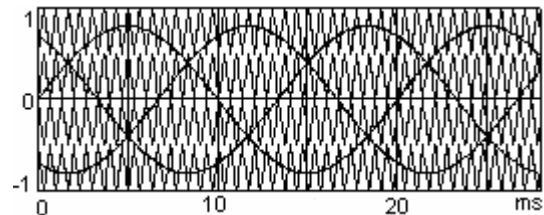


Şekil 2. Beş-seviyeli kaskad bağlı inverterin bağlantı şeması.



Şekil 3. Beş-seviyeli kaskad bağlı inverterin bir faz tek köprü yapısının PSPICE için kullanılan modeli.

Şekil 2’de verilen inverterin güç devresindeki anahtarlar doğal örneklemeli Sinüs-Üçgen Darbe Genişlik Modülasyonlu (SDGM) işaretler ile sürülmüştür. Bu modülasyon tekniğinde inverterin seviye sayısına bağlı olan taşıyıcı üçgen dalga işaretler ile üç-fazlı sinüzoidal referans işaretlerin karşılaştırılması ile DGM’li işaretler elde edilmektedir (9). DGM’li işaretleri elde etmek için üretici firmasından elde edilen PSPICE Opamp modelleri kullanılmıştır. Şekil 4’te beş-seviyeli inverter için PSPICE’den elde edilen taşıyıcı ve referans işaretler görülmektedir.



Şekil 4. Beş-seviyeli inverter için taşıyıcı ve referans işaretleri

3. ÜÇ FAZLI MOTOR VE MEKANİK MOMENTİN PSPİCE BENZETİMİ

Modellenen üç-fazlı beş-seviyeli inverter devresi için yük olarak bir üç-fazlı asenkron motor kullanılmıştır. Bazı ihmaller yapılarak üç fazlı asenkron motorun davranışını incelemek için aşağıdaki denklemlerin kullanılması yeterlidir (1,10).

$$\begin{aligned} \vec{u}_s &= R_s \vec{i}_s + L_s \frac{d\vec{i}_s}{dt} + M \frac{d(\vec{i}_r e^{j\theta})}{dt} \\ \vec{u}_r &= R_r \vec{i}_r + L_r \frac{d\vec{i}_r}{dt} + M \frac{d(\vec{i}_s e^{-j\theta})}{dt} \\ M_m &= \frac{N_p M}{3} \text{Im}[\vec{i}_s (\vec{i}_r e^{j\theta})^*] \\ M_m - M_y &= M_d + M_{sür} \end{aligned} \quad (1)$$

Bu bağıntılardaki u_s ve u_r üç-fazlı stator ve rotor gerilimleri, M_m motor momenti, M_y yük momenti ve M_d dinamik moment ve $M_{sür}$ sürtünme momentidir. Bu bağıntıların geliştirilmesi ile asenkron motorun üç-fazlı modeli doğrusal olmayan diferansiyel denklem takımlarının çözülmesi ile elde edilmektedir. Analog simülatörler ile gerçekleştirilebilecek bu üç-fazlı model PSPİCE’ta Opamp’lı devrelerle yapılacak diferansiyel denklem çözücülerini ile rahatlıkla oluşturulabilmektedir. Asenkron motorun çokça kullanılan bir modeli de, d-q sistem modelidir. Burada üç-fazlı sistem uygun dönüşüm bağıntılarıyla d-q eksen sistemine dönüştürülüp işlemler burada gerçekleştirilir ve sonuçlar uygun bir şekilde tekrar üç fazlı sisteme dönüştürülür. Üç-fazlı stator faz gerilimlerinden, d-q eksen takımına dönüşüm için aşağıda verilen (2) denklemi kullanılarak gerçekleştirilebilir.

$$\begin{aligned} u_{sd} &= u_{s1} - \frac{1}{2}(u_{s2} + u_{s3}) \\ u_{sq} &= \frac{\sqrt{3}}{2}(u_{s2} - u_{s3}) \end{aligned} \quad (2)$$

Burada, u_{s1} , u_{s2} ve u_{s3} stator faz gerilimleridir. Üç-fazlı asenkron motorun d-q eksen sisteminde geçerli olan denklemleri aşağıda verilmiştir (1,10).

$$\begin{aligned} u_{ds} &= R_s i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} + M \frac{di_{dr}}{dt} \\ u_{qs} &= R_s i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + M \frac{di_{qr}}{dt} \\ u_{dr} &= R_r i_{dr} + M \frac{di_{ds}}{dt} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} + \frac{d\epsilon}{dt} (M i_{qs} + L_r i_{qr}) \\ u_{qr} &= R_r i_{qr} + M \frac{di_{qs}}{dt} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} + \frac{d\epsilon}{dt} (M i_{ds} + L_r i_{dr}) \\ M_m &= \frac{N_p M}{3} (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \end{aligned} \quad (3)$$

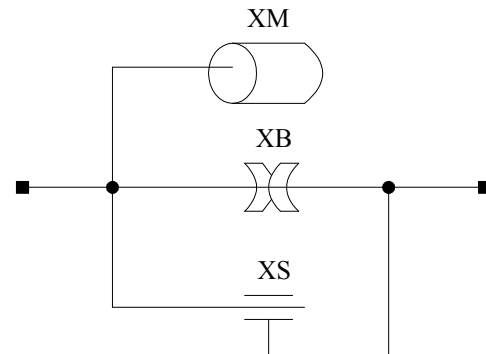
Motorun stator akımları ise aşağıda verilen denklem yardımıyla elde edilebilir.

$$\begin{aligned} i_{s1} &= \frac{2}{3} i_{sd} \\ i_{s2} &= \frac{2}{3} \left[-\frac{1}{2} i_{sd} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{sq} \right] \\ i_{s3} &= \frac{2}{3} \left[-\frac{1}{2} i_{sd} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{sq} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

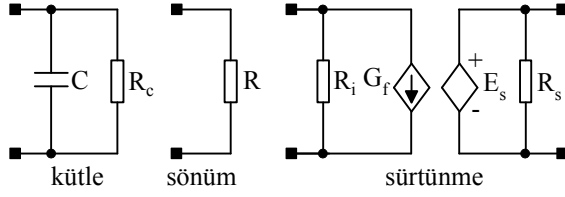
Motor miline yansıyan mekanik moment; yük momenti (M_y), dinamik (hareket-ivmelendirme, M_d) moment ve sürtünme ($M_{sür}$) momentlerinden oluşur. Sürtünme momentinin de; yapışkanlık (viskozite) sürtünme, statik sürtünme ve kinetik sürtünme momentleri olarak üç bileşeni vardır. Yapışkanlık sürtünme momentleri dönüş hızıyla doğrudan orantılıdır. Statik sürtünme momentleri yüzeyin özelliklerine bağlı olarak oluşur ve genellikle ihmal edilir. Kinetik sürtünme momentleri ise hızdan bağımsız olarak oluşur. Kuru sürtünme olarak ta adlandırılan bu moment, dönüş yönünden bağımsız olarak bir yük gibi davranır (11). Denklem (5)’te mekanik momentin bileşenleri verilmektedir.

$$M_{mek} = M_y + j \frac{dw}{dt} + M_{sür} \quad (5)$$

Eylemsizlik kütlesi (j) enerjii kapasitif bir etkiyle depolayan bir eleman gibi modellenebilir. $M_{sür}$ sürtünme momentinin yapışkanlık sürtünme bileşeni dönel sönümleyici olarak ta adlandırılmaktadır. Dönel sönümleyici katsayısı B olarak tanımlanırsa yapışkanlık sürtünmesi momentini; B ile w açısal hızın çarpımı şeklindedir. Şekil 5’de mekanik momentin bileşenleri görülmektedir. Burada XM eylemsizlik momentini, XB yapışkanlık sürtünmesi momentini, XS statik ve dinamik sürtünme momentlerini temsil eder. Eğer yük momenti hızdan bağımsız karakterde ise sürtünme momentleri içerisine katılabilir. Mekanik momentin elektriksel devre elemanları ile modellenebilmesini sağlayan, mekanik-elektrik dönüşüm analogisi ise Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 5. Mekanik momentin bileşenleri



Şekil 6. Mekanik moment bileşenlerinin elektriksel benzetimi

Burada; eylemsizlik kütlesi bir RC devresi ile, sönüm katsayısı B, uygun değerli bir direnç değeri (R) ile verilmiştir. Dinamik ve statik sürtünme momenti ise sadece sistem parametreleri ile hesaplanamayacağından, davranış modeli ile elde edilir. Bu momentlerin davranış modeli ise; G_f akım kaynağı üzerindeki gerilime bağlı olan bir gerilim kontrollü gerilim kaynağı ile verilebilir (1).

PSPICE’ta mekatronik sistemi oluşturan bileşenlerin bir kısmı fonksiyonel tasarım seviyesinde (asenكرون motor) ve bir kısmı da fiziksel tasarım (fiziksel simülasyonlar kullanılarak) seviyesinde (inverter ve dinamik moment) oluşturularak sistem analiz edilebilmektedir. Fonksiyonel tasarım seviyesindeki modeller PSPICE’ta genellikle, bloklar, cebrik ve diferansiyel denklemler, transfer fonksiyonları vb. matematiksel fonksiyonlardan oluşmaktadır. Bu şekilde oluşturulmuş eleman modelleri bir kütüphaneden (mekatro.lib vb.) çağrılarak program içerisinde kullanılmaktadır. Aşağıdaki PSPICE program parçası, motor ve mekanik moment modellerinin *mekatro.lib* isimli bir dosyadan çağrılıp kullanılmasına bir örnektir.

```
xmot 1210 2210 3210 w0 acmot3f params: Rs={Rs}
Rr={Rr} M={M} Ls={Ls} Lr={Lr}
```

```
+Jm={Jm} B={B} Wm={Wm} Np={Np}
```

```
.param Rs=3.35 Rr=1.99 Ls=0.17 Lr=0.17 +M=0.16373
Np=2 Jm=.015 B=15n Wm=5 Np=2
```

```
.param w0=0 ; Başlangıç hızı
```

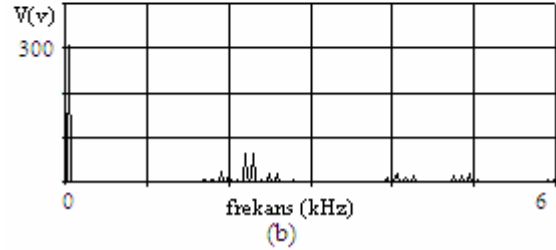
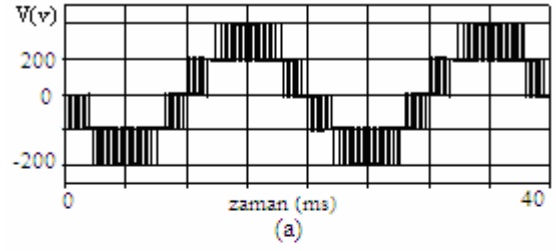
```
xload w mass params: m=0.015
```

```
.lib d:\mekatro.lib; d sürücüsündeki Mekatronik
kütüphanesi dosyası
```

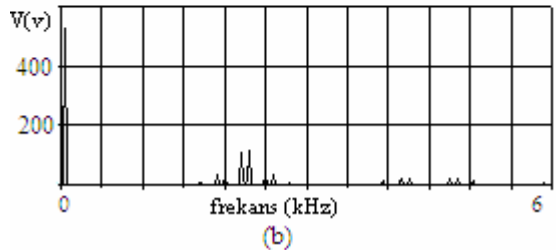
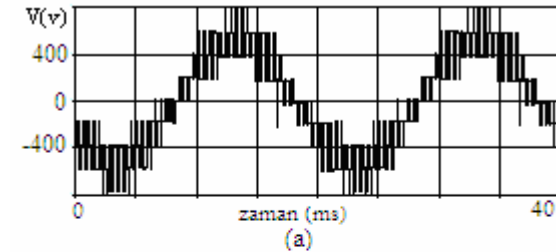
Burada xmot ve xload, *mekatro.lib* dosya isimli kütüphaneden çağrılan motor ve yük momentini modelleyen alt devrelerdir. Kullanıcının gerek motor ve dinamik moment gerek sürtünme momentiyle ilgili değerleri seçebilmesi, “.param” komutuyla kolaylıkla yapılabilir.

4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bölüm 3’te açıklanan PSPICE modellerine göre çalıştırılan PSPICE programından elde edilen sonuçlar Şekil 7-14 arasında verilmiştir. Analizlerde, kaskad bağlı inverterin her bir köprüsü 200 V dc izoleli kaynaktan beslenmiş olup, çıkış frekansı 50 Hz, anahtarlama frekansı 2,25 kHz ve modülasyon indeksi ise 0,8 olarak alınmıştır. Simülasyon çalışmalarında ek’te parametreleri verilen bir asenكرون motor kullanılmıştır.



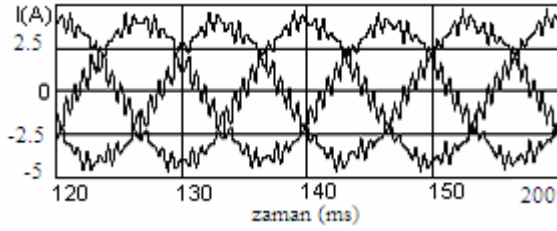
Şekil 7. (a) Beş-seviyeli inverterin çıkış faz-nötr gerilimi (b) Faz-nötr geriliminin harmonik analizi.



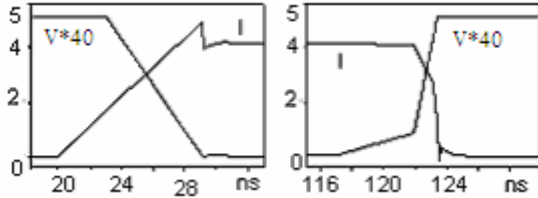
Şekil 8. (a) Beş-seviyeli inverterin çıkış faz-faz gerilimi, (b)Faz-faz geriliminin harmonik analizi.

Şekil 7’de beş-seviyeli inverterin faz-nötr çıkış gerilimi ve onun harmonik analizi görülmektedir. Şekil 8’de ise aynı şartlarda faz-faz gerilimi ve onun harmonik analizi verilmiştir. Harmonik analizleri, PSPICE programının FFT komutuyla elde edilmiştir. Analizlerden de görüldüğü gibi faz ve faz-faz gerilimlerinde oluşan harmonik bileşenler, anahtarlama frekansı ve katları civarında oluşmaktadır. Dolayısıyla anahtarlama frekansı yüksek seçilerek istenmeyen yakın harmoniklerin oluşması önlenmiştir.

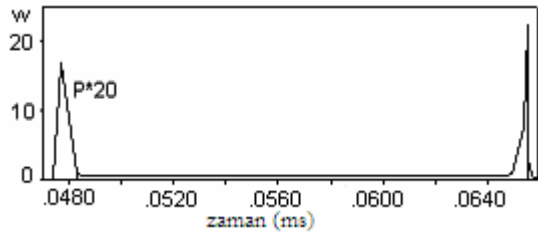
Şekil 9’da üç-fazlı motor akımının değişimi verilmektedir. Şekil 10’da fiziksel tasarım seviyesinde modellenmiş inverterin bir anahtarı (IGBT) için iletme girme ve kesime gitme geçici durumlarındaki anahtar akımı ve geriliminin zamana göre değişimi görülmektedir. Şekil 11’de ise inverterin bir anahtarı için iletim ve kesim durumlarında anahtarlama kayıp gücünün zamana göre değişimi verilmiştir.



Şekil 9. Üç fazlı motor akımları

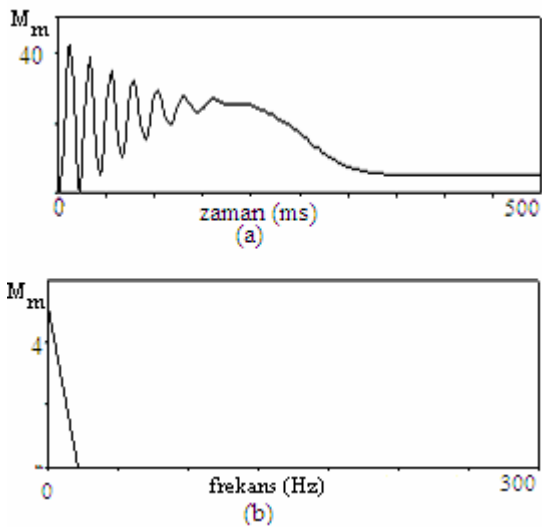


Şekil 10. İnverterin herhangi bir anahtarının iletime girme ve kesime gitme geçici durumları.

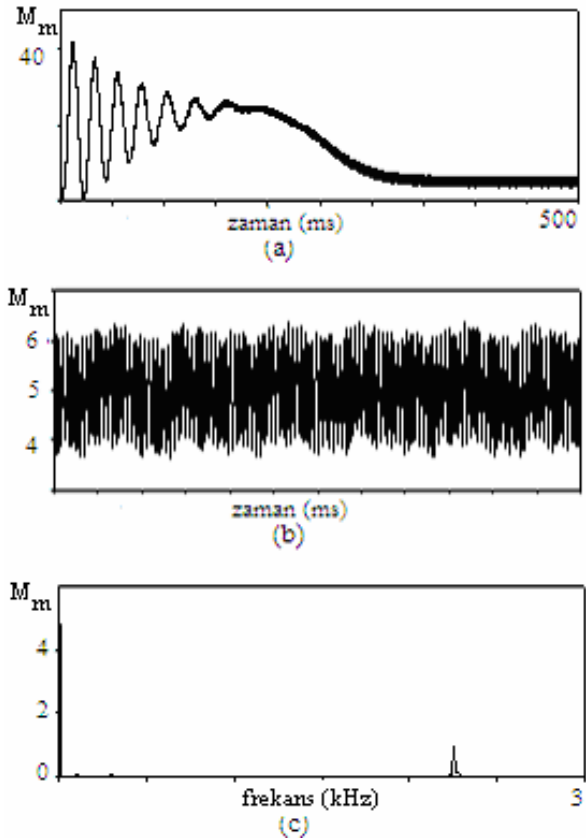


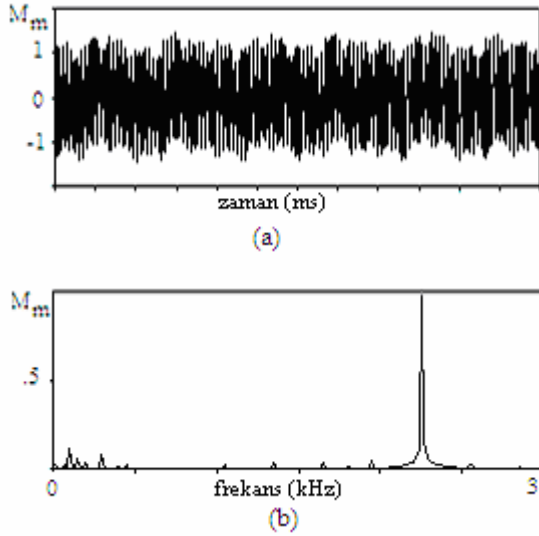
Şekil 11. İnverterin herhangi bir anahtarı için anahtarlama kayıpları ile iletim kayıplarının değişimi.

Bu çalışmada olduğu gibi, eğer yarıiletken anahtarlar gerçeğine yakın bir şekilde modellenilebilirse (PSPICE buna imkân vermektedir), üzerlerindeki ısıya harcanan kayıp güç kolaylıkla doğru bir şekilde elde edilebilir. Bu durum Şekil 11'de görülmektedir. Buradan hareketle yarıiletken anahtarlar için soğutucu hesaplamaları da kolaylıkla yapılabilir.

Şekil 12. Yüklü durumda sinüzoidal gerilimle beslenen motor için (a) momentinin zamana göre değişimi, (b) momentin harmonik analizi ($f=50$ Hz, $M_y = 5$ Nm).

Şekil 12'de sinüzoidal kaynaktan beslenen motorun yol alma ve sürekli durum sürecindeki momentin değişimi ve sürekli durum için momentin harmonik analizi verilmiştir. Şekil 13'te ise beş-seviyeli kaskad bağlı inverterden beslenen motor momentinin zamana göre değişimi, sürekli haldeki momentin değişimi ve onun harmonik analizi görülmektedir. Aynı inverterden beslenen motorun yüksüz çalışma durumundaki, sürekli durum momentini ve onun harmonik analizi ise Şekil 14'de verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi, sinüzoidal kaynaktan beslenen motor momentinde harmonikler oluşmamaktadır. Ancak inverter çıkışından beslenen motor momentinde az da olsa harmonikler mevcuttur. Bu harmonikler faydalı moment üretmezler ancak, birbirine yakın tek ve çift sayılı bileşenler salınım momentleri üretmektedirler.

Şekil 13. Yüklü durumda beş-seviyeli inverterle beslenen motor için (a) momentinin zamana göre değişimi, (b) sürekli durumda moment değişimi ve (c) sürekli durumda momentin harmonik analizi. ($f=50$ Hz, $M_y = 5$ Nm)



Şekil 14. Yüksüz durumda beş-seviyeli inverterle beslenen motor için (a)sürekli durumda momentin değişimi, (b) sürekli durumda momentin harmonik analizi. ($f=50$ Hz, $M_y = 0$ Nm)

5. SONUÇ

Bu makalede; basit mekatronik sistemlere bir örnek olarak ele alınan elektrik sürücü, motor ve mekanik yükten oluşan sistemin PSPICE ile analiz edilebilmesi için yapılacak işlemler açıklanmıştır. Sistem beş-seviyeli kaskad bağlı bir üç fazlı inverter, üç fazlı bir asenkron motor ve yük momenti, sürtünme momenti, dinamik moment'ten oluşmaktadır.

Çok seviyeli inverterin tasarlanmasında, PSPICE fiziksel simülasyon olarak kullanılmıştır. İnverter güç devresinde anahtar olarak kullanılan IRG4PC40UD IGBT'lerinin PSPICE modelleri üretici firmasından temin edilen fiziksel tasarım modelidir. Kontrol devresinde kullanılan Opamp'larda da fiziksel seviye modeli kullanılmıştır. Asenkron motor PSPICE'ta fonksiyonel tasarım seviyesinde modellenmiş olup bazı ihmaller ve kabuller yapılarak model denklemleri oluşturulmuştur. Dinamik moment, sürtünme momenti ve yük momenti ise fiziksel tasarım modeli ile modellenmiştir.

Beş-seviyeli kaskad inverter için fiziksel tasarım modeli kullanıldığından inverterle ilgili bütün elektriksel bilgiler gerçeğine oldukça yakın bir şekildedir. Örnek olarak, IGBT anahtarların iletim ve anahtarlama kayıpları hesaplanabilir, anahtarların üzerindeki gerilim düşümleri rahatlıkla ölçülebilmektedir. Asenkron motor fonksiyonel tasarım aşamasında modellendiğinden, analizler teorik olarak ideal durumlar için geçerlidir. Bu çalışmada modelleme iki-fazlı dönen eksen sisteminde yapılmıştır. Bununla birlikte, motorun üç-fazlı model denklemleri kullanılarak ta başka bir dönüşüme gerek duyulmadan, analog simülasyonlar ile bu diferansiyel

denklemlerin çözümü yapılabilmektedir. Bunun için Opamp'ların, integratör, toplayıcı, çarpıcı olarak kullanılması gerekir. Bu işlem, PSPICE'ta Opamp'ın fiziksel modelleri kullanılarak gerçekleştirilebilir.

Mekanik yük ise fiziksel simülasyonlar ile modellenildiğinden, mekanik-elektriksel analogi dönüşüm katsayılarının doğru seçimi, bu sistemin modellenme doğruluğuyla doğru orantılı olmaktadır. Mekatronik sistemlerde değişik enerji formlarında çalışan farklı üniteler mevcuttur. Eğer sistem analizi PSPICE ile yapılacaksa, bu üniteler değişik modelleme seviyelerinde modellenerek bir kütüphane oluşturulmalıdır. Kullanılacak sisteme göre, üniteler bu kütüphaneden çağrılıp, değişken parametreler aracılığı ile sisteme adapte edilmesi ile analiz kolaylıkla başarılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Scholliers J., Design and Simulation of Mechatronical Systems, Final Report Human Capital and Mobility Fellowship ERBCHICT930534, VTT automation, 1995.
- Bernardi M., Bley H., Schmitt B., New Approaches for Developing Mechatronical Products in Multidisciplinary Teamwork, The 35th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems, 13-15 May, 2002.
- Amerongen J.V., Mechatronic Design, Mechatronics, Volume 13, Issue 10, 1045-1066, 2003
- Scholliers J., Yli P.T., A SPICE-based Library for Mechatronic Systems, ISCAS'95, IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 668-671, 28 April-3 May 1995.
- Kielkowski R., Inside SPICE, McGraw-Hill, New York, 1994.
- Rashid M.H., SPICE for Power Electronics and Electric Power, Prentice Hall, 1993
- Rodriguez J., Lai J.S., Peng F.Z., Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications, IEEE Transactions on Industry Electronics, 724-737, 2002.
- IGBT SpiceMod Library, International Rectifier, 1992.
- Tuncer S., Tatar Y., Çok Seviyeli Kaskad İnverterlerde SPWM Tekniğinin Kullanımı, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 7, Sayı 2, 56-60, 2003.
- Bose B.K., Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall, 2002.
- Subrahmanyam V., Electric Drives, McGraw-Hill, New Delhi, 1996

Ek. Kullanılan asenkron motorun parametreleri

$$U_{f,f}=380 \text{ V}, f=50 \text{ Hz}, p=2, R_s=3.35 \Omega, R_r=1.99 \Omega, L_s=0.17 \text{ H}, L_r=0.163 \text{ H}, j=0.015 \text{ kgm}^2$$