

GÜÇ ELEKTRONİĞİ DEVRELERİNİN İHM TABANLI BİLGİSAYAR BENZETİMİ

Okan ÖZGÖNENEL¹

Engin Ufuk ERGÜL²

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Elektrik – Elektronik Müh. Böl. Samsun

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Amasya M.Y.O., Amasya

¹e-posta:okanoz@omu.edu.tr

²e-posta:euergul@mynet.com

Anahtar Sözcükler: İletim hattı modeli (İHM), güç elektroniği, sayısal benzetim

ÖZET

Bu çalışmada güç elektroniği devrelerinin İHM tabanlı bilgisayar benzetimi gerçekleştirilmiştir. İHM yöntemi 1970 yılında iki boyutlu elektromanyetik alan problemlerinin çözümü için önerilen bir tekniktir. Son yıllarda ise geleneksel integral ve türev denklemlerinin çözümünde seçimli bir yöntem olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeye koşut olarak, İHM yöntemi hesaplama kolaylığı bakımından çok sayıda üstünlüğe sahiptir.

Bu çalışmada, İHM yöntemini kullanarak temel güç elektroniği devrelerinin (yarım dalga ve tam dalga doğrultucu, faz kontrollü doğrultucular, etc.) sayısal olarak İHM modelleri çıkarılmış ve örnek devreler üzerine uygulanmıştır.

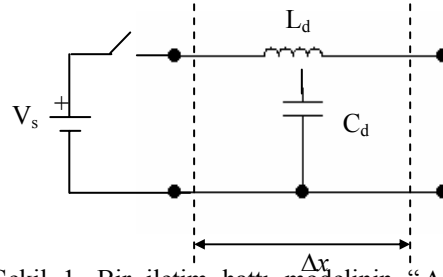
1. GİRİŞ

İHM ilkesi iletim hattı birim kesitinin reaktif eleman modellerine dayanmaktadır. Sonsuz uzunlukta bir iletim hattı, akım taşıyan paralel iki iletken oluşmaktadır. İletkenlerin etrafında bir manyetik alan vardır ve iletken boyunca gerilim düşümü olmaktadır. Manyetik alan hattın öz endüktansının (L), gerilim düşümü ise direncinin (R) varlığını simgelemektedir. Uygulanan başlangıç gerilimi de hattı yüklemekte ve iletkenler arasında elektrik alanı yaratmaktadır. Bu etkilerde iletkenler arası sığaç (C) ve hiçbir sığaç da kayıpsız olmadığına göre paralel bir iletkenlik (G) ile simgelenir [1].

İletim hattının dağıtılmış L ve C parametreleri iki şekilde (link ve stub) ifade edilebilir (Şekil 1). Stub modelde endüktans, depolanan enerjinin ve akımın en büyük olduğu durumu simgelemek amacıyla başlangıç koşullarında kısa devre gibi düşünülür. Sığacın İHM modelinde ise başlangıç koşullarında açık devre gibi düşünülür ve bu sayede sığaç etkisi yaratılır [2], [3].

Be devrelerin DC ile geçici durum, AC ile de kararlı durum çözümlenmeleri yapılır.

2. TEMEL ELEMANLARIN İHM MODELİ



Şekil 1. Bir iletim hattı modelinin “ Δ_x ” kesiti ve dağıtılmış parametreleri

Şekil 1’de;

$C_d \Delta_x$: Hat sığacı

$L_d \Delta_x$: Hat endüktansı

V_s : Kaynak gerilimi

Δ_Q : Δ_x kesitindeki yüküdür ve $C_d \Delta_x V_s$ ile ifade edilir.

Z_c : Karakteristik empedanstır ve $\frac{L_d}{C_d}$ ile ifade edilir.

Ayrıca hat başı gerilim $V_s = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ ile ve akım da

$I = C_d V_s \frac{1}{\sqrt{L_d C_d}} = \frac{V_s}{\sqrt{L_d / C_d}}$ ifadeleri yardımıyla

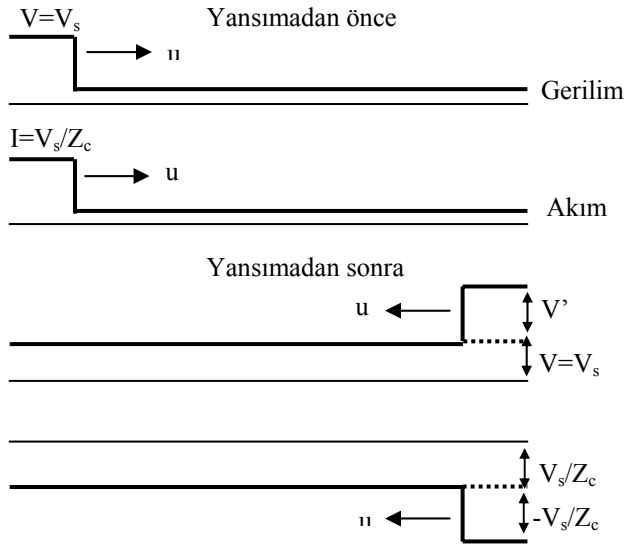
bulunur.

İHM yöntemi temelde endüktans ve sığaç elemanları üzerine gelen ve yansıyan gerilimlerin her benzetim adımında hesaplanır, güncellenmeleri kabulüne dayanmaktadır. Başlangıç koşulları değişinceye kadar akım hat boyunca sabit kalır ama gerçek sistemde değişmektedir.

Hat açık devre olduğunda, hat boyunca indüklenen gerilim $V' + V_s$ olur, akım ise sıfır olur. V' nün genliği enerji dönüşümüyle hesaplanır ve 2τ 'luk zaman dilimine ihtiyaç vardır. Bu yüzden, gelen gerilim darbesinin tamamı hat sonundan yansır.

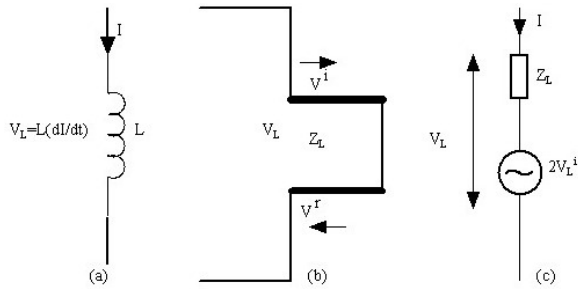
$\Gamma = \frac{R - Z_c}{R + Z_c}$: yansıma katsayısı

Bu durum aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.



Şekil 2. Bir iletim hattına gelen ve yansıyan dalgalar, yansımadan önce ve sonrası

Bu yaklaşımlar altında endüktans ve sığacın İHM aşağıdaki gibidir.



Şekil 3. Bir endüktansın a) Zaman düzlemi, b) İHM modeli ve c) Thevenin eşdeğeri gösterilimi

Endüktans ile ilgili eşitlikler;

$$Z_L = \frac{2L}{\Delta t},$$

$$V_L = I.Z_L + 2.V_L^i, \quad (1)$$

$$V_L^r = V_L - V_L^i \text{ ve bir sonraki } \Delta t \text{ anında}$$

$$V_L^i = -V_L^r$$

Bu eşitliklerde,

L: Endüktans,

Z_L : Endüktansa ilişkin empedans

Δt :Zaman adımı

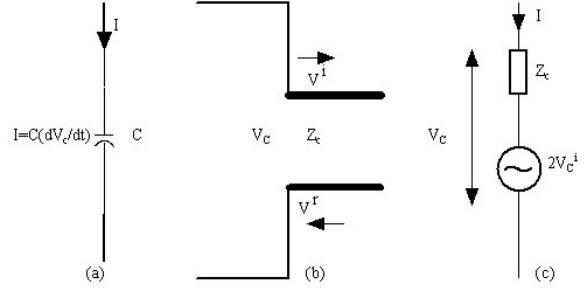
I :Akım

V_L : Endüktans üzerindeki gerilim düşümü

i: Gelen dalga indisini

r: Yansıyan dalga indisini

belirtmektedir.



Şekil 4. Bir sığacın a) zaman düzlemi, b) İHM modeli ve c) Thevenin eşdeğeri gösterilimi

Sığaç ile ilgili eşitlikler;

$$Z_C = \frac{2}{C.\Delta t},$$

$$V_C = I.Z_C + 2.V_C^i, \quad (2)$$

$$V_C^r = V_C - V_C^i \text{ ve bir sonraki } \Delta t \text{ anında}$$

$$V_C^i = V_C^r$$

Bu eşitliklerde,

C : Sığaç

Z_C: Sığaca ilişkin empedans

Δt :Zaman adımı

I: Akım

V_C : Sığaç üzerindeki gerilim düşümünü

belirtmektedir.

Benzer şekilde; gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek amacı ile endüktans ve sığacın doğrusal olmayan davranışları da İHM içerisinde modellenilebilir.

Anahtar güç elektroniği devrelerinin vazgeçilmez bir elemanıdır. Geleneksel olarak kapalı olduğunda çok küçük değerlikli bir direnç ve açık olduğunda ise çok büyük değerlikli bir direnç gibi modellenmektedir. Bu da bazı uygulamalarda sistem empedansının değişmesine yol açmakta ve her bir benzeşim anında sistem empedansının yeniden hesaplanmasını gerektirmektedir. İHM ortamında ise anahtar elemanları kapalı olduğu anda çok küçük değerlikli bir endüktans (tahminen sistem empedansının yüzde biri) ve kapalı olduğu durumda ise çok küçük değerlikli bir sığaç olarak modellenmektedir. Bu sayede karmaşık sistemlerde sistem empedansı etkilenmemektedir.

Denklem (1) ve (2) deki ifadeler benzeşim zamanı boyunca yinelemeli olarak devam etmektedir. Seri R-L ve C elemanından oluşan bir devre için şu ifadeler yinelemeli olarak hesaplanır.

Başlangıç anı atamaları: (k=0 anı)

$$V_C^0 = 0, V_L^0 = 0, I_0 = 0$$

$$V_0^i = (V_s - I_0.Z_L) / 2$$

$$V_0^r = -(I_0.Z_C) / 2$$

$$V_0^r = V_0^i - V_0^i$$

$$V_0^r = V_0^i - V_0^i$$

Ana işlemler:

$$V_L = 2.V_L^i + I.Z_L \quad V_L^r = V_L - V_L^i$$

$$V_C = 2.V_C^i + I.Z_C \quad V_C^r = V_C - V_C^i$$

Bir sonraki adımda;

$$V_C^i = V_C^r, \quad V_L^i = -V_L^r$$

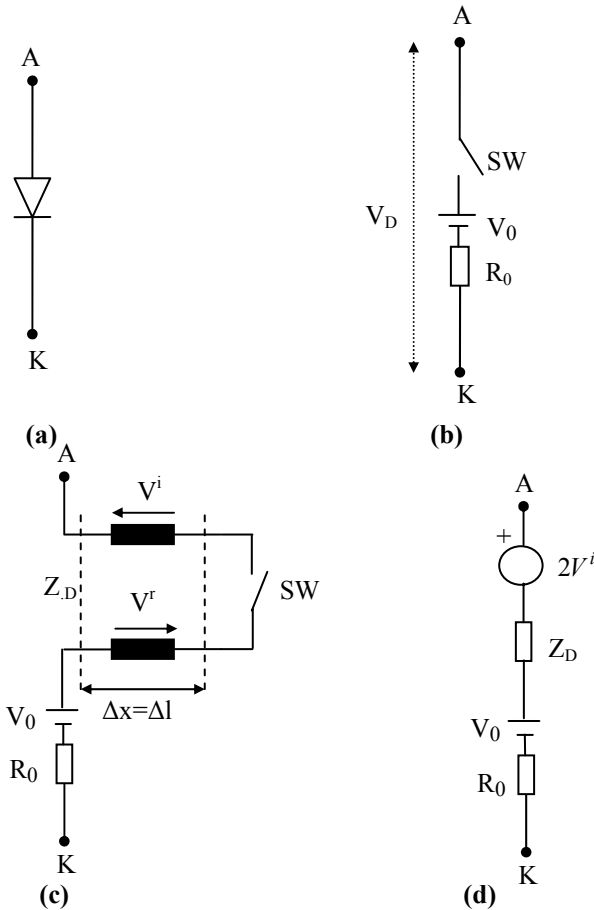
Bu ifadelerde "0" indisi $k=0$ anının temsil etmektedir. V_L endüktans üzerindeki, V_C ise sığaç üzerindeki gerilim düşümünü temsil etmektedir. i : gelen dalga, r : yansıyan dalga indisleridir.

Sonraki bölümde yarı iletken elemanların İHM modelleri açıklanacaktır.

3. YARI İLETKEN ELEMANLARIN İHM MODELİ

3.1 Diyot Modeli

İHM yönteminde diyot anahtar gibi modellenmiştir ve eşik gerilimini temsil eden bir kaynak ve küçük değerli bir dirençle gösterilir. Bu durumdan yararlanarak diyota ilişkin İHM modeli çıkartılmıştır. Aşağıdaki şekilde diyotun İHM modeli ve Thevenin eşdeğeri görülmektedir.



Şekil 5. (a) Diyot Gösterilimi (b) Eşdeğer Devresi
(c) İHM Modeli (d) Thevenin Eşdeğeri

Şekil 5' te; V_0 diyotun eşik gerilimi, SW anahtar, V_D diyot gerilimi, Z_D İHM modelindeki empedans, i ve r sırasıyla gelen ve yansıyan dalga indislerini temsil etmektedir.

Diyotun TLM modeli anahtar elemanıya özdeş olduğundan modellemeye benzer olacaktır. Diyot iletimde olduğunda (yani anahtarın kapalı konumu, $V_D > V_0$) küçük değerli bir endüktans (L), diyot tıkamada olduğunda ise (yani anahtarın açık konumu, $V_D < V_0$) küçük değerli bir sığaçla (C) modellenir.

3.2 Tristör Modeli

Tristör, kapı ucu tetiklendikten sonra iletime geçer ve bu durumda diyot gibi davranır. Tıkama durumu da yine diyotta olduğu gibidir. Ancak tristörün iletime geçme durumu kapı ucuna verilen darbenin biçimine (darbe işaretinin biçimine) bağlı olarak denetlenebilir. Böylece tristör kullanılarak faz denetimi de yapılabilir. Bu faz, tetikleme açısı olarak adlandırılabilir. Tristörü diyottan ayıran özellik, tristörün iletime geçeceği anın denetlenebilmesidir. Diyot denetlenemeyen bir elemandır ve anoduna gelen gerilim değeri eşik değerinden yüksekse iletime geçer aksi takdirde tıkamadadır. Ayrıca şunu da belirtmekte fayda vardır; iletimden sonra tristörün tutma akımı geçilmediği sürece tristör iletimde kalmaya devam edecektir.

Tristörün iletim hattı modeli aynı diyotta olduğu gibi verilebilir, buradaki tek fark kapı ucunun tetiklenip tetiklenmediğinin belirlenmesidir. Kapı ucunda darbe varsa, tristör iletimde olacak, aksi takdirde tıkamada olacaktır. İletim durumunda küçük bir endüktansla, tıkama durumunda ise küçük bir sığaçla iletim hattı modeli oluşturulmuştur.

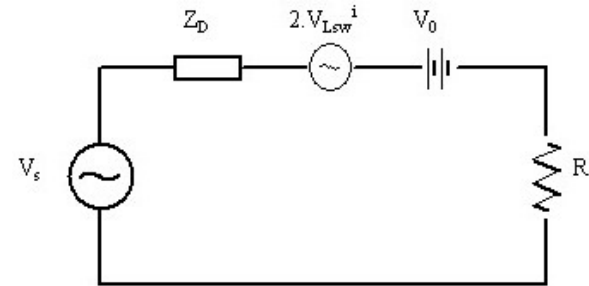
3.3 Triyak Modeli

İHM modelleme biçimi tristöre benzer ancak tek fark iki yönlü iletime olanak sağlamasıdır. Ters paralel bağlı iki tristör gibi modellenmiştir.

4. BİLGİSAYAR BENZETİMLERİ

4.1 Yarım Dalga Doğrultucu

Diyot iletimde olduğunu andaki endüktans modeli aşağıdaki gibi çıkartılmıştır.



Şekil 6. Diyotun İHM modeli

İlgili eşitlikler;

$$Z_D = Z_{L_{sw}} = \frac{2 \cdot L_{sw}}{\Delta t}, \quad {}_k V_{L_{sw}} = 2 {}_k V_{L_{sw}}^i + {}_k I \cdot Z_{L_{sw}}$$

$${}_k V_{L_{sw}}^r = {}_k V_{L_{sw}} - {}_k V_{L_{sw}}^i, \quad {}_k I = \frac{{}_k V_s - 2 {}_k V_{L_{sw}}^i - V_0}{R + Z_{L_{sw}}}$$

$${}_{k+1} V_{L_{sw}}^i = -{}_k V_{L_{sw}}^r = {}_k V_{L_{sw}} - {}_k V_{L_{sw}}^i$$

Diyot tıkamada olduğu anda şu eşitlikler geçerlidir;

$$Z_D = Z_{C_{SW}} = \frac{\Delta t}{2.C_{SW}},$$

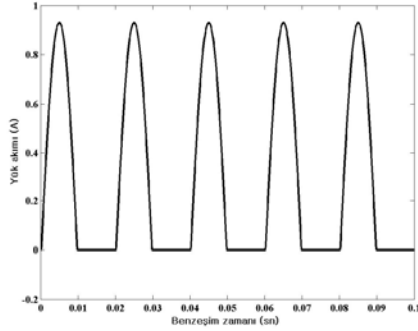
$${}_k V_{C_{SW}} = {}_k V_{C_{SW}}^i + {}_k V_{C_{SW}}^r$$

$${}_k V_{C_{SW}}^r = {}_k V_{C_{SW}} - {}_k V_{C_{SW}}^i,$$

$${}_k V_{C_{SW}} = 2{}_k V_{C_{SW}}^i + {}_k I.Z_{C_{SW}}$$

$${}_k I = \frac{{}_k V_s - 2{}_k V_{C_{SW}}^i - V_0}{R + Z_{C_{SW}}}, \quad {}_{k+1} V_{C_{SW}}^i = {}_k V_{C_{SW}}^r = {}_k V_{C_{SW}} - {}_k V_{C_{SW}}^i$$

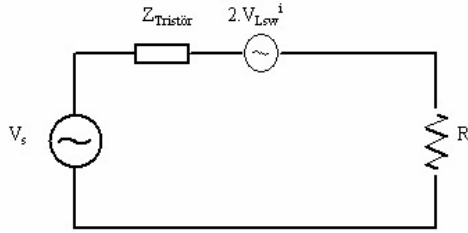
Üstteki ifadelerde k adımları, Δt zaman aralığını, V_0 diyotun eşik gerilimini, L_{sw} küçük değerli endüktansı, C_{sw} küçük değerli sığacı, V_s kaynak gerilimin temsil etmektedir.



Şekil 7. Yük üzerindeki akımın değişimi, $V_s=10V$ (tepe değeri), $R=10\ \Omega$ (Si diyot için).

4.2 Tristör Uygulaması

Tristör uygulaması için Şekil 8'de gösterilen, basit faz kontrollü yarım dalga doğrultucu devresi kullanılmıştır. Tristörün kapı ucunda darbe varsa *iletimde* olacaktır ve aynen diyotta olduğu gibi modellenecektir. Bu modelde tristör ideal olarak varsayılmıştır.



Şekil 8. Tristörlü devrenin Thevenin eşdeğeri

Bu durumda tristör küçük değerli bir L_{sw} endüktansıyla modellenir ve devreye ilişkin ifadeler şöyle türetilir:

$$Z_{Tristör} = Z_{L_{SW}} = \frac{2.L_{SW}}{\Delta t}, \quad {}_k V_{L_{SW}} = 2{}_k V_{L_{SW}}^i + {}_k I.Z_{L_{SW}}$$

$${}_k V_{L_{SW}}^r = {}_k V_{L_{SW}} - {}_k V_{L_{SW}}^i, \quad {}_k I = \frac{{}_k V_s - 2{}_k V_{L_{SW}}^i}{R + Z_{L_{SW}}}$$

$${}_{k+1} V_{L_{SW}}^i = -{}_k V_{L_{SW}}^r = {}_k V_{L_{SW}} - {}_k V_{L_{SW}}^i$$

Tristör kesimde iken küçük değerlikli C_{sw} sığacı ile modellenir ve devreye ilişkin ifadeler aşağıdaki gibi türetilir;

$$Z_{Tristör} = Z_{C_{SW}} = \frac{\Delta t}{2.C_{SW}},$$

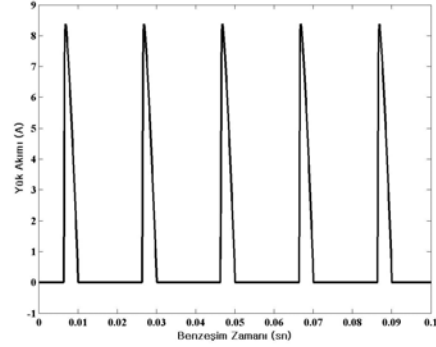
$${}_k V_{C_{SW}} = {}_k V_{C_{SW}}^i + {}_k V_{C_{SW}}^r$$

$${}_k V_{C_{SW}}^r = {}_k V_{C_{SW}} - {}_k V_{C_{SW}}^i,$$

$${}_k V_{C_{SW}} = 2{}_k V_{C_{SW}}^i + {}_k I.Z_{C_{SW}}$$

$${}_k I = \frac{{}_k V_s - 2{}_k V_{C_{SW}}^i}{R + Z_{C_{SW}}}, \quad {}_{k+1} V_{C_{SW}}^i = {}_k V_{C_{SW}}^r = {}_k V_{C_{SW}} - {}_k V_{C_{SW}}^i$$

Tetikleme açısı 90° , uygulanan gerilimin tepe değeri 10V ve direnç yükü $1\ \Omega$ iken aşağıdaki grafik elde edilmiştir.



Şekil 9. Tristör uygulaması

Triyak içinde benzer şekilde İHM modeli çıkartılmış ve çeşitli koşullarda denenmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada güç elektroniği devre elemanlarının bilgisayar benzetimi için farklı bir çözümleme yöntemi üzerinde durulmuştur. İHM yöntemi doğasında ayrı olarak tanımlandığı için birinci dereceden türev ve tümlev devrelerinin çözümünde oldukça hassas sonuçlar üretmektedir. Farklı güç elektroniği elemanlarının bu yolla modellenmesi ve sayısal çözümlenmeleri amaçlanmıştır.

Tüm hesaplama işlemleri için MATLAB ® [4] kullanılmıştır.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında Nottingham Üniversitesi (İngiltere), Elektrik – Elektronik Mühendisliği bölümü öğretim üyelerine teşekkürü bir borç biliriz.

KAYNAKLAR

[1] Christos Christopoulos, "The Transmission Line Modelling Method TLM", IEEE/OUP Series on Electromagnetic Wave Theory, 1995.

[2] Hui, S.Y.R., C. Christopolus, "Non-linear Transmission Line Modelling Technique for Modelling Power Electronic Circuits", European Power Electronics Conference, Florence. Proceedings Vol. 1, 80-84, 1991.

[3] S.Y.R. Hui, C. Christopoulos, "Discrete Transform Technique For Solving Non-linear Circuits and Equations", IEE Proceedings – A, Vol. 139, No.6, November 1992.

[4] www.mathworks.com