

# PARAFUDURUN GEÇİCİ REJİM ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

M. Emin MERAL<sup>1</sup>

M. Salih MAMIŞ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yüzüncü Yıl Üniversitesi,  
Van Meslek Yüksek Okulu 65080, VAN

<sup>2</sup>İnönü Üniversitesi Mühendislik Fak.

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 44069-MALATYA

<sup>1</sup>e-posta: emeralm@yahoo.com

<sup>2</sup>e-posta: smamis@inonu.edu.tr

*Anahtar sözcükler: Enerji iletim sistemleri, durum uzayı tekniği, iletim hattı, doğrusal olmayan elemanlar*

## ÖZET

*Bu bildiriye, durum uzayı tekniği uygulanarak bir enerji iletim sisteminde bulunan parafudurun geçici rejim altındaki cevabı bulunmuştur. Parafudur gibi doğrusal olmayan karakteristiğe sahip bir elemanın bulunduğu sistemde yıldırım dalgasının analizi yapılmıştır. Çözümde parafudurun karakteristiğine uygun bir analitik denklem ve durum uzayı tekniği olarak trapez kuralına göre sayısal entegrasyon kullanılmıştır. Önerilen yönteme ait program, kullanıcı tarafından girilen bilgilere göre denklemleri otomatik olarak düzenleyip geçici rejim cevabını vermektedir. EMTP (Elektromagnetik Transient Program) gibi hazır programlarda ise her değişik durumda sonuç alabilmek için hattı birçok düğümle tanımlamak ve her seferinde parafudura ve kaynağa ait düğümleri değiştirmek gerekmektedir. Ayrıca EMTP ile hatta ait enerji grafikleri doğrudan alınmazken önerilen yöntemde alınabilmektedir.*

## 1. GİRİŞ

Enerji iletim sistemlerinin geçici rejim durumundaki davranışının ve koruma amaçlı kullanılan aygıtların etkisinin tespit edilmesi önemlidir. Bu nedenle, doğrusal olmayan elemanlar ile kısa devre, korona gibi doğrusal olmayan durumların çözüme dahil edilmesi gerekmektedir. Enerji iletim hatlarının en önemli elemanı olan iletim hattı dağıtık parametrelili bir elemandır. Genel olarak iletim hatlarının analizinde zaman ve frekans domeni olmak üzere iki temel yöntem kullanılmaktadır. Zaman domeni yönteminde frekans bağımlı parametrelerin çözüme dahil edilmesi zor olmaktadır. Diğer taraftan frekans domeni yöntemlerinde ise doğrusal olmayan durumların ve elemanların çözüme dahil edilmesi zaman domenindeki kadar kolay olmamaktadır. Bir yaklaşım olarak hat  $\pi$ -kesitli devrelerle modellenebilir. Bu modelin analizi elde edilen türevsel denklemlerin çözülmesini gerektirmektedir. Bu türevsel denklemler durum denklemleri olarak bilinir ve sistem doğrusal olmayan elemanlar içerse dahi

çözümde durum uzayı tekniklerini kullanmak mümkündür [1,2].

Geçmişte bu konuda yapılan çalışmalarda genel olarak ya doğrusal olmayan elemanlar parçalı doğrusal kabul edilerek durum uzayı tekniği kullanılmış [3], yada bu elemanlar; paralel bağlı değişken bir akım kaynağı ile doğrusal bir direnç gibi kabul edilerek Newton-Raphson gibi tekrarlı yöntemlerle çözülmüştür [4,5]. Bununla birlikte, bu yöntemlerde parçalı doğrusal yaklaşımdan kaynaklanan hatalar ile analiz edilen sistemdeki doğrusal olmayan eleman sayısı, uygun başlangıç koşullarının seçilmesi, yakınsama ve bir düğümde sadece tek bir doğrusal olmayan elemanın bulunması gibi bazı sınırlamalar mevcuttur. Bu çalışmada kullanılan durum uzayı tekniğinde ise bu tür sınırlamalar bulunmamaktadır.

Durum uzayı tekniği kullanılarak daha önce yapılan çalışmalarda sonuna doğrusal olmayan bir eleman olan parafudur bağlı ve ortasına yıldırım dalgası düşen bir iletim hattı sayısal entegrasyonla incelenmiştir [1,2]. Bu çalışmada, daha önce yapılan çalışmalar temel alınarak MATLAB [6] paket programında hat içinde parafudur ve kaynak mesafelerini isteyen ve denklemleri kendi düzenleyip gerilim ve enerji değişimini veren bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Çözüm için yamuk kuralıyla sayısal entegrasyon ve doğrusal olmayan karakteristiği olan analitik bir denklem kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar EMTP [7] sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

## 2. İLETİM HATTININ DURUM UZAYI MODELİ

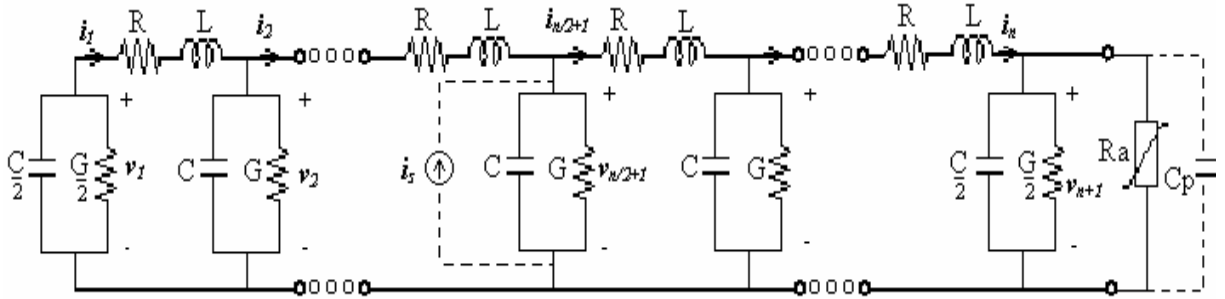
Doğrusal bir sistemin durum uzayı denklemleri

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad (1)$$

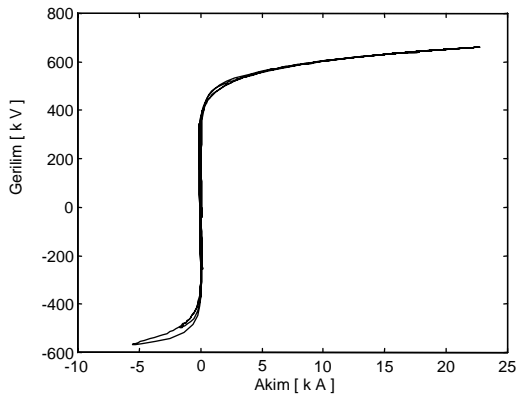
şeklinindedir. (1) denkleminde  $\mathbf{x}$  ilk değeri  $\mathbf{x}_0$  olan durum değişkeni vektörü,  $\mathbf{A}$  ve  $\mathbf{B}$  sırasıyla  $(n \times n)$  ve  $(n \times 1)$  boyutlu katsayı matrisleri ve  $\mathbf{u}$  kaynak fonksiyonlarını temsil eden giriş vektörüdür.

İletim hatları dağınık parametrelili elemanlar içerir, fakat çok sayıda toplu parametrelili eşdeğer devrelerin ardışık bağlantısı şeklinde gösterilebilir. Bu eşdeğer devrelerin sayısı ne kadar yüksek alınırsa benzetimden doğan hatalar da o oranda az olur. Şekil 1'de  $\pi$  eşdeğer devreleri kullanılarak elde edilen toplu parametrelili bir iletim hattı modeli gösterilmektedir. Şekildeki R, L, G ve C sırasıyla direnç, endüktans, kaçak geçirgenlik ve kapasite değerleridir. Her bir  $\pi$  devresinde kapasitans ve kaçak geçirgenlik, sırasıyla iki yanda paralel C/2 ve G/2 değeriyle gösterilir ve  $\pi$  eşdeğer devreleri birleştirildiğinde aradaki kapasite ve kaçak geçirgenlikler toplanır. Yıldırım düşmesi sonucu akım kaynağının ortada olduğu ve parafudrun Cp kapasite değeri ile modellenen bir transformatöre paralel bağlı olarak sonda olduğu tek fazlı bir iletim hattında durum denklemleri aşağıdaki denklemdeki gibi olur:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \\ v_2 \\ i_2 \\ \vdots \\ v_{n/2+1} \\ i_n \\ v_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -G/C & -2/C & 0 & \dots & 0 \\ 1/L & -R/L & -1/L & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/C & -G/C & -1/C & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1/L & -R/L & -1/L & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots & 1/C & -G/C & -1/C & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 1/L & -R/L & -1/L \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 2/C & -(G+2/Ra)/Ct & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{n/2+1} \\ i_n \\ v_{n+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1/C \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_s(t) \quad (2)$$



Şekil-1. Toplu parametrelili enerji iletim hattı modeli



Şekil-2. 209 kV' luk bir parafudurun karakteristiği

Bu denklemde  $x$  durum değişkenleri vektörünün elemanları, hattaki kapasite gerilimleri ( $v_j$ ,  $j=1,2,\dots,n+1$ ) ve endüktans akımlarıdır ( $i_j$ ,  $j=1,2,\dots,n$ ). Sonuç olarak ( $n$ ) tane  $\pi$  eşdeğer devreden oluşan bir iletim hattında ( $2n+1$ ) durum değişkeni vardır ve ( $n+1$ ). durum değişkeni, hattın tam ortasındaki düğümle nötr arasındaki gerilim düşümdür.

### 3. PARAFUDUR MODELİ

Enerji iletim hatlarında koruma amaçlı kullanılan parafudur doğrusal olmayan karakteristiğe sahip bir elemandır ve bu karakteristiği şu analitik denklemle ifade edilmektedir [8]:

$$i = kv^\alpha \quad (3)$$

(3) denkleminde  $k$  sabit bir değer,  $\alpha$  ise malzemeye göre değişen nonlineerlik katsayısıdır. (3) denkleminde parafudur direncinin doğrusal olmayan değişimi analitik olarak

$$R_a = k^{-1}v^{-(\alpha-1)} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Örnek olarak; Şekil 2'deki gibi bir parafudurun karakteristiği [4]'te eğri uydurma yöntemi ile bulunarak,  $k=8.13 \times 10^{-25}$  ve  $\alpha=9.025$  olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi bu özelliklerdeki bir parafudurun kırılma gerilimi 600 kV civarındadır, ve üzerindeki aşırı gerilimler bu değeri aşmayacak şekildedir.

### 4. DURUM DENKLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ

Durum denklemlerinin çözümü için bir çok yöntem bulunmaktadır. Ancak doğrusal olmayan elemanlar

içeren sistemlerin durum denklemlerinin çözümü için sayısal entegral kullanılması en elverişli yöntem olarak görülmektedir, çünkü durum denklemlerinin sayısal entegrasyonla lineer fark denklemlerine dönüştürülmesi sistemdeki doğrusal olmayan değişimlerin çözüme yansıtılmasını kolaylaştırmaktadır [2]

Sayısal entegrasyonda ise tek basamaklı ve çok basamaklı entegrasyon gibi yöntemler mevcuttur. Tek basamaklı yöntem olarak Runge-kutta yöntemi, çok basamaklıya örnek trapez kuralıyla entegrasyon gösterilebilir. Tek basamaklı entegrasyonda her bir zaman adımında birden çok türev hesaplaması gerekirken, çok basamaklı entegrasyonda önceki zaman adımlarında hesaplanan sonuçların kullanılması daha hızlı bir hesaplama sağlar.

Sistemin ( $t_k=k\Delta t$ ) anındaki cevabı  $x_k$ 'nin bilindiği varsayılarak ( $t_{k+1}=(k+1)\Delta t$ ) anındaki cevabı şöyle bulunabilir.

$$x_{k+1} = x_k + \frac{h}{2}(f(t_k, x_k) + f(t_{k+1}, x_{k+1})) \quad (5)$$

Buradaki  $f$  fonksiyonu (1) denklemindeki türev ifadesini temsil etmektedir. O halde (5) denklemi,

$$x_{k+1} = x_k + \frac{h}{2}((Ax_k + Bu_k) + (Ax_{k+1} + Bu_{k+1})) \quad (6)$$

şeklinde yazılabilir. (6) denklemi düzenlenirse;

$$(I - \frac{h}{2}A)x_{k+1} = (I + \frac{h}{2}A)x_k + \frac{h}{2}B(u_k + u_{k+1}) \quad (7)$$

ve bu denklemde,

$$(I - \frac{h}{2}A) = a_k ; (I + \frac{h}{2}A) = b_{k1} \quad (8)$$

$$b_k = b_{k1}.x_k + \frac{h}{2}B(u_k + u_{k+1}) \quad (9)$$

şeklinde isimler verdiğimizde;

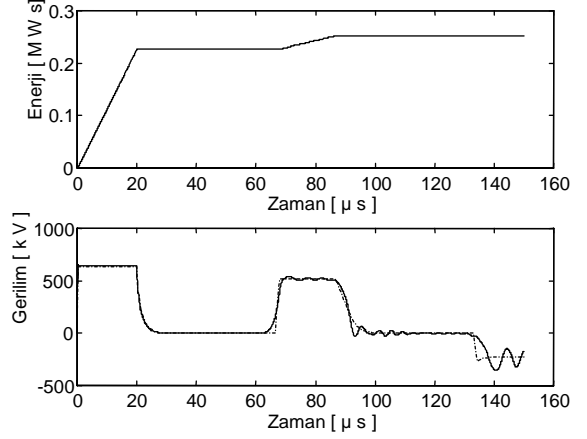
$$a_k.x_{k+1} = b_k \quad (10)$$

çözülecek genel denklem (10)'daki gibi olur. Bu ifade bilinmeyen ( $x_{k+1}$ )'i bulmak için değişik yöntemler mevcuttur. Programda doğrudan ( $n \times n$ ) boyutlu  $ak$  matrisinin tersi alınabilir, ama bu şekilde yapıldığında program  $ak$  bant matrisinin sıfır olan elemanlarıyla ilgili gereksiz işlemleri de yapar. Bu nedenle LU ayrışım yöntemini uygulamak zaman ve bilgisayar yükü açısından avantaj sağlar.

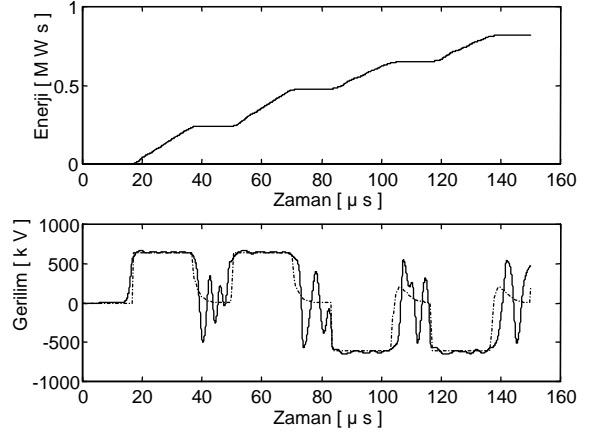
## 5. YÖNTEMİN UYGULANMASI

Uygulamada [1]'deki gibi 10 km uzunluğunda birim uzunluğa düşen parametreleri  $r=0.05 \Omega/\text{km}$ ,  $l=1 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $g=0.556 \mu\text{S}/\text{km}$  ve  $c=11.11 \text{ nF}/\text{km}$  olan bir iletim hattı seçilmiştir. Doğrusal olmayan eleman olarak değerleri [4]'te bulunmuş olan, Şekil 2'deki karakteristiğe sahip bir parafudur seçilmiştir. Parafudurun ve kaynağın hat üzerinde değişik birkaç noktada olmalarına göre parafudur üzerindeki enerji ve gerilimin geçici rejim cevapları bulunmuştur. Şekil 3a, 3b ve 3c'de 20 kA genliği olan ve 20  $\mu\text{s}$  süreyle

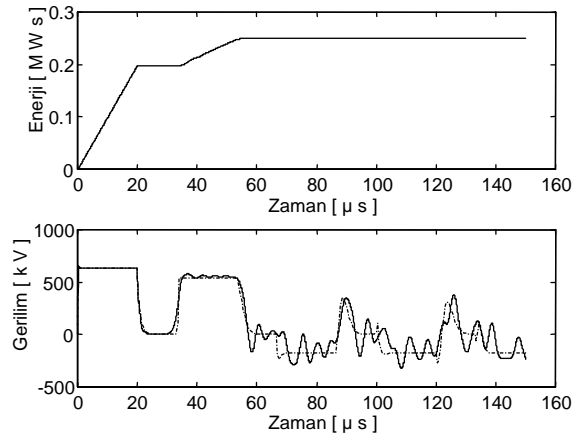
devam eden bir yıldırım dalgası, Şekil 4a, 4b, 4c'de ise 1.2/50  $\mu\text{s}$ 'lik yıldırım dalgası ( $i_s(t) = 11.03x(e^{-1.466x10^4 t} - e^{-2.470x10^6 t}) \text{ kA}$ ) akım kaynağı olarak kullanılmıştır. Sonuçlar EMTP programı sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (—) çizgisi önerilen yöntemin sonuçlarını, (-.-) çizgisi ise EMTP sonuçlarını göstermektedir.



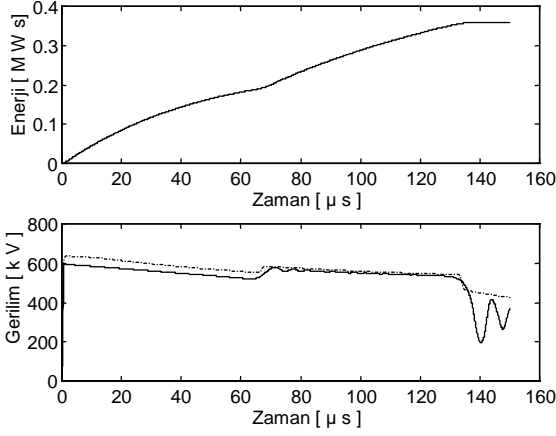
Şekil 3a. Parafudur ve kaynak hat başında



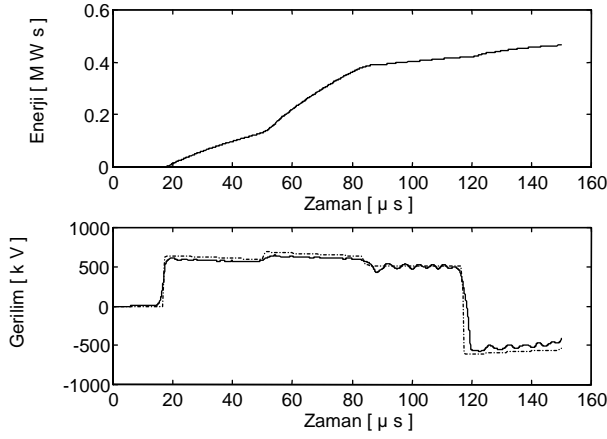
Şekil 3b. Parafudur hat başında, kaynak 5. km'de



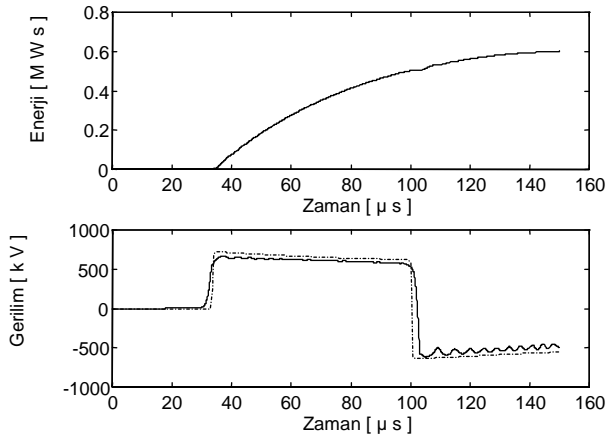
Şekil 3c. Parafudur ve kaynak 5. km'de



Şekil 4a. Parafudur ve kaynak hat başında



Şekil 4b. Parafudur hat başında, kaynak 5. km'de



Şekil 4c. Parafudur hat başında, kaynak 10. km'de

### 3. SONUÇ

Bu bildiriye, doğrusal olmayan elemanlara sahip enerji iletim sistemlerinin geçici rejim cevabı için bir durum uzayı tekniği sunulmuştur. Önerilen yöntemin gerilim çözümleri EMTP programı sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yöntemin sadece parafudurun ve kaynağın sabit olduğu durumları kapsamaması,

değişik iletim hatlarında kaynak ve parafudur mesafesi verildiğinde denklemleri otomatik olarak düzenlemesi ve EMTP'de elde edilemeyen enerji çözümlerinin elde edilebilmesi ve tamamiyle doğrusal olmayan karakteristiğe uygun çözüm vermesi üstünlükleri arasında sayılabilir. Bazı noktalardaki önerilen yöntem sonuçları ile EMTP sonuçları arasındaki farklar EMTP'nin parçalı doğrusal yaklaşım yapmasından kaynaklanıyor olabilir. Yöntem enerji iletim sistemlerinde, iletim hattının herhangi bir mesafesinde korona olayı veya kısa devre olması gibi doğrusal olmayan durumlar için geliştirilebilir.

### KAYNAKLAR

- [1] Mamiş, M. S., 2002. Doğrusal olmayan elemanlar içeren enerji iletim sistemlerinin durum uzayı çözümlemesi. OTOMATİK KONTROL ULUSAL KONGRESİ TOK'2002, Bildiri Kitabı. 9-11 Eylül 2002, ODTÜ, Ankara. 229-235.
- [2] M.S. Mamis, "Computation of electromagnetic transients on transmission lines with nonlinear components," IEE PROC.-GENERATION, TRANSMISSION and DISTRIBUTION, 150 (2), s. 200-204, 2003.
- [3] Nelms R. M., Sheble G. B., Newton S. R. ve Grigsby L. L., "Using a personal computer to teach power system transients," IEEE TRANS. POWER SYST., 4, (3), s. 1293-1297, 1989.
- [4] Yamamoto K., Irwin G., Nayak O. ve Ametani A., "Combined iteration algorithm for nonlinear elements in electromagnetic transient simulation," 3TH INT. CONFERENCE ON POWER SYSTEM TRANSIENTS IPST'99, Budapest, 1999, s. 75-80.
- [5] Noda, T., Yamamoto K., Nagaoka, N., Ametani, A., 1997. A predictor-corrector scheme for solving a nonlinear circuit. 2. INT. CONFERENCE ON POWER SYSTEM TRANSIENTS IPST'97. Seattle. 5-10.
- [6] The MathWorks Inc., The Student Edition of MATLAB Version 4 User's Guide, Prentice Hall, 1995.
- [7] Microtran Power System Analysis Corporation: Transient Analysis Program Reference Manual, Vancouver, 1992.
- [8]. Greenwood A., Electrical Transients in Power Systems, 2. Baskı, Bölüm 13,1, John Wiley, 1991.