

# ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNDE HAT PARAMETRELERİNİN KESTİRİMİ

Esra KARAER<sup>1</sup>

Fatma Gül BAĞRIYANIK<sup>2</sup>

Mustafa BAĞRIYANIK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Programı  
34469, Maslak, İstanbul

<sup>2,3</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi  
Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü  
34469, Maslak, İstanbul

<sup>1</sup>e-posta: karaere@itu.edu.tr

<sup>2</sup>e-posta: fatmagul@elk.itu.edu.tr

<sup>3</sup>e-posta: bagriy@elk.itu.edu.tr

*Anahtar sözcükler: Enerji İletim Hatları, Parametre Kestirimi, Hat Parametreleri*

## ABSTRACT

*The calculation/estimation of power transmission lines parameters has a fundamental importance in the design, construction and simulation of electric power systems. Especially, while digital protection devices conduct the protection, it is necessary making sensitive fault analysis and determining fault location of the transmission line by reducing the error rates for the reliability of the systems. Two common methods to determine the line parameters are the calculation based on Carson's formulae and parameter estimation based on measurements of the open-circuit and short-circuit voltages and currents which are at each end of the line. In this study first a short discussion of the parameter estimation techniques are presented. Then, the results, which obtained by applying the adaptive parameter estimation technique on an example short line are given for both heavy and light load conditions.*

## 1. GİRİŞ

Elektrik enerji iletim sistemleri, elektrik üretim merkezlerinde üretilen elektrik enerjisinin, tüketicilere ulaştırılması amacıyla tesis edilirler. Enerji iletim sistemlerinin planlanması ve işletimi safhalarında yapılan simülasyonlarda iletim hattının parametrelerinin varolan değerlerine en yakın şekilde kullanılmaları önemlidir. Özellikle sayısal koruma aygıtlarının koruma işlevini yerine getirmesinde, hassas arıza analizleri ve arıza bölgelerinin belirlenmesinde hatanın en aza indirilmesi, elektrik enerji sisteminin güvenli ve güvenilir çalışması açısından gereklidir.

İletim hattını oluşturan iletkenlerin birim uzunluğunun direnci (R) ve endüktansı (L) vardır. Ayrıca birbirine paralel ve yalıtılmış olan hat iletkenleri arasında bir kapasite (C) mevcut olduğu gibi yalıtkan maddenin mükemmel olmaması nedeniyle küçük de olsa bir kondüktans (G) mevcuttur. Bu parametreler hattın yapıldığı maddenin fiziksel özelliklerine, boyutlarına, yapılış tarzına göre hesaplanır; frekansla ve çevre koşullarıyla (atmosferik koşullar, hat üzerindeki bir bölümün bakım nedeniyle yeni bir iletkenle değişiminin gerekmesi, eklenen hatlar, hattın arazi koşulları nedeniyle güzergahının değişimi vb.) değişmektedir.

Enerji sistemlerinde yer alan yüksek gerilim iletim ve dağıtım hatları, üretim merkezleri ile son kullanıcılar arasında temel sürekliliği sağlayan yaşamsal bağlantılardır. Ekonomik açıdan enerji besleme sürekliliği için, iletim hattının arıza tespiti ve arıza yeri analizinin önemi artmaktadır. Enerji iletim hattında arıza meydana gelmesi, üretim merkezleri ile tüketim noktaları arasında bağlantının kopmasına, bazı durumlarda büyük ekonomik kayıpların oluşmasına, özellikle büyük şehirlerde karışıklıkların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.

Elektrik enerjisinin iletimini sağlamak amacıyla tasarlanan sistemlerde özellikle sayısal koruma aygıtlarının yeterli koruma görevini yerine getirebilmesi için, iletim hattı elektriksel parametrelerinin iyi bir tahminle bilinmesi gereklidir. İletim hattı parametrelerindeki hatanın azaltılması, sistemde arıza olması halinde elde edilen verilerle en doğru ve en kısa sürede gerekli müdahale yapılabilmesini sağlayacaktır.

Bu çalışmada, ilk olarak iletim hattı parametrelerinin kestirimi konusu değerlendirilmiş, daha sonra öncelikle zaman domeninde gerçekleştirilen bir yöntem olan adapte edilmiş kestirim şeması ele alınarak bu yöntemin bir kısa iletim hattı üzerindeki uygulaması incelenmiştir.

## 2. İLETİM HATTI PARAMETRE KESTİRİMİ

Enerji iletim hattı parametrelerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan iki yöntem vardır. Bunlar, Carson formülüne göre yapılan hesaplamalar ve açık devre - kısa devre için hat başında ve hat sonunda gerilim ve akımlarının ölçümlerine dayanarak yapılan parametre kestirimidir. Ayrıca zaman ve fazör domeni olmak üzere kendi içlerinde iki gruba ayrılan yöntemlerde fazör domeninde gerçekleştirilenler temel frekansı ele alarak harmoniklerin giderilmesine çalışmakta ve arıza bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Zaman domeninde gerçekleşen yöntemler için ise sinyallerin senkronize olması büyük önem taşımakta ve kısa, orta, uzun olmak üzere tüm iletim hattı çeşitlerinde kullanılmaktadır. Zaman ve fazör domeninde ölçümlerin elde edilmesi ve sayısal olarak anında elde edilen verilerin bilgisayar ortamında hesaplama ve simülasyon yoluyla değerlendirilmesini içeren hat parametre kestirimi, efektif çalışma alanı ve zamandan kazanç anlamında önemini koruyarak literatürdeki yerini almıştır [1-6].

İletim hattı parametre kestirimi konusunda gerçekleştirilen araştırmalar arasında, aşırı yüklü iletim hattının parametre kestiriminde hattın iki ucunda sayısal olarak ölçülen akım ve gerilim değerlerini kullanarak çaprazlanmamış bir hattın empedans ve admitanslarının kestirimi için bir yöntem [4]' de sunulmuştur. İletim hattının normal çalışma durumu ve tek fazlı arıza durumu için ölçüm değerleri ile elde edilen eşzamanlı gerilim ve akım fazörleri her bir durum için incelenmiştir. İletim hattı parametrelerinin kestiriminde, en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır.

Tek kutuplu anahtarlama ya da harici tek faz-toprak arızaları gibi yaygın asimetric enerji sistemi koşulları sırasında, hat terminallerindeki sayısal rölelerden bulunan arıza kayıtlarının temeline dayanan iletim hattı parametrelerinin tahminine ilişkin bir yöntem [5]' de verilmiştir. Önerilen bu yöntemin avantajı, kasıtlı olarak arıza yada tek kutuplu anahtarlama gereksinim duymadan sayısal röle kayıtlarını kullanarak kestirim işleminin gerçekleştirilmesidir. Bu yöntemde, sayısal rölelerden elde edilen arıza verileri ile pozitif ve sıfır dizi seri iletim hattı parametreleri, normal koşullar altında ilave ölçüm aletleri kullanılmadan elde edilmektedir. Paralel iletim hatları durumunu da ele alan çalışma, pozitif ve sıfır dizi sistemlerinin direnç, reaktans ve kapasitesinin belirlenmesinde kullanılabilecek matematik eşitlikleri

içermektedir. Eğer hattın iki ucundan elde edilen akım ve gerilim örnekleri eş zamanlı ise iki uç ölçüm noktalarındaki akım ve gerilim değerlerinden oluşan kompleks fazörler giriş değerleri olmaktadır. Eğer hattın her iki ucunda eş zamanlı örneklemelerden bağımsız olan giriş bilgisi yani eş zamanlı olmayan giriş bilgisi var ise sayısal rölelerin bir merkezden idare edilmeyip, özerk bir şekilde çalışması ele alınmaktadır. Eş zamanlı olmayan arıza verilerinin kayıtları ile belirlenen iletim hattı parametrelerinin incelenmesine de yer verilen bu çalışmada, doğrusal olan ve doğrusal olmayan çeşitli yöntemler karşılaştırılmalı sonuçlarla sunulmuştur. Çaprazlanmamış iletim hatlarının ele alınmaması çalışmanın eksikliğidir.

Adaptif fazör ölçüm (PMU) temelli arıza algılama ve yerini belirleme tekniğine ilişkin çalışma aynı zamanda bir hat parametre kestirimi algoritmasını da içermektedir [6]. Kullanılan parametre kestirim algoritması, iletim hattının yaşlanmasından kaynaklanan parametre belirsizliğini çözmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu parametre belirsizliği problemi, arıza yeri belirlenmesinde hatayı arttırdığı için büyük önem taşımaktadır. Ayrıca ısı değişimi, hatların simetrisizliği, yük akışındaki değişim gibi nedenler de parametre belirsizliği yaratabilmektedir. Harmoniklerin, gürültü ve nominal frekansın iniş çıkışlarıyla olan frekans çalkantılarının fazörlerin hesabı üzerindeki etkileri gidermek için DFT (Discrete Fourier Transform) filtreleme kullanılmıştır. Önerilen yöntemlerin verdikleri sonuçlar, saha testleri ile sınıanmıştır. Sonuçlar, frekans çalkantısı ve harmoniklerin varlığında, eş zamanlı fazör ölçüm tekniğinin varlığıyla tam doğru fazörler elde edilebildiğini göstermektedir. Yöntemde ölçüm verileri gerilimler ve akımlar ( $V_g, I_g, V_a, I_a$ ) hattın her iki ucundan yeni DFT filtreleme yaklaşımı ile elde edilmektedir. Modal dönüşümün ardından, kestirilecek iletim hattı parametreleri olarak göz önüne alınan karakteristik empedans ve iletim hattının yayılım sabiti belirlenmektedir. Yöntemin alan testleri ve simülasyon sonuçları çalışmada karşılaştırmalar ile sunulmuştur.

Bu bildiriye, kısa hat için [3] önerilmiş olan iletim hattı uçlarındaki akım ve gerilim işaretlerini ele alan adaptif parametre kestirim yöntemi daha ayrıntılı olarak ele alınarak yöntemin farklı hat yüklenme durumunda örnek hat için uygulaması gerçekleştirilmiştir. Yöntem hat mod parametrelerinin kestiriminde, normal çalışma ve hat dışındaki bir arıza için ölçülecek verileri kullanmaktadır.

## 3. ADAPTİF PARAMETRE KESTİRİMİ

Adaptif kestirim şeması,

$$\dot{x} = ax + bu, \quad x(0) = x_0 \quad (1)$$

ile ifade edilebilir. Burada  $x$ , sistemin durum değişkeni ve  $u$ , giriş büyüklüğüdür.  $a$  ve  $b$  bilinmeyen

parametrelerdir.  $x_0$ ,  $t=0$  anındaki başlangıç koşuludur.

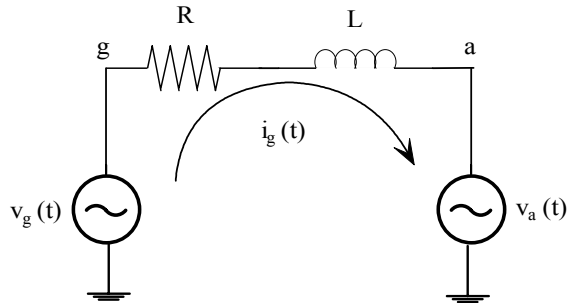
Kestirim süreci a ve b için  $\hat{a}$  ve  $\hat{b}$  olmak üzere tahminlerle başlar. Bu kestirimler yeni durum değişkeni  $\hat{x}$ ' in hesaplanmasında kullanılmaktadır. Aradaki fark, kestirim hatası  $\varepsilon$  olarak ifade edilmektedir.

$$\varepsilon = x - \hat{x} \quad (2)$$

adapte edilmiş kural kullanılarak  $\hat{a}$  ve  $\hat{b}$  değiştirilmektedir.

$t \rightarrow \infty$  olduğunda  $\varepsilon \rightarrow 0$  ve  $a \rightarrow \hat{a}$  ve  $b \rightarrow \hat{b}$  olmaktadır. Diğer bir ifadeyle parametreler kendi değerlerine yaklaşmaktadır.

İletim hattının parametre kestirimi için yöntem uygulandığında ilk adım 3 fazlı ortak kuplajlı devrelerin 3 tek fazlı kuplajsız devrelere modal dönüşüm ile dönüştürülmesidir.



Şekil 1. R ve L elemanlarından oluşan kısa iletim hattı

Şekil 1' de gösterilen sadece seri direnç (R) ve endüktans (L) elemanlarının göz önüne alındığı bir kısa iletim hattı için hattın gönderici uç gerilimi,

$$v_g(t) = Ri_g(t) + L \frac{di_g}{dt} + v_a(t) \quad (3)$$

dir. Bu eşitlik,

$$\frac{di_g}{dt} = -\frac{R}{L}i_g + \frac{1}{L}(v_g - v_a) \quad (4)$$

olarak düzenlenebilir. Böylece, (1) ve (4) eşitliklerinden, kısa iletim hattı için a ve b parametreleri ile x ve u değişkenleri arasındaki ilişki,

$$a = -\frac{R}{L}, \quad b = \frac{1}{L} \quad (5)$$

$$x = i_g \quad u = v_g - v_a$$

olarak elde edilir.

Lyapunov teoremine dayanan kestirim tekniğinde, öncelikle sistemin kestirilen durum parametresi  $\hat{x}$ ,

$$\dot{\hat{x}} = a_m \hat{x} + (\hat{a} - a_m)x + \hat{b}u \quad (6)$$

eşitliği ile hesaplanır.  $a_m < 0$  olacak şekilde tasarım

sabitleri,  $\hat{a}$  ve  $\hat{b}$  sırasıyla a ve b' nin kestirimleridir.

(2) ve (6) eşitliklerinden kestirim hatası  $\varepsilon$  için,

$$\dot{\varepsilon} = a_m \varepsilon - \tilde{a}x - \tilde{b}u \quad (7)$$

(7) eşitliğindeki  $\tilde{a} = \hat{a} - a$  ve  $\tilde{b} = \hat{b} - b$ , parametre kestirimlerindeki hatalardır.

(7) eşitliği denge durumun  $\varepsilon_e = 0$ ,  $\tilde{a}_e = 0$ ,  $\tilde{b}_e = 0$  olması halidir.

Lyapunov aday fonksiyonu olarak

$$V = \frac{1}{2}(\varepsilon^2 + \tilde{a}^2 + \tilde{b}^2) \quad (8)$$

alındığında, fonksiyonun zamana göre türevi,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \varepsilon \dot{\varepsilon} + \tilde{a} \dot{\tilde{a}} + \tilde{b} \dot{\tilde{b}} \\ &= \varepsilon(a_m \varepsilon - \tilde{a}x - \tilde{b}u) + \tilde{a} \dot{\tilde{a}} + \tilde{b} \dot{\tilde{b}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$= a_m \varepsilon^2 - \tilde{a} \varepsilon x - \tilde{b} \varepsilon u + \tilde{a} \dot{\tilde{a}} + \tilde{b} \dot{\tilde{b}}$$

(7) eşitliğinin denge durumu durağanlığı için gereken koşul,  $\dot{V} \leq 0$  dır.

Eğer (9) eşitliğinde  $\dot{\tilde{a}} = \varepsilon x$  ve  $\dot{\tilde{b}} = \varepsilon u$  olması durumları seçildiğinde  $\dot{V} = a_m \varepsilon^2 \leq 0$  (10) olmaktadır.

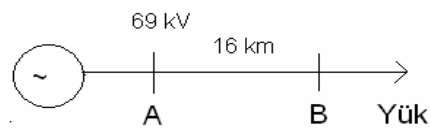
(7) eşitliğinin denge sabiti, durağandır. Bu durum  $t \rightarrow \infty$  olduğunda

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &\rightarrow 0, \\ \dot{\tilde{a}}(t) &\rightarrow 0 \\ \dot{\tilde{b}}(t) &\rightarrow 0 \end{aligned} \quad (11)$$

ile ifade edilir. (11) eşitlikleri, a ve b parametrelerinin adaptif kestirimine ilişkindir [3].

#### 4. UYGULAMA SONUÇLARI

Bu çalışmada adaptif parametre kestirimi yönteminin uygulaması amacıyla 69 kV' luk 3 fazlı 16 km uzunluğunda bir kısa iletim hattı göz önüne alınmıştır. Şekil 2' de gösterilen örnek iletim hattının faz başına seri empedansı  $0,125+j0,4375 \Omega/\text{km}$  'dir. İncelemelerde ele alınan yöntemin hattın yük durumuna bağlı olarak etkilenmesini görmek amacıyla, hattın alıcı ucunda 120 MW' lık (ağır yük) ve 4,5 MW' lık (hafif yük) yüklenme durumları göz önüne alınmıştır. Güç faktörünün 1,0 olduğu varsayılmıştır. Örnek sistem üzerindeki incelemeler MATLAB-Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [7].

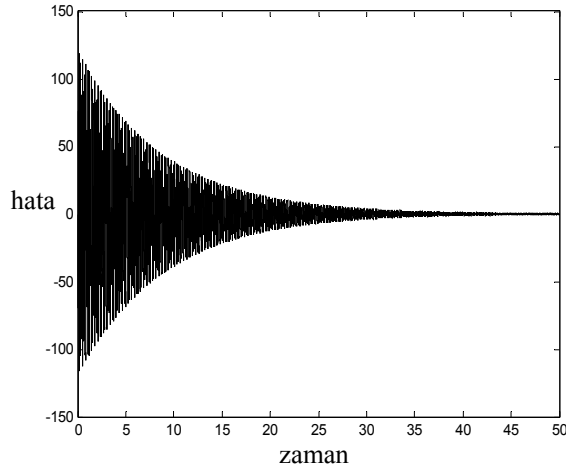


Şekil 2. Örnek iletim hattı

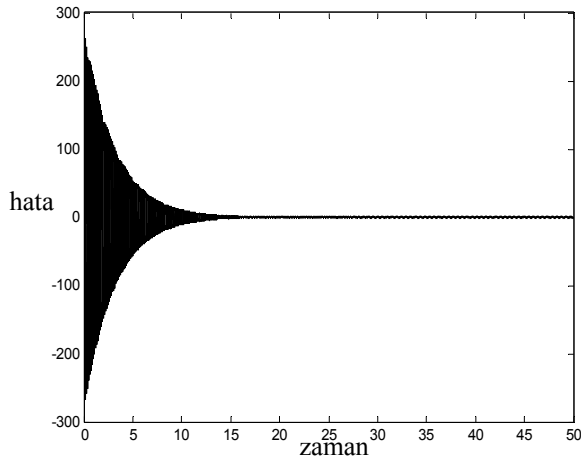
Göz önüne alınan 16 km uzunluğundaki iletim hattının seri direnci  $R=2\Omega$  ve reaktansı  $X_L=7\Omega$  dur.  $f=50$  Hz için toplam hat endüktansı  $L=0,02228$  H olarak bulunur.

İncelemelerde 50 sn' lik bir zaman süresi için elde edilen, hat uçlarındaki veriler kullanılmıştır. Örnekleme frekansı olarak 20 kHz alınmıştır.

Her iki yük durumu için elde edilen sonuçlara ait hata değişimleri şekil 3 ve 4' de verilmiştir. Bu şekillerden görüleceği üzere parametre kestirimi için 15-35 sn' lik veriye ihtiyaç duyulabilmektedir.



Şekil 3. 4,5 MW' lık yük için çıkışta elde edilen sistem hatası



Şekil 4. 120 MW' lık yük için çıkışta elde edilen sistem hatası

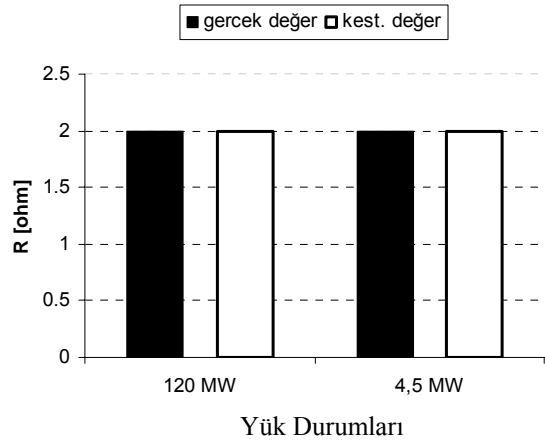
İletim hattı parametreleri R ve L nin gerçek ve kestirilen değerleri ise tablo 1' de verilir. Yöntemle elde edilen parametre değerleri ile gerçek değerler arasındaki karşılaştırma seri direnç R için şekil 5 de verilir. Hattın seri endüktansı L için elde edilen sonuçlar ise şekil 6' dan görülebilir. Bu sonuçlara göre kestirim değerlerinde hata, direnç R için her ki yük durumunda da 0 olarak bulunmuştur. Endüktans için gözlemlenen hata ise 4,5 MW' lık yük durumunda

%0,045 gibi sifıra yakın değerdedir. 120 MW' lık yük durumundaki hata ise yine oldukça küçük değerde %0,179 dir.

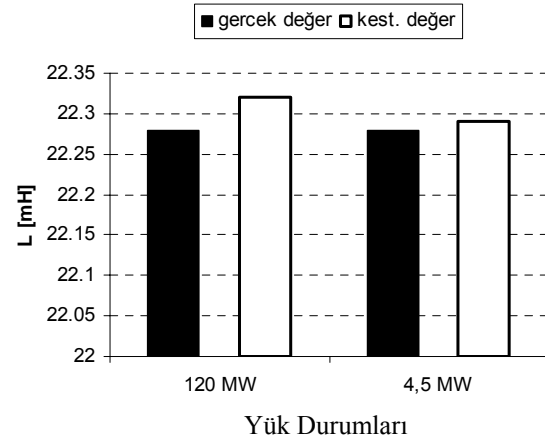
Yöntemin bir sınırlaması, parametre kestirimi için gereken zamanın uzun olmasıdır. Bu nedenle, parametre kestirimlerinin yakınsaması için veri penceresi genişletilmelidir.

Tablo-1. R ve L değerleri

	Yük					
	4,5 MW			120 MW		
	gerçek değer	kest. değer	hata oranı (%)	gerçek değer	kest. değer	hata oranı (%)
<b>R</b> <b>(<math>\Omega</math>)</b>	2	2	0	2	2	0
<b>L</b> <b>(H)</b>	0,02228	0,02229	0,045	0,02228	0,02232	0,179



Şekil 5. Direnç değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 6. Endüktans değerlerinin karşılaştırılması

## 5. SONUÇ

Bir elektrik enerji iletim sisteminde korumanın yeterli hassaslıkta ve arıza bölgelerinin büyük doğrulukta belirlenmesi için iletim hattının elektriksel parametreleri iyi bir şekilde kestirilmelidir. Parametrelerin doğru şekilde kestirimini sağlayan bir algoritmanın gelişmiş koruma aygıtlarında kullanılması, sistem korumasını iyileştirecek ve sistemin daha güvenli ve güvenilir çalışmasını sağlayacaktır. Bu çalışmada, iletim hattı parametrelerinin kestirimi konusu değerlendirilmiş ve adaptif parametre kestirimi yöntemi ele alınarak bu yöntemin bir kısa iletim hattı üzerindeki uygulaması incelenmiştir. Ayrıca iletim hattının yüklenme durumunun etkisi de araştırılmıştır.

Kullanılacak yöntemin bozucu etkilerden mümkün olduğunca az etkilenmesi, uzun iletim hattı, paralel hat ve çaprazlanmamış hat durumlarında da parametre kestirimini en hızlı ve doğru şekilde yapacak yöntemin geliştirilmesi için çalışmalar yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] Clayton P. R., Analysis of Multiconductor Transmission Lines, New York, J. Wiley, 1994
- [2] Giovanni M., Transmission Lines and Lumped Circuits, San Diego, Academic Press, 2001
- [3] Gopalakrishnan A., Fault Location and Parameter Estimation on Overhead Transmission Lines Using Synchronized Sampling, PhD. Dissertation, Texas A&M University, 2000
- [4] Philippot L., Maun J-C., An Application of Synchronous Phasor Measurement to the Estimation of the Parameters of an Overhead Transmission Line, Proceedings of the Fault and Disturbance Analysis and Precise Measurement Conference, Arlington, Virginia, November, 1995
- [5] Koglin H-J., Schmidt M., Estimation of Transmission Line Parameters by Evaluating Fault Data Records, Proceedings of the 12th Power Systems Computation Conference Dresden, Germany, August, 1996
- [6] Jiang J. A., Yang J. Z., Lin Y. H., Liu C. W., Ma J.C., An Adaptive PMU Based Fault Detection/Location Technique for Transmission Lines, Part I: Theory and Algorithms, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.15, No.2, pp.486-493, April 2000
- [7] MATLAB, Release 13, The MathWorks Inc., Natick MA, USA, 2002