

TRİSTÖR VE TRİYAK HARMONİKLERİNİN 3 BOYUTLU GÖSTERİMİ VE TOPLAM HARMONİK BOZUNUMA EĞRİ UYDURMA

Ahmet ALTINTAŞ

Dumlupınar Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü, Simav/Kütahya

Geliş Tarihi : 19.11.2003

ÖZET

Tristör ve triyak gibi anahtarlama elemanları güç elektroniğinde geniş olarak kullanılmaktadır. Bu elemanlar lineer olmayan yük karakteristiğine sahip olup etkin harmonik üretirler. Lineer olmayan bir alıcıya harmonik kompanzasyonu yapmak için, çalışma şartlarında yükün üretebileceği tüm harmonik genliklerinin ve toplam harmonik bozunum (THD-Total Harmonic Deflection) (THD) değerinin bilinmesi gereklidir. Bu da ancak harmonik analizi ile mümkündür. Harmonik analizi özel düzenekler isteyen pahalı bir işlemdir. Bu çalışmada, tristör ve triyakın çeşitli yük ve tetikleme açılarında üretmiş olduğu harmonikler 3 boyutlu uzayda ifade edilip, harmonik analiz sonuçlarının görüntülenmesine yeni bir bakış açısı getirilmiştir; her bir tetikleme açısındaki THD değerlerine eğri uydurularak polinomlar elde edilmiş, bu sayede harmonik analizi yapılmaksızın THD değerlerinin direkt olarak bulunması sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Harmonik analizi, Eğri uydurma, THD

SHOWING THE THYRISTOR AND TRIAC HARMONICS IN 3D SPACE AND CURVE FITTING TO THD

ABSTRACT

The switching equipment, like thyristors and triacs, are widely used power electronics. Also, they have non-linear load characteristics and produce effective harmonics. In order to compensate harmonic currents of non-linear loads, THD value and the amplitude of harmonics produced from loads at the working conditions should be known. Also, this process is only possible with harmonic analysis. Harmonic analysis is expensive process because of demanding special equipment. In this study, by expressing harmonics, produced thyristor and triac with different load and firing angle, in 3D space, a new viewing point to show harmonic analysis was presented; with curve fitting to the THD values at the each firing angle, polynomials were obtained; by doing so, THD values will be directly found without harmonic analysis.

Key Words : Harmonic analysis, Curve fitting, THD

1. GİRİŞ

Elektrik sistemlerinde elektrik enerjisinin kaliteli olması istenir. Kaliteli elektrik enerjisi kısaca, süreklilik, sabit frekans ve sabit genliğe sahip sinüsoidal gerilim ile açıklanabilir. Elektrik sistemlerinde şebeke geriliminin sinüsoidal değişimini bozarak enerjinin kalitesini düşüren en

önemli etken, sistemde oluşan harmoniklerdir (Arrilaga et al., 1985; Rashid, 2002).

Lineer olmayan yükler şebekeden temel dalga frekansında aktif ve reaktif akım çekerken çeşitli frekanslarda harmonik dalgaları üretirler. Bu tip yüklerin üretmiş oldukları harmonik dalgaları devrelerini şebekede bulunan alıcılar üzerinden tamamlar ve başlangıçta saf sinüsoidal olan

şebekenin gerilim dalga şeklini bozarlar. Sinüsoidal değişim göstermeyen dalgaların elektrik sistemleri ve sistem elemanları üzerindeki etkilerinin araştırılması 20. yüzyılın başlarına kadar uzanır. Sinüsten ayrılan dalgaların beraberinde getirdiği harmoniklerin mertebesi, çeşitliliği ve genel enerji sistemleri üzerindeki etkinliği yıllar boyunca artarak süregelmiştir. Bu süreç içinde, harmoniklerin etkinliğini araştırmaya yönelik gerek kuramsal gerekse çeşitli deneysel yaklaşımlar ortaya konmuştur. Araştırmalar, harmonik üreten alıcılar, harmonik analize ilişkin matematiksel tanım ve çözümleme teknikleri, harmoniklerin olumsuz etkileri, harmonik alt/üst sınırları, harmoniklerin yok edilmesi veya zayıflatılması gibi konular üzerine yoğunlaşmıştır (Anon., 1993; Chicharo and Wang, 1994; Atmaca, 1995; Ay, 1999).

Kontrol sistemlerinde anahtarlama elemanı olarak kullanılan, güç elektroniği elemanları tristör, triyak, vb.'nin iletme ve kesime geçmesi sırasında anahtarlama frekansına bağlı olarak harmonikler üretilir. Tristör ve triyak gibi anahtarlama elemanlarının doğasından kaynaklanan en önemli bozucu etki, akım ve gerilim dalga biçimlerinin periyodik olmakla birlikte, şebeke geriliminin sinüsoidal değişimini bozmalarıdır. Tristör ve triyak kontrollü tüm alıcılar, lineer olmayan bir yük karakteristiğine sahiptir ve lineer olmayan tüm alıcılar harmonik üretirler (Chicharo and Wang, 1994; Rashid, 2002).

Bu çalışmada, tristör ve triyak kontrollü omik ve endüktif yükler modellenip, her bir tetikleme açısı için akım dalga formlarının fonksiyonları elde edilmiştir; bu fonksiyonlar kullanılarak ayrı zamanlardaki akım dalga verileri elde edilip bu verilere FFT uygulanmıştır; FFT sonunda 19. harmoniğe kadar hesaplanan harmonik genlikleri üç boyutlu (tetikleme açısı, harmonik mertebesi, harmonik genliği) ortama taşınmıştır; her bir tetikleme açısı için THD değeri bulunup, bu değerlere eğri uydurularak (curve-fitting) polinomlar elde edilmiştir. Polinomlar sayesinde bu yük türlerine ait THD değerleri harmonik analizi yapılmaksızın bulunabilecektir. Çalışmanın sonunda, gerçek veriler ile polinomdan alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. YÜK AKIMI FONKSİYONLARI

Yük akımlarını tanımlayabilmek için parçalı fonksiyonlardan faydalanılmıştır. Tetikleme açısı (α) radyan cinsinden alınarak, tristör kontrollü omik yükün bir periyotluk zaman (t) parametrelili akım dalga fonksiyonu Eşitlik 1 ile, triyak kontrollü omik

yükün akım dalga fonksiyonu Eşitlik 2 ile tanımlanmıştır. Burada $f = 50\text{Hz}$, $\omega = 2\pi f$ ve $0 \leq t \leq 0.02 \text{ sn}$ 'dir

$$f(t) = \begin{cases} 0 \leq \omega t < \alpha, & f(t) = 0 \\ \alpha \leq \omega t \leq \pi, & f(t) = \sin(\omega t) \\ \pi < \omega t < 2\pi, & f(t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$f(t) = \begin{cases} 0 \leq \omega t < \alpha, & f(t) = 0 \\ \alpha \leq \omega t \leq \pi, & f(t) = \sin(\omega t) \\ \pi < \omega t < \pi + \alpha, & f(t) = 0 \\ \pi + \alpha \leq \omega t < 2\pi, & f(t) = \sin(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

Yük açısı $= a \tan(\omega L/R)$ ile radyan cinsinden ifade edilip, tristör kontrollü endüktif yükün akım dalga fonksiyonu Eşitlik 3 ve triyak kontrollü endüktif yükün akım dalga fonksiyonu Eşitlik 4 ile tanımlanmıştır.

$$f(t) = \begin{cases} Id(t) > 0, & f(t) = Id(t) \\ \text{Haricinde} & f(t) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$f(t) = \begin{cases} Id1(t) > 0 \ \& \ t < 0.02, \ f(t) = Id1(t) \\ Id2(t) < 0 \ \& \ t > 0.01, \ f(t) = Id2(t) \\ \text{Haricinde,} & f(t) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

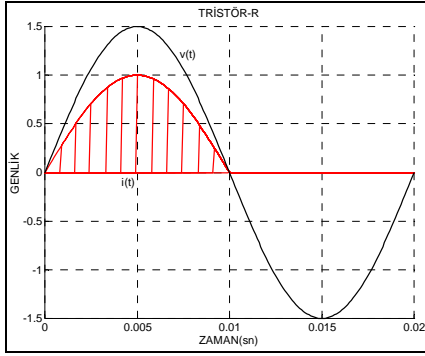
$Id(t), Id1(t), Id2(t)$ sırasıyla Eşitlik 5, Eşitlik 6 ve Eşitlik 7'de verilmiştir. Burada, R ve L , yükün omik ve endüktans değeri olup, $\beta = \alpha + \pi$ dir.

$$Id(t) = \sin(\omega t - \alpha) - \sin(\alpha - \omega t) e^{-\frac{R(\omega t - \alpha)}{\omega L}} \quad (5)$$

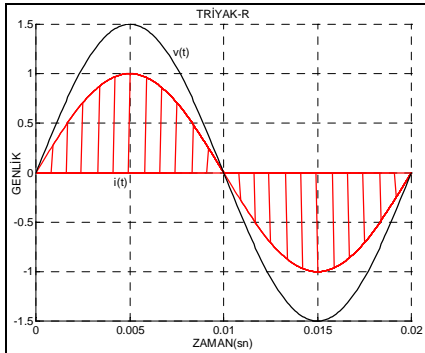
$$Id1(t) = \sin(\omega t - \alpha) - \sin(\alpha - \omega t) e^{-\frac{R(\omega t - \alpha)}{\omega L}} \quad (6)$$

$$Id2(t) = \sin(\omega t - \beta) - \sin(\beta - \omega t) e^{-\frac{R(\omega t - \beta)}{\omega L}} \quad (7)$$

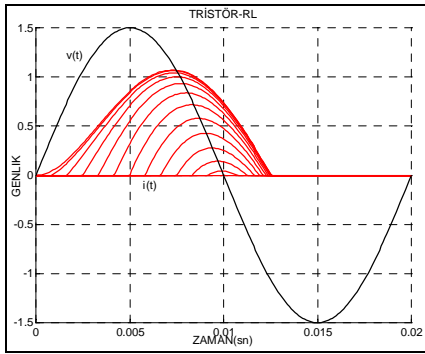
Tristör ve triyak kontrollü omik ve endüktif ($\cos \phi = 0.707$) yükün çeşitli tetikleme açılarındaki akım değişimleri Şekil 1'de görülmektedir. Eğrileri normalize etmek için, yüklerin 0° tetikleme durumundaki akımın maksimum değeri 1 Amper alınmıştır. Tetikleme açısı artış miktarı 15° dir.



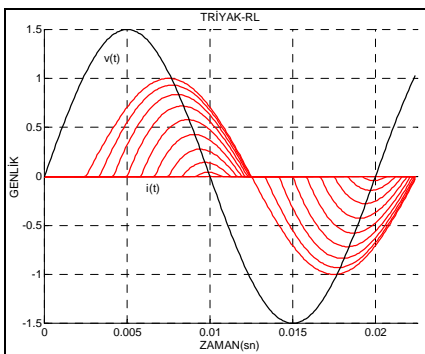
(a)



(b)



(c)



(d)

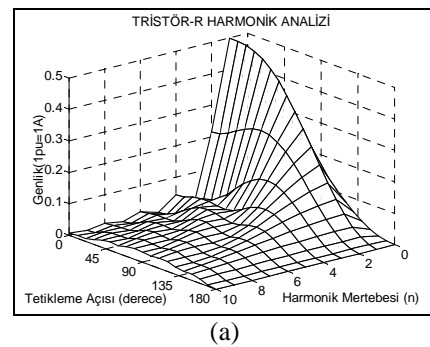
Şekil 1. Tristör ve triyak kontrollü omik ve endüktif ($\cos = 0,707$) yüklerin çeşitli tetikleme açılarındaki akım değişimleri, a) Tristör kontrollü omik yük, b) Triyak kontrollü omik yük, c) Tristör kontrollü endüktif yük, d) Triyak kontrollü endüktif yük

3. FOURIER ANALİZİ VE HIZLI FOURIER DÖNÜŞÜMÜ (FFT)

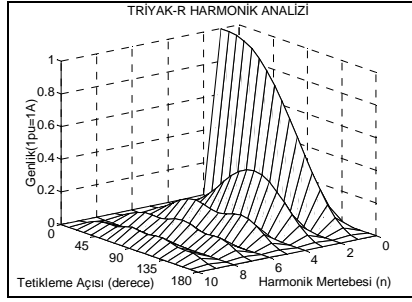
Periyodik bir sinyal, çeşitli genlik ve frekanstaki bir çok sinüs sinyalinin toplamı şeklinde ifade edilebilir. Bu işlem Fourier analizi olarak bilinmektedir. En düşük frekanslı sinüs sinyali 1.harmonik (temel dalga), diğerleri ise harmonik bileşenler adını almaktadır. Analiz sonunda a_0 katsayısı ve a_n , b_n seri katsayıları hesaplanarak harmonik genlikleri bulunmuş olur. n indisi harmonik mertebesini göstermekte olup, a_n ve b_n n . harmoniğin bileşenleridir. Fourier analizinde integral alma işleminin kullanılması, analiz süresini oldukça uzatmaktadır.

Periyodik olmayan sinyallerin de harmonik analizinin yapılabilmesi amacıyla, sayısal işlemci tabanlı Ayrık Fourier Dönüşüm (DFT) yöntemi tanımlanmıştır. Algoritması gereği, DFT yöntemi de Fourier analizi gibi uzun bir zaman almaktadır. Daha sonraki yıllarda dönüşüm süresini kısaltmak için DFT'nun özel bir durumu olan Hızlı Fourier Dönüşüm (FFT) yöntemi geliştirilmiştir (Cooley and Turkey, 1965; Howard, 1991). FFT algoritmasının hızlı olması, uygun veri sayısının (2^n , $n = +$ tamsayı) işlenmesi ile sağlanmıştır. Fourier analizi periyodik olan sinyalin fonksiyonunu kullanırken, DFT ve FFT yöntemleri periyodik olan veya olmayan sinyalin örneklenmiş verilerini kullanmaktadır.

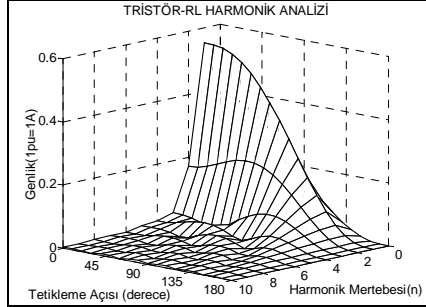
Yapılan simülasyonlarda Matlab paket programı kullanılmış olup (Ingle and Prokais, 2000), şebeke geriliminin sinüsoidal olduğu kabul edilmiştir. Program ile her bir tetikleme açısındaki akım fonksiyonunun verileri alınmıştır. Elde edilen matrisel formdaki akım verilerine FFT uygulanarak harmonik analizi yapılmıştır. Hesaplanan harmonik genlikleri ve harmonik mertebeleri ile tetikleme açıları kullanılarak üç boyutlu (3B) görüntü elde edilmiştir. 10. harmoniğe kadar elde edilen 3B görünüm Şekil 2'de verilmiştir. 0.mertebeden harmonikler DC bileşeni temsil etmektedir.



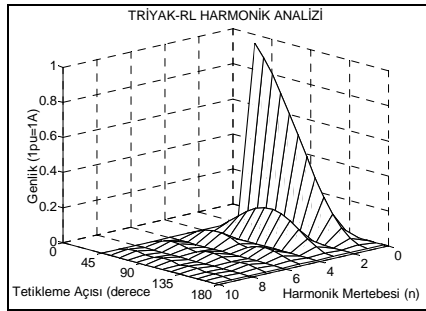
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2. 10. harmoniğe kadar elde edilen 3B görüntümler, a) Tristör kontrollü omik yük, b) Triyak kontrollü omik yük, c) Tristör kontrollü endüktif yük, d) Triyak kontrollü endüktif yük

4. THD VE EĞRİ UYDURMA

Elektrik sistemlerinde lineer olmayan bir alıcının harmonik etkinliği "Toplam Harmonik Bozunumu (THD)" ile yüzde (%) olarak ifade edilip Eşitlik 8 ile bulunabilir.

$$THD(I) = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}{I_1^2}} \cdot 100 \quad (8)$$

Burada indisler harmonik mertebelerini göstermektedir. THD harmonik normuna göre, 19. harmoniğe kadar yapılan hesaplama doğru bir THD değeri için yeterli olacaktır. FFT yöntemi ile

hesaplanan harmonik değerleri kullanılarak her bir tetikleme açısı için THD değeri hesaplanmıştır. 10°'lik artışlarla hesaplanan THD değerleri Tablo 1'de verilmiştir. 180° tetikleme durumu bir anlam ifade etmediği için dikkate alınmamıştır.

Tablo 1. Çeşitli Yük ve Tetikleme Açılarında Elde Edilen THD Değerleri

Açı	THD				
	Tristör-R	Triyak-R	Tristör-RL	Açı	THD
0°	44.042	0	32.205		
10°	45.292	2.7113	32.82		
20°	49.061	8.0189	34.7		
30°	54.778	14.295	37.726	45°	0
40°	61.84	21.257	41.706	55°	6.1636
50°	69.888	28.671	46.457	65°	12.198
60°	78.722	36.489	51.883	75°	18.672
70°	88.361	44.784	58.01	85°	25.676
80°	98.868	53.603	64.826	95°	33.332
90°	110.5	63.187	72.571	105°	41.878
100°	123.53	73.699	81.359	115°	51.667
110°	138.5	85.598	91.669	125°	63.181
120°	156.16	99.347	104.02	135°	77.523
130°	177.71	115.91	119.39	145°	96.167
140°	205.52	136.86	139.6	155°	123.55
150°	243.16	164.97	168.05	165°	171.16
160°	302.57	208.55	214.72	175°	271.11
170°	385.33	270.44	312.63		

2B düzlemde, tetikleme açısı X-ekseninde, THD değerleri Y-ekseninde alındığında, değişimin parabolik bir eğri oluşturduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla, bu değişimi tanımlayabilecek bir polinom en az 2. dereceden olmalıdır. Eğri uydurma işlemi (curve-fitting), bir grup veriyi ara değerleri ile birlikte ifade edebilecek bir polinom bulma işlemidir.

Kullanılan eğri uydurma yönteminde en küçük kareler (least-squares) metodu kullanılmıştır. Bu metod ile bulunan polinom, verilen noktalara olan mesafenin karelerinin toplamını azaltacak şekilde oluşturulur (Howard, 1991; Biran and Breiner, 1995).

Elimizde bulunan m adet (x_i, y_i) verisine Eşitlik 9'daki gibi 2. dereceden bir polinom uydurulmak istensin;

$$y = c_1 x^2 + c_2 x + c_3 \quad (9)$$

Karesi alınmış hatanın toplamı Eşitlik 10 ile bulunabilir.

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^m e_i^2 = \sum_{i=1}^m (y_i - c_1 x_i^2 - c_2 x_i - c_3)^2 \quad (10)$$

Hata toplamının c_1, c_2 ve c_3 polinom katsayılarına göre diferansiyelini alıp, türevlerini sifıra eşitlersek,

Eşitlik 11'deki denklem sistemini elde ederiz. Denklem sisteminin çözümü ile polinom katsayıları bulunmuş olur. Burada i sayısı, 1'den m 'ye kadar değişmektedir.

$$\begin{bmatrix} \sum x_i^4 & \sum x_i^3 & \sum x_i^2 \\ \sum x_i^3 & \sum x_i^2 & \sum x_i \\ \sum x_i^2 & \sum x_i & m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 y_i \\ \sum x_i y_i \\ \sum y_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

Eğri uydurma yöntemi kullanılarak, hesaplanan THD değerlerini temsil edebilecek 4., 5. ve 6. dereceden polinomlar elde edilmiştir. Polinom derecesi arttıkça doğal olarak hassasiyet de artacaktır. Eğri uydurma işleminde, polinom katsayılarının uygunluğu için tetikleme açısı raydan

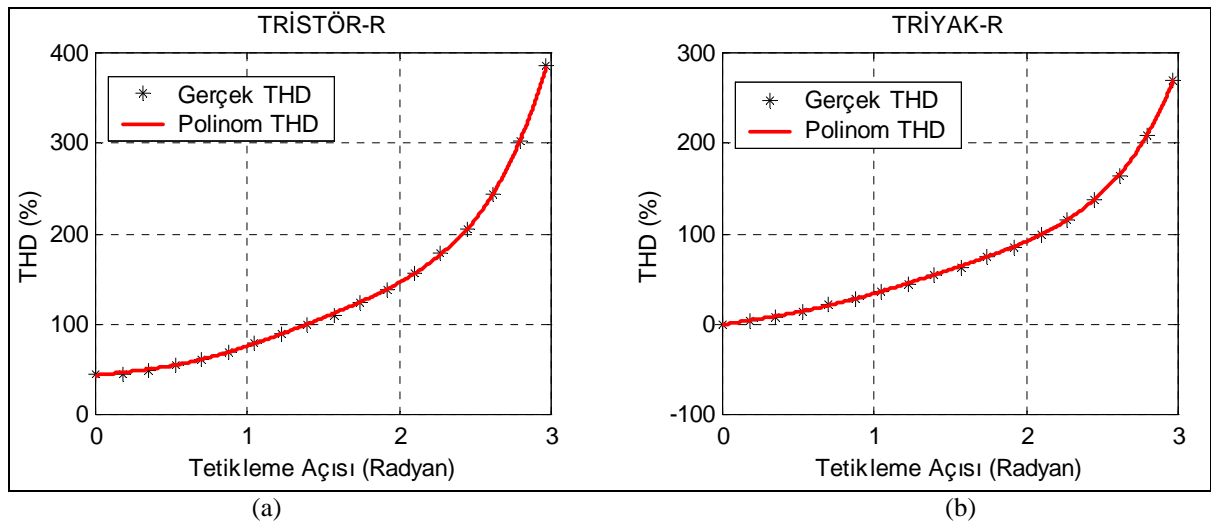
cinsinden ($0 \leq \alpha < \pi$) alınmıştır (tetikleme açısının derece cinsinden alınması durumunda polinom katsayıları çok küçük çıkacaktır). Eğri uydurma sonucunda elde edilen polinom katsayıları Tablo 2'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre tristör kontrollü omik yüke ait 4. dereceden polinom Eşitlik 12'deki gibi olacaktır.

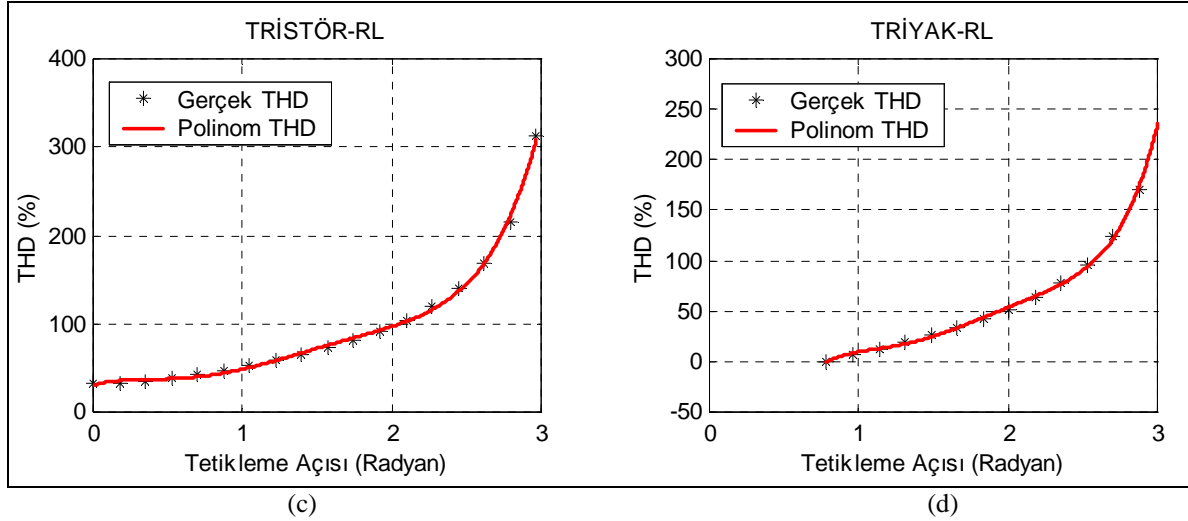
$$P_{\text{THD}} = 18.026x^4 - 81.702x^3 + 135x^2 - 39.622x + 46.879 \quad (12)$$

Hesaplanan THD değerleri ile 5. dereceden uydurulan polinom eğrileri Şekil 3'de görülmektedir. Bu eğrilerden de anlaşılacağı üzere, sonuçlar çok az hata ile örtüşmektedir.

Tablo 2. Eğri Uydurma Sonucunda Elde Edilen Polinom Denklemleri

YÜK TÜRÜ	POL. DER.	x^6	x^5	x^4	x^3	x^2	x	Sabit
Tristör-R	P4			18.026	-81.702	135	-39.622	46.879
	P5		7.92	-40.722	71.363	-29.041	22.867	43.099
	P6	3.8826	-26.64	74.808	-107.13	96.075	-9.0974	44.157
Triyak-R	P4			13.198	-59.399	95.132	-14.788	1.8861
	P5		5.8413	-30.131	53.493	-25.857	31.3	-0.9015
	P6	3.4587	-24.945	72.783	-105.51	85.597	2.8268	0.04129
Tristör-RL $\cos = 0.707$	P4			21.518	-100.89	162.06	-65.729	37.121
	P5		14.791	-88.2	184.97	-144.31	50.975	30.063
	P6	10.929	-82.487	236.99	-317.44	207.86	-38.996	33.042
Triyak-RL $\cos = 0.707$	P4			52.975	-347.25	826.82	-796.03	266.74
	P5		46.003	-388.62	1274.8	-2004.8	1537.9	-455.74
	P6	36.121	-370.09	1538.8	-3302.5	3848.5	-2268.6	524.63





Şekil 3. Gerçek ve polinom THD sonuçları, a) Tristör kontrollü omik yük, b) Triyak kontrollü omik yük c) Tristör kontrollü endüktif yük, d) Triyak kontrollü endüktif yük

Gerçek THD değerleri ile 5. dereceden elde edilen polinom THD sonuçları ve % olarak hata değeri Tablo 3'te verilmiştir. Seçilen bu açı değerleri için en büyük hata tristör kontrollü endüktif yükte oluşmuştur. Hata oranlarını azaltmak için 6. dereceden polinom denklemleri kullanılabilir.

Tablo 3. Gerçek ve Polinom THD Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yük Türü ⇒	Tristör- R	Triyak- R	Tristör- RL	Triyak- RL
Sonuçlar ⇓	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 95^\circ$
Gerçek THD	78.72	36.489	51.883	33.33
Polinom THD	78.153	36.072	50.165	32.89
Hata (%)	0.72	1.1	3.3	1.3

5. SONUÇ

Bu çalışmada, tristör ve triyakın çeşitli yük ve tetikleme açılarında ürettiği harmonikler 3B uzayda ifade edilmiş ve her bir tetikleme açısında hesaplanan THD değerlerine eğri uydurulmuştur. Bu sayede, harmonik analizi yapılmaksızın, farklı tetikleme açılarındaki THD değerleri polinom kullanılarak bulunabilecektir.

Bu amaçla, tristör ve triyak kontrollü omik ve endüktif yükler modellenip, 10° lik tetikleme açısı artışı ile akım dalga formlarının fonksiyonları elde edilmiştir; bu fonksiyonlar yardımı ile ayrık zamandaki akım dalga verileri elde edilip bu verilere

FFT uygulanmıştır; FFT sonunda 19. harmoniğe kadar hesaplanan harmonik genlikleri 3B ortama taşınmıştır; her bir tetikleme açısına karşılık gelecek 18 adet (triyak kontrollü endüktif yük için 14 adet) THD değeri bulunup, bu değerlere 'en küçük kareler yöntemi' ile eğri uydurulmuş ve üç adet polinom elde edilmiştir.

Elde edilen polinom denklemleri, tristör ve triyak kontrollü tüm omik yükler için direkt olarak kullanılabilir. Fakat, endüktif yüklerin güç katsayısının farklı olabilmesi sınırlayıcı bir etkidir. 3B görüntüler, her bir harmoniğin tetikleme açısına göre değişim eğrisini ve genliğini açık olarak ifade etmektedir. Ayrıca, çok parametrelili harmonik analizinin görüntülenmesinde farklı bir yaklaşım sunmaktadır. Bu yöntemle, periyodik akım dalga şekline sahip non-lineer tüm yüklerin (sabit PWM ve PAM kontrollü alıcılar, vb.) harmonikleri 3B uzayda ifade edilebilir.

6. KAYNAKLAR

Anonymous, 1993. IEEE Standard 519- "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", IEEE, New York.

Arrilaga, J., Bradley, D. A. and Bodger, P. S. 1985. Power Systems Harmonics. John Wiley and Sons, Inc.

Atmaca, E. 1995. Harmoniklerin Elektrik Donanımı Üzerindeki Etkileri. 3e Dergisi, 19, 311-318.

Ay, S. 1999. Alçak Gerilim Tesislerinde Harmoniklerin İncelenmesi. Kaynak Elektrik Dergisi, 129, İstanbul,

Biran, A., Breiner, M. 1995. MATLAB for Engineers. Addison-Wesley Publishing Company.

Chicharo, J., Wang, H. 1994. Power System Harmonic Signal Estimation and Retrieval for Active Power Filter Applications. IEEE Trans. on Power, 9 (6), 580-586.

Cooley, J. W., Tukey, J. W. 1965. An Algorithm

for the Machine Computation of Complex Fourier Series. Mathematical Computations, 19, 297-301.

Howard, A. 1991. Data Acquisition Techniques Using Personal Computers. Academic Press, Inc., 184-191.

Ingle, V. K., Proakis, J. G. 2000. Digital Signal Processing Using Matlab. Bookware Companion Series, 116-172.

Rashid, M. H. 2002. Power Electronics Handbook. Academic Press, Inc., New York, 559-615, 820-829.