

FLORESAN LAMBALARIN HARMONİK GÜÇ HESAPLARI VE ÖLÇÜMÜ

Osman KILIÇ⁽¹⁾

Bora ACARKAN⁽²⁾

Selim AY⁽³⁾

Niyazi GÜNDÜZ⁽⁴⁾

⁽¹⁾Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü

^{(2),(3)}Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

⁽⁴⁾İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü & NyZ Mühendislik Ltd. Şti.

⁽¹⁾osman.kilic@marmara.edu.tr, ⁽²⁾acarkan@yildiz.edu.tr, ⁽³⁾selimay@yildiz.edu.tr, ⁽⁴⁾ngunduz@nyz.com.tr

Özet – Floresan lambalar hızla gelişen LED teknolojisine rağmen günümüzde ticari ve kamu binalarında en çok kullanılan ve vazgeçilmez ışık kaynaklarıdır. Nonlineer karakteristiğe sahip bu lambaların ve elektronik güç kaynağına sahip donanımlarının yaygın kullanımıyla bu donanımlardan kaynaklanan güç kalitesi problemleri de giderek artmaktadır. Bu konuda birçok çalışma da yapılmasına rağmen mevcut analizlerin yetersiz kaldığı ve tedbirlerin alınmadığı durumlar oluşabilmektedir. Özellikle filtrelenmediği takdirde yüksek oranda harmonik akım üreten kompakt floresan lambalar, tek başına düşünüldüğünde güç sisteminde büyük bir bozucu etkiye sahip değildir. Fakat bu düşük güçlü donanımların ticari binalar, hastane, okul ve ofis binaları gibi yapılar da bir arada topluca veya yayılı yük olarak yüksek sayılarda kullanılması, güç sisteminde önemli oranlarda “harmonik kirlilik” potansiyeli oluşturmaktadır. Bu çalışmada düşük kayıplı manyetik balastlı, elektronik balastlı ve kompakt floresan lambaların harmonik bileşenleri klasik yaklaşımdan (aktif, reaktif, distorsiyon gücü) farklı olarak **nonaktif güç** kavramını içeren güç hesaplamaları floresan sistemlerine uygulanmış ve deneysel olarak ispat edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Floresan lamba, Kompakt floresan, Elektronik Balast, Harmonik, Nonaktif Güç, Harmonik Analiz, Harmonik Akım Sınırları.

1. GİRİŞ

Harmonik üreten donanımlar, evlerden üretim tesislerine kadar çok geniş alanlara yayılmışlar ve günlük hayatta kullanımları vazgeçilmez hale gelmiştir [1],[2],[6].

Bina ve çevre aydınlatmasında yaygın olarak kullanılan floresan lamba tesislerinde tek harmoniklerin seviyesi önemli oranda sistemi etkiler. Özellikle üç ve üçün katlarındaki “triplen” harmonik akım bileşenleri, üç fazlı dört iletkenli aydınlatma devrelerinde nötr iletkeninden geçerek yüklenen iletkenin ısınmasına neden olur. Ayrıca

floresan lambalara bağlanan balastların manyetik devreleri olması nedeniyle bu elemanlar da harmonik üretirler [6],[7].

Son yıllarda manyetik balastların yerine kullanılmak üzere geliştirilen ve anahtarlamalı güç kaynağı prensibi ile çalışan elektronik balastlar ve elektronik balast devreleri içeren kompakt floresan lambalar da harmonik üretirler [5],[6].

2. TEK FAZLI SİSTEMLERDEKİ GÜÇ TANIMLARI

Efektif gerilim ve akım ifadeleri, gerilim ve akımın DC bileşenini de içerecek şekilde aşağıdaki biçimde ifade edilebilir:

$$\left. \begin{aligned} V &= \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} V_h^2} \\ I &= \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2} \end{aligned} \right\}$$

Temel bileşen büyüklükleri (V_1 , I_1), harmonik bileşenlerden (V_H , I_H) ayrıştırılırsa aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$\left. \begin{aligned} V^2 &= V_1^2 + V_H^2 \\ I^2 &= I_1^2 + I_H^2 \end{aligned} \right\}$$

Burada,

$$V_H^2 = \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h^2$$

$$I_H^2 = \sum_{h \neq 1}^{\infty} I_h^2$$

“Görünen Güç” (S) elde edilir:

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1 I_1)^2 + (V_H I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_1 I_H)^2$$

Görünen gücün iki bileşeni vardır:

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2$$

Burada,

$$S_1^2 = (V_1 I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \varphi_1$$

$$\varphi_1 = \alpha_1 - \beta_1$$

“Temel Bileşenin Görünen Gücü” (S_1), “Temel Bileşenin Aktif Gücü” (P_1) ve “Temel Bileşenin Reaktif Gücü” (Q_1) ile ifade edilmiştir [1]-[3].

Bu terimlerin dışında “Nonaktif Güç” (Aktif olmayan Güç) (N) tanımı yapılabilir:

$$\left. \begin{aligned} N^2 &= S^2 - P^2 \\ N &= \sqrt{S^2 - P^2} \end{aligned} \right\}$$

“**Temel Bileşen Dışı Görünen Güç**” (S_N), üç bileşenden oluşmaktadır:

$$S_N^2 = (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2$$

Bu ifadedeki ilk terim $V_1 I_H$, “Akım Distorsiyon Gücü” olarak adlandırılır ve temel bileşen geriliminin efektif değeri ile harmonik akımının efektif değerinin çarpımına eşittir. Genellikle bu terim denklemdaki en baskın terimdir. Ayrıca $I_H > 0$ durumunda, gerilimin tam sinüsoidal olması gibi aşırı uç durumlarda da bu terim ağırlıktadır. “Gerilim Distorsiyon Gücü” olarak adlandırılan ikinci terim $V_H I_1$, temel bileşen akımının efektif değeri ile harmonik geriliminin efektif değerinin çarpımına eşittir ve ele alınan baradaki gerilim distorsiyonunu yansıtır. Üçüncü terim, “Harmonik Görünen Güç” (S_H), iki ayrı terimle ifade edilebilir:

$$S_H^2 = (V_H I_H)^2 = P_H^2 + N_H^2$$

Burada,

$$P_H = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h$$

$$\varphi_h = \alpha_h - \beta_h$$

Burada, P_H , “Toplam Harmonik Aktif Güç”, diğer terim N_H ise “Toplam Harmonik Nonaktif Güç” tür.

Gerilim ve akımın THD 'sinin fonksiyonu biçiminde yeniden yazılabilir:

$$\left(\frac{S_N}{S_1} \right)^2 = \left(\frac{I_H}{I_1} \right)^2 + \left(\frac{V_H}{V_1} \right)^2 + \left(\frac{V_H I_H}{V_1 I_1} \right)^2$$

$$\left(\frac{S_N}{S_1} \right)^2 = (THD_I)^2 + (THD_V)^2 + (THD_I \cdot THD_V)^2$$

Yaklaşık olarak $0.01 < THD_V < 0.03$ arasında değişen THD_V değeri, enerji kuruluşları tarafından da $THD_V < 0.05$ sınırında tutulmaya çalışılmaktadır. Buna karşın THD_I değerleri THD_V değerlerine göre çok daha büyüktür. Tipik bir orta gerilim veya alçak gerilim tesisinde $0.05 < THD_I < 0.09$ arasında değişmektedir. Bazı alçak gerilim nonlineer yükleri 1,5'ten büyük THD_I ile çalışabilir ve bazı yük grupları THD_I değerini 0.9'un üzerine çıkarmak için zorlayabilir [1],[2].

$THD_I > \%20$ ve $THD_V < \%5$ için,

$$\frac{S_N}{S_1} \approx THD_I$$

Daha iyi bir yaklaşım aşağıdaki ifadeyle elde edilebilir:

$$\frac{S_N}{S_1} \approx \sqrt{(THD_I)^2 + (THD_V)^2}$$

denklemindeki normalize edilmiş yaklaşım kullanıldığında %5'ten küçük THD_V değerleri için hata %0.15'ten küçüktür.

“**Normalize edilmiş Harmonik Görünen Güç**” (S_H/S_1) ifadesi hesaplanabilir:

$$\frac{S_H}{S_1} = \frac{V_H I_H}{V_1 I_1} = THD_I \cdot THD_V$$

Örneğin, $THD_I = 0.4$ ve $THD_V < 0.05$ için $S_H/S_1 < 0.02$ olur. $P_H \leq S_H$ olduğu için P_H/S_1 ifadesi genellikle çok küçük değerlerdedir, pratikte P_H/S_1 değerinin 0.015'i aştığı görülmez.

“**Temel Bileşen Dışı Görünen Güç**” ve “**Harmonik Görünen Güç**” arasındaki ayrımın altının çizilmesi oldukça önemlidir. Harmonik Görünen Güç (S_H), Temel Bileşen Dışı Görünen Güç'ten (S_N) çok daha küçüktür ve bir nonlineer yük hakkında çok fazla bilgi vermez. Harmonik güç akışını değerlendirmek için çok etkili bir yol değildir. Çünkü gözlenen yükte veya yük grubunda bazı harmonik derecelerinde güç üretilirken diğerlerinde güç tüketilebilir. Bu durumda P_H teriminde birbirini karşılıklı götüren terimler bulunacaktır. Her bir harmoniğin enerji akışına etkisinin açık olarak anlaşılabilmesi sadece harmonik akım ve gerilim fazörlerinin (genlik ve faz açısı) tam bir dökümünün incelenmesiyle mümkün olabilir.

Genellikle S_N ve normalize edilmiş değer S_N/S_1 terimleri, **harmonik “kirlenme”** seviyesini gösterme bakımından **P_H değerinden çok daha iyi sonuç vermektedir**. İyi filtrelenmiş bir nonlineer yük, çok düşük bir S_N/S_1 oranıyla karakterize edilecektir. Akım distorsiyonundaki bir artış, P_H değerini her zaman artırmadığı halde normalize edilmiş S_N/S_1 değerini daima artıracaktır.

Bir sistemden çekilen enerjinin etkinliğini ölçmek için kullanılan en önemli ifade ‘‘Toplam Güç Faktörü’’ ifadesidir.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{(P_1 + P_H)}{S}$$

P_1 , Q_1 ve S_1 güçlerinin harmonik güçlerden ayrıştırılması, temel frekanstaki bozulmamış güç akışının izlenmesini ve mühendislik açısından önemli ekonomik kriterlerin (örneğin güç faktörünü düzeltmek için kondansatör kullanımı vb.) uygulanmasını kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle temel bileşen güçleri harmonik bileşenlerden ayrı olarak incelendiğinde, ‘‘Deplasman Güç Faktörü’’ de (dPF) oldukça önemlidir [1]-[3],[6]:

$$dPF = \frac{P_1}{S_1} = \cos \varphi_1$$

3. TS EN 61000-3-2 STANDARTI

TS EN 61000-3-2 standardı, alçak gerilimde faz başına 16 A'den düşük akım çeken donanımın harmonik akım sınırlarını belirlemektedir [4],[5],[7].

Bu standart, genel elektrik şebeke sistemi içine enjekte edilen harmonik akımların değerlerini kapsamaktadır ve belirlenmiş şartlar altında deneyden geçirilen donanımın giriş akımının harmonik bileşenlerinin sınır değerlerini belirlemektedir. Bu standart, alçak gerilim dağıtım sistemlerine bağlanması düşünülen ve faz başına giriş akımı 16 A'e (16 A dahil) kadar olan elektrik ve elektronik donanımlara uygulanabilir. Anma gerilimleri 220 V'tan (faz-nötr) daha düşük olan sistemler için sınırlamalar göz önüne alınmamıştır.

Aydınlatma donanımı aşağıda belirtilen donanımları kapsamaktadır [5],[7].

- Lambalar ve aydınlatma cihazları,
- Birincil fonksiyonlarından birinin aydınlatma yaptığı çok fonksiyonlu donanımın ışıklandırma kısmı,
- Deşarj lambaları için bağımsız balastlar ve bağımsız akkor lamba transformatörleri,
- Mor ötesi (UV) ve kızıl ötesi (IR) radyasyon donanımı,
- Işıklıdırılmış reklam tabelaları,
- Akkor lambalardan başka lambalarda kullanılan ışık zayıflatıcıları.

C sınıfı:

- Aydınlatma donanımı.

C Sınıfı Donanımlar için Sınır Değerler

a) Aktif giriş gücü >25 W

25 W'tan daha büyük bir giriş gücüne sahip aydınlatma donanımı için harmonik akımlar, Çizelge 2.9'da verilen bağıl sınır değerlerini geçmemelidir.

b) Aktif giriş gücü ≤ 25 W

25 W'a eşit veya daha küçük bir aktif giriş gücüne sahip gaz deşarjlı aydınlatma donanımı aşağıdaki iki şarttan birine uymalıdır:

- Harmonik akımlar, Çizelge 2.10'daki 2. sütunun gücle ilgili sınır değerlerini geçmemelidir,
- Ana bileşen akımın bir yüzdesi olarak ifade edilen üçüncü harmonik akım %86'yı ve beşinci %61'i geçmemelidir. Deşarjlı aydınlatma donanımı ışık zayıflatıcı bir cihaza sahipse, ölçme yalnız tam yüklü durumda yapılmalıdır.

Tablo 1. C sınıfı donanımlar için harmonik sınır değerleri

Harmonik derecesi (h)	Temel frekanstaki giriş akımının yüzdesi olarak ifade edilen izin verilen en büyük harmonik akım (%)
2	2
3	30×Devrenin güç faktörü
5	10
7	7
9	5
11 ≤ h ≤ 39	3

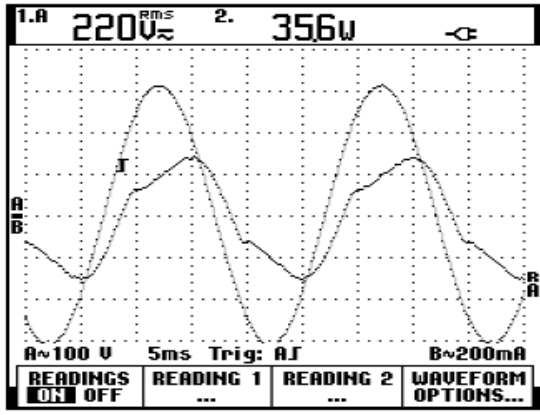
4. SAYISAL UYGULAMA ve ÖLÇÜMLER

Uygulama kısmında farklı tipteki floresan lambaların kalibrasyonlu cihazlarla deneysel ölçümleri yapılmış ve nonaktif güç değerlerini de içeren kapsamlı hesap analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında düşük kayıplı manyetik balastlı floresan lamba, filtresiz elektronik balastlı lamba ve kompakt floresan lamba örneklerine yer verilmiştir. Çalışma nominal gerilimin alt sınırı olan 220 V değerindeki (özel güç kaynağından sağlanan) sinüsoidal gerilim ($THD_V < \%1$) altında yapılmıştır [7]-[10].

4.1. Düşük Kayıplı Manyetik Balastlı Floresan Lamba

2x18 W Floresan Lambalı Armatür

Donanımın özellikleri: Lamba: PHILIPS TLD 18 W, Balast: HELVAR (1 adet, lambalar seri bağlantılı), 20/18 W, 230 V, 0,37 A, 50 Hz.



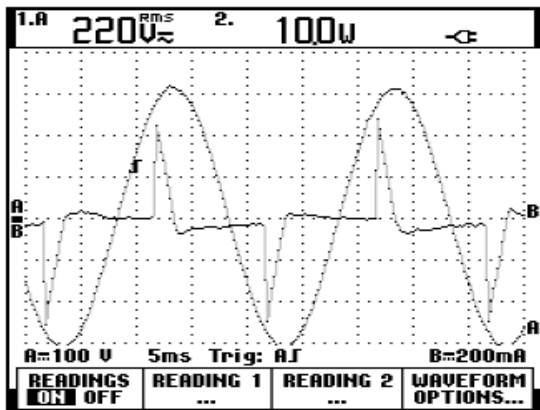
Şekil 1. 2x18 W floresan lambalı armatüre ait gerilim ve aktif güç ekranını gösteren ölçüm ekranı

Tablo 2. 2x18 W floresan lambalı armatüre ait hesaplanan güç değerleri

Büyüklik		Değer
Görünen Güç	S	43,2005 VA
Temel Bileşenin Görünen Gücü	S_1	42,6011 VA
Temel Bileşenin Aktif Gücü	P_1	34,1631 W
Temel Bileşenin Reaktif Gücü	Q_1	25,4505 VAR
Deplasman Güç Faktörü	dPF	0,8019
Toplam Harmonik Aktif Güç	P_H	-0,0039 W
Aktif Güç	P	34,1592 W
Nonaktif Güç	N	26,4467 VAR
Güç Faktörü	PF	0,7907
Temel Bileşen Dışı Görünen Güç	S_N	7,1714 VA
Harmonik Görünen Güç	S_H	0,0597 VA

4.2. Elektronik Balastlı Floresan Lamba

Donanımın özellikleri: ECOPLUS, 1x18 W, 220-230 V, 50-60 Hz, $\cos\phi=0,58$, $PF=0,33$. (Harmonik filtresiz)



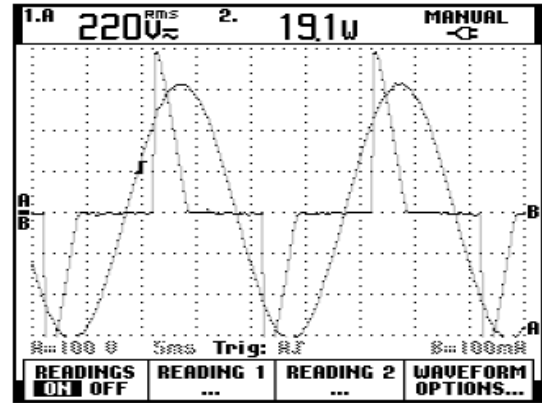
Şekil 2. Elektronik balastlı floresan lamba devresine ait gerilim ve aktif güç ekranını gösteren ölçüm ekranı

Tablo 3. 1x18 W elektronik balastlı floresan lambaya ait hesaplanan güç değerleri

Büyüklik		Değer
Görünen Güç	S	26,9785 VA
Temel Bileşenin Görünen Gücü	S_1	13,7614 VA
Temel Bileşenin Aktif Gücü	P_1	10,2276 W
Temel Bileşenin Reaktif Gücü	Q_1	9,2071 VAR
Deplasman Güç Faktörü	dPF	0,7432
Toplam Harmonik Aktif Güç	P_H	0,0223 W
Aktif Güç	P	10,2499 W
Nonaktif Güç	N	24,9555 VAR
Güç Faktörü	PF	0,3799
Temel Bileşen Dışı Görünen Güç	S_N	23,2048 VA
Harmonik Görünen Güç	S_H	0,1874 VA

4.3. Kompakt Floresan Lamba

Donanımın özellikleri: OSRAM DULUX EL Economy, 21 W, 220-240 V, 170 mA, 50-60 Hz.



Şekil 3 21 W kompakt floresan lambaya ait gerilim ve aktif güç ekranını gösteren ölçüm ekranı

Tablo 4. Kompakt floresan lambaya ait hesaplanan güç değerleri

Büyüklik		Değer
Görünen Güç	S	30,3750 VA
Temel Bileşenin Görünen Gücü	S_1	20,7873 VA
Temel Bileşenin Aktif Gücü	P_1	18,7116 W
Temel Bileşenin Reaktif Gücü	Q_1	9,0548 VAR
Deplasman Güç Faktörü	dPF	0,9001
Toplam Harmonik Aktif Güç	P_H	-0,0144 W
Aktif Güç	P	18,6972 W
Nonaktif Güç	N	23,9386 VAR
Güç Faktörü	PF	0,6155
Temel Bileşen Dışı Görünen Güç	S_N	22,1479 VA
Harmonik Görünen Güç	S_H	0,1792 VA

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Enerji verimliliği ve tasarrufuna yönelik çalışmaların son derece hız kazandığı günümüzde aydınlatma alanında en güncel uygulamalardan bir tanesi de akkor veya halojen grubundaki aydınlatma donanımlarının yerine kompakt floresan lambaların uygulanmasıdır. Ticari binalar, hastane, okul ve ofis binaları gibi yapılarda ise floresan ışık kaynakları genel aydınlatmada kullanılan birincil ışık kaynaklarıdır.

Filtresiz elektronik balastların ve kompakt floresan lambaların çok yüksek harmonik akım üretmelerinden dolayı (tipik olarak %150-170 dolaylarında) özellikle alçak gerilim şebekelerine getirecekleri ek harmonik yükler nedeniyle yeterli tedbirlerin alınabilmesi ve öngörülerin yapılabilmesi amacıyla doğru harmonik ölçüm, modelleme ve analizlerinin yapılması son derece önemlidir.

Elektronik elemanlardan kaynaklanan harmoniklerin analizinde aktif, reaktif güç tanımları yanında distorsiyon gücü tanımı yetersiz kalmaktadır ve fiziksel büyüklükler tam olarak tanımlanamamaktadır. Nonaktif güç tanımıyla harmoniklerden kaynaklanan ve aktif güç dışındaki diğer güçler tanımlanabilmektedir.

Çalışmada nonaktif güç yaklaşımı floresan lamba devreleri için uygulanmıştır. Laboratuvar ortamında yapılan deneysel ölçümler neticesinde nonaktif güç tabanlı hesaplama yöntemiyle harmonik analizler yapılmış (Tablo 2,3,4) ve ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların (özellikle aktif ve görünen güçlerin) ölçülen değerlere oldukça yakın olduğu gözlenmiştir. Bu sayede lambaların harmonik modelleri güvenilir bir şekilde geliştirilebilir ve harmonik analizine yönelik simülasyon ve kestirim hesapları gerçek değerlere uygun yaklaşımla yapılabilir. Çalışmadaki yöntem diğer elektronik elemanlara ve ışık kaynaklarına da (LED, sodyum, cıva buharlı, vb.) kolaylıkla uyarlanabilir.

Gelecekte özellikle evsel kullanımda kompakt floresan lambaların yerini alması düşünülen LED ampullerinin de harmonik modelleri bu yöntemle çıkarılabilir; devrelerindeki anahtarlamalı güç kaynağı, dc dönüştürücü ve sürücü (driver) elemanlarının harmonik etkilerinin kestirimi tasarım aşamasında dahi yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] IEEE working group on Power System Harmonic, "Power System Harmonics: An Overview", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, pp. 2455-2460, 1983.
- [2] IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations, "Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(4): 79-101, 1996.
- [3] Arrillaga, J., Smith, B.C., Watson, N.R. ve Wood, A.R., *Power System Harmonic Analysis*, J. Wiley and Sons, London, 1998
- [4] Jewell, W. and Ward, D.J. , "Single Phase Harmonic Limits", *PSERC EMI, Power Quality and Safety Workshop*, Wichita State University, Kansas, 18-19 Apr. 2002.
- [5] *TS EN 61000-3-2*, Elektro-manyetik Uyumluluk (EMU) - Bölüm 3-2: Sınır Değerler – Harmonik Akım Emisyonlar için Sınır Değerler (Faz Başına Donanımın Giriş Akımı $\leq 16A$), 2003.
- [6] Kocatepe, C., Yumurtacı, R., Uzunoglu, M., Karakaş, A. ve Arıkan, O., *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2003.
- [7] Acarkan, B., Kılıç, O. ve İnan, A., (2004), "Alçak Gerilimde Tek Fazlı Yükler için Harmonik Akım Sınırları", *ELECO'2004, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Aralık 2004.
- [8] Yong Z., Haozhong C., "A robust support vector algorithm for harmonic and interharmonic analysis of electric power system", *Electric Power Systems Research*, Volume 73, Issue 3, March 2005, Pages 393-400
- [9] García, H., Madrigal, M., Vyakaranam, B., Rarick, R., Villaseca, F.E., "Dynamic companion harmonic circuit models for analysis of power systems with embedded power electronics devices", *Electric Power Systems Research*, Volume 81, Issue 2, February 2011, Pages 340-346
- [10] Claudionor F.N., Azauri A.O., Alessandro G., Alvaro B. D., "Harmonic distortion monitoring for nonlinear loads using neural-network-method", *Applied Soft Computing*, Volume 13, Issue 1, January 2013, Pages 475-482