

HARMONİK KAYNAĞI TESPİT METOTLARININ/ İNDİSLERİNİN ÇEŞİTLİ KAYNAK VE YÜK DURUMLARI İÇİN DOĞRULUKLARININ İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

Ahmet
KÖKSOY¹

Onur
ÖZTÜRK¹

Özgür
KARACASU¹

M.Erhan
BALCI²

M. Hakan
HOCAOĞLU¹

¹Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Bölümü
41400 Gebze KOCAELİ

{akoksoy, onurozturk, karacasu, hocaoglu}@gyte.edu.tr

²Balıkesir Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Çalış Yerleşkesi 10145 BALIKESİR
mbalci@balikesir.edu.tr

ÖZET

Güç elektroniği temelli elemanların yaygın kullanımı sebebiyle günümüz güç sistemlerinde, gerilim ve akım harmonik kirliliği önemli derecede artmıştır. Harmoniklerin güç sistemi elemanlarının kayıplarında artışa ve ömürlerinde kısalmaya sebep olduğu literatürde iyi bilinmektedir. Bu olumsuz etkilerden dolayı harmonik üreten yüklerle sahip tüketicilerin cezalandırılması veya harcadıkları enerjinin ekstra fiyatlandırılması düşüncesi; harmonik bozulmanın sınırlandırılması için bir önlem olarak ortaya çıkmıştır. Bu amaçla tek noktadan eş zamanlı olmayan ve çok noktadan eş zamanlı ölçüm yaklaşımlarına dayanan harmonik kaynağı tespit metotları/ indisleri literatürde tanımlanmıştır. Bu metotların/ indislerin geçerliliği (doğruluğu) genellikle simülasyon temelli analizlerle gösterilmiştir. Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak bilinen tek noktadan eş zamanlı olmayan ölçüm yaklaşımına dayalı metotların/ indislerin doğrulukları kurulan bir test sisteminde yapılan ölçümlerle analiz edilmiştir. Analizlerde farklı harmonik bileşenlere sahip çok sayıda gerilim dalga şekli ve çeşitli yük tipleri dikkate alınmıştır. Çok sayıda kaynak ve yük durumu için elde edilen doğruluk analizi sonuçları istatistiksel olarak yorumlanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Harmonikler, Görünür Güç Tanımları, Harmonik İndisler.

1. GİRİŞ

Harmonik bozulmaya sahip (diğer bir deyişle sinüzoidal olmayan dalga şeklinde) akım çeken güç elektroniği temelli yüklerin, günümüzde büyük güçlerde ve yaygın olarak kullanımı; güç sistemlerindeki gerilim ve akım harmonik kirliliğinde önemli ölçüde artışa sebep olmaktadır [1]-[3]. Bu durum güç sistemi elemanlarının kayıplarında artışa, ömürlerinde kısalmaya ve seri/ paralel rezonans olaylarına sebep olması harmoniklerin sınırlandırılması için bir motivasyon olmuştur. Böylece harmonik üreten yüklerle sahip tüketicilerin cezalandırılması veya ürettikleri harmonik bozulma sebebiyle harcadıkları enerjinin farklı fiyatlandırılması düşüncesi; bir yaptırım yaklaşımı olarak ortaya çıkmıştır. Bütün bunlar neticesinde uluslararası mühendislik organizasyonları ve enstitüler konu üzerine çeşitli kılavuzlar ve standartlar hazırlamıştır

[4]-[10]. Bu çalışmalardan biri olan Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsünün (IEEE) düzenlediği IEEE std. 519-1992 [4]'de harmoniklerin kontrol edilmesine ilişkin uygulamalar, harmonik bozulma miktarını gösteren çeşitli indislerin hesabı ve ortak bağlantı noktasında ölçülen gerilim ve akıma ait Toplam Harmonik Bozulma (THD) sınırlamaları tavsiye niteliğinde belirlenmiştir. Ayrıca Uluslararası Elektroteknik Komisyonunun (IEC) düzenlediği IEC 61000-3-2 [5], 3-4 [6] ve 3-6 [7] standartlarında çeşitli tiplerde yükler için harmonik akımlarına sınırlamalar getirilmiş, IEC Std. 61000-4-7 [8] ve 4-30 [9] standartlarında ise harmonik bozulma miktarının ölçülmesine ilişkin metotlar tanımlanmıştır. Avrupa Normlarına göre düzenlenen EN 50160 [10] standardında ise ortak bağlantı noktası gerilimine ait bozulma miktarı ve dalga şekli sınırlama altına alınmıştır.

Ancak bu standartlarda harmonik üreten yüklerin tespiti ve harmonik sorumluluğun paylaşılması için herhangi bir metot/ indis sunulmamıştır. Bununla birlikte harmonik üreten yüklerin tespiti edilmesi ve harmonik sorumluluğun paylaşılması için literatürde birçok metot/ indis önerilmiş ve önerilen metotların/ indislerin analizleri yapılarak bahsedilen standartlar desteklenmiştir [11]-[25].

Literatürde harmonik kaynağı tespiti ve harmonik bozulma sorumluluğunun paylaşılması için önerilen metotlar/ indisler ölçüm stratejisine göre tek noktadan eş zamanlı olmayan ve çok noktadan eş zamanlı olmak üzere iki gruba ayrılabilir [12], [14]. Çok noktadan eş zamanlı ölçümlere dayalı metotlar/ indisler tek noktadan eş zamanlı olmayan ölçümlere dayalı metotlara/ indislere göre daha güvenilir sonuçlar vermekle birlikte birçok noktaya yerleştirilmiş eş zamanlı ölçüm ve haberleşme sistemlerine ihtiyaç duyması sebebiyle maliyetleri daha yüksektir.

Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak bilinen tek noktadan eş zamanlı olmayan ölçüm yaklaşımına dayalı metotların/ indislerin doğrulukları kurulan bir test sisteminde yapılan ölçümlerle analiz edilmiştir. Bu metotlar/ indisler sırasıyla; Kaynak-Yük Kalite (KYK) [17], Harmonik Global (HG) [18], Uygun Akım (UA) [23], Lineer Akım (LA) [24] indisleri ve Kaydırılmış İletkenlik Gücü (D_{SC}) temelli metottur [26]-[28]. Analizlerde farklı harmonik bileşenlere sahip çok sayıda gerilim dalga şekli ve çeşitli yük

tipleri için elde edilen metot/ indis sonuçları istatistiksel olarak yorumlanmıştır.

2. HARMONİK KAYNAĞI TESPİT METOT ve İNDİSLERİ

Bu kısımda *KYK*, *HG*, *LA* ve *UA* indisleri ile *Dsc* metodu kısaca özetlenmiştir.

2.1 Kaynak-Yük Kalite (KYK) İndisi

KYK indisi harmoniklere ait aktif güç yönünü dikkate alan bir yöntemdir. *KYK* indisi aktif ve temel harmonik aktif güçleri cinsinden Denklem (3)'teki gibi ifade edilir.

$$P = \sum_n V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n) \quad (1)$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos(\theta_1 - \delta_1) \quad (2)$$

$$KYK = P/P_1 \quad (3)$$

Hesaplanan *KYK* indisinin değeri 1' den küçük ise baskın harmonik kaynağının yük tarafı olduğu; değeri 1'den büyük ise baskın harmonik kaynağının kaynak tarafı olduğu kabul edilir [17].

2.2 Harmonik Global (HG) İndisi

Harmoniklere ait aktif güç yönünü dikkate alan bir diğer metot da *HG* indisidir. Bu indiste harmonik akımlar, iki farklı grup halinde ele alınır. İlk grup aktif gücün negatif olduğu harmonik akımlarıken ikinci grup aktif gücün pozitif olduğu harmonik akımlarıdır.

$$I_{\ell k} = \begin{cases} 0 & \text{eğer } P_k \geq 0 \\ I_k & \text{eğer } P_k < 0 \end{cases} \quad k = 0, 2..n \quad (4)$$

$$I_{sk} = \begin{cases} 0 & \text{eğer } P_k \leq 0 \\ I_k & \text{eğer } P_k > 0 \end{cases} \quad k = 0, 2..n \quad (5)$$

$$HGI = \frac{\sqrt{\sum_{k=0}^N I_{\ell k}^2}}{\sqrt{\sum_{k=0}^N I_{sk}^2}} \quad (6)$$

HG indisi ilk gruptaki harmonik akımların etkin değerlerinin toplamının, ikinci gruptaki harmonik akımların etkin değerlerinin toplamına oranı ile hesaplanır[15],[18]. Birinci ve İkinci gruba ait akımların hesaplanması sırasıyla Denklem (4) ve (5)'te verilmiştir. *HG* indisi hesabı ise Denklem (6)'da verilmiştir [18].

2.3 Uygun Akım (UA) İndisi

Bu indis hesaplanırken akım iki bileşene ayrılmıştır. Birinci parça gerilimle aynı harmonik bozulmaya sahip olan uygun (Conformity) akım, diğer parça ise uygun olmayan (Non-conformity) akımdır [23]. Denklem (7)'de hesaplanan *n*. harmonik yük empedansı üzerinden akan akım, yük akımının uygun akım parçasıdır. Uygun akım bileşeninin zaman domenyindeki ifadesi Denklem (8)'de verilmiştir. Uygun olmayan akım bileşeni ise Denklem (9)'de verildiği üzere toplam akım ifadesinden uygun akım bileşeninin çıkartılması ile elde edilir.

$$Z_n = \frac{|V_1|}{|I_1|} \angle n(\theta_1 - \delta_1) \quad (7)$$

$$i_{co}(t) = \sum_n \frac{I_1}{V_1} V_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n + n(\delta_1 - \theta_1)) \quad (8)$$

$$i_{nco}(t) = i(t) - i_{co}(t) \quad (9)$$

$$UA(\%) = \frac{I_{nco}}{I} 100 \quad (10)$$

Yükün harmonik bozulma sorumluluğunu gösteren *UA*, Denklem (10)'da verildiği gibi uygun olmayan akım bileşeninin akımın toplam etkin değerine oranı ile hesaplanır.

2.4 Lineer Akım (LA) İndisi

LA indisinde yük akımı doğrusal eşdeğer empedansın çektiği doğrusal (lineer) akım ve geriye kalan akım olan lineer olmayan akım olmak üzere iki parçaya ayrılmıştır [24]. Bu eşdeğer empedansın direnç ve *n*. harmonik indüktif reaktans değeri sırası ile Denklem (11) ve (12)'deki ifadelerden bulunur.

$$R = \frac{V_1}{I_1} \cos(\theta_1 - \delta_1) \quad (11)$$

$$X_n = n \frac{V_1}{I_1} \sin(n(\theta_1 - \delta_1)) \quad (12)$$

Eşdeğer empedansın genliği ve açısı ise sırası ile Denklem (13) ve (14)'deki ifadeler ile elde edilir.

$$|Z_n| = \sqrt{R^2 + X_n^2} \quad (13)$$

$$\theta_n = \arctan\left(\frac{X_n}{R}\right) \quad (14)$$

Böylece eşdeğer empedans üzerinden geçen yük akımının lineer parçası,

$$i_{\ell}(t) = \sum_n \frac{(\sqrt{2}V_n)}{|Z_n|} \sin(n\omega_1 t + \theta_n - \theta_n) \quad (15)$$

biçiminde ifade edilir. Yük akımından lineer akım parçası çıkarılırsa, lineer olmayan akım parçası

$$i_{n\ell}(t) = i(t) - i_{\ell}(t) \quad (16)$$

elde edilir. *LA* Lineer olmayan akım parçasının toplam yük akımının etkin değerlerine oranlanması

$$LA(\%) = \frac{I_{n\ell}}{I} 100 \quad (17)$$

ile hesaplanır [24].

2.5 Kaydırılmış İletkenlik Gücü (Dsc) Temelli Metot

Bu metotta [26], [27]'de önerilen güç ifadesinde yer alan Kaydırılmış İletkenlik Gücünün (*D_{SC}*) ölçümü esas alınmıştır. Yük gerilimi ve akımı sırasıyla Denklem (18) ve (19)'daki gibi kabul edilirse her bir harmonik numarasında fazdan çekilen aktif güç Denklem (20)'deki gibi ifade edilebilir.

$$V = \sum_n \sqrt{2}V_n \sin(\omega_n t + \theta_n) \quad (18)$$

$$I = \sum_n \sqrt{2}I_n \sin(\omega_n t + \delta_n) \quad (19)$$

$$P_n = V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n) \quad (20)$$

Denklem (20)'de verilen aktif güç ifadesi kullanılarak n. harmonik dengeli iletkenlik değeri Denklem (21)'deki gibi hesaplanır.

$$G_n = \frac{P_n}{V_n^2} \quad (21)$$

Eşdeğer iletkenlik ise

$$G_e = \sum_n P_n / \sum_n V_n^2 \quad (22)$$

oranı biçiminde hesaplanır. Kaydırılmış iletkenlik akımı ise

$$I_{sc} = \sqrt{\sum_n (G_n - G_e)^2 V_n^2} \quad (23)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem (24)'teki V_{rms} , ölçüm yapılan faz için hesaplanan etkin gerilim değeri olmak üzere Kaydırılmış İletkenlik Gücü, D_{sc} Denklem (25)'deki ifadeden hesaplanmaktadır.

$$V_{rms} = \sqrt{V_n^2} \quad (24)$$

$$D_{sc} = I_{sc} V_{rms} \quad (25)$$

Bu metodun sorumluluk paylaşımı ile ilgili göstergesi, kaydırılmış iletkenlik gücünün görünür güce göre normalize edilmiş değeridir. Görünür güç, faza ait etkin gerilim ve akım değerleri kullanılarak,

$$S = VI \quad (26)$$

biçiminde hesaplanır. Diğer taraftan [28] çalışması, D_{sc} gücünün; yük tarafının baskın harmonik kaynağı olduğu durumlarda kaynak tarafının baskın harmonik kaynağı olduğu durumlara göre çok büyük değerde olduğunu göstermiştir.

3. YAPILAN ÇALIŞMA

Bir önceki bölümde özetlenen metod ve indislerin geçerliliklerinin (doğruluklarının) istatistiksel analizi için 6 farklı yük tipi dikkate alınmıştır. Testlerde kullanılan yük tipleri ve bu yük tiplerinin sinüzoidal gerilim altında çektikleri akımlara ait Toplam Harmonik Bozulma (THD_I) değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Bu tablodan RL yükü ve kompanze edilmiş RL yükünün sinüzoidal gerilim altında çektikleri akımlara ait çok küçük bozulma değerleri ölçüldüğü görülmektedir. Bununla birlikte sabit güç çeken yük, A.A. Kırıyıcı ile beslenen R yükü, Kompakt Floresan Lamba Yükü ve Monitör Yükünün sinüzoidal gerilim altında harmonikli akım çektiği görülmektedir. Yük gruplarının saf sinüs gerilimi altında çektikleri akım dalga formları Şekil 1'de görülmektedir.

Tablo 1'de belirtilen her bir yük grubuna, hazırlanan test düzeneği vasıtasıyla, Gerilim Toplam

Harmonik Bozulma (TDH_V) miktarının %2, %5 ve %8 olduğu 100'er farklı gerilim dalga formu uygulanmıştır. Uygulanan 100 dalga formu sonucunda her bir yükün akım gerilim bilgisi kaydedilmiştir. Kaydedilen bu veriler kullanılarak *KYK*, *HG*, *UA*, *LA* ve D_{sc} metotları/ indisleri hesaplanmıştır. Her bir metoda/ indise göre gruplanmış histogramlar toplu olarak Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 1: Test yüklerinin sinüzoidal gerilim altındaki TDH_I değerleri.

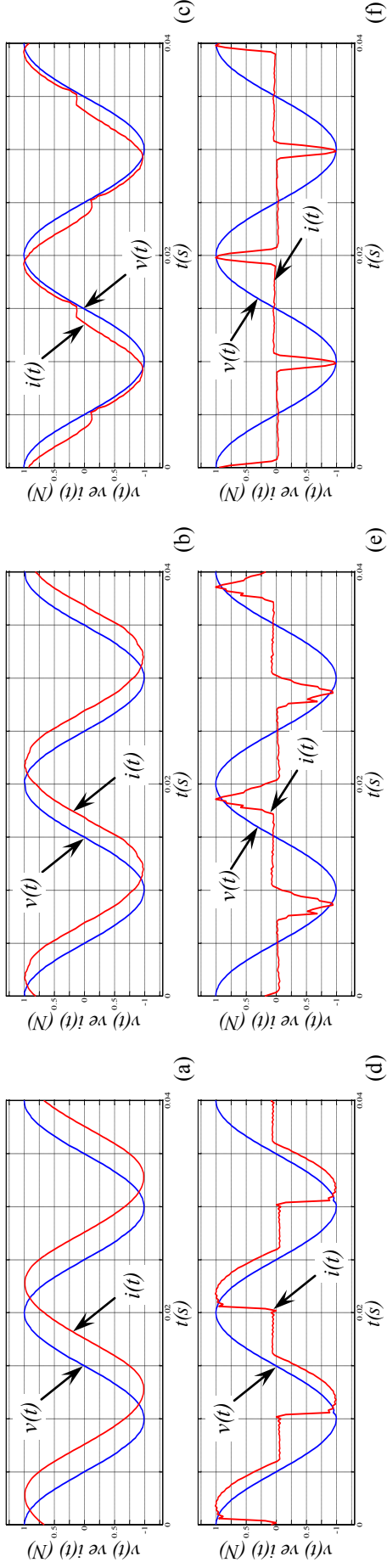
| YÜK | THD_I |
|---|---------|
| • RL Yükü (RL) | 1.62% |
| • Kompanze Edilmiş RL Yükü (RLC) | 2.19% |
| • Sabit Güç Çeken Yük (SGY) (AC-AC Dön. ile Beslenen R Yükü) | 11.52% |
| • A.A. Kırıyıcı Devresi ile Beslenen R Yükü (KR) (Tetikleme Açısı 90°) | 40.81% |
| • Kompakt Floresan Lamba Yükü (CFL) (10 Adet) | 99.80% |
| • Monitör (M) (3 Adet) | 151.51% |

Şekil 2'de verilen histogramlar üzerinde değeri gözle belirlenen bir eşik değeri çizilerek harmonik bozulma kaynağının tespiti bakımından her bir metodun/ indisin doğruluğu istatistiksel olarak incelenmiştir. Buna göre UA, LA, HG indisleri ve D_{sc} temelli metod için çizginin sağ tarafında kalan bölge ; KYK indisi için ise çizginin sol tarafında kalan bölge yükün baskın harmonik kaynağı olarak yorumlandığı bölgedir.

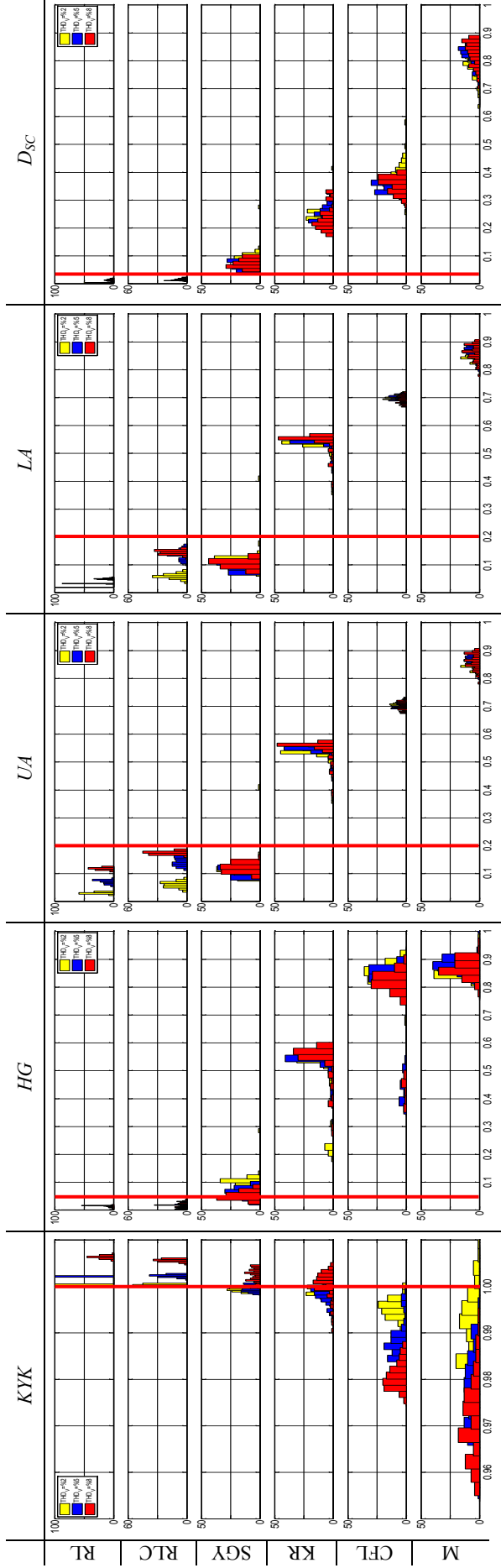
YORUMLAR ve SONUÇ

KYK indisinin, harmonik üretmeyen yükler (RL ve RLC yükleri) için bütün test gerilimleri altında 1'den büyük değerler aldığı, dolayısıyla bu yüklerin tespitinde doğru çalıştığı Şekil 2'den görülmektedir. Bununla birlikte bazı test gerilimleri altında harmonik üreten yükler (SGY, KR, CFL ve M yükleri) için 1'den büyük değerler alarak bu yüklerin tespitinde hatalı sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Bu durum *KYK*'nın doğruluğunun kaynak geriliminin THD_V değerinden etkilendiğini göstermektedir.

HG indisinin SGY dışındaki bütün test yüklerini doğru bir şekilde sınıflandırdığı Şekil 2'den görülmektedir. Diğer taraftan, bu indis düşük THD_V değerlerinde SGY'yi harmonik üreten yük olarak doğru sınıflamış, fakat yüksek THD_V değerlerinde aynı yükü hatalı biçimde doğrusal yük olarak sınıflamıştır. Sabit güç çeken yük özel karakterli bir yüküdür. Girişinde aktif güç faktörü düzeltme devresi bulunmaktadır. Bu tip yükler sistem içinde UPS, motor kontrol devreleri, tüketici elektroniği yükleri şeklinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktif güç faktörü düzeltme devresine sahip yüklerin enerji sistemi içindeki ağırlığının, bu cihazlarla ilgili standartlarda Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) zorunluluklarının artmasına paralel olarak, artması beklenmektedir. Dolayısıyla bu tip yüklerin harmonik üreten karakterinin belirlenmesi özel önem arz etmektedir.



Şekil 1: Sinüzoidal Test Gerilimi altında (a) RL, (b) RLC, (c) SGY, (d) KR, (e) CFL, (f) M yükleri tarafından çekilen akımlar.



Şekil 2: RL, RLC, SGY, KR, CFL ve M yükleri için, THDV %2-5-8 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formunda hesaplanan KYK, HG, UA, LA ve D_{sc} histogramları.

UA ve LA indislerinin tüm yük grupları için benzer davranış sergilediği görülmektedir. Her iki indis, HG indisi gibi, yüksek THD_1 değerine sahip yükleri başarılı sınıflandırmış, bununla birlikte düşük THD_1 değerine sahip sabit güç çeken yükte sınıflama hatası yapmıştır. Bununla birlikte, histogram grafikleri UA ve LA indislerinin özellikle RLC tipi doğrusal yükler için THD_V değerinin artışından çok fazla etkilendiğini göstermiştir.

Son olarak; Şekil 2’den D_{SC} temelli metodun bütün test yüklerini doğru olarak sınıfladığı görülmektedir. Ayrıca D_{SC} gücü, yük tipinden bağımsız olarak, THD_V değerindeki değişimden çok az etkilenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen “Harmonik Üreten Yüklerin Tespit Edilmesi İçin Yeni Bir Metot Geliştirmek (Proje No:110E113)” isimli proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- [1] Arrilaga, J., Watson, N. R., Chen, S.; “Power System Quality Assessment”, John Wiley & Sons, 2000.
- [2] Kocatepe, C., Uzunoglu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O.; “Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, Birsen Yayınevi, Kasım 2003.
- [3] Singh, G. K.; “Power System Harmonics Research: a Survey”, Eur. Trans. Electr. Power, vol. 19, no. 2, p.p.: 151–172, 2009.
- [4] IEEE Std. 519-1992; “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993.
- [5] IEC 61000 3-2; “Limitation of Emission of Harmonic Currents in Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment with Rated Current Less Than 16A”, International Electrotechnical Commission, 2000.
- [6] IEC 61000 3-4; “Limitation of Emission of Harmonic Currents in Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment with Rated Current Greater Than 16A”, International Electrotechnical Commission, 1998.
- [7] IEC 61000 3-6; “Assesment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems”, International Electrotechnical Commission, 1996.
- [8] IEC Standard 61000-4-7, “Testing and Measurement Techniques – General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto,” Int. Electrotechnical Commission, 2000.
- [9] IEC Standard 61000-4-30, “Testing and Measurement Techniques-Power Quality Measurement Methods”, International Electrotechnical Commission, 2000.
- [10] EN 50160, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, Euro. Norms.
- [11] Xu, W., Liu, X., Liu, Y.; “An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination,” IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 18, no. 1, p.p. 214-219, 2003.
- [12] Cataliotti, A., Cosentino, V., Ippolito, M. G., Morana, G., Nuccio, S.; “Single-point Strategies for the Detection of Harmonic Sources in Power Systems”, 9th Int. Conf. on Elec. Power Quality and Utilisation, Barcelona, Spain, 2007.
- [13] Perera, S., Gosbel, V.J., Sneddon, B.; “A Study on the identification of Major Harmonic Sources in Power Systems” Prof. of the AUPEC 02, Melbourne, Australia, 2002.
- [14] Davis, E. J., Emanuel, A. E., Pileggi, D. J.; “Evaluation of Single-Point Measurements Method for Harmonic Pollution Cost Allocation”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 15, no. 1, p.p. 14-18, 2000.
- [15] Cristaldi, L., Ferrero, A.; “Harmonic Power Flow Analysis for the Measurement of the Electric Power Quality”, IEEE Trans. Instrum. and Meas., vol. 44, no. 3, p.p. 683–685, 1995.
- [16] Aiello, M., Cataliotti, A., Cosentino, V., Nuccio, S.; “A Self-Synchronizing Instrument for Harmonic Source Detection in Power Systems”, IEEE Trans. on Instrum. and Meas., vol. 54, no. 1, p.p. 15–23, 2005.
- [17] Ferrero, A., Menchetti, A., Sasdelli, R.; “Measurement of the Electric Power Quality and Related Problems”, European Transaction on Electrical Power, vol. 6, no. 6, p.p. 401–406, 1996.
- [18] Muscas, C.; “Assessment of Electric Power Quality: Indices for Identifying Disturbing Loads”, European Trans. on Elect. Power, vol.8, no.4, p.p. 287–292, 1998.
- [19] Xu, W., Liu, Y.; “A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 15, p.p. 804–811, 2000.
- [20] Sergio Ferreira de Paula Silva, Jose Carlos de Oliveira; “The Sharing of Responsibility between the Supplier and the Consumer for Harmonic Voltage Distortion: A Case Study”, Electric Power Syst. Res., (2 June 2008).
- [21] Pfajfar, T., Blažič, B., Papič, I.; “Harmonic Contributions Evaluation with the Harmonic Current Vector Method”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 23, no. 1, p.p. 425-433, 2008.
- [22] Chaoying, C., Xiuling, L., Koval, D., Xu, W., Tayjasanant, T.; “Critical Impedance Method - a New Detecting Harmonic Sources Method in Distribution Systems”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 19, no. 1, p.p. 288- 297, 2004.
- [23] Srinivasan, K., Jutras, R.; “Conforming and Non-Conforming Current for Attributing Steady State Power Quality Problems”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 13, no. 1, p.p. 212-217, 1998.
- [24] Dellapos Aquila, A., Marinelli, M., Monopoli, V. G., Zanchetta, P.; “New Power-Quality Assessment Criteria for Supply Systems under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 19, no. 3, p.p. 1284-1290, 2004.
- [25] Locci, N., Muscas, C., Sulis, S.; “On the Measurement of Power-Quality Indexes for Harmonic Distortion in the Presence of Capacitors,” IEEE Trans. on Instrum. and Meas., vol. 56, no. 5, p.p. 1871-1876, 2007.
- [26] Balci M. E. and Hocaoglu M. H., “New Power Decomposition for Sinusoidal and Nonsinusoidal Conditions”, IEEE ICHQP 2006, Portugal, 2006.
- [27] Balci, M. E., Hocaoglu, M. H. “A power resolution for nonsinusoidal and unbalanced systems — Part II: Theoretical background”, Eleco 2011, p.p. I-173 - I-178, Bursa, Turkey, Dec. 2011.
- [28] Balci, M. E., Hocaoglu, M. H. “Addendum to a power resolution for nonsinusoidal and unbalanced systems: Evaluation examples”, Eleco 2011, p.p. I-179 - I-182, Bursa, Turkey, Dec. 2011.