

Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Meydana Getirdiği Kayıpların Analizi

Faruk KÜRKER^{*1}, Ramazan TAŞALTIN²

¹Adiyaman Üniversitesi, Elektrik Elektronik Bölümü, 02040 Adiyaman/Türkiye

²Harran Üniversitesi, Elektrik Elektronik Bölümü, 63300 Şanlıurfa/Türkiye

ÖZET

Elektrik güç sistemlerinde enerjinin üretilmesi, iletimi ve dağıtımı sırasında, akım ve gerilimin, 50 Hz frekansında ve sinüs eğrisine çok benzer bir biçimde olması istenir. Bu koşul, elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biridir. Ancak, doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonikler nedeni ile akım ve gerilim gibi büyüklükler sinüs biçimde olmaktan çıkarlar ve dalga biçimleri oldukça karmaşık hale gelir. Bunun sonucunda, işletme açısından arzu edilmeyen önemli sorunlar ortaya çıkar. Harmoniklerin enerji sistemindeki olumsuz etkileri; teknik ve ekonomik problemler olarak ikiye ayrılır. Teknik problemler, sistemin çalışmasını olumsuz yönde etkileyen ve tüketiciye kaliteli enerji sunulmasını engelleyen problemlerdir. Ekonomik problemler ise, harmoniklerin sistemde meydana getirdiği ek kayıpların oluşturduğu problemlerdir. Bu çalışmada, lazer torna tezgâhına sahip bir tesiste, CNC dik torna makinasına sahip bir tesiste ve endüksiyon eritme ocağına sahip bir tesiste güç analizörü ile sisteme ait akım, gerilim ve güç gibi parametreler kaydedilmiştir. Elde edilen veriler bilgisayara aktarılarak güç analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde, akım ve gerilim harmonikleri incelenmiş, akım ve gerilim harmoniklerinin sistemde ne kadar kayıp meydana getirdiği hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Harmonik, güç kalitesi, harmonik bozulma

Analysis of Harmonics Losses in Electrical Installations

ABSTRACT

During the generation, transmission, and distribution of energy in electric power systems, it is desirable that the current and the voltage are in a frequency of 50 Hz and very similar to the sine curve. This condition is one of the main factors determining the quality of electric energy. However, due to the harmonics produced by the nonlinear loads, the magnitudes such as current and voltage are subtracted from the sinusoidal form and the waveforms become more complex. As a result, important problems arise which are not desirable in terms of operation. The harmful effects of harmonics in the energy system can be classified as technical and economic problems. Technical problems are problems that affect the operation of the system in a negative way and prevent the delivery of quality energy to the consumer. Economic problems are the problems that additional losses caused by harmonics in the system produce. In this study, parameters such as current, voltage and power of the system were recorded by a power analyzer with a laser-lathing machine, a machine with a CNC vertical lathing machine and an induction melting furnace. Power analysis was performed by transferring the obtained data to the computer. In the analyzes made, current and voltage harmonics are investigated and it is calculated how much current and voltage harmonics are lost in the system.

Keywords: Harmonic, power quality, harmonic distortion

* Sorumlu yazar e-posta: fkurker@adiyaman.edu.tr

1. Giriş

Teknolojik gelişmeler ve nüfus artışı güvenilir ve kaliteli enerji kavramını doğurmuştur. Ayrıca teknolojik gelişmeler ve nüfus artışına bağlı olarak kurulu güç sürekli artmaktadır. Günümüzde her geçen gün elektrik sistemlerimize yeni bir elektrik enerjisi tüketen yükler eklenmektedir. Bu yüklerin karakteristikleri enerji iletim ve dağıtım hatlarında ilave yüklenmelere sebep olmaktadır. Bu yüklenmeler nedeniyle elektrik enerji sistemlerinde bulunan cihazlara ve yüklere ciddi zararlar vermektedir. Aşırı yüklenmeler cihazların ömürlerinin kısalmalarına neden olmaktadır. Aynı zamanda tüketicinin kullandığı enerjinin istenildiği durumda olmamasına, kalitesiz bir enerji kullanmasına sebebiyet vermektedir.

Güç kalitesi, sabit ve şebeke frekansında gerilim sunulması yani sabit ve sinüsoidal biçimli gerilim sunulmasıdır. Daha geniş bir tanımlama ile güç kalitesi; enerjinin sürekli olması, gerilim ve frekansın sabitliği, güç faktörünün bire yakınlığı, faz gerilimlerinin dengeli olması, akım ve gerilimdeki harmoniklerin belirli değerlerde kalması, gibi kriterlerin göz önüne alınması olarak tanımlanabilir [1].

Güç sistemlerine bağlanan cihazların oluşturduğu problemler nedeni ile kaliteli enerjinin sağlanması her zaman mümkün olamamaktadır. İçlerinde yarı iletken elemanlar bulunduran alıcılar ve doğrusal olmayan (nonlinear) yükler olarak isimlendirilen cihazlar güç kalitesinin bozulmasında büyük paya sahiptirler. Bu tür yükler, enerji kalitesini düşürmenin yanısıra modern elektronik cihazların enerji sistemlerinde meydana gelen bozulmalara karşı duyarlılığını önemli ölçüde etkilerler. Doğrusal olmayan yükler, enerji sistemlerinde harmoniklere sebebiyet verdiklerinden kalitesi düşük enerjiye neden olurlar [2].

Akım ve gerilim dalga şekilleri; hem sanayide kullanılan bazı doğrusal olmayan yüklerden (güç elektroniği elemanları, ark fırınları v.b.) hem de yarı iletkenlerin etkisiyle, periyodik olmakla birlikte, temel sinüsoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer dalgaların (harmoniklerin) toplamından meydana gelmektedir [3].

Temel frekans dışındaki dalgalara harmonik adı verilir. Bu dalgalar, Fourier analizi yardımıyla, temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinden ifade edilebilir. Fourier analizi ile sinüsoidal şekle sahip olmayan dalgalar, frekansları farklı sinüsoidal dalgaların toplamı şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Bu sayede harmoniklerin analizi kolaylıkla yapılabilir [4]. Sonsuz serideki herhangi bir trigonometrik terimin periyodu, temel periyodunun bir tamsayı katı veya harmoniğidir (denklem 1).

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t) + B_n \sin(n\omega_0 t) \quad (1)$$

Burada A_0 , A_n , B_n Fourier katsayısıdır ve $f(t)$ den hesaplanabilir. Periyodik bir fonksiyon olan $f(t)$ 'nin temel frekansı ω_0 'dir . $2\omega_0$, $3\omega_0$, $4\omega_0$, , $n\omega_0$ $f(t)$ fonksiyonunun harmonik frekanslarıdır. $2\omega_0$ $f(t)$ sinyalinin yada fonksiyonunun ikinci harmoniği, $3\omega_0$ $f(t)$ sinyalinin üçüncü harmoniği, $4\omega_0$ $f(t)$ sinyalinin dördüncü harmoniği ve $n\omega_0$ $f(t)$ sinyalinin n 'inci harmoniği olarak ifade edilir [5].

Harmonik ölçüm cihazları ile yapılan analiz sonucunda ölçülen harmonik büyüklük değerleri ile harmonik standartları ile karşılaştırılmakta ve bu standartlara uygunluğu tespit edilebilmektedir [6].

1.1. Elektrik Enerjisinin Kalitesi ve Harmonikler

Bilindiği gibi elektrik enerjisi üretiminde kullanılan fosil yakıtlarının sebep oldukları sera gazları küresel ısınmada önemli yer tutmaktadır. Üretimin ve toplum hayatının vazgeçilmez gereği olan elektrik enerjisinin verimli kullanımı ve yaşama kalitesini düşürmeden enerji tasarrufu miktarlarının bireysel ve kurumsal olarak araştırılması ve uygulanması, tabiata bırakılan sera gazı emisyonunu azaltacağı gibi milli ekonomi açısından da büyük katkı sağlayacaktır. Elektrik enerjisinin verimli kullanılmasının yanında tüketime sunulan elektrik enerjisinin kalitesi, üretim ve toplum hayatında önemli bir yer tutar. Çevre kirliliğinin etkilerini inkâr etmemiz nasıl mümkün değilse enerji kirliliğini de aynı şekilde inkâr edemeyiz. Enerjinin kalitesi üretimdeki kaliteyi arttıran bir etkidir, bu yönüyle verimi arttırıcı ve çevre sağlığını da olumlu etkileyen bir role sahiptir. Elektrik enerjisi, elektrik üreten santraller tarafından mesafeye göre hesaplanan gerilimler akıma göre seçilen kesitlerde iletilir ve dağıtılır.

Avrupa güç kalitesi araştırma raporuna göre 25 avrupa birliği ülkelerinde meydana gelen güç kalitesi sorunlarının maliyeti yaklaşık olarak yıllık 150 milyar euro'dur [7]. Bu değer, güç kalitesi problemlerinin neden olduğu maliyetin boyutunu göz önüne sermektedir. 150 milyar euro tutarındaki maliyetin %29'u darbe gerilimleri ve gerilim yükselmelerinden, %23,6'sı gerilim çökmelerinden, %18,8'i kısa kesintilerden, %12,5'i uzun kesintilerden, %10,7'si diğer problemlerden ve %5,4'ü harmoniklerden kaynaklanmaktadır [8].

Sanayileşmiş bazı ülkelerde akım harmonik bozulma oranı yüzde 6'nın üzerine çıktığında dağıtım şirketleri hiç haber vermeden enerjiyi kesebiliyor. Örneğin Almanya'da aboneye belli bir süre veriliyor. Bu sistemi en iyi uygulayan ülke Almanya'dır. Almanya, eğer harmonikten dolayı aynı trafodan beslenen diğer aboneler şikayetçi olurlarsa ve dağıtım şirketi bunu tespit ederse problemin çözümü için harmonik yaratan aboneye 1 ay süre vermektedir. Bu sistem, 10 yılı aşkın süredir istikrarlı bir şekilde uygulanmaktadır.

Türkiye Elektrik İletim Sistemi'nin genelinde, ilgili yönetmeliklere göre, hem akım hem de gerilimde 5. harmonik problemi olduğu gözlenmiştir [9].

Ülkemizde harmoniklerden kaynaklanan kayıplar tahmin edilenden daha yüksek olduğu düşünülmektedir. Adana, Mersin, Hatay, Kilis, Osmaniye ve Gaziantep illerinde yaklaşık 142 noktada 15'er saniye aralıklarla bir gün boyunca alınan verilerin ortalamasında Adana ilinde I_{THD} %6'dan büyük, Mersin ilinde I_{THD} %1,5'den büyük, Hatay ilinde I_{THD} %2,23'den büyük, Kilis ilinde I_{THD} %1,32'den büyük, Osmaniye ilinde I_{THD} %3,21'den büyük ve Gaziantep ilinde I_{THD} %2,66'dan büyük olduğu tespit edilmiştir. İllerdeki U_{THD} ise %3'den küçük ölçülmüştür.

Elektrik enerjisi, elektrik üreten santraller tarafından mesafeye göre hesaplanan gerilimler ve akıma göre seçilen kesitlerde iletilir ve dağıtılır. Normal (ideal kalitede) sinüsoidal şebeke eğrisi, sabit gerilime ve sabit frekansa sahiptir.

Tepe değer (Maximum değer), alternatif akım ya da gerilimin ani değerlerinin en büyük değeridir. Gerilimin tepe değeri V_{max} , akımın tepe değeri I_{max} ile gösterilir. RMS değeri 1 birim olan sinüsoidal dalganın peak (tepe=maximum) değeri $\sqrt{2} = 1,414$ birim olmaktadır.

RMS (Root mean square) değer, alternatif bir akımın RMS değeri sabit bir direnç yükünden geçen ve aynı miktarda ısı enerjisi üreten DC akımın değerine eşittir. RMS karesel ortalama değer (root mean square) anlamına gelir ve etkin değer, efektif değer olarak da isimlendirilir.

Bir işaretin RMS değeri ayrık (dijital) olarak hesaplanırken şu adımlar izlenir: İşaretin bir periyot boyunca belirli örnekleme zamanıyla genlik değerleri alınır. Alınan bu değerlerin kareleri toplanır. Bu toplam alınan örnek sayısına bölünür. Denklem (2)' de görüldüğü üzere bu bölümün karekökü alınır.

$$S_{RMS} = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n S_n^2}{n}} \quad (2)$$

Alternatif gerilimin en büyük değeri veya genliği, sinüs sinyalinin belli bir periyot süresi içerisinde aldığı en büyük değeri belirtir. Bu değer şebeke için yaklaşık 311 Volt'dur. Şebeke gerilimi için bu değer en büyük genliğin yaklaşık 0,707 ile çarpımı ile yani $\sqrt{2}$ 'ye bölümü ile bulunur ve 220 Volt'dur. Fakat bu genlik değeri anma değeri olarak çok yaygın kullanılmaz. Bunun yerine bu sinüs fonksiyonun etkin değeri (rms) kullanılır. Bu değer söz konusu alternatif gerilimin doğru gerilim eşdeğeri olarak görülebilir. Bir sinüs sinyalinin gerilim için etkin değeri denklem (3)'de verilmiştir.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = 0,707.V_{max} \quad (3)$$

RMS değer bu yöntemle hesaplanırken örnekleme sıklıkla yapılırsa ölçüm hassasiyeti o kadar yüksek olur. Sinüsoidal bir işaretin akım için RMS değeri denklem (4)'de verilmiştir.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}} = 0,707.I_{max} \quad (4)$$

Harmonikler; elektrik güç dağıtım sistemlerinde güç kalitesinin bozulmasına ve akım ve gerilim bozulmalarından dolayı sinüsoidal sistemin bozulmasıdır. TEDAŞ veya bazı özel dağıtım şirketleri harmonik ısı kayıplarını, kWh olarak tüketiciden tahsil etmektedirler. İşletmelerdeki makinelerin meydana getirdiği harmoniklerden kaynaklı, işletmeler kayıp bedeli ödemektedirler. Bu harmonik ısı kaybı yaklaşık olarak; $NHkWh \approx 860 \text{ kCal} = 1 \text{ kWh}$ 'ye denk gelmektedir. Harmonik kayıp olarak adlandırılan bu bedel, işletmeci yani tüketici tarafından ödenmektedir.

Yüksek frekanslı olmasından dolayı harmonik bileşenleri literatürde skin-effect (deri etkisi) adı verilen etkiyi meydana getirirler. Alternatif akımdaki bir iletkenin direnci doğru akımdaki direncinden daha büyüktür. Bu direnç değeri hamonik bileşenler için daha da artmaktadır. İletken üzerinden geçen yüksek frekanslı harmonik akımları yoğun olarak iletkenin dış yüzeyini tercih edeceğinden, bu da akımın iletilmesi için kullanılan kesitin azalmasına, bu nedenle direncin artmasına neden olacaktır. Deri etkisi sebebiyle iletkenlerde kayıplar artar. Harmonik kaynaklı deri etkisinin iletkenler üzerindeki olumsuz sonuçlarından birisi de aşırı ısınmadır.

Elektrik güç sistemlerindeki nonlineer elemanlar, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi harmonikler meydana gelmesine sebep olmakta ve bunun sonucu olarak tüketiciye verilen enerjinin kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Kaliteli bir enerji ya da güç için kompanzasyon problemlerini, harmoniklerin varlığına göre projelendirmemiz gereklidir. Aksi durumda hatalı kompanzasyondan dolayı elektrik kayıplarımız fazla olur. Harmonikler güç kalitesinin en önemli ölçülebilir parametrelerinden biridir.

Harmonikler, genel olarak nonlineer elemanlar ile nonsinüsoidal kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Akım-gerilim karakteristiği doğrusal olmayan elemanlara nonlineer elemanlar denir. Sistemde bulunan bu elemanların etkisiyle akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte temel sinüsoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüsoidal

dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel dalga dışındaki sinüsoidal dalgalara “harmonik” adı verilir.

Güç sistemindeki sinüzoidal dalganın simetrisinden dolayı 3., 5., 7., 11. gibi tek harmonik bileşenleri bulunur. Çift harmonikli bileşenler bulunmaz.

Enerji kalitesinin ölçülebilmesi ve bozulmaların sınırlandırılabilmesi için akım ve gerilim harmoniklerinin tanımlanması gerekmektedir.

Toplam harmonik distorsiyonu (THD), harmonikli bileşenlerin efektif (rms) değerlerinin, temel bileşen efektif (rms) değerine bölünmesiyle elde edilir ve genellikle yüzde olarak gösterilir. Toplam harmonik distorsiyon ifadesinin yardımı ile temel sinüs bileşenimizin harmonik bileşenlerin toplanması ile ilk formundan ne derece sapmaya maruz kalacağı görülebilir.

Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüsoidal dalga için THD değeri sıfırdır. Yani denklem (5) ve denklem (6)’dan da anlaşılacağı gibi harmonik bileşenlerin olmadığı sistemlerde toplam harmonik distorsiyon herhangi bir değere ulaşmayacaktır [10]. Gerilim için toplam harmonik distorsiyonu denklem (5)’de verilmiştir.

$$THD_V = U_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (5)$$

Burada;

THD_V (THB_V): Gerilimin toplam harmonik distorsiyonunu (bozunumu),

V_n : Devreye uygulanan gerilimin n’inci mertebedeki harmoniğinin etkin değerini,

V_1 : Devreye uygulanan gerilimin temel frekanstaki etkin değerini,

Akım için toplam harmonik distorsiyonu denklem (6)’da verilmiştir.

$$THD_I = I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (6)$$

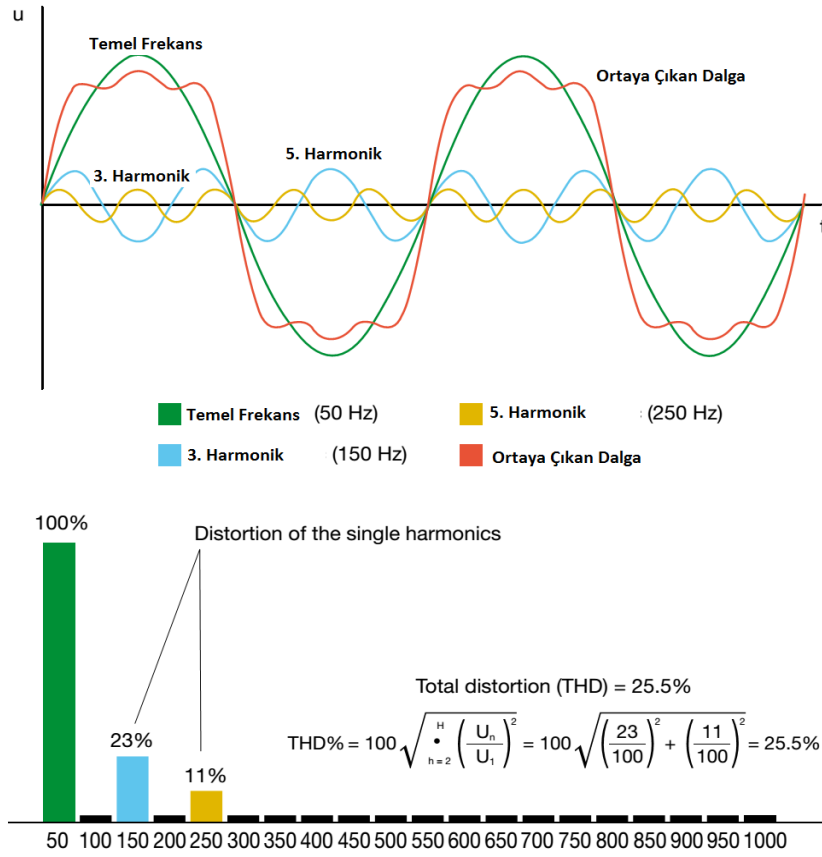
Burada;

THD_I (THB_I): Akımın toplam harmonik distorsiyonunu (bozunumu),

I_n : Devreden geçen akımın n’inci mertebedeki harmoniğinin etkin değerini,

I_1 : Devreden geçen akımın temel frekanstaki etkin değerini ifade etmektedir,

Temel dalga, harmonikli dalgalar ve bunların bileşkesi olan toplam dalgalar ile ilgili örnek şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Harmoniklerin sisteme etkisi, sinüsoidal bozukluk (harmonik bozulmasında bir akım dalgası), temel 50 Hz. sinüsoidal akım, 3.,5. harmonik ve toplam harmonikli dalga [11].

Ülkemizde ideal enerji dağıtımı 50 Hz. de, temel frekansta ve sinüsoidal dalga şeklindedir. Ancak işletmelerimizdeki bazı yükler sahip oldukları çalışma karakteristiklerinden dolayı çeşitli frekans seviyelerinde akım ve gerilim oluştururlar. Bu gibi devrelerde faz gerilimlerinin dengeli olması ve gerilimdeki harmonik miktarının belirli değerlerde kalması gibi bir takım kriterlerin göz önüne alınması gerekir.

Harmoniklerin önlenmesi için alınabilecek tedbirlerin en önemlileri, tasarım sırasında alınabilecek önlemler ve filtre devrelerinin kullanılmasıdır [12].

Uluslararası (IEC 519-1992)'ye göre harmonik bozulma değerleri akım için $I_{THD} < \%5$ ve gerilim için $U_{THD} < \%3$ verilmiştir. Şebekede normal olarak akım toplam harmonik distorsiyonu $I_{THD} < \%15-20$ ve gerilim toplam harmonik distorsiyonu $U_{THD} < \%3-5$ olmalıdır. Bu limit değerlerinin üzerinde bulunan harmonik oranlarında elektrik devre veya sistemleri için tehlikeli ve büyük zararlar oluşturabilecektir [13].

Resmi gazete yayınlanmış olan 09.10.2013 tarihli elektrik dağıtımı ve perakende satışına ilişkin hizmet kalitesi yönetmeliğine göre "Harmonik bozulmaya neden olan kullanıcıya, dağıtım şirketi tarafından durumun düzeltilmesi için AG kullanıcısı olması durumunda en fazla 60 iş günü, OG kullanıcısı olması durumunda ise en fazla 120 iş günü süre tanınır. Kullanıcıya yapılan bildirimde, verilen sürenin sonunda durumun düzeltilmemiş olmasının tespiti halinde bağlantısının kesileceği bildirilir. Verilen sürenin sonunda, kullanıcı tarafından kusurlu durumun giderilmemesi halinde, kullanıcının bağlantısı kesilir." İbaresini yer alır [13].

Yapmış olduğumuz çalışmamızda üç tesiste harmoniklerden meydana gelen kayıplar tespit edilerek. Harmonikler neticesinde sistemde ciddi kayıpların olduğunu göstererek, harmoniklerin azaltılması çalışmalarının bir an önce resmi gazete yayınlanmış şekli ile uygulamaya geçirilmesinin önemi gösterilmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem

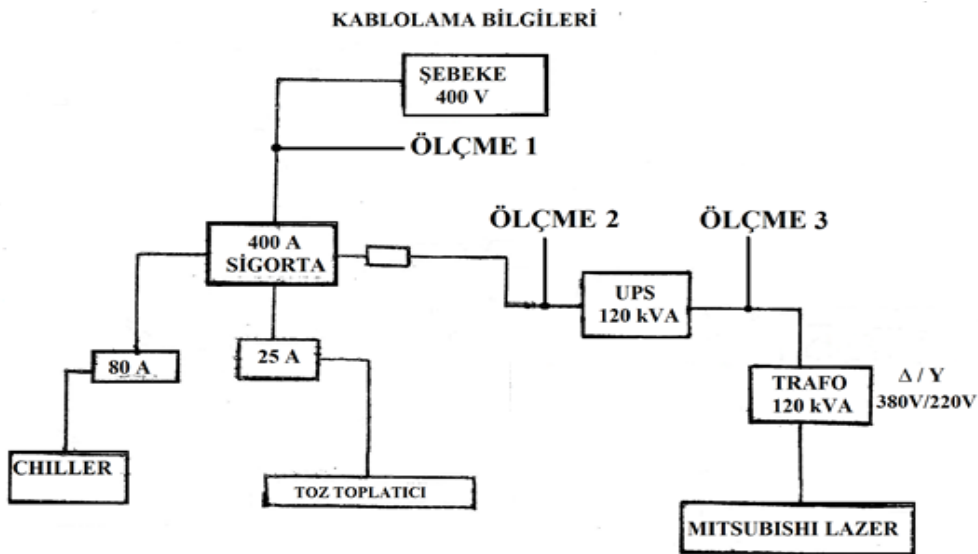
Çalışmamızda kullanılan güç analizörü Amprobe Energy Test 2020'dir. Amprobe Energy Test 2020 gerilimleri, akım ve ilgili harmonik, aktif ve reaktif güçlerin yanı sıra aktif ve reaktif enerjileri tam bir analiz taşıma kapasitesine sahip üç fazlı güç analizörü ve kaydedicidir.

Yapılan çalışmada, lazer torna tezgâhına sahip bir tesiste, CNC dik torna makinasına sahip bir tesiste ve endüksiyon eritme ocağına sahip bir tesiste güç analizörü ile sisteme ait akım, gerilim ve güç gibi parametreler kaydedilmiştir. Elde edilen veriler bilgisayara aktarılarak güç analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde, akım ve gerilim harmonikleri incelenmiş, akım ve gerilim harmoniklerinin sistemde ne kadar kayıp meydana getirdiği hesaplanmıştır. Başka bir ifadeyle ölçümler neticesinde % olarak testteki harmoniklerden kaynaklanan kayıp hesaplanmıştır.

Şekil 2'de lazer torna tezgâhına sahip tesiste belirlenen ölçüm noktaları görülmektedir. Şekil 2'de görüldüğü gibi birinci ölçüm yeri tesiste bulunan panonun olduğu nokta, ikinci ölçüm yeri 120 kVA'lık UPS ten hemen önceki nokta, üçüncü ölçüm yeri ise 120 kVA'lık trafo ile 120 kVA'lık UPS arasındaki noktadır.

3. Araştırma Bulguları

Ölçüm yapılan tesis DKP ve siyah, galvanizli, bakır, alüminyum ve krom saç kesimini lazerle yapmaktadır. Lazer torna tesisinde belirlenen üç noktada ölçümler yapılarak, her faz için akım ve gerilim harmonikleri tespit edildikten sonra harmoniklerin meydana getirdiği kayıp % olarak hesaplanacaktır. Tesiste kullanılan lazer kesim makinasının markası Mitsubishi ML3015ex olup anma gücü 4500 Watt'tır. Şekil 2'de lazer tesisinde belirlenen ölçüm noktaları görülmektedir.



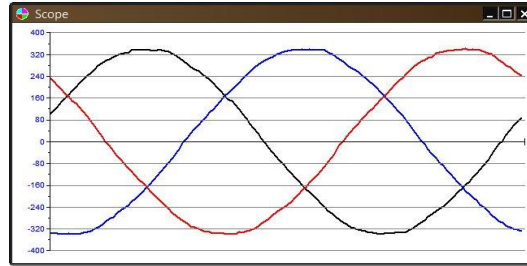
Şekil 2. Lazer tesisi ölçüm noktaları

Çizelge 1’de lazer besleme 1 (ölçme 1), çizelge 3’de lazer besleme 2 (ölçme 2), çizelge 5’de lazer besleme 3 (ölçme 3) tüm fazlara ait Urms, Irms, fazlar arası gerilim thd(U), S(kVA), P(kW), thd(I), Q(kVar), Pfc (capacitive power factor), dPf (cosφ) ile Stot(kVA), Qtot(kVar), Ptot(kW) değerleri verilmiştir.

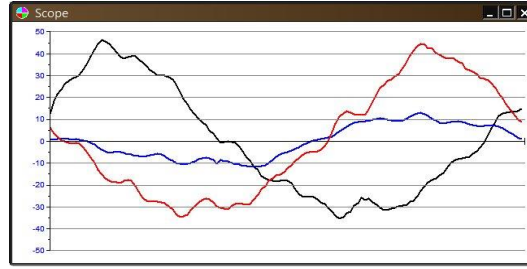
Çizelge 2’de ölçme1, çizelge 4’de ölçme2, çizelge 6’da ölçme3’e ait toplam görünür güç (Stot), toplam reaktif güç (Qtot), toplam aktif güç (Ptot), güç katsayısı (Pf), her faz için ölçüm değerleri, harmonik kayıpları ve % harmonik kaybı ile ilgili hesaplamalar verilmiştir.

Çizelge 1. Lazer besleme 1 (ölçme 1) tüm fazların değerleri

1st phase		2nd phase		3rd phase	
Urms	UL_12	Urms	UL_23	Urms	UL_13
239.956	416.238	240.754	417.251	240.459	415.601
thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)
0	5.964	0	1.830	0	5.914
Irms	P(kW)	Irms	P(kW)	Irms	P(kW)
24.856	5.462	7.601	-0.227	24.593	5.414
thd(I)	Q(kVAR) c	thd(I)	Q(kVAR) c	thd(I)	Q(kVAR) c
16.984	-2.395	24.870	1.816	16.402	-2.380
Pf c	dPf	Pf c	dPf	Pf c	dPf
0.916	0.929	0.124	0.127	0.915	0.928
Total info					
Stot(kW)	Qtot(kVAR)	Ptot(kW)	Pftot c	I null	
11.05	-2.96	10.65	0.96	29.21	

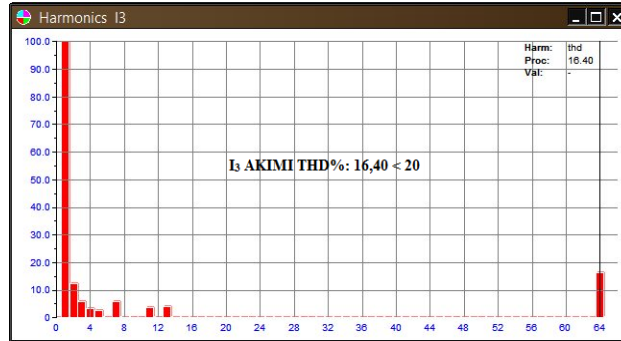
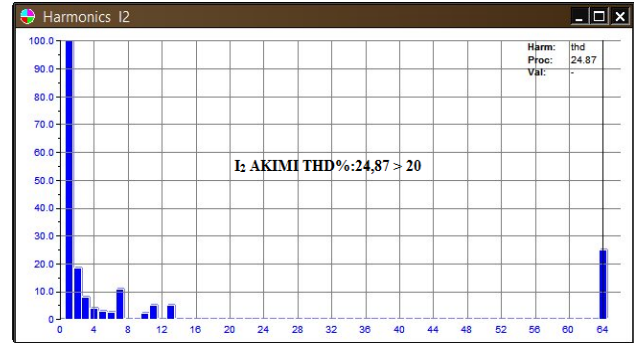
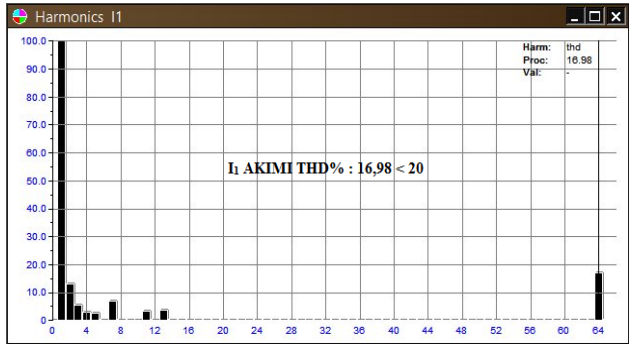


Şekil 3. Ölçme1, besleme1, işletmedeki gerilimler grafiği



Şekil 4. Ölçme1, besleme1, işletmedeki akımlar grafiği

Çizelge 1 ve Şekil 3'te görüldüğü üzere birinci ölçüm noktasında yapılan ölçümlerde gerilim harmoniğine rastlanmadığından dolayı gerilim sinüsoidal olarak ölçülmüştür. Akım harmoniğine rastlandığı için ise şekil 4'te akım sinüsoidal görünümde değildir.



Şekil 5. Ölçme1, besleme1, akım grafiği I₁, I₂ ve I₃ akımının harmonik değerleri

Birinci ölçüm noktasında şekil 5'te birinci fazda belirgin olarak 3. ve 5. harmonik tespit edilmiş olup toplam harmonik bozulma değeri yaklaşık olarak THD₁ değeri %16,98, ikinci fazda belirgin 3., 7., 11. ve 13. harmonik tespit edilmiş olup toplam harmonik bozulma değeri yaklaşık olarak THD₁ değeri %24,87, üçüncü fazda belirgin olarak 3. ve 7. harmonik tespit edilmiş olup toplam harmonik bozulma değeri yaklaşık olarak THD₁ değeri %16,40'dır.

Çizelge 2. Ölçme1, besleme1, harmonik hesaplamaları

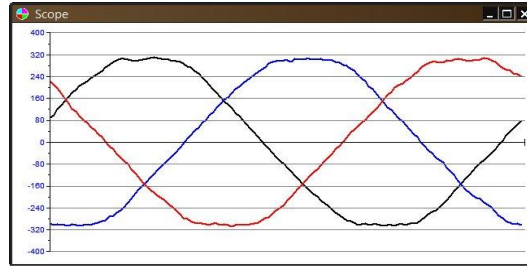
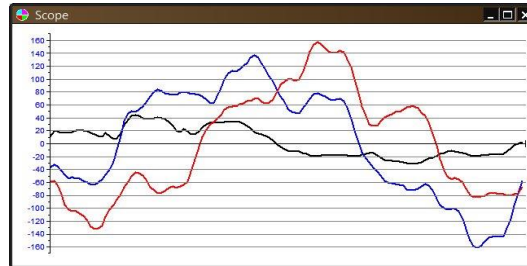
AMPROBE GÜÇ ANALİZÖRÜ ÖLÇMELERİ VE HESAPLAMALAR											
ÖLÇÜLEN YER :					LAZER BESLEME.1						
GÜÇ	ADI			F O R M Ü L			ÖLÇÜLEN	BİRİM			
1	S_{tot}	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ			S_{tot} = S₁ + S₂ + S₃			13,708	kVA.		
	Q_{tot}	TOPLAM REAKTİF GÜÇ			Q_{tot} = Q₁ + Q₂ + Q₃			6,591	kVar		
	P_{tot}	TOPLAM AKTİF GÜÇ			P_{tot} = P₁ + P₂ + P₄			11,103	kW.		
	P_{fi}	GÜÇ KATSAYISI			P_{fi} = (P_{fi1} + P_{fi2} + P_{fi3}) / 3			0,651	-		
	I_{null}	NÖTR AKIMI (DENGESİZ YÜK)						29,210	A.		
FAZ	GÜÇ	Ö L Ç M E D E Ğ E R L E R İ							DEĞER		
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	5,96	S2	Urms2 x Irms2	1,83	S3	Urms3 x Irms3	5,914	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	5,46	P2	S2 x Pfi2	0,23	P3	S3 x Pfi3	5,414	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	2,40	Q2	S2 x sinØ2	1,82	Q3	S3 x sinØ3	2,380	kVar.
		thd	0, U1	0,00	thd	0, U2	0,00	thd	0, U3	0,000	
HARMONİK KAYIPLARI											
FAZ	I _{rms}	O, I _{thd}	U _{rms}	(cosØ) dPf	P _{Harm.} (Kw.)						
3	L1	24,865	0,16984	239,956	0,929	0,941					
	L2	7,601	0,24870	240,754	0,127	0,058					
	L3	24,593	0,16402	240,459	0,928	0,900					
TOPLAM										1,899	
HARMONİK % KAYIPLARI											
Ö L Ç M E		% P _{Har.} Kaybı			% HARMONİK KAYBI						
4	P _{Har.} (kW)	1,899	(P _{Har.} / P _{Tot.}) x 100			17,11					
	P _{Tot.} (kW)	11,103									

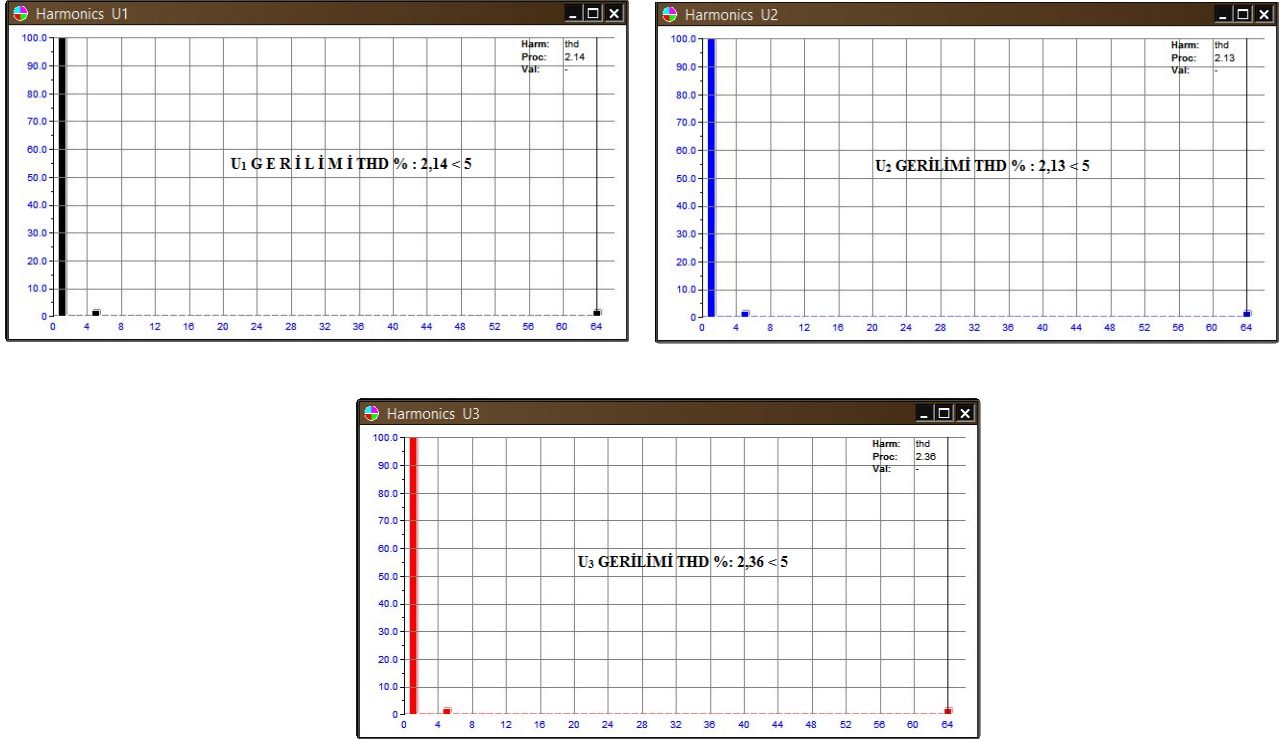
Çizelge 2’de birinci kısımda toplam görünür güç (Stot) 13,708 kVA, toplam reaktif güç (Qtot) 6,591 kVar, toplam aktif güç (Ptot) 11,103 kW ve güç katsayısı (Pfi) 0,651 olarak tespit edilmiştir. İkinci kısımda birinci, ikinci ve üçüncü fazlardaki her bir faz için ölçülen akım, gerilim etkin değerleri ve güç katsayısı kullanılarak görünür, aktif ve reaktif güç hesaplanmıştır. Üçüncü kısımda birinci, ikinci ve üçüncü fazlardaki her bir faz için ölçülen akım, gerilim etkin değerleri, akım için ölçülen harmonik bozulma ve cosØ kullanılarak harmonik güç kaybı hesaplanmıştır. Dördüncü kısımda ise toplam harmonik güç kaybı ve toplam aktif güç kullanılarak % olarak harmonik kayıp %17,11 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3 ve Şekil 6’da görüldüğü üzere ikinci ölçüm noktasında yapılan ölçümlerde gerilim harmoniğine çok az rastlandığından dolayı gerilim sinüsoidal’a yakın olarak ölçülmüştür. Akım harmoniğine rastlandığı için ise şekil 7’de akım sinüsoidal görünümde değildir.

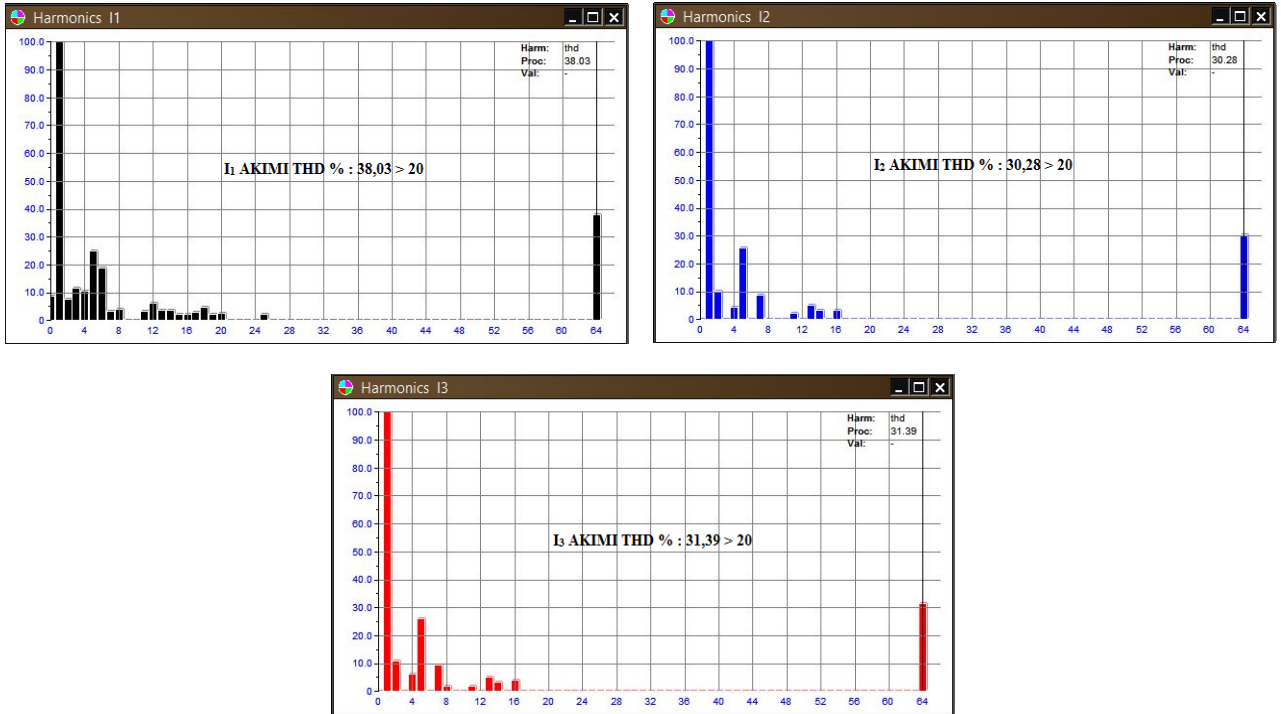
Çizelge 3. Lazer besleme 2 (ölçme 2) tüm fazların değerleri

1st phase		2nd phase		3rd phase	
Urms	UI_12	Urms	UI_23	Urms	UI_13
221.440	383.811	221.130	382.730	220.369	381.585
thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)
2.145	5.043	2.133	18.611	2.364	18.003
Irms	P(kW)	Irms	P(kW)	Irms	P(kW)
22.773	4.505	84.162	11.620	81.697	-5.909
thd(I)	Q(kVAR) i	thd(I)	Q(kVAR) c	thd(I)	Q(kVAR) i
38.025	2.267	30.283	-14.537	31.388	-17.006
Pf i	dPf	Pf c	dPf	Pf i	dPf
0.893	0.968	0.624	0.649	0.328	0.351
Total info					
Stot(kW)	Qtot(kVAR)	Ptot(kW)	Ptot c	I null	
31.01	-29.28	10.22	0.33	148.24	

**Şekil 6.** Ölçme2, besleme2, işletmedeki gerilimler grafiği**Şekil 7.** Ölçme2, besleme2, işletmedeki akımlar grafiği



Şekil 8. Ölçme2, besleme2, gerilim grafiği U₁, U₂ ve U₃ geriliminin harmonik değerleri



Şekil 9. Ölçme2, besleme2, akım grafiği I₁, I₂ ve I₃ akımının harmonik değerleri

İkinci ölçüm noktasında şekil 8’de birinci fazda toplam harmonik bozulma değeri yaklaşık olarak THD_v değeri %2,14, ikinci fazda toplam harmonik bozulma değeri yaklaşık olarak THD_v değeri %2,13, üçüncü fazda toplam harmonik bozulma değeri yaklaşık olarak THD_v değeri %2,36’dır.

İkinci ölçüm noktasında şekil 9’da birinci fazda belirgin olarak 3. ve 5. harmonik tespit edilmiş olup toplam harmonik bozulma değeri yaklaşık olarak THD_i değeri %38,03, ikinci fazda belirgin olarak 5., 7. ve 13. harmonik tespit edilmiş olup toplam harmonik bozulma değeri yaklaşık olarak THD_i değeri %30,28, üçüncü fazda belirgin olarak 5., 7. ve 13. harmonik tespit edilmiş olup toplam harmonik bozulma değeri yaklaşık olarak THD_i değeri %31,39’dur.

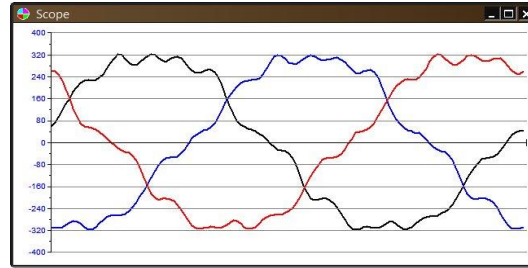
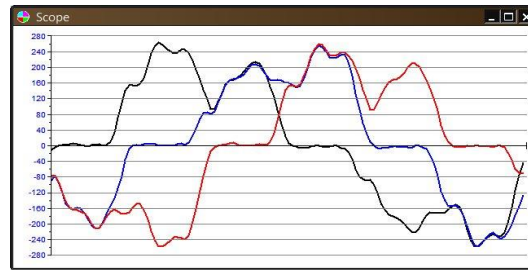
Çizelge 4. Ölçme2, besleme2, harmonik hesapları

AMPROBE GÜÇ ANALİZÖRÜ ÖLÇMELERİ VE HESAPLAMALAR											
ÖLÇÜLEN YER :					LAZER BESLEME.2						
GÜÇ	ADI			F O R M Ü L			ÖLÇÜLEN	BİRİM			
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ			Stot = S1 + S2 + S3			41,651	kVA.		
	Qtot	TOPLAM REAKTİF GÜÇ			Qtot = Q1+Q2+Q3			33,810	kVar.		
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ			Ptot = P1+P2+P4			22,034	kW.		
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI			Pfi = (Pf1+Pf2+Pf3) / 3			0,614	-		
	Inull	NÖTR AKIMI (DENGESİZ YÜK)						148,240	A.		
FAZ	GÜÇ	Ö L Ç M E D E Ğ E R L E R İ								DEĞER	
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	5,04	S2	Urms2xIrms2	18,61	S3	Urms3xIrms3	18,00	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	4,51	P2	S2xPfi2	11,62	P3	S3xPfi3	5,91	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	2,27	Q2	S2xsinØ2	14,54	Q3	S3xsinØ3	17,01	kVar.
		thd	0, U1	0,0215	thd	0, U2	0,0213	thd	0, U3	0,0236	
H A R M O N İ K K A Y I P L A R I											
FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosØ) dPfi		PHarm. (Kw.)					
3	L1	22,773	0,38025	221,440	0,968		1,856				
	L2	84,162	0,30283	221,130	0,649		3,658				
	L3	81,697	0,31388	220,369	0,351		1,983				
TOPLAM							7,497				
H A R M O N İ K % K A Y I P L A R I											
4	Ö L Ç M E		%P Har.Kaybı		% H A R M O N İ K K A Y B I						
	PHar. (kW)	7,497	(PHar. / PTot.) x 100		34,03						
	PTot. (kW)	22,034									

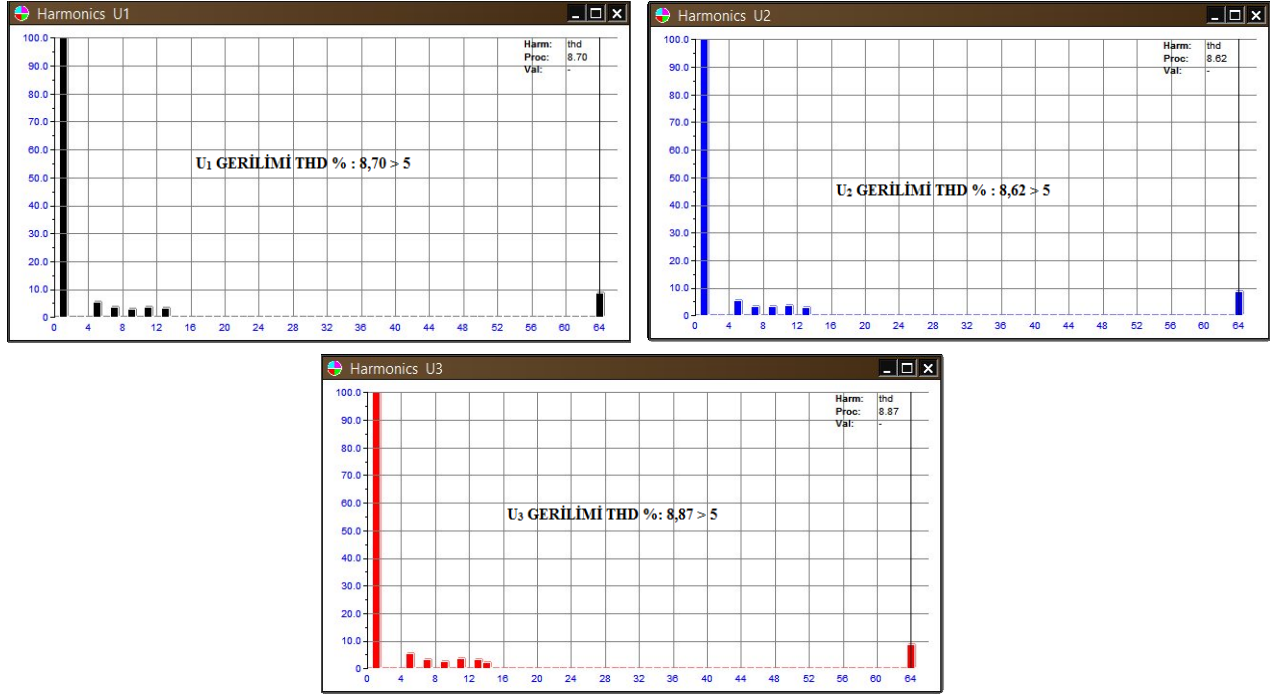
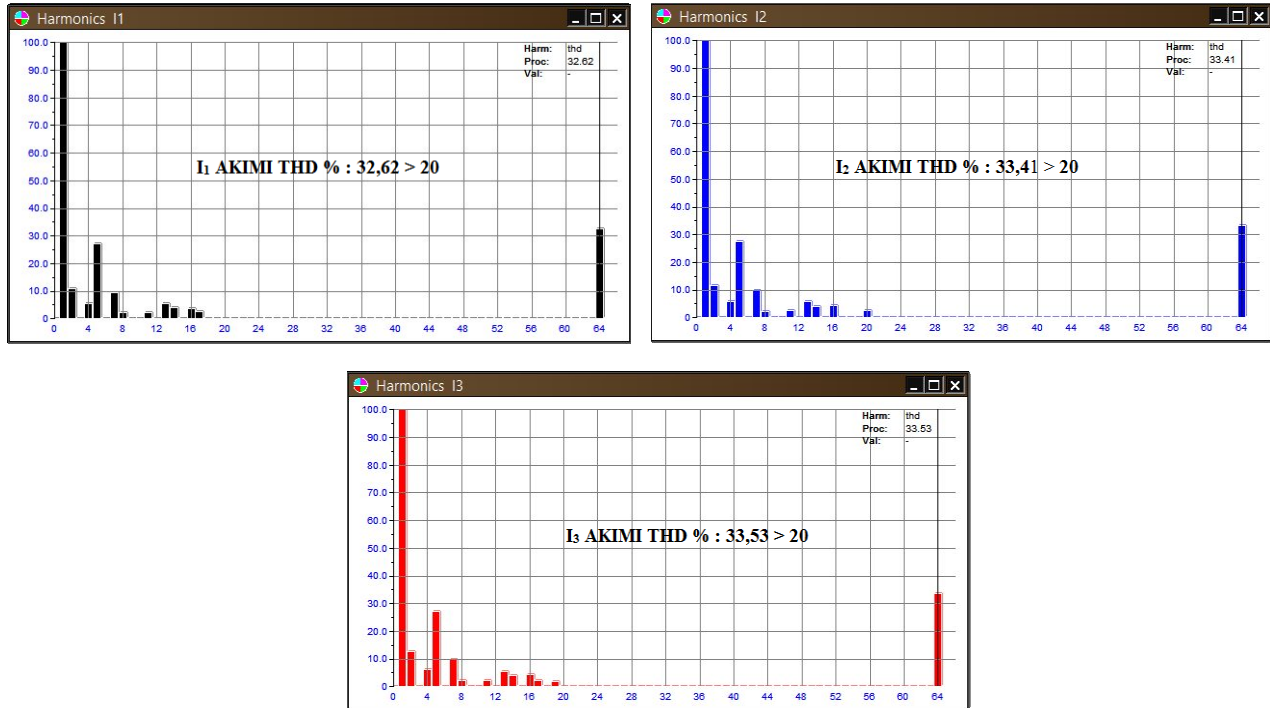
Çizelge 4’de birinci kısımda toplam görünür güç (Stot) 41,651 kVA, toplam reaktif güç (Qtot) 33,810 kVar, toplam aktif güç (Ptot) 22,034 kW ve güç katsayısı (Pf) 0,614 olarak tespit edilmiştir. İkinci kısımda birinci, ikinci ve üçüncü fazlardaki her bir faz için ölçülen akım, gerilim etkin değerleri ve güç katsayısı kullanılarak görünür, aktif ve reaktif güç hesaplanmıştır. Üçüncü kısımda birinci, ikinci ve üçüncü fazlardaki her bir faz için ölçülen akım, gerilim etkin değerleri, akım için ölçülen harmonik bozulma ve cosØ kullanılarak harmonik güç kaybı hesaplanmıştır. Dördüncü kısımda ise toplam harmonik güç kaybı ve toplam aktif güç kullanılarak % olarak harmonik kayıp %34,03 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5. Lazer besleme 3 (ölçme 3) tüm fazların değerleri

1st phase		2nd phase		3rd phase	
Urms	UL_12	Urms	UL_23	Urms	UL_13
225.271	390.123	224.388	389.021	224.089	387.115
thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)
8.699	34.798	8.619	33.522	8.870	34.026
Irms	P(kW)	Irms	P(kW)	Irms	P(kW)
154.473	24.932	149.391	29.606	151.840	6.090
thd(I)	Q(kVAR) i	thd(I)	Q(kVAR) c	thd(I)	Q(kVAR) c
32.624	24.276	33.412	-15.723	33.531	-33.476
Pf i	dPf	Pf c	dPf	Pf c	dPf
0.716	0.772	0.883	0.938	0.179	0.176
Total info					
Stot(kW)	Qtot(kVAR)	Ptot(kW)	Pftot c	I null	
65.55	-24.92	60.63	0.92	299.56	

**Şekil 10.** Ölçme3, besleme3, işletmedeki gerilimler grafiği**Şekil 11.** Ölçme3, besleme3, işletmedeki akımlar grafiği

Çizelge 5 ve Şekil 10'da görüldüğü üzere üçüncü ölçüm noktasında yapılan ölçümlerde gerilim harmoniğine rastlandığından dolayı gerilim sinüsoidal görünümde değildir. Akım harmoniğine de rastlandığı için ise şekil 11'de akım da sinüsoidal görünümde değildir.

Şekil 12. Ölçme3, besleme3, gerilim grafiği U₁, U₂ ve U₃ geriliminin harmonik değerleriŞekil 13. Ölçme3, besleme3, akım grafiği I₁, I₂ ve I₃ akımının harmonik değerleri

Üçüncü ölçüm noktasında şekil 12’de tüm fazlarda 5., 7., 9., 11. ve 13. harmoniklere rastlamıştır. Birinci fazda toplam harmonik bozulma değeri yaklaşık olarak THD_V değeri %8,70, ikinci fazda toplam harmonik bozulma değeri yaklaşık olarak THD_V değeri %8,62, üçüncü fazda toplam harmonik bozulma değeri yaklaşık olarak THD_V değeri %8,87’dir.

Üçüncü ölçüm noktasında şekil 13’de birinci fazda belirgin olarak 5., 7. ve 13. harmonik tespit edilmiş olup toplam harmonik bozulma değeri yaklaşık olarak THD_I değeri %32,62, ikinci fazda belirgin olarak 5., 7. ve 13. harmonik tespit edilmiş olup toplam harmonik bozulma değeri yaklaşık olarak THD_I değeri %33,41, üçüncü fazda belirgin olarak 5., 7. ve 13. harmonik tespit edilmiş olup toplam harmonik bozulma değeri yaklaşık olarak THD_I değeri %33,53’dür.

Çizelge 6. Ölçme3, besleme3, harmonik hesapları

AMPROBE GÜÇ ANALİZÖRÜ ÖLÇMELERİ VE HESAPLAMALAR											
ÖLÇÜLEN YER :					LAZER BESLEME.3						
GÜÇ	ADI		FORMÜL				ÖLÇÜLEN	BİRİM			
1	S_{tot}	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ		S_{tot} = S1 + S2 + S3				102,346	kVA.		
	Q_{tot}	TOPLAM REAKTİF GÜÇ		Q_{tot} = Q1+Q2+Q3				73,475	kVar.		
	P_{tot}	TOPLAM AKTİF GÜÇ		P_{tot} = P1+P2+P4				60,628	kW.		
	P_{fi}	GÜÇ KATSAYISI		P_{fi} = (P_{f1}+P_{f2}+P_{f3}) / 3				0,593	-		
	I_{null}	NÖTR AKIMI (DENGESİZ YÜK)						299.56	A.		
FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER	
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	20,09	S2	Urms2xIrms2	19,35	S3	Urms3xIrms3	19,65	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	26,86	P2	S2xPfi2	31,47	P3	S3xPfi3	5,99	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	24,28	Q2	S2xsinØ2	15,72	Q3	S3xsinØ3	33,48	kVar.
		thd	0, U1	0,0870	thd	0, U2	0,0862	thd	0, U3	0,0887	
HARMONİK KAYIPLARI											
FAZ	Irms	0, I _{THD} .	Urms	(cosØ) dPfi	P _{Har.} (Kw.)						
3	L1	154,473	0,32624	130,064	0,772	5,060					
	L2	149,391	0,33411	129,554	0,938	6,066					
	L3	151,840	0,33531	129,381	0,176	1,159					
TOPLAM										12,285	
HARMONİK % KAYIPLARI											
4	ÖLÇME		%P _{Har.} Kayıbı		% HARMONİK KAYBI						
	P_{Har.} (kW)	12,285	(P_{Har.} / P_{Tot.}) x 100		20,26						
	P_{Tot.} (kW)	60,628									

Çizelge 6’da birinci kısımda toplam görünür güç (Stot) 102,346 kVA, toplam reaktif güç (Qtot) 73,475 kVar, toplam aktif güç (Ptot) 60,628 kW ve güç katsayısı (Pf) 0,593 olarak tespit edilmiştir. İkinci kısımda birinci, ikinci ve üçüncü fazlardaki her bir faz için ölçülen akım, gerilim etkin değerleri ve güç katsayısı kullanılarak görünür, aktif ve reaktif güç hesaplanmıştır. Üçüncü kısımda birinci, ikinci ve üçüncü

fazlardaki her bir faz için ölçülen akım, gerilim etkin değerleri, akım için ölçülen harmonik bozulma ve $\cos\phi$ kullanılarak harmonik güç kaybı hesaplanmıştır. Dördüncü kısımda ise toplam harmonik güç kaybı ve toplam aktif güç kullanılarak % olarak harmonik kayıp %20,26 olarak hesaplanmıştır.

Lazer torna tezgâhına sahip tesiste birinci ölçüm noktasında toplam gücümüz 11103 W iken harmoniklerden kaynaklanan kayıp 1899 W ve yüzdesel olarak % 17,11'lik bir kayıp söz konusudur. En yüksek akım harmonik değeri % 24,87 olarak ölçülmüştür. İkinci ölçüm noktasında toplam gücümüz 22034 W iken harmoniklerden kaynaklanan kayıp 7497 W ve yüzdesel olarak % 34,03'lük bir kayıp söz konusudur. En yüksek gerilim harmonik değeri % 2,36 ve akım harmonik değeri % 38,03 olarak ölçülmüştür. Üçüncü ölçüm noktasında toplam gücümüz 60628 W iken harmoniklerden kaynaklanan kayıp 12285 W ve yüzdesel olarak %20,26'lık bir kayıp söz konusudur. En yüksek gerilim harmonik değeri % 8,87 ve akım harmonik değeri % 33,53 olarak ölçülmüştür.

CNC Dik torna makinasına sahip tesiste yapılan ölçüm neticesinde toplam gücümüz 25640 W iken harmoniklerden kaynaklanan kayıp 7348 W'tır. Yüzdesel olarak % 28,66'lık bir kayıp söz konusudur. En yüksek gerilim harmonik değeri % 4,71 ve akım harmonik değeri % 29,87 olarak ölçülmüştür.

Endüksiyon eritme ocağına sahip tesiste yapılan ölçümde toplam gücümüz 331240 W iken harmoniklerden kaynaklanan kayıp 104690 W'tır. Yüzdesel olarak % 31,61'lik bir kayıp söz konusudur. En yüksek gerilim harmonik değeri % 31,83 ve akım harmonik değeri % 27,95 olarak ölçülmüştür.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Elektrik güç sistemlerinde enerjinin üretilmesi, iletimi ve dağıtımı sırasında, akım ve gerilimin, 50 Hz frekansında ve sinüs eğrisine çok benzer bir biçimde olması istenir. Bu koşul, elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biridir. Ancak, doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonikler nedeni ile akım ve gerilim gibi büyüklükler sinüs biçimde olmaktan çıkarlar ve dalga biçimleri oldukça karmaşık hale gelir. Bunun sonucunda, işletme açısından arzu edilmeyen önemli sorunlar ortaya çıkar.

Kuvvetli akım tesislerinde; aşırı doymuş transformatörler, ark fırınları, ark kaynak makineleri, elektrik makineleri ve artık günümüzde oldukça gelişen güç elektroniği elemanları, şebekede harmoniklerin meydana gelmesine sebep olmaktadır.

Harmoniklerin enerji sistemindeki olumsuz etkileri; teknik ve ekonomik problemler olarak ikiye ayrılabilir. Teknik problemler, sistemin çalışmasını olumsuz yönde etkileyen ve tüketiciye kaliteli enerji sunulmasını engelleyen problemlerdir. Ekonomik problemler ise, harmoniklerin sistemde meydana getirdiği ek kayıpların oluşturduğu problemlerdir.

Harmoniklerin hiç olmaması enerji sistemleri için büyük bir yarar sağlar. Ancak günümüz şartlarında bunun mümkün olmadığı görülmektedir. Yukarıdaki ölçümler sonucunda harmoniklerin etkilerinin azaltılması ve hatta tamamen giderilmesi gerekmektedir.

Yapmış olduğumuz çalışmamızda görüldüğü gibi harmonikler neticesinde sistemde yüzdesel olarak ciddi kayıpların olduğu (%34,03), harmoniklerin azaltılması çalışmalarının bir an önce resmi gazete yayınlanmış şekli ile uygulamaya geçirilmesinin gerektiği görülmektedir.

Teşekkür

Bu makale, "Elektrik Enerjisi Kalitesi, Harmonikler ve Harmonik Azaltma Analizi" adlı devam eden doktora tezimde kullandığım ölçümlerden türetilmiştir. Çalışmanın olgunlaşip mevcut duruma gelmesinde yardımını esirgemeyen Aydemir KALEBEK'e, yapıcı katkılarından dolayı eleştirilenlere teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Dugan, R.C., Mcgranaghan, M.F., BEATY H.W., Santoso S., 2004. Electrical Power Systems Quality 2nd Edition. McGraw-Hill, 521s, New York.
- [2] Güntürkün, R., 2003. İleri Beslemeli ve Elman Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağlarını Kullanarak Harmoniklerin Kompanzasyonu, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya, 156s.
- [3] Adak, S., 2003. Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonunun Azaltılması, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 130s
- [4] Kakilli, A., Tunçalp, K., ve Sucu, M., 2008. Harmoniklerin Reaktif Güç Kompanzasyon Sistemine Etkilerinin İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20,1: 109-115.
- [5]. Nilsson, J.,W., Riedel, S., A., 1998. Electric Circuits. Prentice Hall, 794s, New Jersey.
- [6] Şenyurt, Ö., 2006. Elektrik Tesislerinde Hızlı Fourier Dönüşümü ile Harmonik Analizinin Yapılması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 116s.
- [7] Targosz, R. And Manson, J., 2007. PAN European LPQI power quality survey, Proceedings of 19th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2007), May 2007, Vienna.
- [8] Manson, J. And Targosz, R., 2008. European Power Quality Survey Report, Leonardo Energy, 29s.
- [9] Küçük, D., Salor, Ö., Güder, M., Demirci, T., Akkaya, Y., Çadircı, I., Ermiş, M., 2009. Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Harmonik Bozulma ve Kırpışma Parametrelerinin Oluşturulan Güç Kalitesi Veritabanı Yapısıyla Değerlendirilmesi, III. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, 6s.
- [10] 2016Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O., 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler. Birsen Yayınevi, 330s, İstanbul.
- [11] ABB, Technical Application Papers No.8, 64s.
<https://library.e.abb.com/public/4704e67320c08992c1257870002e4700/1SDC007107G0202.pdf>
Erişim Tarihi:09.06.2016
- [12] Filiz, C., 2006. Güç Sistemlerine Harmonikler ve Filtrelerin İncelenmesi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale, 146s.
- [13].Elektrik Dağıtım ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği.
<http://www3.epdk.org.tr/index.php/elektrik-piyasasi/mevzuat?id=94>
<http://www3.epdk.org.tr/index.php/elektrik-piyasasi/mevzuat?id=992>
Erişim Tarihi: 01 Aralık 2015.