

HARMONİKLERİN ENDÜSTRİYEL GÜÇ KALİTESİ VE ENERJİ VERİMLİLİĞİNE ETKİSİ ÜZERİNE BİR SAHA İNCELEMESİ VE UYGULAMASI

Levent KILIÇ^{1*}, Gürhan DURAL¹, Mehmet UZALA², Fatih MUTLU³, Anıl KAYAR³, Serkan ŞÜKRÜOĞLU³, Mirbey ÇETİNKAYA³

¹Şişecam Bilim, Teknoloji ve Tasarım Merkezi, Gebze, Kocaeli, TÜRKİYE

²Şişecam Operasyon Teknolojileri Müdürlüğü, Lüleburgaz, Kırklareli, TÜRKİYE

³Şişecam Otomotiv Fabrikası Teknik Müdürlüğü, Lüleburgaz, Kırklareli, TÜRKİYE

Makale Künye Bilgisi: Kılıç, L., Dural, G., Uzala, M., Mutlu, F., Kayar, A., Şükrüoğlu, S., Çetinkaya, M. (2022). Harmoniklerin Endüstriyel Güç Kalitesi ve Enerji Verimliliğine Etkisi Üzerine Bir Saha İncelemesi ve Uygulaması, *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(2): 73-84.

Öne Çıkanlar

- Harmonik bozulmalarla ilgili verilerin bölgesel ve tesis bazında ortaya konması
- Bozulmuş durumu iyileştirecek yöntem geliştirilmesi ve uygulaması
- Çözümün enerji ve operasyonel etkinliğinin gösterilmesi

Makale Bilgileri	Öz
Makale Tarihiçesi: Geliş: 17 Mayıs 2022 Kabul: 24 Ekim 2022	Endüstriyel tesisler gerek bağlı oldukları şebekeden ve gerekse de kendi sistem ve ekipmanlarından doğrusal olmayan yükler nedeniyle yoğun bir harmonik etkiye maruz kalmaktadırlar. Endüstriyel elektrik sistemlerinde aşırı ısınma, bileşenlerin yaşlanması ve kapasite azalması, koruma ve ölçüm cihazlarının arızalanması, güç faktörünün daha düşük olması ve buna bağlı olarak artan kayıplar nedeniyle verimliliğin düşmesi, nedensiz açmalar gibi olaylar güç kalitesi problemlerinden olan harmoniklerin bazı temel etkileridir.
Anahtar Kelimeler: Harmonikler; Endüstriyel tesis; Güç kalitesi; Aktif pasif filtre; Enerji verimliliği.	Bu çalışmada, endüstriyel tesisin şebeke bağlantı noktasında uzun süreli izlenen şebeke olayları istatistikleri ve iç dağıtım sisteminde tespit edilen bozucu olaylar için iyileştirme çözümleri, önceki ve sonraki durumları gösterilerek verilmiştir. İşletme operasyon ve teknik yönetimindeki iyileşme durumu ve enerji verimliliğine etkisi de ayrıca hesaplanmıştır. Literatüre, sektöre, ilgi duyabileceklere ve düzenleyici otoritelere, konuya sahadan ve pratik verilerle katkı sağlamak amaçlanmıştır.

A RESEARCH AND APPLICATION OF HARMONICS EFFECTS ON INDUSTRIAL POWER QUALITY AND ENERGY EFFICIENCY

Highlights

- Long term local and plant harmonic data monitoring
- Solution method and improved implementation against clarified harmonic problems
- Analysing of outputs based for energy and operational efficiency

Article Info	Abstract
Article History: Received: May 17, 2022 Accepted: October 24, 2022	Industrial plants are exposed to an intensive harmonic effects due to non-linear loads from both the network they are connected to and their own systems and equipment. In industrial electrical systems, events such as overheating, aging of components and capacity reduction, failure of protection and measuring devices, lower power factor and consequently decreased efficiency due to increased losses, unexplained tripping are some of the main effects of harmonics, which are among power quality problems.
Keywords: Harmonics; Industrial plant; Power Quality; Active passive filter; Energy efficiency.	In this study, the improvements against clarified harmonic problems are given with the help of the statistics of long-term monitored network events at the grid connection point and of the industrial plant itself. The improvement is also given with before-after operational and technical before in the operation and technical data. It is aimed to contribute to the literature, the sector, those who may be interested and regulatory authorities, with practical data from the field.

1. Giriş

Son yıllarda, güç sistemine bağlanan ve sayıları gittikçe artan konverterler, ark fırınları, güç elektroniği elemanları, hızlı reaktif güç sağlayıcılar gibi doğrusal olmayan yükler, sistemdeki akım ve gerilim büyüklüklerinin sinüzoidal olmamasına, yani harmonik bozulmaya neden olabilirler (B. Kekezoglu, C. Kocatepe, R. Yumurtaci, O. Arıkan, M. Baysal, A. Bozkurt, Y. Akkaya, E. Özdemirci, 2022 ve Emenike Ugwuagbo, Adeola Balogun, Ayobami Olajube, Osita Omeje, Ayokunle Awelewa, Shehu Abba-Aliyu, 2021). Çok sayıda doğrusal olmayan yük, ek kayıpların oluşmasına ve beklenmeyen arızaların yaşanmasına neden olabilen elektrik tesislerinde istenmeyen bir durumdur (IEEE P519.1TM/D12, 2012). Doğrusal olmayan yükler, dağıtım sistemlerine harmonik akımlar enjekte eder. Sinüzoidal bir kaynaktan doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin bir kombinasyonu beslendiğinde, toplam besleme akımı harmonikler içerecektir (IEEE 1531, 2003). Enjekte edilen harmonik akımlar ve ortaya çıkan harmonik gerilimler, güç kalitesi sorunlarına neden olmaktadır.

Ekipmanda aşırı ısınma, bileşenlerin yaşlanması ve kapasite azalması, koruma ve ölçüm cihazlarının arızalanması, güç faktörünün daha düşük olması ve buna bağlı olarak artan kayıplar nedeniyle güç sistemi verimliliğinin düşmesi, güç dağıtım sistemlerinde harmoniklerin bazı temel etkileridir. Harmonik bozulmalar, enerji kayıplarını artırır, ekipmanların ömürlerini azaltır ve fazla arızaya neden olarak sistemlerdeki işletme maliyetlerini artırır. Farklı güç sistemi sektörlerinde kullanılan çok sayıda doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu harmoniklerden kaynaklanan enerji kaybı tahmin edilebilir (M. Jawad

Ghorbani, H. Mokhtari, 2015). Üretilen güç ile tüketilen güç arasındaki fark, enerji kaybı olarak kabul edilir. Ancak, dağıtım şebekelerindeki enerji kayıpları, yetersiz ölçüm ve ayrıca yüksek veri toplama maliyeti nedeniyle genellikle ölçülmekten ziyade tahmin edilmektedir. Ayrıca, güç sistemi dağıtım kaybı tahmin yöntemleri, teknik kayıpları belirlemenin güvenilir yollarındandır (Pablo Rodríguez Pajarón, Araceli Hernández Bayo, Jovica V.Milanović 2022, P. Karuppanan, Kamala Manta Mahapatra, 2014, Cigre 313, 2007).

Pratik, teorinin kaynağı ve yeniden denenmesinin ölçüsüdür. Gerçeklik pratikte mevcutsa, teorideki yerini de alacaktır. Endüstride farklı koşullar için yapılmış bu uygulama ile hangi durumlar için hangi çözümlerin uygun olacağı, arıza, operasyon ve enerji verimliliğine etkisi gerçek verilerle ortaya koyulmaktadır. Bu, sektörden sağlanmış bir yenilik olarak öne çıkmaktadır.

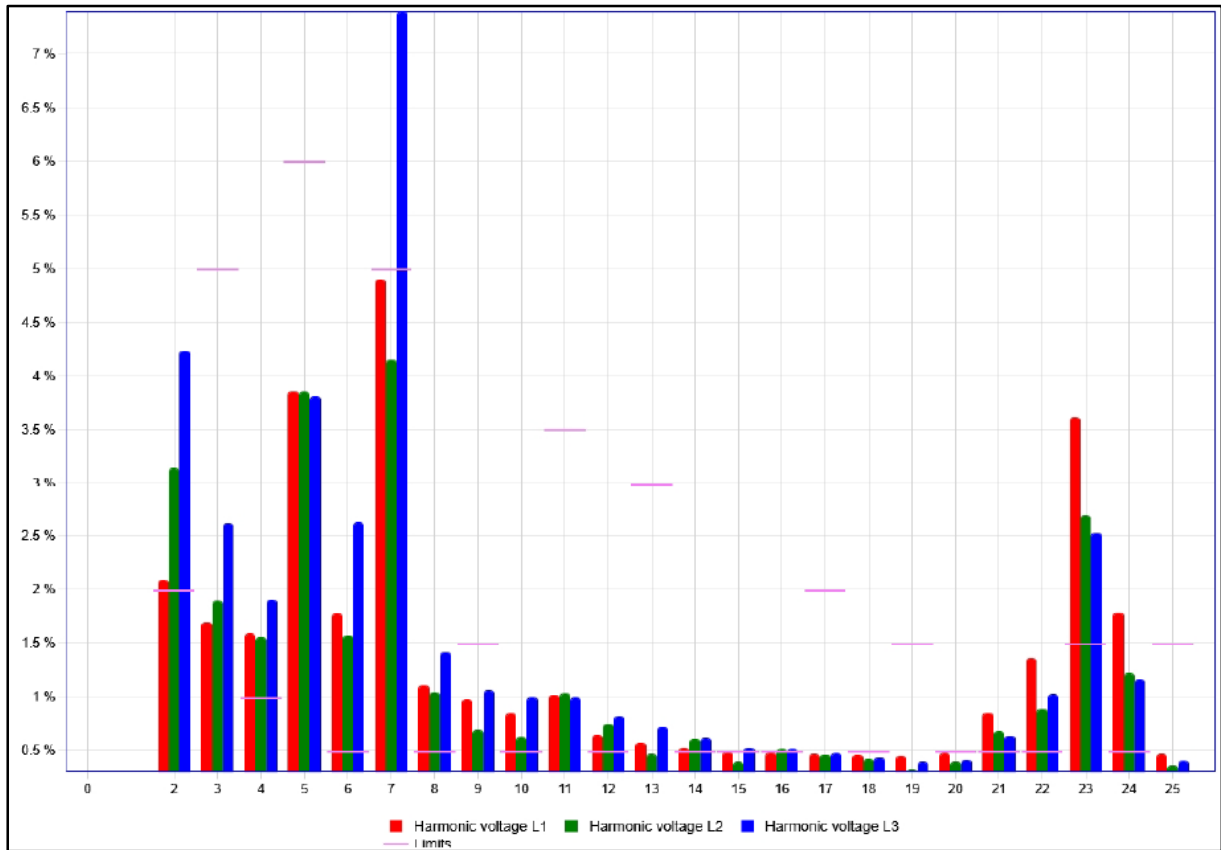
2. Şebeke Güç Kalitesi Olayları

2.1. Şebeke İstatistiksel Analizi

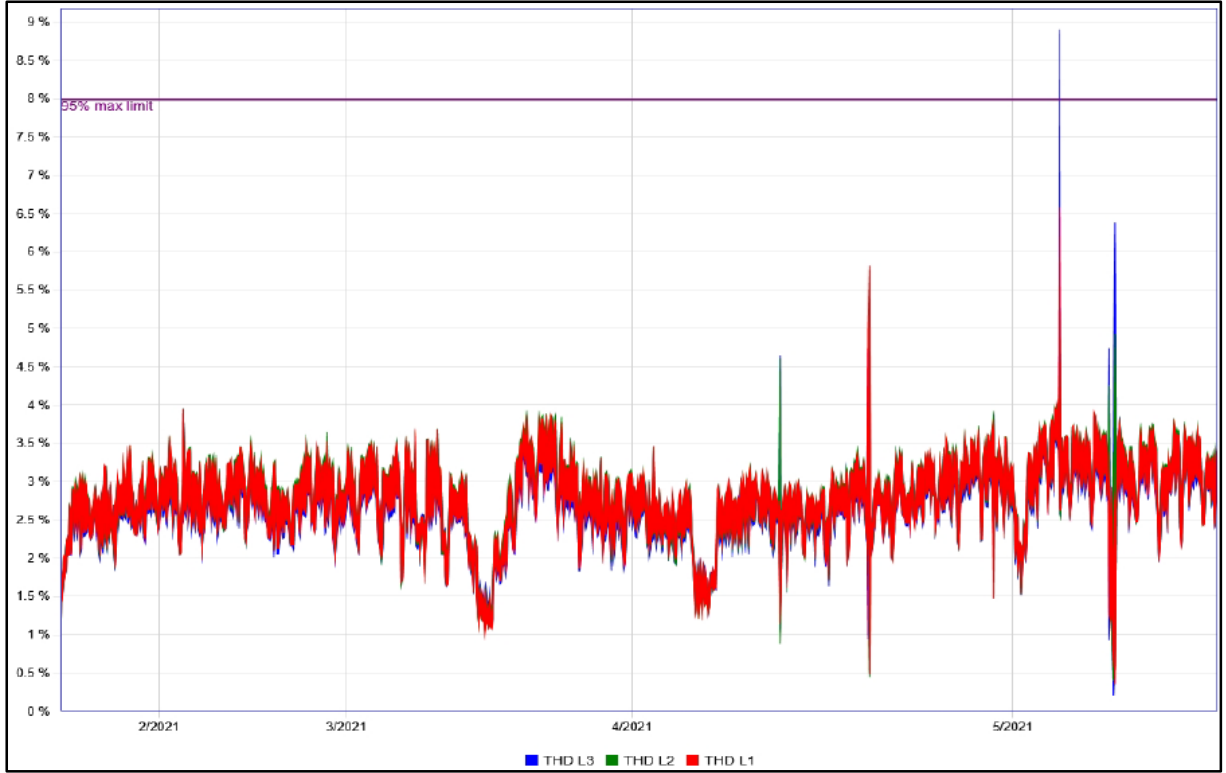
Şebeke bağlantı noktasında yaşanmış olaylar, EN 50160 standartına (EN 50160, 2000) göre kategorize edilmiş olarak Tablo 1’de, gerçek zamanlı güç kalitesi analizöründen 2021 yılına ait harmonik bileşenleri ve bozunum trendleri ise sırasıyla Şekil 1 ve 2’de verilmektedir.

Tablo 1. Güç kalitesi 6 yıllık istatistikleri

Yıl	Kısa süreli kesinti	Uzun süreli kesinti	Gerilim düşmesi	Gerilim yükselmesi
2016	2	9	409	408
2017	0	11	357	355
2018	0	10	659	672
2019	0	7	380	359
2020	1	11	432	369
2021	0	9	378	415



Şekil 1. 2021 yılı gerilim harmoniği bileşenleri



Şekil 2. 2021 yılı gerilim harmoniği bozunumu

2.2. Bara Ölçümleri

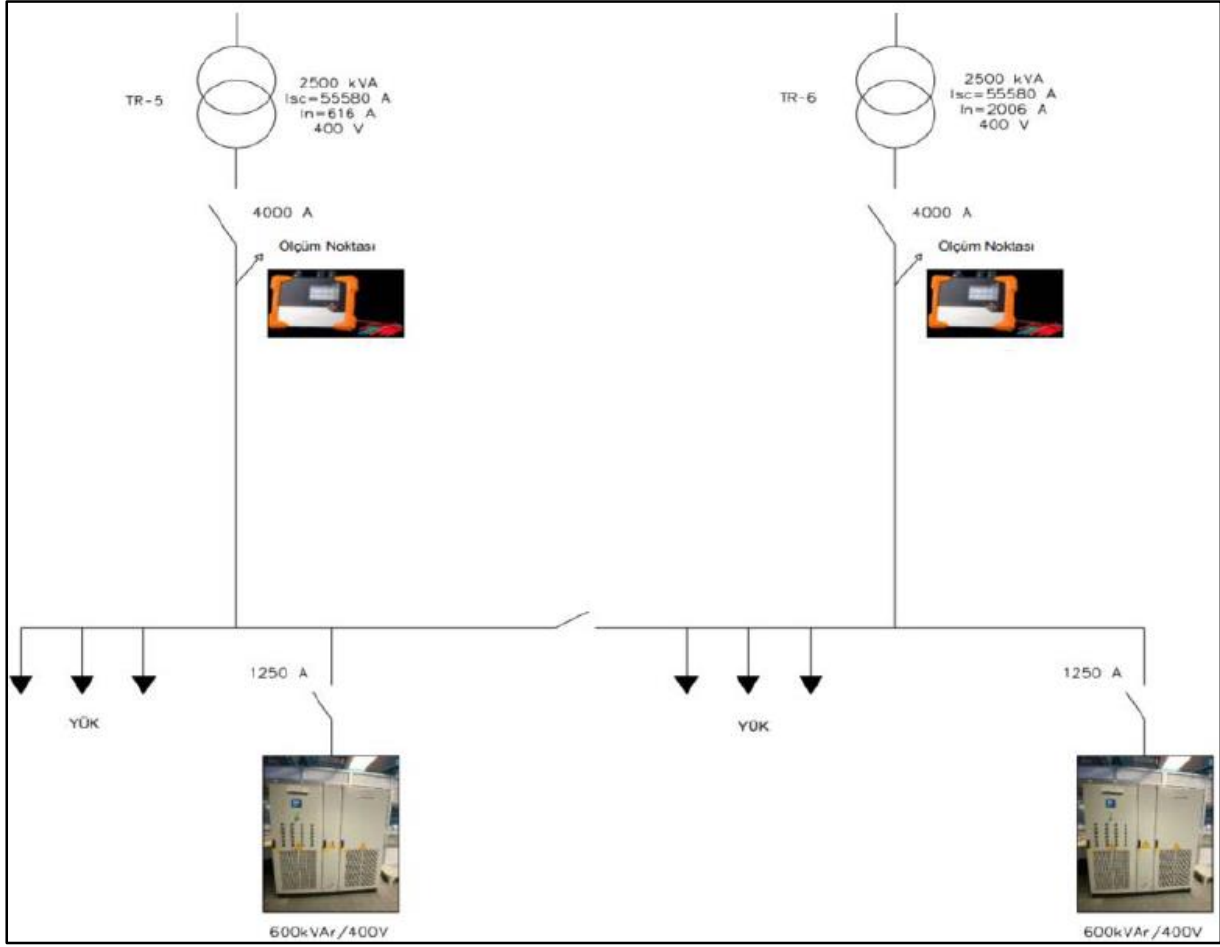
Fabrika dağıtım sisteminin tümünde gerek farklı firmalara yaptırılmış ve gerekse de enerji izleme

sisteminden doğrulanmış, Tablo 2’de görülen verilere göre, bazı noktalarda iyileştirme ihtiyacı olduğu dikkat çekmektedir.

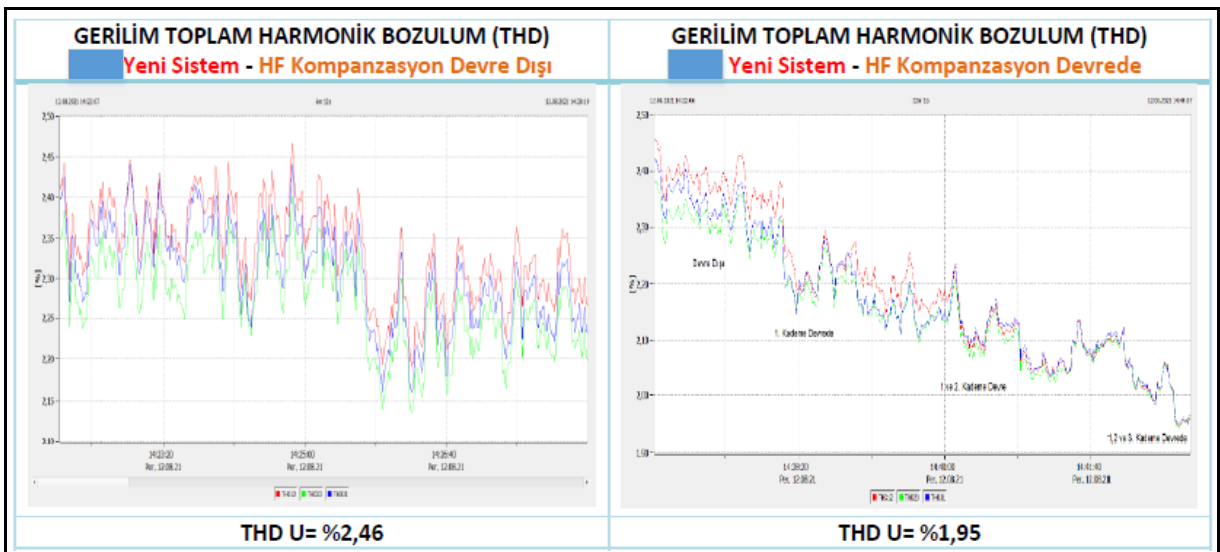
Tablo 2. Dağıtım sistemindeki akım harmonik bozulmaları

Ölçüm Noktası	S_n (kVA)	U_k (%)	I_{sc} (A)	I_n (A)	I_{sc}/I_n	H3 (%)	H5 (%)	H7 (%)	THDI (%)
1. durum: Pasif Filtre	2500	6,5	55580	1781	31,2	0,7<7,0	1,5<7,0	0,6<7,0	3,8<8,0
	2500	6,5	55580	1847	30	0,7<7,0	1,1<7,0	0,6<7,0	2,2<8,0
	2500	6,5	55580	616	90	0,6<10,0	11,7>10,0	6,0<10,0	15,4>12,0
	2500	6,5	55580	2006	27,7	2,4<7,0	12,2>7,0	5,2<7,0	15,2>8,0
	2500	6,5	55580	3166	17,5	0,5<4,0	1,8<4,0	0,3<4,0	2,3<5,0
2. durum: Aktif Filtre	2500	6,5	55580	2390	23,2	0,3<4,0	1,7<4,0	0,1<4,0	1,94<5,0
	2500	6,5	55580	685	81,1	0,9<10,0	1,7<4,0	0,8<4,0	5,6<12,0
	2500	5,7	63380	921	68,8	1,6<10,0	26,3>10,0	6,1<10,0	28,64>12,0
	2500	5,7	63380	568	111,5	3,1<12,0	32,5>12,0	6,9<10,0	34,20>15,0
	2500	6,5	55580	1715	32,4	1<7,0	1,25<7,0	0,9<7,0	2,2<8,0
	2500	6,5	55580	1814	30,6	1,5<7,0	4,4<7,0	0,6<7,0	4,7<8,0
	2500	6,5	55580	2533	21,9	0,5<7,0	1,1<7,0	0,5<7,0	1,8<8,0
	2500	6,5	55580	2492	22,3	0,3<7,0	0,7<7,0	0,7<7,0	2,2<8,0
	2500	6,5	55580	1658	33,5	0,8<7,0	1,6<7,0	1,4<7,0	2,8<8,0
	2500	6,5	55580	321	173,1	1,9<12,0	1,6<12,0	0,7<12,0	7,8<15,0
2500	6,5	55580	280	198,5	0,8<12,0	9,6<12,0	5,4<12,0	11,4<15,0	

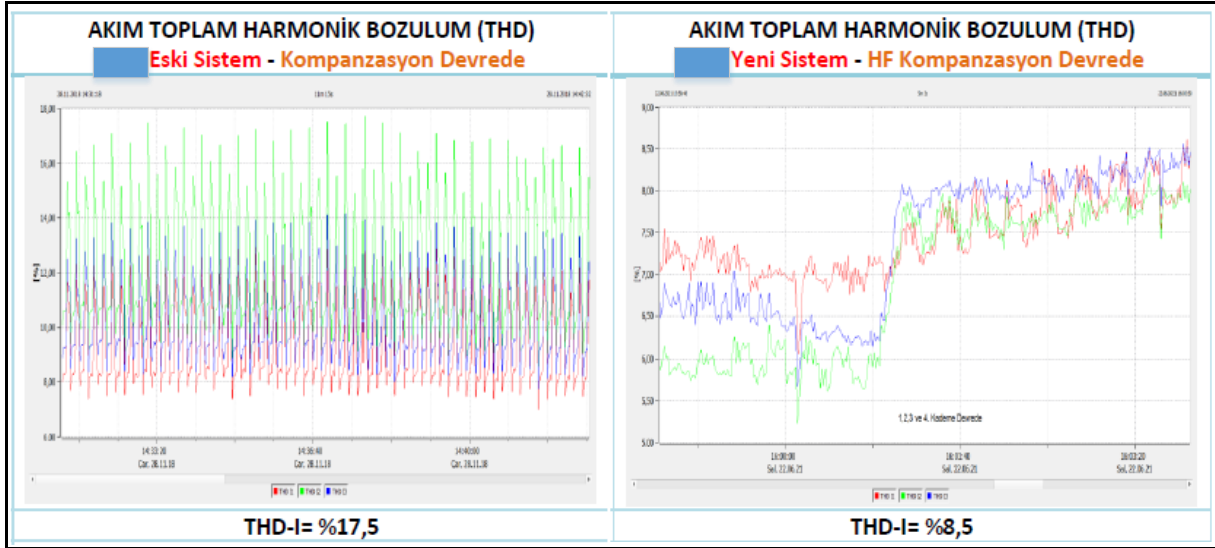
Bozulmaların yüksek olduğu, pasif filtre uygulanan hatın topolojik şekli basitleştirilmiş olarak Şekil 3’de, iyileştirme öncesi ve sonrası ölçümler ise Şekil 4 ve 5’de verilmektedir (Epkom, 2021).



Şekil 3. Birinci uygulama için basitleştirilmiş tek hat çizimi



Şekil 4. Filtre öncesi – sonrası durum



Şekil 5. Filtre öncesi – sonrası durum

Yapılan çalışmadan sağlanan iyileştirmelerin etkisi, sırasıyla Tablo 3 ve 4'te verilmektedir. Akımlardaki ciddi düşme dikkat çekmektedir.

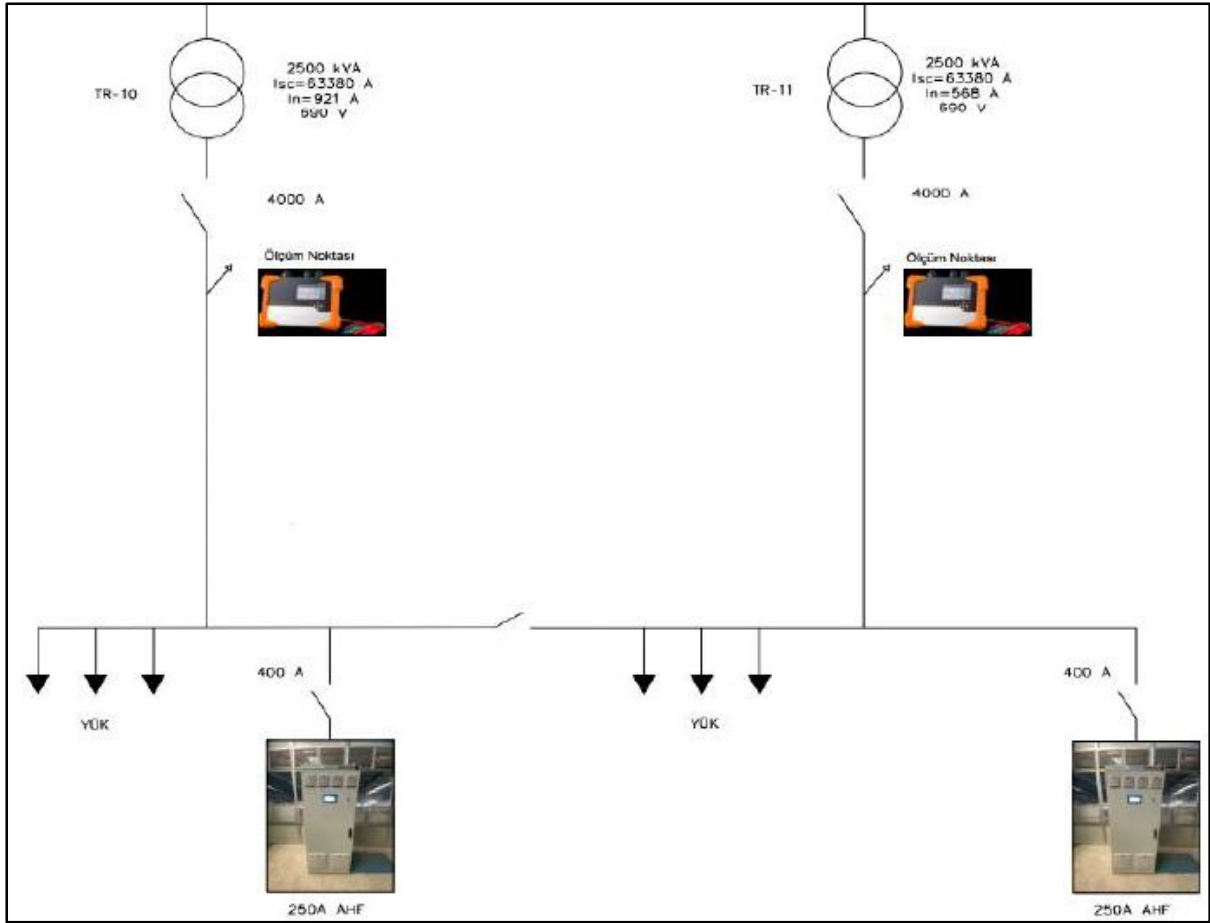
Tablo 3. Eski sistem cevapları

	Kompanzasyon Devrede				Kompanzasyon Devre Dışı			
	Q (kVAr)	I (A)	THD-I (%)	THD-U (%)	Q (kVAr)	I (A)	THD-I (%)	THD-U (%)
	100	1357	17.5	4	350	1550	6.2	3.20
	80	1254	7.7	3.36	160	1358	6.5	2.64

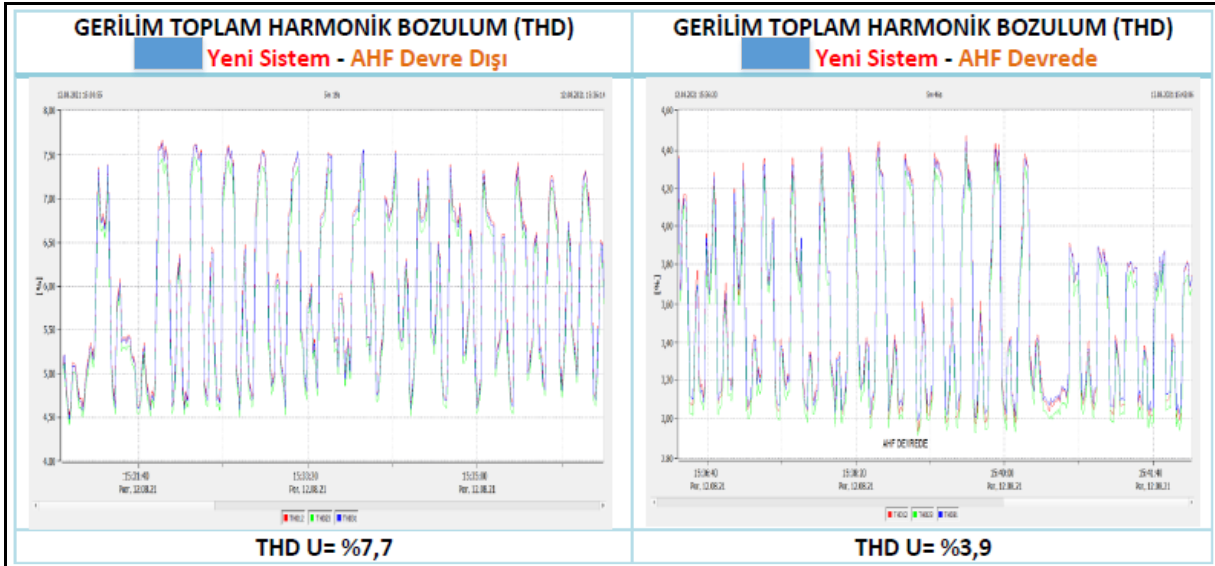
Tablo 4. Yeni sistem cevapları

	Kompanzasyon Devrede							Kompanzasyon Devre Dışı						
	I (A)	THD-I (%)	THD-U (%)	H5-U (%)	H7-U (%)	H11-U (%)	H13-U (%)	I (A)	THD-I (%)	THD-U (%)	H5-U (%)	H7-U (%)	H11-U (%)	H13-U (%)
	618	8,52	2,46	2,35	0,58	0,16	0,09	928	8,18	3,01	2,88	0,76	0,26	0,17
	973	9,62	1,95	1,79	0,55	0,31	0,04	1197	7,61	2,46	2,35	0,68	0,43	0,17

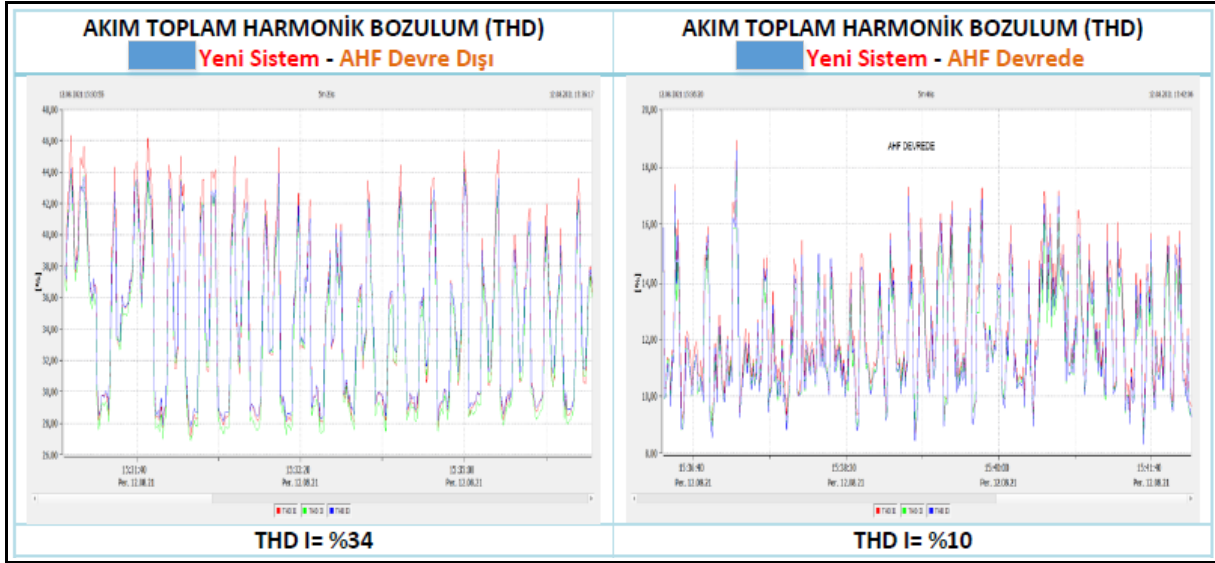
Aktif filtre uygulanan ikinci durum tek hat çizimi Şekil 6'da, iyileştirme öncesi ve sonrası ölçümler ise Şekil 7 ve 8' de verilmektedir. Akım bozulması yarıya düşürüldüğü görülmektedir.



Şekil 6. İkinci uygulama için basitleştirilmiş tek hat çizimi



Şekil 7. Filtre öncesi – sonrası durum



Şekil 8. Filtre öncesi – sonrası durum

Tablo 5. Eski sistem cevapları

Ölçüm Noktası	S_n (kVA)	U_k (%)	I_{sc} (A)	I_n (A)	I_{sc}/I_n	H3 (%)	H5 (%)	H7 (%)	THDI (%)
	2500	5,7	63380	921	68,8	1,6<10,0	26,3>10,0	6,1<10,0	28,64>12,0
	2500	5,7	63380	568	111,5	3,1<12,0	32,5>12,0	6,9<10,0	34,20>15,0

Tablo 6. Yeni sistem cevapları

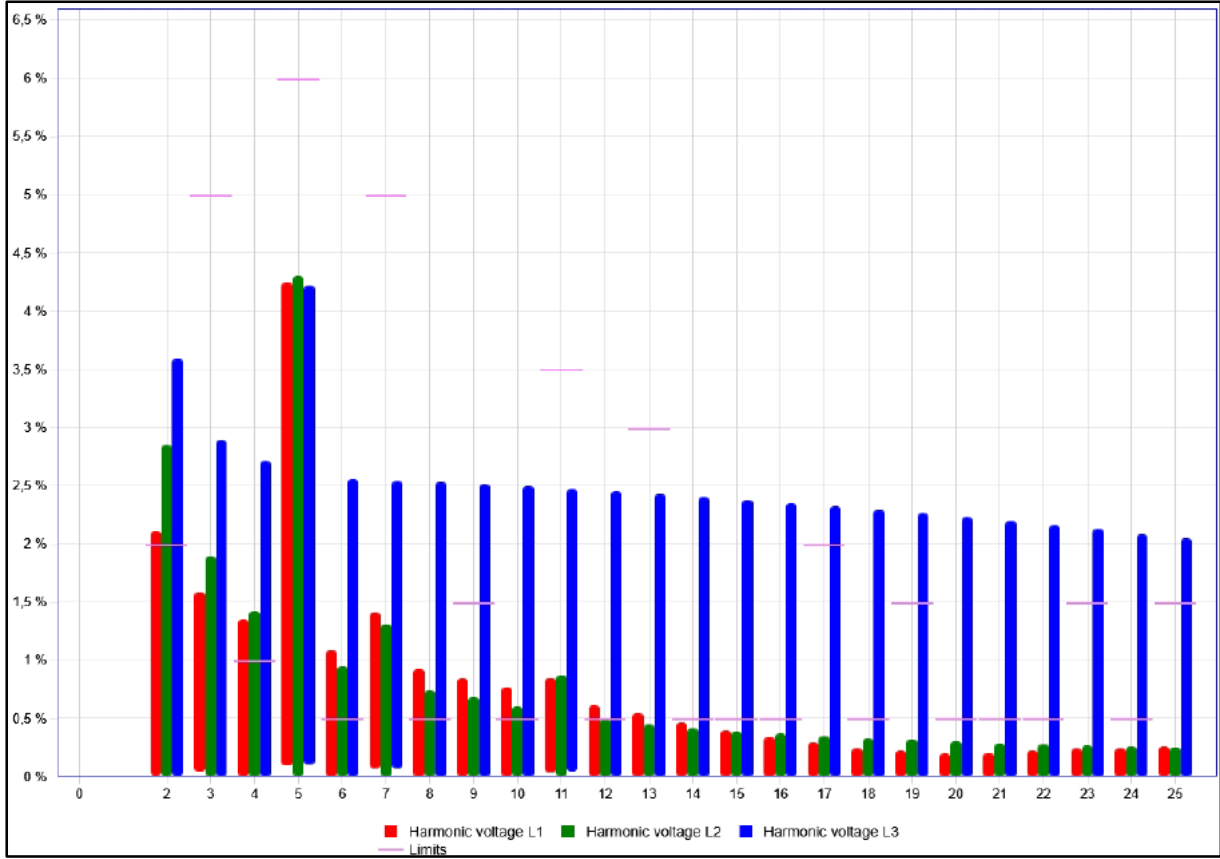
	AHF Devrede							AHF Devre Dışı						
	I (A)	THD-U (%)	THD-I (%)	H5-I (A)	H7-I (A)	H11-I (A)	H13-I (A)	I (A)	THD-U (%)	THD-I (%)	H5-I (A)	H7-I (A)	H11-I (A)	H13-I (A)
	901	3,90	10,3	54,7	22,1	16,07	14,84	1098	7,66	46,05	252,2	77,28	50,01	33,71
	727	3,52	6,91	42,11	16,91	8,61	3,27	770	6,43	35,85	207,52	48,02	39,04	15,84

Yapılan çalışmadan sağlanan iyileştirmelerin etkisi, sırasıyla Tablo 5 ve 6' da verilmektedir. %46 akım harmonik oranının, %10'a düşmesi sağlanmıştır.

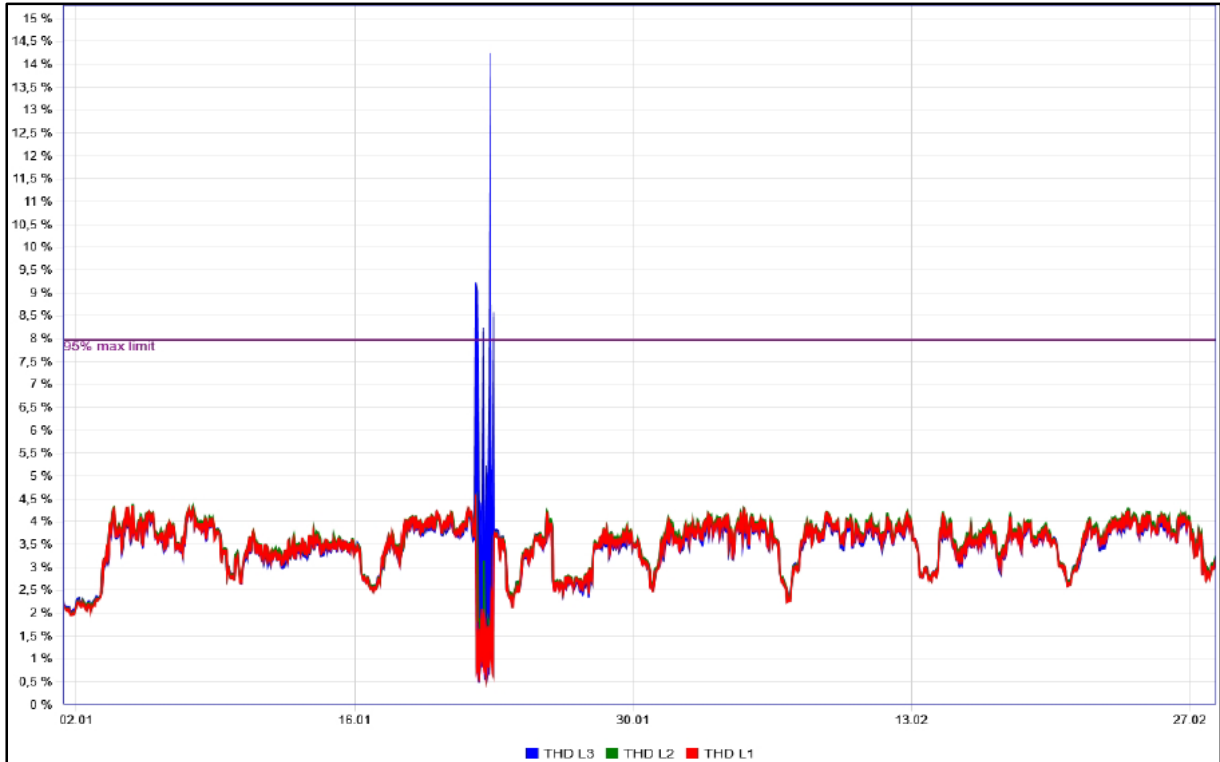
3. Teknik Değerlendirmeler

3.1. Giriş Barasına Etkisi

Giriş barası gerilim harmonik bozulmaları sırasıyla Şekil 9 ve 10' da verilmektedir.



Şekil 9. 2022 yılı gerilim harmoniği bileşenleri (14 Nisan 2022'ye kadar)



Şekil 10. 2022 yılı gerilim harmoniği bozunumu (14 Nisan 2022'ye kadar)

3.2. Enerji Verimliliğine Etkisi

Toplam akım ve gerilim bozulması formülleri denklem 1 ve 2'de sırasıyla verilmektedir (TS EN ISO 50001, 2013 ve TS ISO 5006, 2016).

$$\text{Toplam akım harmonik bozulması} = \frac{I_h}{I_f} \quad 1.$$

$$\text{Toplam gerilim harmonik bozulması} = \frac{V_h}{V_f} \quad 2.$$

5 ve 7. harmoniklerin etkin olduğu devrelerde, birinci durumdaki iki ayrı sistemde uygulanan pasif filtre

çözümü ile, kablo kayıplarında, sırasıyla, $\left(\frac{1197}{973}\right)^2 \cdot \%100 = \%51$ ve $\%25$ iyileşme olduğu hesaplanmaktadır.

Yine aynı harmoniklerin baskın olduğu ikinci durumdaki iki ayrı aktif filtre uygulamasında ise, oranların sırasıyla, $\%49$ ve $\%12$ olduğu görülmektedir.

Devreye alınmış aktif ve pasif filtrelerinin karşılaştırması Tablo 7'de kategorize edilmiştir.

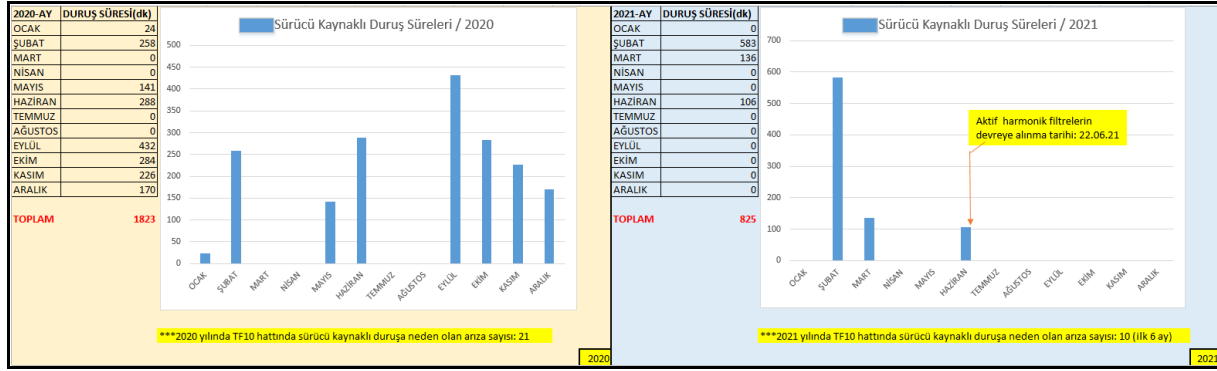
Tablo 7. Aktif ve pasif filtre karşılaştırması

Konu	Pasif filtre	Aktif filtre
Filtrenin ayarlandığı frekans	Bir veya iki frekansa ayarlanabilmektedir.	Birden fazla frekansa ayarlanabilmektedir.
Harmonik değerlerinde değişme	Yeni bir filtre gerektirmektedir	Problem yaşanmayacaktır
Empedans etkisi	Rezonans meydana gelebilmektedir	Etkilemeyecektir
Temel frekans değişmesi	Etkinliği azalabilmektedir	Etkilemeyecektir
Akım yükselmesi	Problem çıkabilmektedir	Aşırı yükleme yaşanmayacaktır
Harmonik sırasının kontrolü	Oldukça zordur	Ayar ile mümkün olabilmektedir

3.3. Teknik Operasyonlara Etkisi

Duruş sürelerinde $\%55$, bakım sürelerinde $\%80$ oranlarında iyileştirmelerin sağlandığı görülmektedir.

Kabloların harmonik akımlarından kaynaklanan sıcaklık artışının $\%32$ düştüğü gözlenmektedir.



Şekil 11. Duruş sürelerindeki iyileşme

4. Sonuç ve Yeni Yatırımlar İçin Öneriler

Devreye alınmış iki pasif, iki de aktif filtreler ile sağlanan ve sağlanabilecek teknik faydalar özetlenmektedir:

- Arıza sıklığı sifıra yakınsamıştır.
- Harmonik filtrelerinin, akımı düşürmesi nedeniyle, hat kayıplarını ve sıcaklıkları azaltılmıştır.
- Özellikle sürücü gereken uygulamalarda, daha kurulum aşamasında düşük harmonik oranına sahip ürün seçiminin yapılması önem taşımaktadır.
- Kompanzasyon sistemi ihtiyacı olan sistemlerin, daha kurulum aşamasında, harmonik filtrelili şekilde düşünülmesi önem arz etmektedir.
- Şebeke sağlayıcılarının, güç kalitesi istatistiklerini sağlama zorunluluğu getirilmelidir. Limitler, her geçen sene iyileştirme yönünde güncellenmelidir.
- Harmonik kaynaklı hat kayıpları azaltılmıştır.

Yapılan uygulama çalışması ile, harmonik bozulmaların yol açtığı sorunlar, tesis ve bölgesel bazlı ortaya konmuş ve tesiste sağlanan teknik ve ekonomik kazançlar karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

Kaynaklar

- B. Kekezoglu, C. Kocatepe, R. Yumurtaci, O. Arıkan, M. Baysal, A. Bozkurt, Y. Akkaya, E. Özdemirci, (2008). Investigation of harmonic effect in Turkey's iron – steel industry, *IEEE Power Quality and Supply Reliability Conference*, IEEE Xplore.
- Emenike Ugwuagbo, Adeola Balogun, Ayobami Olajube, Osita Omeje, Ayokunle Awelewa, Shehu Abba-Aliyu, (2021, December). Experimental data on power quality assessment at point of common coupling of a steel mill to an electric power grid, *Data in Brief*, Volume 39, 107681.
- IEEE Power Standards Coordinating Committee (2012, July). *IEEE P519.1TM/D12 Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems*.
- IEEE 1531 IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters (2003). IEEE Power Engineering Society.
- M. Jawad Ghorbani, H. Mokhtari (2015, February) Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol.5, No.1, pp. 166-174.
- Pablo Rodríguez Pajarón, Araceli Hernández Bayo, Jovica V.Milanović, (2022, March). Forecasting

voltage harmonic distortion in residential distribution networks using smart meter data, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 136, 107653.

P. Karuppanan, Kamala Manta Mahapatra, (2014, November). Active harmonic current compensation to enhance power quality, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 62, Pages 144-151.

Cigre 313, Connection Criteria at the Distribution Network for Distributed Generation, (2007, February). Task Force C6.04.01.

EN 50160 (2000). Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, European Norm, Brussels.

www.epkom.com.tr, Ziyaret tarihi: 16.06.2021.

TS EN ISO 50001 (2013, Şubat). Enerji Yönetim Sistemleri – Şartlar ve Kullanım İçin Kılavuz, TSE – Ankara.

TS ISO 50006 (2016, Şubat). Enerji Yönetim Sistemleri – Enerji Temel Seviyeleri (ETS) ve Enerji Performans Göstergeleri (EPG) Kullanılarak Enerji Performans Ölçümü – Genel Prensipler ve Kılavuzluk, TSE – Ankara.