

ELEKTRİK TESİSLERİNDE YÜKSEK FREKANSLI BİLEŞENLERİN ISI ETKİLERİ VE ÖRNEK VAKALAR(*)

MERT DİRİK

ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSİ

1. GİRİŞ

Elektrik tesislerindeki en önemli kavramlardan biri tesislerin tükettikleri/ürettikleri gücün kalitesi ve tesisin elektrik şebekesine uyumluluğu konusudur. Tesislerin ve elektrik şebekesinin üretim verimliliği, sürdürülebilirliği ve güvenliği için güç kalitesinin belirli standart değerleri karşılaması gerekmektedir. Bu standart değerler ise belirli gerilim seviyelerine göre gerek IEC gerek IEEE gibi uluslararası standartlarca belirlenmiş ve ülkemizde de hem EPDK hem de TSE tarafından kabul görüp uygulamaya konmuştur. Güç kalitesi fenomenleri arasında en bilinen ve kararlı durum olarak adlandırılabilen kavram ise harmoniklerdir.

Standartlarda bahsedilen güç kalitesi parametreleri kısaca çok genel başlıklar olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Dalga formu bozuklukları (bu başlığın en çok bilinen fenomeni harmoniklerdir)
- Transient
- Uzun ve kısa süreli gerilim varyasyonları
- Gerilim dalgalanmaları
- Frekans dalgalanmaları

Harmonikler, temel şebeke frekansının(50/60Hz) tam sayı katları şeklinde, sünzoidal dalga formuna sahip periyodik sinyaller olarak tanımlanmaktadır. İçerdikleri yarı-iletken anahtarlama ekipmanları sebebiyle frekans konvertörü, fotovoltaiik invertör, enerji depolama sistemlerinde kullanılan invertörler, elektrikli araç şarj istasyonlarındaki vb. gibi elektrik sinyalinin yapısının değiştirilmesi sonucu oluşan harmonikler temel şebeke frekansının(50/60Hz) dışındaki bileşenlerdir ve iletim yoluyla yayılan elektromanyetik girişimlerden biri olarak

kavramsallaştırılmışlardır.

İletim yoluyla oluşan elektromanyetik girişimler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir. (1)

- a) Subharmonik : <50Hz
- b) Harmonik : 50Hz – 2kHz
- c) Supraharmonik : 2kHz – 150kHz
- d) EMC(İletim yol.) : 150kHz – 30MHz

IEC 61000 – 2 – 2 (2) standardında 2018’ de yapılan değişikliğe kadar elektrik tesislerinde güç kalitesi bağlamındaki harmonik analizleri hep 2kHz’ e kadar yapılmaktaydı. Fakat 2018 yılından sonra ilgili standardın güncellenmesi nedeniyle literatüre “supraharmonik” kavramı girmiş ve harmonik analizlerinin 2kHz’ in ötesine genişletilmesi ihtiyacı doğmuştur.

Supraharmonikler 2kHz ile 150kHz arasında görülen, gerilim ve akım sinyallerindeki yüksek frekanslı dalga formu bozuklukları olarak tanımlanmaktadır. Termal stres, izolasyon hataları, gürültü, ekipmanlarda hızlı yıpranma, diğer elektrikli ekipmanlara gürültü yayılımı, RCD’lerin sebepsiz yere açma vermesi, haberleşme hataları ve PLC sinyallerinin sönümlenmesi/sapması gibi oldukça kötü sorunlara sebep olmaktadır.

Özellikle aktif kontrollü frekans konvertörleri(AFE), PV invertörler, elektrikli araç şarj istasyonları gibi örnek verilebilecek olan gerilim kaynaklı konvertörlerde IGBT tabanlı doğrultma ve invertör devrelerinin kullanılması, harmonik analizinin 2kHz üzerinde de yapılmasını ve supraharmoniklerin incelenmesini bir ihtiyaç değil zorunluluk haline getirmiştir. Yapılan birçok araştırma ve saha çalışması supraharmonik etkilerin araştırılmasını ve önlem alınmasının gerekliliğini ortaya koymuştur.

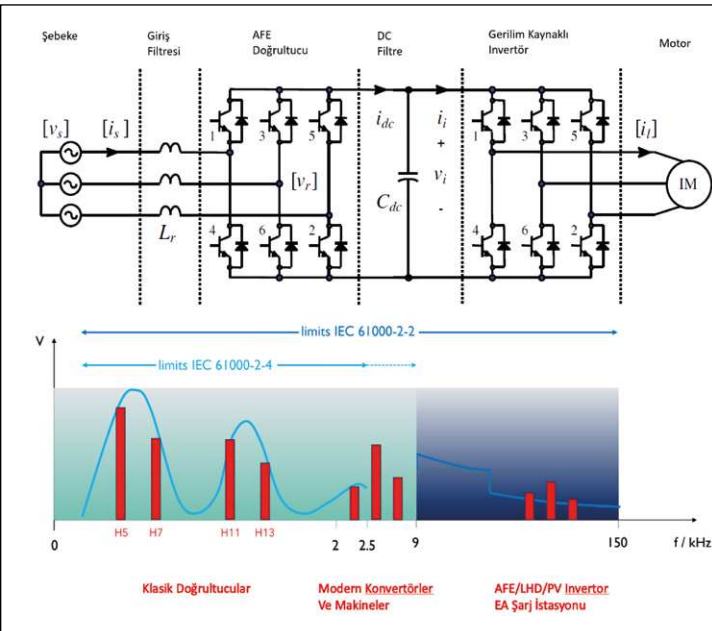
Supraharmonik kaynaklara örnek olarak aşağıdaki

(*) Uluslararası Katılımlı Yangın Sempozyumu 2024 bildiriler kitabında yayınlanmıştır.

elektriksel ekipmanlar sıralanabilir:

- Aktif Doğrultucular ve SMPS'ler
- Elektrikli Araç Şarj İstasyonları (10 – 80kHz)
- AFE/LHD Sürücüler (4 – 20kHz)
- LED Sürücüler (20 – 200kHz)
- Aktif Harmonik Filtreler (8 – 20kHz)
- Inverter Tabanlı Alternatif Enerji Sistemleri(IBR)
- Solar Sistemler (16 – 22kHz)
- Rüzgar Türbinleri (2,5 – 10kHz)
- Enerji Depolama Sistemleri
- UPS Sistemleri (15 – 25kHz)

Şekil – 1'de örnek olarak gerilim kaynaklı bir invertör(AFE) ve ilgili standartlara göre yaydıkları bozukluk frekans aralıkları gösterilmiştir.



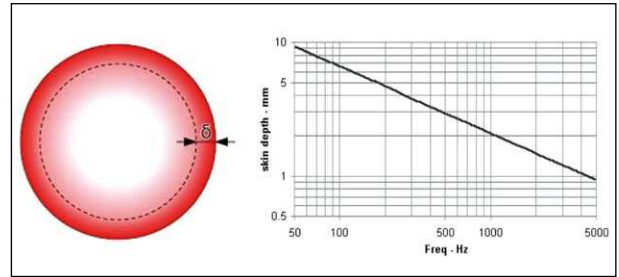
Şekil 1. AFE ve frekans bozukluk limit aralıkları

1.1. Supraharmoniklerin Elektrik Tesislerine Etkileri ve Ortak Mod Akım/Gerilimi

Supraharmonikler, transformatörler de dahil olmak üzere bütün elektriksel ekipmanlar üzerinde yaşanmayı hızlandırabilen ve erken arızaya yol açabilen çeşitli stres faktörlerine neden olur. Birincil mekanizmalardan biri, transformatör ve ekipman yalıtımı üzerindeki dielektrik stresin artmasıdır. Yüksek frekanslı bileşenler ark oluşumuna neden olabilir ve kısmi deşarjların gelişmesine yol açabilir. Belirli koşullar altında, dielektrik alan gücü yalıtımın bozulma gücünü aşarak lokalize deşarjlara yol açar.

Kısmi deşarjlar supraharmonik bileşenler tarafından oluşturulabilir ve şiddetlendirilebilir.

Ayrıca, supraharmonik akımlar nedeniyle artan ısınma hem “yüzey” (Bkz. Şekil 2) hem de “yakınlık etkisi” ne yol açarak transformatör sargıları içinde ve elektriksel ekipmanlar dolayında lokalize sıcak noktalar olarak ortaya çıkabilir. Bu sıcak noktalar yalıtımı bozarak erken arızaya daha fazla katkıda bulunabilir. Bilindiği gibi bir iletkenin direnci iletkenin kesiti ile ters orantılı, boyu ve öz iletkenlik katsayısı ile doğru orantılıdır. Bu durumda frekansın yükselmesi yüzey derinliğini ve dolayısıyla kesit alanını azaltacak ve iletken direncini yükseltecektir. Bu durum sonucunda da iletken ısısı yükselecek ve izolasyon hatalarına daha elverişli bir hale gelecektir.

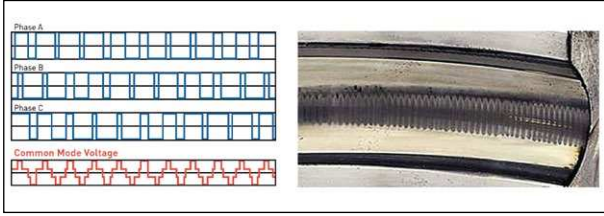


Şekil 2. Yüzey Etkisi, Yüzey Derinliği ve Frekans Arasındaki İlişki

Supraharmoniklerin transformatörler üzerindeki bir başka etkisi ise aşırı çözünmüş gazları oluşturmalarıdır. Supraharmonik belirtilerin varlığı, transformatör yalıtım sıvısı içinde aşırı çözünmüş gazların oluşmasına yol açabilir. Söz konusu başlıca gazlar hidrojen, metan, etilen ve asetildir. Bu gazlar tipik olarak transformatör içindeki termal ve elektriksel arızalar nedeniyle üretilir. Supraharmonikler, termal stresi artırarak ve yağ içindeki elektrik deşarjlarını teşvik ederek bu koşulları daha da kötüleştirir, yağ ve yalıtım malzemelerinin bozulmasını hızlandırır.

Bunun dışında özellikle invertörlerin yüksek dv/dt oranı ile anahtarlama yaparak sanal sinüs sinyali üretmeleri ortak mod akımı/gerilimi(CMC/CMV) olarak isimlendirilen bir bozukluğun varlığına neden olur. Darbe genişlik modülasyonu(PWM) tekniği kullanılarak sanal sinüs sinyalinin invertör yardımıyla oluşturulması nedeniyle, sanal sinüs sinyalinin ortalama değeri hiçbir zaman sıfır olamamaktadır. Bu da sistemin nötr noktası ile toprak arasındaki potansiyelin sürekli olarak yer değiştirmesine ve toprak hattında istenmeyen yüksek frekanslı akımların dolaşmasına neden olmaktadır. Bu durum sonucunda da özellikle artık akım koruma cihazlarının(RCD) sebpsiz

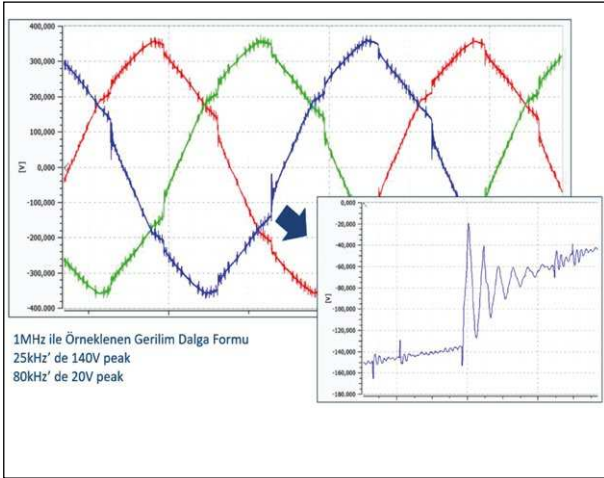
yere açma vermesine ve elektrik devresinin enerjisinin olmaması gereken bir zamanda kesilmesine neden olabilir. Bunun dışında elektrik motorlarında rulman arızalarına da neden olmaktadır.(Bkz. Şekil – 3) (3) (4)



Şekil 3. Ortak Mod Gerilimi ve Ortak Mod Gerilimi Nedeniyle Rulman Yatağındaki Aşınmalar

Daha da vahim olan durum ise ortak mod akım ve gerilimleri tüm elektrik tesislerinin yanı sıra özellikle petrol, kimya, kağıt vb. gibi yanıcı ürünlerin bulunduğu kritik tesislerde ise yangınlara sebep olabilmektedir. Özellikle deniz-üstü petrol kuyularında ve ada modu çalışan tesislerde bu konu oldukça önem arz etmektedir. (4)

Frekans konvertörü ile motor arasındaki kablo mesafesinin artması yüksek frekanslı diferansiyel ve ortak mod gerilimini yükseltmektedir. Bununla ilgili olarak bir örnek Şekil – 4’ de gösterilmiştir.



Şekil 4. Frekans Konvertörü – Motor Arasındaki Uzun Kablo Dolayısıyla Oluşan Yüksek Frekanslı Girişimler

Ortak mod akım ve gerilimlerinin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için özellikle tesis kurulum aşamasında elektriksel ekipmanların kurulum kılavuzları dikkate alınmalıdır. Unutulmamalıdır ki ortak mod akım ve gerilimleri tamamen ortadan kaldırılamazlar fakat alınacak uygun tedbirler ile etkileri oldukça minimize edilebilir.

2. ÖRNEK VAKALAR

2.1. Çatı Tipi GES Örneği

Makalenin giriş kısmında da belirtildiği gibi fotovoltaik (PV) invertörler, DC – AC dönüşüm yapabilmek ve sinüs sinyali oluşturabilmek adına IGBT yarı-iletken malzemeleri ve yüksek frekanslı bir anahtarlama sinyali kullanırlar. Bu anahtarlama sinyali genel itibarı ile üreticisine göre 16 – 22kHz arasında değişkenlik göstermektedir. Bu taşıyıcı anahtarlama frekansındaki akım ile birlikte sistem empedansının etkileşime girmesi nedeniyle yüksek frekans bantlarında gerilimler yani supraharmolik gerilimler oluşur.

TS EN 50160 (5) standardı kapsamında bir çatı tipi GES tesisinde güç kalitesi analizi yapıldığında ortaya çıkan manzara aşağıda Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilmiş ve açıklanmıştır.

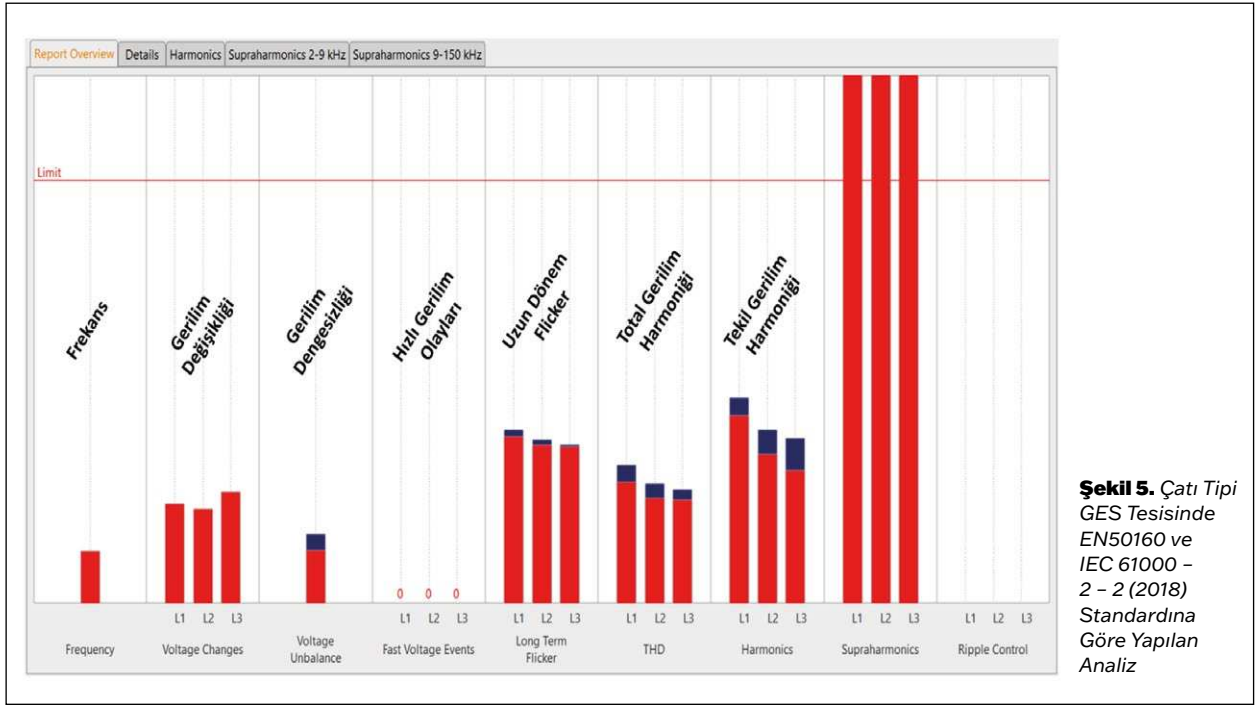
TS EN 50160 standardında yapılan harmonik limit değeri sınırlandırması sadece 25. Harmoniğe kadar yani 50Hz sistemler için 1250Hz’ e kadar verilmiştir. Fakat IEC 61000 – 2 – 2 standardı 2018 güncellemesi ile 150kHz’ e kadar frekans bantlarındaki bozulmalara limit değerler tanımlamıştır.

IEC 61000 – 2 – 2 standardının 2018 güncellemesi ile birlikte 2 – 150kHz arasındaki frekansların limit değerleri Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1. IEC 61000 – 2 – 2 (2018)’e Göre 2 – 150kHz Arasındaki Frekansların Limit Değerleri

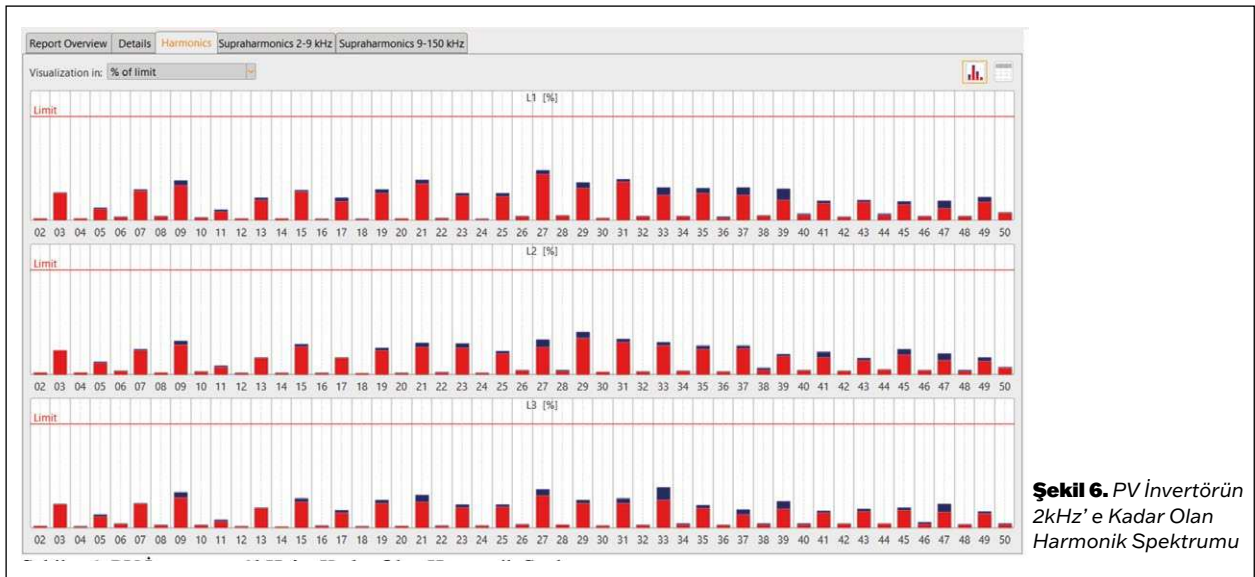
Frekans[kHz]	Limit[%]	Frekans[kHz]	Limit[%]	Frekans[kHz]	Limit[%]	Frekans[kHz]	Limit[%]/dB[uV]
2,1	1,40	4,1	1,13	6,1	0,85	8,1	0,70
2,3	1,40	4,3	1,09	6,3	0,83	8,3	0,69
2,5	1,40	4,5	1,05	6,5	0,82	8,5	0,68
2,7	1,40	4,7	1,02	6,7	0,80	8,7	0,67
2,9	1,40	4,9	1,00	6,9	0,79	8,9	0,66
3,1	1,37	5,1	0,97	7,1	0,77	9 - 30	129 - 122 dB[uV]
3,3	1,31	5,3	0,94	7,3	0,75	30 - 50	122 - 119 dB[uV]
3,5	1,26	5,5	0,92	7,5	0,74	50 - 150	113 - 89 dB[uV]
3,7	1,21	5,7	0,89	7,7	0,72		
3,9	1,16	5,9	0,87	7,9	0,71		

Yaşanan olayda, PV invertörlerin sürekli olarak arızaya düştüğü, yapılan incelemelerde herhangi bir donanımsal soruna rastlanmadığı ve harmonikler açısından da bir sorun tespit edilemediği fakat bir süre sonra invertörlerin ve GES dağıtım panosunun yandığı ilgili kişiler tarafından belirtilmiştir. Çatı tipi GES tesisinde yapılan güç kalitesi analizindeki aşağıda detaylandırılmıştır.



Şekil – 5’te yatay olarak çizilmiş olan kırmızı çizgi her bir parametre için kendi içinde ölçekli olmakla birlikte o parametreye ait limit değeri temsil etmektedir. Görülebileceği üzere EN50160 standardı kapsamında olan bütün başlıklar kendilerine ait limit değerlerin altında ölçülmüştür. Sadece “supraharmonik” başlığı altındaki yüksek frekanslı bileşenler limit değerin üzerine çıkmaktadır.

Şekil 6’da görüldüğü gibi TS EN 50160 standardı kapsamında yapılan harmonik analizinde 2kHz’ e kadar olan kısım için herhangi bir limit değeri aşımı söz konusu olmamıştır. Yatay kırmızı çizgi her bir tekil gerilim harmoniği için kendi sınır değerini ifade etmektedir. Fakat supraharmonik frekans bandına bakıldığında limit aşımının ne derece yüksek olabileceği net bir şekilde görülmektedir.





Şekil 7’de görüldüğü üzere PV invertörlerin taşıyıcı anahtarlar frekansı sebebiyle oluşan akımının sistem empedansı ile arasındaki ilişki neticesinde 22kHz mertebesinde yaklaşık olarak 35V civarında bir gerilim oluşmuştur. 22kHz’deki 35V’luk gerilim yaklaşık olarak 150,88dB[uV] seviyesine denk gelmektedir. Tablo – 1’den görüleceği üzere 22kHz aralığı için limit değer maksimum 129dB[uV]’tur. Buradan da limit değerinin oldukça yüksek bir şekilde aşıldığı ve standartlar dışına çıktığı net bir şekilde tespit edilmiştir. Bu limit aşımı kontrol altına alınmaz ve 22kHz bandındaki 35V’luk gerilim filtrelenmez ise ortaya çıkacak olan tablo Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Supraharmoniklerin Filtrelenmediği Durumda GES İnvertörleri ve GES Panosu Son Durumu

2.2 Atık Su Arıtma Tesisi Örneği

Atık su arıtma tesisinde yaşanan bazı sorular aşağıda sıralanmıştır.

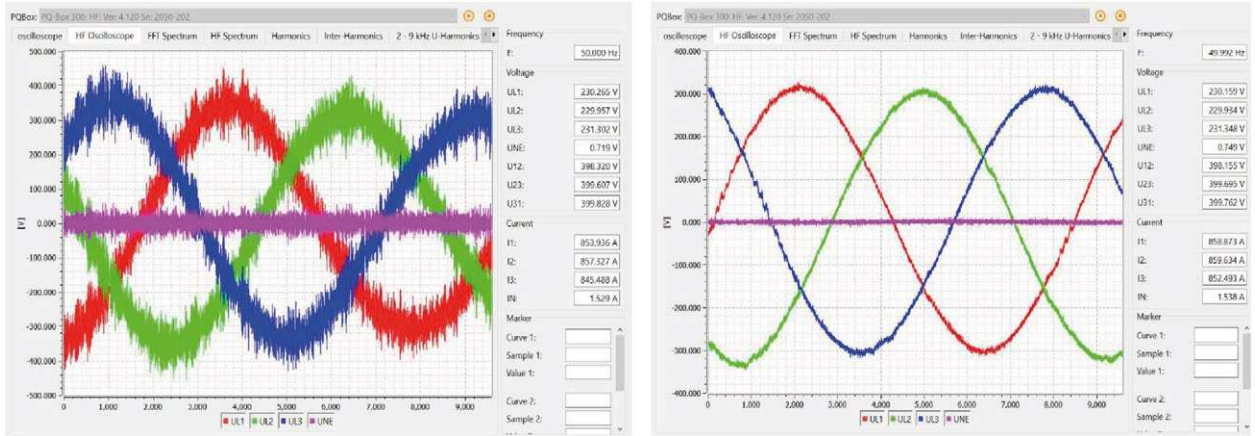
- Transformatörler vızıldıyor
- Generatörler stabil çalışmıyor
- Flicker
- Haberleşme hataları
- Yangın alarm sistemlerinin rastgele çalışması
- Ekipman arızaları

Tesiste yapılan güç kalitesi analizinde supraharmonikler sebebiyle gerilim dalga formunun oldukça bozuk olduğu ve yaklaşık 40kHz mertebesinde 16V’luk bir gerilimin olduğu tespit edilmiştir. Tesisin yapısı, çalışma rejimi ve sistem empedansının bütün halde incelenmesi sonrası tasarlanan filtrenin devreye alınmasıyla supraharmonikler filtrelenmiş ve tesiste yaşanan sorunlar ortadan kaldırılmıştır. Yapılan çalışmaya ait öncesi-sonrası görselleri Şekil – 9’da gösterilmektedir.

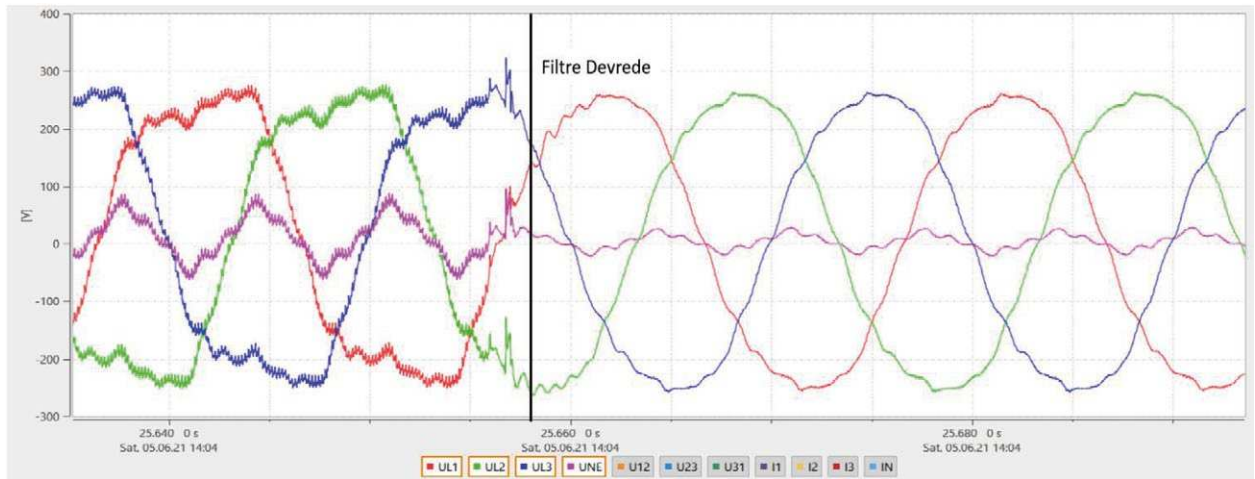
Şekil 9’da sol kısımda filtrenin devre dışı olduğu durum, sağ kısımda ise filtrenin devrede olduğu durum gösterilmektedir. Filtreleme sonrasında 40kHz’deki 16V’luk gerilim yaklaşık olarak 0.2V seviyesine düşürülmüştür.

2.3 Yeni Nesil UPS Giriş Kartı Yanma Örneği

IGBT yarı-iletken malzemelerden oluşan bir doğrultma devresine sahip UPS’de yaşanan kart yanması ve kapasitör arızası sonucu güç kalitesi analizi yapılmış ve 2kHz’e kadar herhangi bir harmonik bileşene rastlanmamıştır. 2kHz üzerindeki supraharmonikler incelendiğinde ise 20kHz ve katlarında yüksek frekans bozulmaları tespit edilmiştir.



Şekil 9. 40kHz'de 16V' luk Supraharmonik Bileşenlerin Filtrenmesi



Şekil 10. 20kHz ve Katlarındaki Supraharmoniklerin Filtrenmesi

Tesinin yapısı, çalışma rejimi ve sistem empedansının bütün halde incelenmesi sonrası tasarlanan filtrenin devreye alınmasıyla supraharmonikler filtrenilmiş ve tesiste yaşanan sorunlar ortadan kaldırılmıştır. Çalışmasının sonucu Şekil 10'da gösterilmiştir.

Şekil 10'da görüleceği üzere filtrenin devreye alınmasıyla birlikte faz gerilimleri üzerindeki yüksek frekanslı bileşenler ortadan kaldırılmış bunun birlikte toprak hatında dolaşan yüksek frekanslı ortak mod gerilimi de düşürülmüştür.

3. SONUÇ

Fotovoltaik sistemler, enerji depolama sistemleri, elektrikli araç şarj istasyonları ve AFE sürücülerinin elektrik şebekesine entegrasyonu, özellikle supraharmonik olgu-

suyla ilgili benzersiz zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu yüksek frekanslı bozulmalar, dağıtım transformatörleri üzerinde önemli strese neden olarak zamansız arızalara, aşırı çözülmüş gaz oluşumuna ve eğer önlem alınmazsa yangınlara yol açabilir.

Ortak mod gürültüsü nedeniyle supraharmoniklerin kablolama, şalt, otomasyon sistemleri, aşırı yük koruması ve hatta veri toplama üzerinde zararlı ve bazı durumlarda yangınlara sebep olabileceğini kabul etmek önemlidir.

Supraharmoniklerin tespiti için IEC 61000 – 4 – 30 Ed.3 standardında belirtilen Class A sınıflandırma şartlarını sağlamış ve 170kHz' e kadar ölçüm yapabilen, yüksek örneklemme frekansına sahip güç kalitesi analizörlerinin kullanılması ve periyodik olarak izlenmesi gerekmektedir.

Geleneksel harmonik sorunlarına yönelik çözümler

arasında pasif ve aktif filtrelemenin yanı sıra diyot doğrultucuların yerine PWM doğrultucuların kullanılması gibi doğrusal olmayan kaynaklardan harmonik oluşumunun ortadan kaldırılması da yer almaktadır. Bu çözümler rezonans tarafından oluşturulan harmonikler için işe yaramaya-

caktır. Bunun yerine, empedans temel neden olduğundan, bu yeni tip harmonik sorunlara yönelik çözümlerin geliştirilmesi, tüm rezonansların uygun şekilde sönümlenmesini sağlayacak şekilde sistem empedansının değiştirilmesine odaklanmalıdır. (6) ■

KAYNAKLAR

1. BÜYÜK, Serdar ve ÖZDEMİR, Engin. Supraharmoniklerin nedenleri, etkileri ve analizi. 2024.
2. TS EN 61000-2-2. Elektromanyetik uyumluluk (EMU) - Bölüm 2-2: Çevre - Kamuya ait düşük gerilimli güç kaynağı sistemlerinde düşük frekanslı iletilen bozulmalar ve işaretleşme için uyumluluk seviyeleri. 2018.
3. Evans, Ian C. Using Active Front-End Drives - Substance or Spin? 2008.
4. Evans, Ian C. The Price of Poor Power Quality. Houston, Texas : American Association of Drilling Engineers, 2011.
5. TS EN 50160. Genel elektrik şebekeleri tarafından sağlanan elektriğin gerilim karakteristikleri. 2023.
6. Sun, Jian. A Theory for Harmonics Created by Resonance in Converter-Grid Systems. 2018. s. 4-5.
7. Mitchell, John. Measuring Between The Gaps Of Harmonics and Emc To Keep Your Systems Running As They Should. Telford, İngiltere, 2023.
8. Morán, Luis. Practical problems associated with the operation of ASDs based on active front end converters in power distribution systems. 2004. s. 5.

YANGIN GÜVENLİK VE KORUMA SİSTEMLERİ DERGİSİ



GÜNCEL İÇERİĞİ VE ETKİ GÜCÜYLE ALANINDA LİDER DERGİMİZDE YER ALARAK MESAJLARINIZI HEDEF KİTLENİZE ULAŞTIRABİLİR, MARKA DEĞERİNİZİ ZİRVEYE TAŞIYABİLİRSİNİZ.

www.yanginguvenlik.com.tr