

Supraharmoniklerin nedenleri, etkileri ve analizi Causes, effects and analysis of Supraharmonics

Serdar BÜYÜK^{1*} , Engin ÖZDEMİR² 

¹Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Ulusal Metroloji Enstitüsü, Elektromanyetik Laboratuvarı, Kocaeli, Türkiye.

serdarbuyuk@gmail.com

²Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.

eozydemir@hotmail.com

Geliş Tarihi/Received: 31.10.2022

Düzeltilme Tarihi/Revision: 10.04.2023

doi: 10.5505/pajes.2023.31704

Kabul Tarihi/Accepted: 22.05.2023

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Güç sistemlerinde, 2 kHz ile 150 kHz aralığındaki bozulmalar "Supraharmonikler" (SH) olarak adlandırılmaktadır. Supraharmonikler yeni bir kavram olmamakla birlikte; araştırmacılar, mühendisler ve son kullanıcıya yönelik cihaz üreticilerinin dikkatini ancak son yıllarda çekmektedir. Elektrikli/elektronik cihazların piyasaya arz edilebilmesi için gerekli olan elektromanyetik uyumluluk (EMC) testleri, harmonik akımların ölçülmesini (50 Hz-2000 Hz) ve iletimle yayınının değerlerinin ölçülmesini zorunlu kılmaktadır. Ancak supraharmonik aralığındaki çalışmalar ve araştırmalar oldukça sınırlıdır. Fotovoltaik enerji sistemleri, elektrikli araç hızlı şarj istasyonları, yüksek hızlı dijital haberleşme sistemleri gibi yüksek güçlü ve kHz mertebelerinde anahtarlama yapan yarı-iletken teknolojilerini kullanan sistemler yaygınlaştıkça, supraharmonikler de güç dağıtım sistemlerinde etkin olmaya ve sorunlara yol açmaya başlamışlardır. Elektrikli ve elektronik cihazlar, anahtarlama güç elektroniği cihazları ve güç hattından haberleşebilen (PLC) cihazların daha fazla kullanımı nedeniyle oluşan yüksek frekanslı bozucu etkilerle mücadele günümüzde daha da öne çıkmaktadır. Son yıllarda yapılan araştırmalarda; 2 kHz ile 150 kHz arasında ortaya çıkan bozucu etkilerin akıllı sayaçlarda ölçüm hatalarına, elektrikle çalışan cihazlarda ise duyulabilen gürültüye, arızalara ve performans azalmalarına yol açtığı ortaya konmuştur. Bu çalışmada, supraharmoniklerin kaynaklarına, cihazlarda ve şebekelerde yol açtığı sorunlara, supraharmoniklerin ölçüm yöntemleri ve ilgili standartlara, seçilen cihazların supraharmonik benzetimine ve ölçüm yoluyla analizlerine yer verilmektedir. Ölçümler ve benzetim sonuçları göstermektedir ki, cihaz tasarımlarında yalnızca EMC gereksinimlerine odaklanmak, supraharmonik bileşenlerinin ihmal edilmesine, dolayısıyla şebekede ve diğer cihazlarda olumsuz etkilenmelere neden olabilmektedir.

Anahtar kelimeler: Supraharmonikler, Güç kalitesi, Elektromanyetik girişim.

Abstract

In power systems, disturbances between 2 kHz and 150 kHz are called "Supraharmonics" (SH). Although supraharmonics are not a new concept; It has only attracted the attention of researchers, engineers and manufacturers of end-user devices in recent years. Electromagnetic compatibility (EMC) tests, which are required for placing electrical/electronic devices on the market, require the measurement of harmonic currents (50 Hz-2000 Hz) and the measurement of conducted emission values. However, studies and research in the supraharmonic range are quite limited. As systems using semi-conductor technologies with high power and switching in the kHz range such as photovoltaic energy systems, electric vehicle fast charging stations, high speed digital communication systems become widespread, supraharmonics have also begun to be effective in power distribution systems and cause problems. Today, the struggle against high-frequency disturbances caused by the increased use of electrical and electronic devices, switched power electronic devices and power line communication (PLC) devices is even more prominent. Research conducted in recent years have revealed that disturbances between 2 kHz and 150 kHz cause measurement errors in smart meters, audible noise, malfunctions and performance reductions in electrical devices. In this study, sources of supraharmonics, the problems they cause in devices and networks, measurement methods of supraharmonics and related standards, supraharmonic simulation of sample devices and analysis by measurement are given. Measurements and simulation results show that focusing only on EMC requirements in device designs can cause supraharmonics to be neglected, thus negatively affecting the network and other devices.

Keywords: Supraharmonics, Power quality, Electromagnetic interference.

1 Giriş

Dünyada enerji temini gereksinimi giderek artarken, enerji üretim yöntemleri de giderek çeşitlenmekte ve yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik hayatın içinde daha çok yer almaktadır. Daha fazla yenilenebilir enerji kaynağının kullanımı ile geleneksel merkezi elektrik üretim yönteminden dağıtık elektrik üretimine doğru bir yöneliş yaşanmaktadır. Bu nedenle, yüksek güçlü uygulamalarda artık güç elektroniği dönüştürücüleri, doğru gerilimden alternatif gerilime dönüşümün yanında alternatif gerilimden doğru gerilime dönüşüm için de sıklıkla kullanılmaktadır. Elektrik güç sistemleri de bu gelişmelere bağlı olarak, geleneksel şebeke

yapısından daha karmaşık bir yapıya dönüşüm halindedir. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmeleri takip eden anahtarlama temelli güç elektroniği devrelerindeki gelişmelerle birlikte, güç devrelerindeki anahtarlama frekanslarının ve verimin birlikte artması bu dönüşümün en önemli itici gücü olarak görülmektedir. Güç, gerilim ve akımın daha kontrol edilebilir hale gelmesi, güç sistemlerinde yeni bir çağın başlangıcı olarak görülmektedir. Bu değişimle birlikte, elektrikli cihazların işlevlerinin bozulan gerilim/akım dalga şekliyle etkilenmesi gibi yeni zorluklar ortaya çıkmaktadır. Tristör, triyak vb. doğrusal olmayan kontrol sistemi bileşenleri iletim ve kesime giderken di/dt ve dV/dt oranları ne kadar yüksekse, yani ne kadar hızlı iletim ve kesim yaparlarsa sinüzoidal dalga

*Yazışılan yazar/Corresponding author

formunu o kadar fazla bozar ve geniş frekans spektrumlu harmonikler üretirler [1].

Geçmişte harmoniklerle ilgili geniş tecrübeler elde edilmiş olmasına rağmen görece daha yeni bir kavram olan ve büyük ölçüde güç elektroniği dönüştürücülerinden kaynaklanan, "Supraharmonik" (SH) olarak adlandırılan girişimler üzerinde tecrübenin daha az olduğu söylenebilir. SHler şebekelerde 2 kHz ile 150 kHz frekans aralığında görülen, gerilimin ve/veya akımın dalga şekli bozulmalarıdır. İletim hattının çeşitli kademelerinde görülebilen ve iletim yoluyla yayılan girişimlerdir [2]. Tablo 1'de iletim hatlarında görülen girişimin frekans tabanındaki sınıflandırılmaları ve ilgili frekans aralıkları verilmiştir.

Tablo 1. İletim yoluyla girişimin frekans aralıkları.

Table 1. Frequency ranges of conducted interference.

Subharmonik	Harmonik	Supraharmonik	Elektromanyetik Girişim (İletim yoluyla)
<50 Hz	50 Hz-2 kHz	2 kHz-150 kHz	150 kHz-30 MHz

Bu girişimler, diğer cihazlar ile etkileşimler sonucu bozulmalara, aşırı ısınmalar sonucu devrelerin yaşlanmasına veya bazen de cihaz arızalarına neden olmaktadır. Kendiliğinden kesime giremeyen tristörlerden sonra, metal oksit yarı iletken alan etkili transistör (MOSFET) ve izole kapılı bipolar transistör (IGBT) gibi daha kolay kontrol edilebilir ve oldukça hızlı anahtarlama elemanlarının gelişmesi ve anahtarlama frekanslarının giderek yükselmesi ile birlikte SHlerin daha çok soruna yol açması beklenmektedir [3].

SH bozulmalar geçmişte çok ilgi çekmemiştir. Fakat hem miktar hem de güç olarak elektrikli araç şarj sistemlerinin ve hızlı şarj cihazlarının kullanımının tüm dünyada artması, elektrik motorlarının sürücülerle kullanımının yaygınlaşması, fotovoltaik sistemlerden elektrik üretiminin yaygınlaşması ve kaydedilen daha birçok teknoloji gelişimiyle, SHlerin ve bunlara bağlı olumsuz etkilerin artacağı öngörülmektedir.

Bunun yanında, güç faktörü düzeltme (PFC) devrelerinin harmonik akımları bastırırken bir yandan da SH girişimlere neden olduğu da bilinmektedir [4]-[6].

Fotovoltaik güneş enerjisi sistemlerinin eviricilerinin de anahtarlama frekansları genelde SH aralığındadır. Literatürde fotovoltaik güneş enerjisi sistemlerinin şebekede SH girişimlere neden olduğu birçok çalışmada ifade edilmiştir [3],[7]-[10]. Bu çalışmaların ayrıntıları bu çalışmanın ikinci bölümünde verilmektedir.

Elektromanyetik uyumluluk (EMC) standartları gereğince cihazların harmonik akımlar ve iletimle yayınım testlerinde başarılı olması zorunludur [11]. Cihazların şebekede neden olduğu harmonik akımların sınırlandırılması için güç faktörü düzeltme devreleri ve iletimle yayınım testlerinde başarılı olması için ise elektromanyetik girişim (EMI) filtreleri cihazlara yerleştirilmektedir. Yapılan çalışmalarda, iletimle yayınım testlerinden başarıyla geçen ve piyasaya sürülen cihazların SH girişimlere neden olduğu ve bu girişimlerin problemlere yol açtığı bildirilmektedir. Literatürde bildirilen sorunların geniş kapsamlı bir raporu Uluslararası Elektroteknik Komitesi (IEC) tarafından IEC TR 50627 teknik raporunda verilmektedir [12].

Bu çalışmada SH ile ilgili etkilerin karakteristik özellikleri, bu etkilerin değerlendirilmesi için tavsiye edilen pratikler açıklanmaktadır. Ayrıca, SH girişimlere dikkat çekmek ve henüz bilginiz kapsamında Türkçe literatürde bir yayın

bulunmaması nedeniyle Türkçe literatüre katkı sağlamak amacıyla, SH girişimlerin nedenleri ve etkileri irdelenmiştir. 2. bölümde SHlerin nedenleri ve etkileri üzerinde daha önce yapılan çalışmalar ile SHlerin ölçüm yöntemleri ve ilgili standartlar hakkında bilgi verilmiştir. 3. ve 4. bölümlerde ise, benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen veriler sunulmuştur. SHlerin tespit edilmesi, değerlendirilmesi ve meydana getirdikleri olayların analiz edilebilmesi için tekrarlanabilir ölçüm metodlarına ihtiyaç vardır.

Literatürde EMI filtrelerin SHler üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışma bulunmakla birlikte, söz konusu çalışmada şebekeye bağlı birden çok cihazın EMI filtrelerinin şebekedeki SH ilerleyişini nasıl etkilediği incelenmiştir [13]. Bu çalışmada ise cihazların EMC testlerinden geçmesi için cihazlara yerleştirilen EMI filtrelerin cihazdan yayılan SH girişimleri engelleyip engellemediği sorgulanmaktadır. Bu amaçla, günümüzde birçok uygulamada kullanılan anahtarlama (AGK) güç kaynaklarının girişinde kullanılan EMI filtrelerinin cihazdan yayılan SHlere etkisi benzetim ve deneysel çalışma ile irdelenmiştir. Ayrıca, SH girişiminin sanayi ortamında da karşılaşılabileceğini göstermek amacıyla, sanayide sıklıkla kullanılan bir üç fazlı asenkron motorun sürücüsü de SH yayını için test edilmiştir.

Bundan başka, fotovoltaik güneş enerjisi sistemlerinin eviricilerinden kaynaklanabilecek SH girişimlere dikkat çekmek için evirici yapısına benzer bir yapıda olan bir güç kaynağının çıkışındaki SHler ölçülmüş ve şebeke güç kalitesi kriterlerine uygun olup olmadığı değerlendirilmiştir.

Literatürde, SHlere çeşitli yaklaşımlar, ölçüm yöntemleri ve SHlerin etkileri üzerinde özellikle son on yılda çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan elde edilen bilgiler 2. Bölüm'de verilmiştir.

2 Yöntem

2.1 Supraharmoniklerin nedenleri ve etkileri

Temel olarak tanımlanmış iki tip SH kaynak vardır: aktif veya pasif anahtarlama güç elektroniği dönüştürücüler ile güç hattı üzerinden haberleşen (PLC) cihazlar veya dönüştürücüler sayılabilir. Bazı SH kaynağı olan cihazlara örnekler aşağıda sıralanmaktadır.

- Endüstriyel güç dönüştürücüler (9 kHz-150 KHz),
- İletişim frekanslarındaki dalgalanmalar (10 kHz kadar),
- Sokak lambaları (20 kHz'e kadar),
- Elektrikli araç şarj cihazları (15 kHz-100 kHz),
- Fotovoltaik (PV) güneş enerjisi eviricileri (4-20 kHz),
- Elektrikli ev aletleri (2 kHz-150 kHz),
- Güç hattından haberleşen cihazlar (PLC, 9-95 kHz),
- Rüzgâr türbini güç elektroniği dönüştürücüler (10 kHz),
- Değişken hızlı motor sürücüler (15 kHz),
- Işık saçan diyot (LED) lambalar (25 kHz),
- Değişken hızlı klima ve iklimlendirme sistemleri (20 kHz),
- Bilgisayarların güç kaynakları (15 kHz).

SHlerin nedenlerine ve etkilerine ilişkin uluslararası literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Bir çalışmada elektrikli araç şarj sistemlerinin ve fotovoltaiik enerji sistemlerinin LED lambalar üzerindeki etkisi incelenmiş ve LED lambaların ömürlerinde azalma tespit edilmiştir. Ancak çalışmada uzun dönem ölçümlere ihtiyaç duyulduğu da ifade edilmektedir [8]. Alternatif gerilimin doğru gerilime dönüştürülmesi sırasında, örneğin elektrikli araç bataryasının şarjında çok sayıda farklı tipte devre şekli kullanılabilir. Elektrikli araç şarj cihazları ve fotovoltaiik enerji sistemlerinin eviricilerinde, devrenin giriş güç faktörünü 1'e yaklaştırmak ve güç faktörünü iyileştirmek üzere kullanılan aktif veya pasif güç katsayısı düzeltme devreleri ile birlikte köprü doğrultucular kullanılmaktadır. Yapılan başka bir çalışmada, dokuz farklı tipte elektrikli araç batarya şarj cihazı (2018 yılında Hollanda'nın araç batarya şarj cihazlarının %90'ını temsil edecek biçimde) SH girişimleri ölçülmüştür. Bu çalışmanın sonucunda, duyulabilen frekans bölgesinde (20 Hz ile 20 kHz arası) anahtarlamaya yapan birçok şarj cihazında kullanıcıları rahatsız eden ve stres oluşturan bir gürültü oluştuğu tespit edilmiştir. Örnek bir şarj cihazı akımı ölçümünde SH bozulma içeren şarj akımının 16 A olduğu ancak 10 kHz frekans bileşeninin genliğinin 1 A (temel bileşenin %5'i) olduğu fakat tepe değerinin 2 A'e kadar çıktığı ölçülmüştür. Bunun şebeke gerilimindeki etkisi ise 10 kHz frekansında ortalama 1 V olarak ölçülmüştür [4]. Bir diğer çalışmada ise, fotovoltaiik eviricilerden ve LED lambalardan yayılan girişimin 2 kHz-150 kHz arasında zaman bazında ölçümü IEC 61000-4-7'ye göre yapılmıştır. SH yayılımının en önemli belirleyicilerinin cihazlardaki anahtarlamaya frekansları olduğu bildirilmektedir. Ancak bunun yanında, cihaz empedansının, güç kaynağı empedansının ve cihaza bağlanan yüklerin empedanslarının da önemli etken oldukları görülmüştür. Ayrıca bağlı cihaz sayısının değişiminin de SH girişimde etkili olduğu belirtilmiştir [9]. Ayrıca şebekedeki SH girişimin etkileri, şebekeye bağlı diğer cihazlara bağlı olarak da değişmektedir. Çünkü çalışmalar göstermektedir ki, şebekeye bağlı cihazlar SH frekans aralığında, şebeke toplam empedansını 50 Hz-2 kHz frekans aralığına nazaran daha fazla etkilemektedir [14]. Bu da bir cihazın şebekede neden olduğu girişimin büyüklüğünü etkilemektedir. 2 kHz-150 kHz frekans aralığında bozucu etkiler oluşturan cihazların artan kullanımı nedeniyle, alçak gerilim ve orta gerilim düzeyindeki elektrik şebekesinde SHlerin etkileri de artmaktadır. Bu nedenle SHlerin görüldüğü alçak ve orta gerilim elektrik şebekelerinde, ışık kırışması, kondansatör ve kablo bağlantı uçlarının yaşlanması, duyulabilir gürültü ve elektrikli araçların şarjının aniden kesilmesi gibi son kullanıcı noktalarında problemler sıklıkla rapor edilmektedir [7]. SHler, fotovoltaiik enerji sistemlerinin ve rüzgâr enerjisi kaynaklarının yüksek frekans anahtarlamaya eviricileri gibi enerji üreticileri ile LED lambalar ve yüksek frekans balastlı flüoresan lambalar gibi yüklerden de kaynaklanmaktadır. Bu tür enerji üreticileri ile yükler, elektrik güç sistemlerinde güç hattından haberleşen sistemler ile girişimde bulunarak, sayaçların yanlış çalışması ve kontrol sistemlerinin hatalı karar vermesi gibi olumsuz sonuçlara neden olabilmekte, ayrıca hem seri hem de paralel rezonans meydana getirmekte ve elektronik cihazların ve güç sistem bileşenlerinin ömürlerinin kısalmasına da yol açmaktadır. Örneğin, alçak gerilim elektrik şebekesinde enerji ölçümü yapmak üzere akıllı sayaçlar Avrupa'da çok yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu tür cihazların iletişim güvenilirliği, şebeke empedansına bağlı olarak diğer cihazlardan kaynaklanan arka plan girişimlerinden de etkilenebilmektedir

[15]. Güç sistemleri de dolaylı olarak SHlerin üretilmesine ve yayımına neden olur. PLC sistemleri genellikle güç şebekelerinde veri iletimi amacıyla 9 kHz-148.5 kHz frekanslı işaret üretmek ve iletmek için kullanılır. 2 kHz-150 kHz aralığındaki frekans harmonikleri, havacılık ağları, yer altı kabloları ve binaların kablolanması yoluyla iletilebilir. Dağıtım şebekeleri güç iletiminde 50 Hz veya 60 Hz frekansında tasarlanmasına rağmen bu şebekelerin 2 kHz-150 kHz frekansındaki işaretleri iletme kapasitesi vardır. 100 kHz civarında, dağıtım şebekesi empedansı yüksektir; bu nedenle 2 kHz-150 kHz frekans aralığında yüksek harmonik yayım, gerilim ve akım dalgaları boyunca iletir. Bu nedenle, SHlerin tanısı akıllı şebekenin ekonomik sürdürülebilirliği için de değerlidir [16]. SHler ayrıca ev aletlerini, yarı iletken üretim cihazlarını, tıbbi ekipmanları, güvenlik sistemlerini ve hatta ulaşım kontrollerini bile etkilemektedir [17]. Bir elektrikli araç şarj sisteminde yayılan girişim, 5 kHz ile 50 kHz frekans aralığında ve 0.1 V ile 1.76 V gerilim düzeyinde kalmaktadır. SHlerin frekansı, yarı-iletken devre elemanlarındaki sınırlar nedeniyle dönüştürücülerin gücünün artmasıyla azalmaktadır. Ayrıca, 50 kHz üzerindeki frekanslar ise küçük güçlü uygulamalarda, LED sürücülerde ve evsel cihazlarda görülmektedir. PLC cihazlarında ilgili standartlara bağlı olarak 3 kHz ile 525 kHz frekans aralığında girişimler görülmektedir [18].

Ölçümler kadar benzetimler de, bir güç tesisindeki birkaç kHz frekansındaki bozulmanın, her bir cihazdan yayılan bozulmanın toplamından daha az olduğunu göstermektedir. SH yayılımı bundan dolayı büyük ölçüde birbirine bağlantılı cihazlar arasında daha etkilidir. Aynı tesiste birbirine bağlı farklı cihazlardan yayılan girişimi belirlemek üzere çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır [14]. Bu deneysel çalışmalarda, tesiste bütün olarak tesisi besleyen şebekeye yayılan bozunum ile tesisin içindeki her bir cihazı etkileyen bozunum arasındaki farklar açık olarak gözlenmiştir. SH frekans aralığındaki akımların meydana getirdiği girişim, şebeke empedansına bağlı olarak komşu cihazların empedansından da etkilenmektedir. SH frekanslarındaki empedansı etkileyen iki tip cihaz; tipik olarak enerji tasarruflu lambalardaki düzeltme kondansatörü bulunan diyotlu doğrultucular ile elektromanyetik girişim (EMI) filtresi bulunan tüm ekipmanlar olarak sayılabilir. Örneğin LED lambaların SH frekanslardaki empedansı, 50 Hz frekanslı bir sistemde gerilimin ilk 20 ms içinde tam bir periyot tamamlandığı sürede değişmektedir. Diyotlar iletimde olduğunda, çıkıştaki kondansatör empedansı düşürecek ve böylece temel frekanstaki işaretin sıfır geçiş noktası gerilimin tepe noktasındaki aynı empedansı göremeyecektir. Güç sistem frekansının bir periyodunda ölçülen empedansta böylece sürekli değişecektir.

Bir cihazda oluşan yayılım (örneğin cihaz ve şebeke arasındaki etkileşim sonucu oluşan akım) farklı şekillerde etkilenmektedir. Aşağıda özetlendiği biçimde bir cihazdan meydana gelen yayılımın etkileri de farklı olabilmektedir.

1. Anma gerilim altındaki bir cihaz (gerilimin genliği ve frekansı anma değerinde, sıfır bozulma ve şebeke empedansı da sıfır),
2. Gerilimin anma değerinde olmaması,
 - 2(a) Sinüzoidal dalga şeklinde fakat farklı genliklerdeki gerilim,
 - 2(b) Farklı frekans değeri (modern güç sistemlerinde frekanstaki değişim oldukça küçüktür),
3. Şebeke empedansının sıfır olmadığı durum,

4. Bozuk şebeke gerilimi (cihaz bağlanmadan önce de şebeke geriliminin bozuk olması),
 - 4(a) Cihaz empedansından geçen akım değişir,
 - 4(b) Cihaz uçlarındaki gerilimin bozuk olmasından dolayı dâhili yayılım değişiklik göstermektedir,
5. Şebekenin geri kalan bölümünün doğrusal olmadığı durum (cihazın bağlı olduğu şebeke civarında çok sayıda doğrusal olmayan başka cihazların bağlı olması),
 - 5(a) Uç gerilimdeki şebeke empedansı değişir,
 - 5(b) Uç gerilimindeki temel gerilim değişir [19].

SHler konusunda Almanya'daki Bingen Uygulamalı Bilimleri Üniversitesi'nde elektrikli araçların güç kalitesine etkileri ve SH girişimler konusunda yapılan uygulamalı bir araştırmada, 20 kHz üzerinde anahtarlama frekansı ile çalışan DA-DA kıyıcıların kullanıldığı bazı elektrikli araçların şarj sistemlerinde ölçümler alınmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, elektrikli araçlar şebekeye tek başına, diğer elektrikli araçlarla birlikte paralel olarak ve üniversitedeki fotovoltaiik sistem eviricileriyle birlikte bağlanmıştır. Farklı üreticilerin ürettiği, 8 kHz ile 50 kHz aralığında kıyıcı anahtarlama frekanslarındaki elektrikli araçlar kullanılmıştır. Farklı tipte elektrikli araçların paralel olarak şarj edildiği durumda, yaygın bir biçimde şarjın kesildiği rapor edilmiştir. Ayrıca, 10 kHz anahtarlama frekansı olan bir elektrikli aracın şarjı sırasında duyulabilen ıslık sesi şeklinde bir gürültü geldiği rapor edilmiştir [7].

Evirici tabanlı güç dönüşüm ve enerji depolama cihazlarının artması, aktif ön doğrultuculu veya aktif güç faktörü düzeltme teknikleri kullanan devrelerin sayısının ve bu devrelerin anahtarlama frekansının artması SHlerin daha fazla görülmesine neden olmaktadır. Ayrıca geleneksel hat komütasyonlu doğrultucuların yerini, son yıllarda modern kendinden komütasyonlu doğrultuculara bırakması nedeniyle daha önceleri 2 kHz ve altında görülen düşük frekanslı bozulmalar yerini 2 kHz ile 150 kHz arasındaki yüksek frekanslı bozulmalara bırakmaktadır. Böylece güç sistemlerinde görülen bozulma frekansları 2 kHz'in üzerine ötelendiği anlaşılmaktadır [5].

2 kHz ile 150 kHz frekans aralığındaki gerilim/akım bozulmaları ve sonucunda rapor edilen girişimler ve olumsuz etkiler, standart komitelerinin de dikkatini çekmektedir. Uluslararası Radyo Girişimi Özel Komitesi (CISPR) 6 No.lu Ortak çalışma Grubu'nu (JWG 6) bu frekans aralığındaki girişimi değerlendirmek üzere görevlendirmiştir [20]. Güç hattından haberleşen cihazlar, SH frekans aralığında bulunan frekanslardaki gerilimleri güç hattı üzerinde haberleşmek için kullanmaktadır. Bu tür girişimler ise isteyerek oluşturulan girişimler olarak adlandırılır. PLC cihazları IEC 50160 standardında belirlenen dar bant sinyal aralığındaki frekans sınırlarını kullanmaktadır ve SH frekans aralığındaki girişimlerden etkilenebilmektedirler. Bu nedenle, bazı standartlarda ve IEC teknik raporlarında, SH aralığının ölçülmesinin gerekli olduğu belirtilmiş ancak genel kabul görmüş bir yöntem üzerinde görüş birliğine varılamamıştır [21],[22].

Günümüzde birçok güç kalitesi ölçümü, 2 kHz ve altındaki düşük frekansta ölçüm yapan güç kalitesi ölçüm cihazlarıyla yapılmaktadır. Bu tip güç analizörleriyle 40. harmonik olan 2000 Hz'e kadar güç kalitesi ölçümleri ve harmonik analizleri yapılmaktadır. Ancak son yıllarda özellikle IGBT ve silikon karbit (SiC), galyum nitrat (GaN) gibi yüksek frekanslarda çalışan anahtarlama elemanlarının gelişmesiyle birlikte

toplam harmonik bozunum sınırı bu değer çok üstüne çıkmış ve daha tehlikeli hale gelmiştir. Gerçek bir ölçüm için 2 kHz ile 150 kHz arasındaki frekanslarda yer alan SHler farklı cihazlar ile ölçülerek analiz edilmelidir [23].

Son günlerde yapılan güç kalitesi analizi ve ölçümlerinde, güç sisteminde yaşanan sorunların veya arızaların nedeni olarak SHler öne çıkmaktadır. Ancak SH frekans aralığında ölçüm yapabilen güç kalitesi analizörleri veya ekipmanları ile bu bozulmaların ölçümü mümkün olabilmektedir. Bu frekans aralığında ölçüm yapabilmek, SH kaynaklı güç kalitesi analizi ve problemlerinin tespit edilebilmesi için oldukça önemlidir. Çok sayıda çalışmada, yüksek gerilim düzeyinde SH gerilimlerin artmasının, kablolardaki yalıtım arızalarına neden olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, çok sayıda güç sistem bileşeninin, aşırı ısınma ve yaşlanmanın hızlanmasına neden olan yüksek frekanslardaki bileşenler nedeniyle kayıplarının artmasına (deri etkisi ve ferit nüvelerde Eddy akımları sonucunda iletim kayıpları vb.) neden olacaktır. SHlerin harmoniklerden daha fazla yıkıcı etkilere sahip olduğu yönünde çalışmalar bulunmaktadır. Endüstriyel tesislerde son yıllarda, SH kaynaklı elektronik kart arızaları, kondansatör bozulmaları, haberleşme hataları ve aşırı yüklenmeler gibi problemler görülmektedir. Çözüm olarak SH girişim frekanslarının ölçümlerle tespit edilmesi ve bu frekanslarda çalışan ve SH filtrelerinin tasarlanarak elektrik güç sistemlerinde kullanılması önerilmektedir. Dünyanın birçok yerinde günün farklı saatlerinde SHler farklı seviyelerde alçak gerilim elektrik şebekesinde görülmektedir. Günlük değişim konum ve yukarıda açıklanan cihazların kullanımına bağlı olarak farklılık göstermektedir. SH gerilim bozulma miktarı bir dakikadan az olmak üzere temel gerilimin %12'si kadar ve ortalama değerleri % 0.09-0.56 düzeyinde gerçekleşmektedir. SHlerin bir güç kalitesi problemi olarak görülmesi oldukça yeni bir yaklaşımdır. Ayrıca, bu konudaki araştırma ve standardizasyon çalışmalarının az sayıda olması da SHlerin bir güç kalitesi problemi olarak nasıl değerlendirileceğinin bilinmemesine yol açmaktadır. Son yıllarda elektrik şebekelerinde bu tür cihazlardan yayılan SH girişimlerin modellenmesi ve şebekeye bağlı olan diğer cihazlardaki etkileri üzerine ilave araştırmaların yapılmasını gerektirmiştir. Geçmişteki araştırmalarda, elektrikli araç şarj cihazları için düşük frekanslı girişimleri (50 Hz-2 kHz) zaman tabanında inceleyen harmonik modeller geliştirilmiştir. Ancak, bu modellerin SH frekans aralığında uygun olup olmayacağı bilinmemektedir [24].

2.2 Supraharmonik ölçüm yöntemleri ve standartlar

Uluslararası standartlarda ve uygulamalarda, harmonik analizi ve denetlenmesi genelde şebeke frekansının 40. bileşenine kadar (50 Hz şebekeler için 2 kHz) yapılmaktadır. Standartlarda belirlenen sınır değerlerin üzerinde harmonik üreten cihazlar standardın koşullarını sağlamadığından, uygunluk belgesi alamaz ve dünyanın birçok ülkesinde ürünün satışına izin verilmez [11]. Uluslararası düzenlemelerde cihazlardan yayılan girişimler için standartlarla belirlenmiş sınırlar olsa da SH aralığına dair standardizasyon çalışmaları ancak son 10 yılda gelişmeye başlamıştır ve halen birçok tür elektrikli/elektronik cihazı kapsamamaktadır [40].

SH kavramı literatürde genel olarak iki şekilde ele alınmaktadır. İlki bir cihazın EMC uygunluğu bakımından SH değerlendirmesi, ikincisi ise şebekedeki akım dalga şeklinin SHlerinin incelenerek bir güç kalitesi ölçümünün yapılması şeklinde özetlenebilir. Elektrik şebekesinin güç kalitesinin

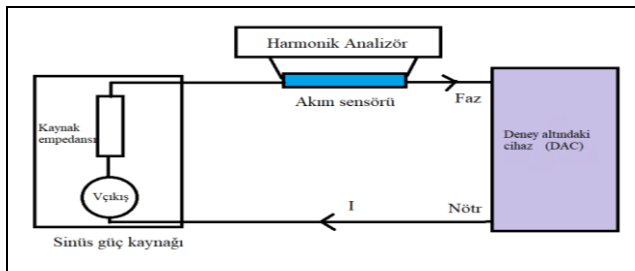
ölçümünde IEC 61000-4-30 standardının kullanımı oldukça yaygındır. Standardın C ekinde 2 kHz-150 kHz aralığı için ölçüm yöntemleri yalnızca tavsiye niteliğinde olup, yöntem olarak IEC 61000-4-7 ve CISPR 16 serisine atıf yapılmaktadır [23].

Bir şebekeye bağlı olarak çalışan elektrikli/elektronik cihazların münferit olarak şebekede neden olduğu SH girişimleri de ölçülebilir. Cihazların neden olduğu girişimin (EMI) ölçülmesi, ticari ürünlerin piyasaya arz edilebilmesi için gerekli olan uygunluk değerlendirmesi testlerinin (tip onay testi) bir parçasıdır [11]. Bir elektrikli/elektronik cihazın piyasaya sürülebilmesi için tip onay testlerinden geçmesi gerekmektedir. Tip onayı gereklerinden biri ise cihazın bulunduğu ortamda ve bağlı şebekede diğer elektrikli/elektronik cihazları etkilemeyecek ve diğer cihazlardan etkilenmeyecek şekilde çalışması kabiliyetidir. Bu kavram elektromanyetik uyumluluk olarak betimlenir ve bir cihazın elektromanyetik uyumluluğu testlerle belirlenir. Bu testlerden biri olan harmonik akımlarının ölçülmesi testi 50 Hz-2 kHz aralığında yapılmakta, yine önemli bir test olan iletimle yayılım testi ise genellikle 150 kHz (sınırlı tipte cihazlar için alt sınır 9 kHz-30 MHz arasında yapılmaktadır. 9 kHz-150 kHz aralığında ise sınırlı sayıda cihaz türünde (bazı aydınlatma cihazları, endüstriyel ürünler, indüksiyon ocakları gibi) girişimin ölçülmesi zorunludur, ancak 2 kHz-150 kHz arasında tüm cihaz türleri için tanımlanmış bir ölçüm zorunluluğu yoktur [25]-[27].

SHlerin ölçüm yöntemleri ve kestirilebilmesine yönelik literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. 2019 yılında yapılan bir çalışmada, darbe modülasyonu ile çalışan enerji dönüşüm cihazlarının 2 kHz - 150 kHz aralığındaki yayınımlarının kestirilebilmesi amacıyla bir model önerilmiştir [28]. 2022'de ise, AGKların şebekenin dalga şekline nasıl etki ettiğine dair bir çalışma yapılmıştır [29]. Larsson, 48 adet floresan lamba ile yaptığı deneysel çalışmada, cihaz sayısının SH akımların üzerindeki etkisini incelemiştir [30]. Espin, 2020 yılında yaptığı çalışmada literatürde bulunan ve SH akımların toplamı için önerilen yöntemlere yeni bir yaklaşım getirmiş, [28]'de önerilen kestirim modelini geliştirerek [30]'da verilen cihaz sayısından daha fazla cihaza uygulamış ve gerçek ölçüm sonuçlarıyla uyumlu bir model önermiştir. Mevcut durumda literatürde gerçek ölçümlerle en yakın sonuçları veren yöntemi geliştirmiştir [31].

2.2.1 IEC 61000-4-7

IEC 61000-4-7 temelde, elektrikli-elektronik cihazların çalışma frekansının (50/60 Hz) 40. harmoniğine kadar bileşenlerinin dağıtım sisteminde neden olduğu girişimin ölçülmesi için yöntem sunmaktadır. Şekil 1'de harmonik ölçümü için gerekli düzeneğin şeması verilmektedir [32].



Şekil 1. IEC 61000-4-7'ye göre harmonik ölçümü düzeneği.

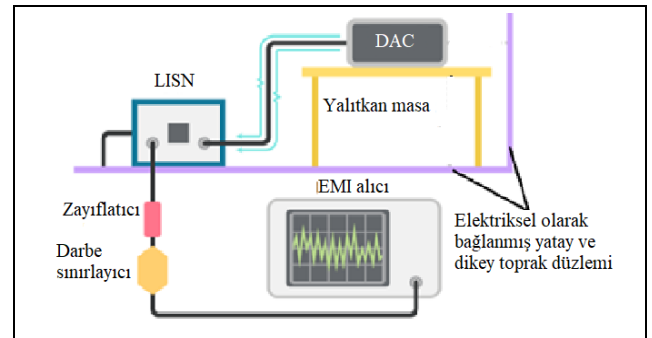
Figure 1. Harmonic measurement setup as per IEC 61000-4-7.

Bu yöntemde 10 dk. boyunca gerilim ve akım bilgisi kaydedilir, daha sonra zaman tabanında alınan veriler Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) yöntemi ile dağıtım sistemi frekansının (50/60 Hz) 40. harmoniğine kadar (50,100,150,...2000 Hz) değerlendirilir. Ancak standardın B ekinde 2 kHz-9 kHz frekans aralığı için de ölçüm yöntemi sunulmaktadır. B ekinde 2 kHz'e kadar öngörülen işleme ek olarak, veriler 200 Hz'lik bant genişliği ile toplanarak 10 periyotluk 200 ms'lik ölçümler alınır.

2100 Hz, 2300 Hz, 8700 Hz, 8900 Hz frekansları merkez olmak üzere, toplanan veriler 200 Hz'lik bantlarda sunulmaktadır. SHler 2 kHz-150 kHz arasında tanımlı olduğundan, standardın önerdiği yöntemin 150 kHz'e kadar uzatılabileceği değerlendirilebilir [32]. Standardın B ekinde, deney altındaki cihazın (DAC) ölçümleri yapılırken, DAC'ın EMC testlerinde yaygın olarak kullanılan bir bant geçiren filtreye, bilinen adıyla Hat Empedansı Sabitleme Şebekesine (LISN) bağlanması gerektiği ifade edilmektedir. LISN pasif bir filtre devresi olup, güç sisteminden gelebilecek olan ve ölçülen girişimin hatalı okunmasına sebep olabilecek girişimleri filtreler ve DAC'ın sabit bir empedans görmesini sağlayarak deney sonuçlarının tekrarlanabilir olmasını, dolayısıyla ölçüm belirsizliğinin yüksek olmamasını sağlar.

2.2.2 CISPR 16-2-1

Diğer yandan, CISPR 16-2-1 standardı 9 kHz -150 kHz arası için zaten bir ölçüm yöntemi vermektedir [33]. Bu standart ise dünya genelinde kabul gören iletimle yayılım standartlarından olup, EMI (elektromanyetik girişim) alıcısıyla frekans tabanında, 200 Hz bant genişliğinde tarama ile radyo frekans (RF) enerjisini toplayarak ölçüm yapar. Bu tarama CISPR 16-1-1'de tanımlı yarı-tepe (quasipeak) detektörü ile gerçekleştirilir [34]. Literatürde bulunan çalışmalarda, CISPR 16-2-1 standardı da bir yöntem olarak verilmekte ise de, CISPR 16-2-1 Standardı, ölçüm yöntemini ve LISN tanımını 9 kHz-30 MHz arasında tanımlamaktadır. SH aralığı için kullanılacak LISNlar IEC 61000-4-7 Ek B'de ve EN 50065-1'de tanımlanmaktadır, ancak bu iki LISN da yapı olarak farklıdır [21],[32]. Literatürde ise ancak bir çalışmada EN 50065-1'deki LISN'ın kullanıldığı görülmüş, diğer çalışmalarda ise bu konuda bir bilgi görülebilmiştir [19]. CISPR 16-2-1 yöntemi ile SH aralığında yapılacak olan ölçümlerde LISN kullanılmaması, ölçümün doğrudan şebeke empedansından etkilenmesine ve gün boyunca değişkenlik gösteren elektrik şebekesi empedansının, ölçümlerin tekrarlanabilirliğinin zayıflamasına neden olabilecektir. CISPR 16-2-1'e uygun bir ölçüm düzeneği Şekil 2'de verilmektedir.

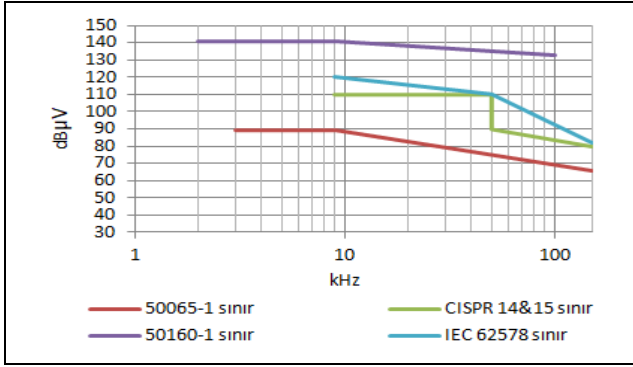


Şekil 2. CISPR 16-2-1 iletimle yayılım ölçüm düzeneği [32].

Figure 2. CISPR 16-2-1 conducted emission measurement setup.

2.2.3 Cihazlar için sınır değerler

PLC cihazlar için EN 50065-1 standardında girişim üst sınırları verilmiştir. Ancak, bu standart yalnızca PLC cihazları kapsamaktadır, dolayısıyla SHlerin frekans aralığında genel olarak elektrikli ve elektronik cihazları kapsayan yasal bir düzenleme mevcut değildir. Şekil 3'te, EN 50065-1 Standardının PLC cihazlar için geniş bant yayını (3 kHz üzeri) girişim üst sınırları, CISPR 15 Standardında belirlenen sınır değerler (aydınlatma cihazları için 9 kHz-150 kHz arasında girişim sınırları), EN 50160 kapsamındaki gerilim bozulmaları sınır değerleri ve IEC TS 62578 teknik spesifikasyonunda aktif beslemeli dönüştürücüler (active infeed converter) için tavsiye olarak verilen sınır değerler görülmektedir [21],[22],[25],[26],[36].



Şekil 3. 2 kHz-150 kHz aralığı için sınır değerler [21],[22],[25],[26],[34].

Figure 3. Limits in standards for the 2 kHz-150 kHz range.

2.3 Güç kalitesi bakımından supraharmenikler

50/60 Hz frekansındaki güç dağıtım sistemlerinin kalite gereksinimleri, çok yaygın olarak kullanılan IEC 61000-4-30 standardı ile belirlenmiştir. IEC 61000-4-30 Standardı, 2 kHz-150 kHz aralığı için standardın Ek C' bölümünde CISPR 16-2-1 ve IEC 61000-4-7 Standartlarında belirtilen yöntemleri önermektedir. Güç sistem şebekelerinde SH ölçümü zorunlu ve yaygın olmamakla birlikte, sorunlara yol açtığı bilinmektedir. Ancak, son yıllarda DA güç sistemleri yaygınlaşmaya başlamaktadır ve bu sistemler için de güç kalitesi önemini korumaktadır [35].

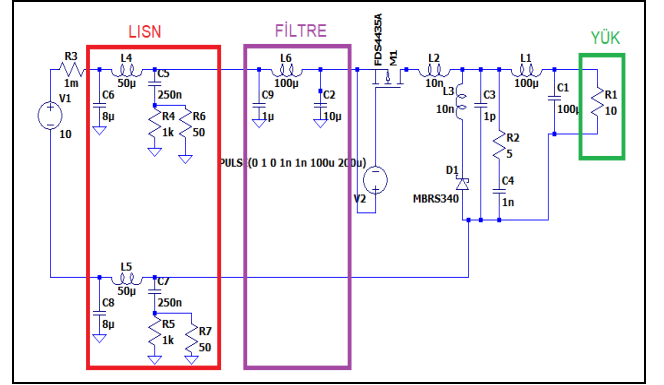
Örneğin IEC tarafından yayınlanan IEC TR 63282 teknik raporu düşük gerilim doğru akım (LVDC) sistemler için bu duruma dikkat çekmektedir [36]. LVDC kavramı 1500 V ve altındaki DA sistemler için kullanılmaktadır ve bu nedenle elektrikli araç şarj istasyonları, fotovoltaik enerji sistemleri, mikro şebeke gibi kavramlarla yakından ilişkilidir. SHler güç sistemlerinde kapasitif akımların artmasına neden olarak güç kaynaklarının zarar görmesine ve nötr akım artışına neden olarak da güvenlik risklerine sebebiyet verebilir. Dahası SHler, dokunmatik kontrollü bileşenler ve lamba dimmerlerinde hatalara, LED lamba ömürlerinin azalmasına, PLC sistemlerinde haberleşme problemlerine, transformatör ve kondansatörlerin aşırı ısınmasına, koruma donanımlarının hatalı açmasına, akıllı sayaçlar ile iletişimin kopmasına, evsel ve medikal cihazların kesintili çalışmasına, ulaştırma kontrol sistemlerinin de hatalı çalışmasına neden olabilmektedir. Ayrıca SH bozulmalar, doğrusal olmayan yüklerdeki kayıpların artmasına ve elektrik dağıtım sistemindeki bileşenlerin olumsuz etkilenmesine neden olabilmektedir. Sonuç olarak SHler özellikle evirici ve mikro şebeke sistemleri içeren yaygın

elektrik şebekelerinde, eviricilerin sürpriz biçimde hatalı çalışması sonucunda kararsızlığa neden olabilmektedir [37]-[39].

3 Benzetim

Cihazlar tasarlanırken EMC Yönetmeliği ve dolayısıyla bu yönetmeliğin atıf yaptığı EMC standartları gözetilmektedir. Ancak EMC standartlarında bulunan harmonik akım ölçümü ve iletimle yayını testleri genel olarak 50 Hz-2 kHz ve 150 kHz-30 MHz aralıklarında uygulandığından, tasarımlarda da bu frekans aralıkları gözetilerek önlemler alınmaktadır. Bu nedenle bu harmoniklerden kurtulmak için genelde güç faktörü düzeltme devreleri ve elektromanyetik girişim filtreleri kullanılmaktadır.

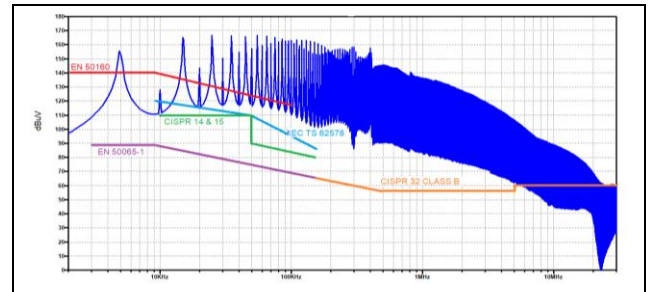
Literatürde, EMI filtrelerin SH aralığındaki performanslarına dair bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yalnızca bir çalışmada şebekeye bağlı cihazların EMI filtrelerinin şebekedeki SHlerin ilerlemesine nasıl bir etki ettiği değerlendirilmiştir [13]. LTSpice® yazılımı ile Şekil 4'te görüldüğü gibi, bir AGK devresinin 2 kHz-30 MHz aralığındaki yayını ölçen bir model oluşturulmuştur.



Şekil 4. EMI filtresine sahip bir anahtarlamalı güç kaynağının girişimi için benzetim devresi.

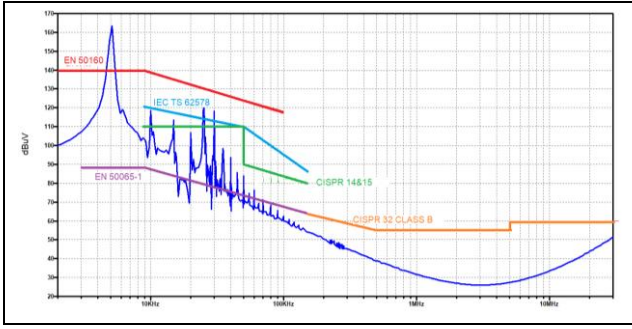
Figure 4. Interference simulation circuit of a switch-mode power supply with an EMI filter.

Bir AGK'nın, içindeki bileşenlerin yerleşiminden ve cihazın muhafazasından ötürü çok küçük de olsa parazitik kapasitans ve endüktansların oluşması kaçınılmazdır. Modelde bu bileşenler de göz önüne alınmıştır. EMI filtre yokken yapılan benzetim sonuçları Şekil 5'te, EMI filtre varken yapılan benzetim sonuçları ise Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. EMI Filtresi olmayan bir anahtarlamalı güç kaynağının girişim benzetimi.

Figure 5. Interference simulation of a switch-mode power supply without an EMI filter.



Şekil 6. EMI filtreli anahtarlamalı güç kaynağı modelinin girişim benzetimi.

Figure 6. Interference simulation of a switch-mode power supply with an EMI filter.

Buna göre, Şekil 4'te mor renk ile gösterilen EMI filtre devrede yokken cihazdan yayılan girişim EMC testlerinde AGKlar için geçerli olan "CISPR 32 Class B" üst sınırını aşmakta (Şekil 5).

Ancak, EMI filtre varken iken "CISPR 32 Class B" üst sınırını aşmamaktadır (Şekil 6); yani EMI filtre EMC aralığında etkin olmaktadır.

Ancak bu durum 150 kHz altında geçerli olmamakta, EMI filtre SH frekans aralığında, EMC frekans aralığındaki kadar etkin olamamaktadır. Dolayısıyla yalnızca EMC testlerinden geçmeye odaklanan bir tasarımcı 150 kHz-30 MHz arasındaki girişimi için önlem aldığıında, SHleri ihmal etmiş olacaktır.

4 Bulgular

Bu bölümde seçilen üç tür cihaz laboratuvarında test edilmiş ve deneysel sonuçlar verilmiştir. 55 W gücündeki bir anahtarlamalı güç kaynağının EMI filtreli ve EMI filtresiz olarak 2 kHz-150 kHz aralığında ve 150 kHz-30 MHz aralığında iletimle yayınımlı ölçülmüş ve sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. Başka bir örnekte ise bir sinüs gerilim kaynağının çıkışındaki SH girişimi ölçülmüştür. Son olarak da bir sürücü-motor sisteminde sürücüdenden kaynaklanan girişim ölçülmüştür.

Ev-ofis ortamlarından endüstriyel uygulamalara kadar sıkça kullanılan bir anahtarlamalı güç kaynağının ölçümü CISPR 16-2-1 yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Güç kaynağı ve iç yapısı Şekil 7'de verilmiştir.

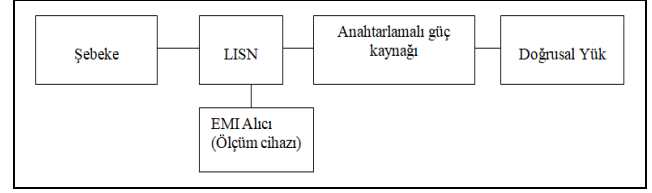


Şekil 7. Anahtarlamalı güç kaynağı.

Figure 7. Switch mode power supply.

Ölçüm sırasında güç kaynağı LISN üzerinden güç şebekesinden beslenmiş, tarama bant genişliği CISPR 16-2-1'e uygun şekilde 200 Hz olarak belirlenmiştir. Güç kaynağı 1A çıkış verecek şekilde yüklenmiştir. Ölçüm düzeneğinin şeması Şekil 8'de, ölçüm düzeneğinin resmi Şekil 9'da verilmektedir. Ölçüm sırasında, yalnızca AGK'dan yayılan girişimin ölçülmesi, yükten kaynaklı bir girişim olmaması için doğrusal bir yük kullanılmıştır. Bu koşullar altındaki 2 kHz-150 kHz

aralığındaki ölçüm grafiği Şekil 10'da, 150 kHz-30 MHz aralığındaki ölçüm grafiği Şekil 11'de verilmiştir.



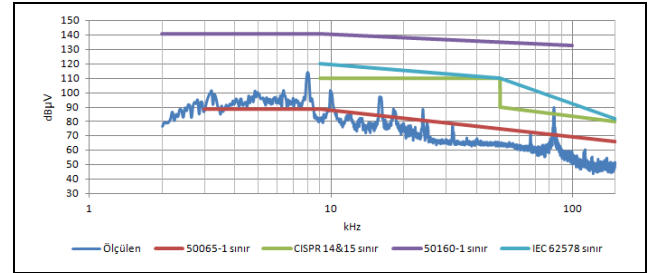
Şekil 8. AGK ölçüm düzeneği şeması.

Figure 8. Diagram of measurement setup of the SMPS.



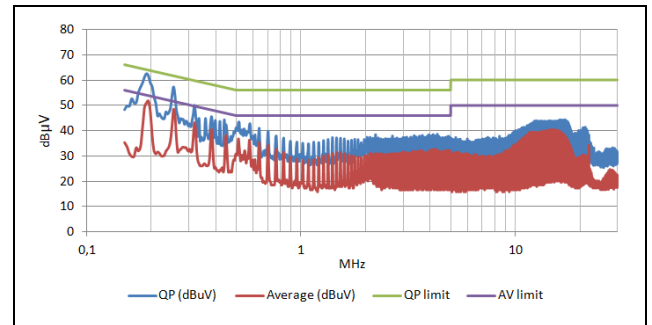
Şekil 9. AGK ölçüm düzeneği.

Figure 9. Measurement setup of the SMPS.



Şekil 10. EMI filtreli AGK 2kHz-150 kHz ölçüm sonucu

Figure 10. Measurement result of an SMPS with an EMI filter in 2kHz - 150 kHz.

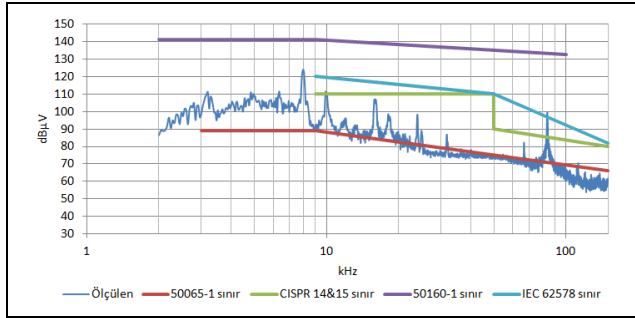


Şekil 11. EMI filtreli AGK 150 kHz-30 MHz ölçüm sonucu.

Figure 11. Measurement result of an SMPS with an EMI filter in 150 kHz-30 MHz.

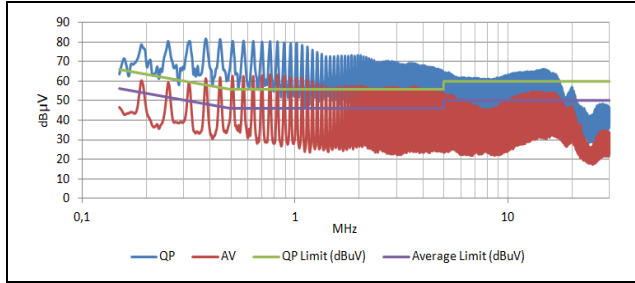
Aynı güç kaynağının girişindeki EMI filtresi sökülerek (Şekil 7'de görülen EMI filtre bileşenleri açık devre ve kısa devre edilerek) aynı koşullarda ölçüm yapılmış ve 2 kHz-150 kHz aralığındaki ölçüm grafiği Şekil 12'de, 150 kHz-30 MHz aralığındaki ölçüm grafiği ise Şekil 13'te verilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre EMI filtresinin etkinliği, 3. Bölümde verilen benzetim sonuçlarıyla uygun şekilde, ancak 150 kHz frekansının üzerinde başlamaktadır. EMI filtresinin varlığı

150 kHz altındaki girişimde etkin bir bastırma sağlamamaktadır. Bu durum, mevcut EMI filtrelerin genelde SHlerin göz ardı edilerek tasarlandığına iyi bir örnektir.



Şekil 12. EMI filtresiz AGK 2 kHz-150 kHz ölçüm sonucu.

Figure 12. Measurement result of an SMPS without an EMI filter in 2 kHz-150 kHz.



Şekil 13. EMI filtresiz AGK 150 kHz-30 MHz ölçüm sonucu.

Figure 13. Measurement result of an SMPS without an EMI filter in 150 kHz-30 MHz.

Bununla birlikte, toplam supraharmolik bozunumu (TSHD) ile ilgili ölçüm ve hesaplamalar literatürdeki bazı çalışmalarda verilmiştir [5],[31]. TSHD için hesaplama yöntemi Denklem 1'de verilmektedir.

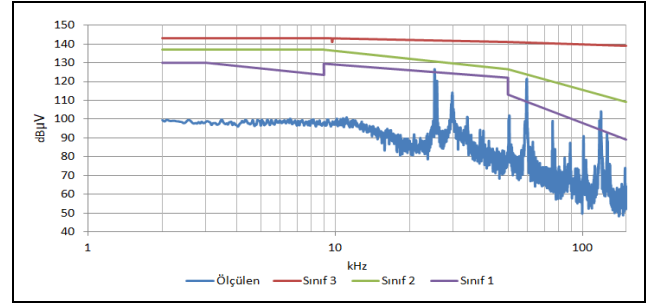
$$TSHD = \frac{\sqrt{\sum_{f_{min}}^{f_{max}} V^2}}{V_t} \quad (1)$$

Burada, f_{min} işleme başlanan frekansı, f_{max} işlemin son frekansını, V ise ilgili frekanstaki gerilimi, V_t ise temel frekanstaki gerilim değerini (230V) ifade eder. TSHD IEC 61000-4-7'ye uygun olarak 200 Hz'lik bantlarda toplanarak hesaplanabilir [32].

AGK'nın TSHD değeri EMI filtre varken ve yokken her iki durumda da %0.5 olarak hesaplanmıştır.

Devre yapısı bakımından fotovoltaik sistemlerin evirici ünitesi çıkışı ile sinüs güç kaynaklarının çıkışı aynı yapıdadır. İki sistemde de bir doğru akım (DA) barasından evirici devresiyle AA biçimli gerilim elde edilmekte ve bu işlev güç elektroniği anahtarlama elemanlarıyla gerçekleştirilmektedir. Bu benzeşmeden faydalanılarak sinüs güç kaynağı çıkışının CISPR 16-2-1'e göre ölçümü yapılarak fotovoltaik sistemlerin çıkış geriliminin kalitesi hakkında fikir sahibi olunabilir.

IEC 61000-3-2'nin güç kaynağı şartlarını sağlayan 45 kVA gücündeki bir sinüs gerilim kaynağı, 50/60 Hz'te en fazla %2 toplam harmonik bozulmaya (THD) sahiptir. Bu kaynağın çıkış gerilimi (230V, 50 Hz) 2 kHz-150 kHz aralığında ölçülmüş, ölçüm sonucu Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 14. Programlanabilir güç kaynağının çıkış geriliminin ölçümü.

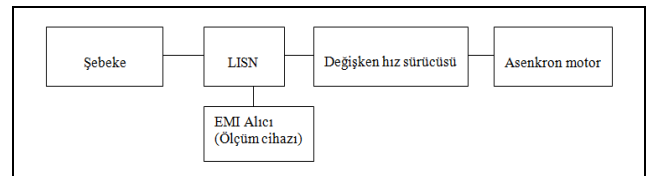
Figure 14. Measurement of output voltage of a programmable power supply.

Güç kaynağının frekans bazında çıkış gerilimi IEC 61000-2-4'te verilen şebeke bozulma sınır değerleri ile kıyaslanmıştır [40]. Bu standartta ölçüm bölgelerine göre güç kalitesinin sınıfları bulunmaktadır. Sınıf 1 korunan bölgeler için (cihazların/sistemlerin hassas olduğu bölgeler: ör. bilimsel ve ölçüm cihazlarının bulunduğu laboratuvarlar), sınıf 2 konut/ofis tipi bölgeler için, sınıf 3 ise ağır sanayi ortamları için geçerlidir. Ölçüm grafiğinden anlaşıldığı üzere, harmonik ölçümü için yeterli düzgünlükte sinüs gerilim üretebilen güç kaynağı, harmonikleri (50 Hz-2 kHz) yeterince bastırarak çıkış verirken; özellikle 20 kHz sonrasında dikkat çekici seviyelerde girişime neden olmaktadır. Güç kaynağı çıkışının özellikle sınıf 1 türü ortamlarda benzer yapıda bir fotovoltaik enerji sisteminin ancak ek önlemlerle kullanılabilceği, sınıf 2 ortamlarda ise sınıra oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durumun, güç kaynağının evirici devresindeki anahtarlama elemanları veya güç faktörü düzeltme devresinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Sinüs güç kaynağı için 2 kHz-150 kHz aralığında TSHD'nin %2.23 bozulma olduğu hesaplanmıştır. Bu değer, kaynağın 50 Hz-2000 Hz arasındaki %2 THD değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Yine de şebeke empedansının SH aralığındaki değişimin göz önüne alınarak TSHD değerlendirilmesi daha ileri çalışmalarda ele alınabilir.

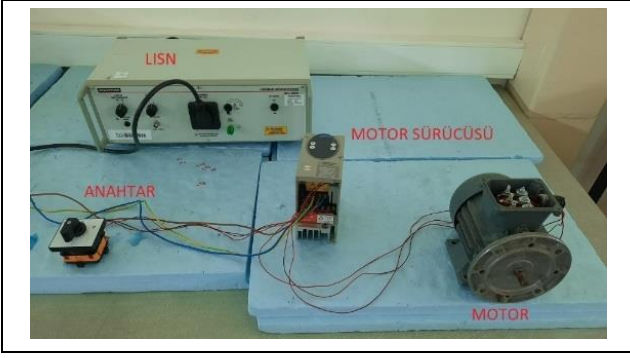
Deneysel çalışmada test edilen bir başka cihaz ise değişken hız sürücüsü (DHS) ile tahrik edilen asenkron motordur. DHSlerle tahrik edilen asenkron motorlara endüstride sıkça rastlanmaktadır. Şekil 15'te bir sürücü-motor sisteminin test düzeneğinin şeması, Şekil 16'da ölçüm düzeneğinin resmi verilmektedir.

Şekil 17'de, 0.75 kW gücündeki 3 fazlı bir asenkron motoru kontrol eden 1.5 kW gücündeki değişken hız sürücüsünün ölçüm sonuçları verilmektedir. Motor, 45 Hz ile sürülmektedir ve boşa (yüksüz) çalışmaktadır. Ölçüm sonuçlarında sürücünün anahtarlama frekansı olan 4 kHz ve katlarında girişim görüşmekle birlikte, 15 kHz ve katlarındaki frekanslarda yüksek seviyede girişimler görülmektedir.



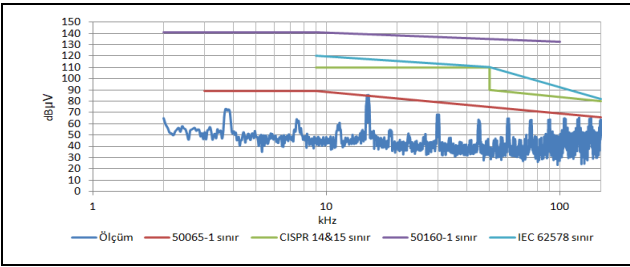
Şekil 15. DHS ve motor sisteminin test düzeneği şeması.

Figure 15. Diagram of driver-motor test setup.



Şekil 16. DHS ve motor sisteminin test düzeneği.

Figure 16. Driver-motor test setup.



Şekil 17. 45 Hz çıkışı ile motor süren DHS'den alınan iletimle yayılım sonucu.

Figure 17. Interference measurement of the motor driver with 45 Hz output.

5 Sonuçlar

Yenilenebilir enerji kaynakları, ulaşım sektöründeki elektrifikasyon ve bilişim teknolojilerindeki yenilikler nedeniyle, şebekelerdeki 2 kHz-150 kHz arasındaki girişimlerin çoğaldığı ve buna bağlı olarak çeşitli sorunların rapor edildiği bilinmektedir. Elektrikli/elektronik cihazlardan yayılan 150 kHz üzerindeki girişimler EMC disiplininin alanına girmekte ve ürünlerin tasarımında EMC yönetmeliğinin atf yaptığı standartlar dikkate alınarak önlemler alınmaktadır. Ancak bu önlemlerin SH bölgesinde yeterli olup olamayacağı tartışmaya açıktır. Bu çalışmadaki benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar EMC ölçümlerine odaklanılarak tasarlanacak bir EMI filtrenin SH aralığında etkin olmayabileceğini göstermektedir. Buna ek olarak, mevcut şebekelerde güç kalitesi ölçümlerinin de ancak harmonikler mertebesinde yapıldığı, SH frekans aralığının gözlemlenmediği anlaşılmaktadır. Özellikle fotovoltaik enerji sistemlerinin eviricilerinin çıkış geriliminin şebekeye SHler enjekte edebileceği görülmektedir. Bu durum da mevcut dağıtım sistemlerinin SHler bakımından incelenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada yer alan benzetim sonuçları ve deneysel çalışmalar göstermektedir ki mevcut önlemler SHleri göz ardı etmektedir. Bu nedenle, güç dağıtım sistemlerinde bulunan SH frekans aralığındaki girişimler incelenmeli ve yeni cihazların tasarımlarında SHler dikkate alınmalıdır. AA veya DA şebekelerin güç kalitesi değerlendirmelerinde SH frekans aralığının da ele alınması gerekmektedir. Aksi halde fotovoltaik enerji sistemleri, elektrikli araç hızlı şarj sistemleri, düşük gerilim DA uygulamaları, mikro-şebekeler gibi günlük hayatta hızlı bir şekilde yer bulmaya başlayan teknolojilerle birlikte şebeke kalitesi düşüşü ve cihaz arızaları gibi sorunlar kaçınılmaz hale gelecektir.

6 Conclusions

It is known that due to innovations in renewable energy sources, electrification in the transportation sector, and information technologies, interferences between 2 kHz and 150 kHz in the networks have increased, and various problems have been reported accordingly. Interferences above 150 kHz emitted from electrical/electronic devices fall within the scope of EMC discipline, and measures are taken in the design of products by taking into account the standards referred to by the EMC regulation. However, it is open to debate whether these measures will be sufficient in the supraharmic region. The simulation results and experimental results in this study show that an EMI filter designed by focusing on EMC measurements may not be effective in the supraharmic range. Additionally, it is understood that power quality measurements in existing networks are only made at the level of harmonics, and the supraharmic frequency range is not observed. In particular, it is seen that the output voltage of the inverters of photovoltaic energy systems can inject supraharmics into the grid. This situation reveals the necessity of examining the existing distribution systems in terms of supraharmics.

The simulation results and experimental studies in this study show that the interferences in the supraharmic frequency range in power distribution systems should be examined, and supraharmics should be taken into account in the designs of new devices. In the power quality evaluations of AC or DC networks, the supraharmic frequency range should also be taken into consideration. Otherwise, problems such as network quality and device failures will become inevitable with technologies such as photovoltaic energy systems, electric vehicle fast charging systems, low voltage DC applications, and microgrids, which are quickly starting to take place in daily life.

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Serdar BÜYÜK, fikrin oluşması, deneysel çalışma ve verilerin değerlendirilmesi başlıklarında; Engin ÖZDEMİR fikrin oluşması, literatür taraması, gözden geçirme başlıklarında katkı vermiştir.

8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

"Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur".

"Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır".

9 Kaynaklar

- [1] Kürker F, Taştaltın R. "Elektrik tesislerinde harmoniklerin meydana getirdiği kayıpların analizi". *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(5), 21-38, 2016.
- [2] Bollen M, Olofsson M, Larsson A, Rönnberg S, Lundmark M. "Standards for supraharmics (2 to 150 kHz)". *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 3(1), 114-119, 2014.
- [3] Rönnberg S, Bollen MHJ, Amaris H, Chang WG, Gu YHI, Kocewiak ŁH, Meyer J, Olofsson M, Ribeiro PF, Desmet J. "On waveform distortion in the frequency range of 2 kHz-150 kHz-Review and research challenges". *Electric Power Systems Research*, 150, 1-10, 2017.

- [4] Slangen T, Wijk T, Cuk V, Cobben S. "The propagation and interaction of supraharmonics from electric vehicle chargers in a low-voltage grid". *Energies*, 13(15), 1-20, 2020.
- [5] Mariscotti A. "Harmonic and supraharmonic emissions of plug-in electric vehicle chargers." *Smart Cities*, 5(2), 496-522, 2022.
- [6] Streubel T, Kattmann C, Eisenmann A, Rudion K. "Characterization of supraharmonic emission from three different electric vehicle charging infrastructures in time and frequency domain". *Energies*, 15(2), 1-19, 2022.
- [7] Blum J. "Evaluating Supraharmonics up to 150 kHz in Electric Vehicles at the University of Applied Sciences Bingen". <https://powerquality.blog/2021/11/05/evaluating-supraharmonics-up-to-150-khz-in-electric-vehicles-at-the-university-of-applied-sciences-bingen/> (07.06.2022).
- [8] Yalçın T. Akıllı Şebekelerde Güç Kalitesi Bozukluklarının İşaret İşleme Yöntemleriyle Tanısı. Doktora Tezi, Samsun Üniversitesi, Samsun, Türkiye, 2019.
- [9] langen, TMH, van Wijk T, Cuk V, Cobben JFG. "The harmonic and supraharmonic emission of battery electric vehicles in the Netherlands". *Proceedings of the 2020 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies*, Istanbul, Turkey, 7-9 September 2020.
- [10] Espin-Delgado A, Ronnberg S, Letha SS, Bollen M. "Diagnosis of supraharmonics-related problems based on the effects on electrical equipment". *Electric Power Systems Research*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107179>.
- [11] International Electrotechnical Committee. "Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current ≤ 16 A Per Phase)". Geneva, Switzerland, IEC 61000-3-2, 2019.
- [12] International Electrotechnical Committee. "Study Report on Electromagnetic Interference between Electrical Equipment/Systems in the Frequency Range Below 150 kHz". Geneva, Switzerland, PD CLC/TR 50627, 2015.
- [13] Sutaria J, Ahmed KMU, Rönnerberg S, Bollen MHJ. "Propagation of Supraharmonics through EMI Filters with Varying Loads". *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics*, Narvik, Norway, 25-27 September. 2019.
- [14] Khokhlov V, Meyer J, Grevener A, Busatto T, Rönnerberg S. "Comparison of measurement methods for the frequency range 2-150 kHz (supraharmonics) based on the present standards framework". *IEEE Access*, 8, 77618-77630, 2020.
- [15] Arechavaleta M, Halpin SM, Birchfield A, Pittman W, Griffin WE, Mitchell M. "Potential impacts of 9-150 kHz harmonic emissions on smart grid communications in the United States". *The Fifth International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies*, Rome, Italy, 24-29 May 2015.
- [16] Yalcin, T, Ozdemir M, Kostyla P, Leonowicz, Z. "Investigation of supra-harmonics through signal processing methods in smart grids". *Transactions on Environment and Electrical Engineering*, 2(2), 80-85, 2017.
- [17] Sakar S. Modelling and Interference Analysis of AC-DC Converters for Immunity to Voltage Disturbances upto 150 kHz. PhD Thesis, Lulea University of Technology, Luleå, Sweden, 2021.
- [18] Ravindran V, Sakar S, Ronnberg S, Bollen MHJ. "Characterization of the impact of PV and EV induced voltage variations on LED lamps in a low voltage installation". *Electric Power Systems Research*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106352>.
- [19] Carpinelli G, Bracale A, Varilone P, Sikorski T, Kostyla P, Leonowicz Z. "A new advanced method for an accurate assessment of harmonic and supraharmonic distortion in power system waveforms". *IEEE Access*, 9, 88685-88698, 2021.
- [20] International Electrotechnical Committee. "JWG 6". https://www.iec.ch/ords/f?p=103:14:11890998869728:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:22022,25 (11.07.2022).
- [21] European Electrotechnical Standardisation Committee. "Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148,5 kHz-Part 1: General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances". Brussels, Belgium, EN 50065-1, 2011.
- [22] European Electrotechnical Standardisation Committee. "Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks". Brussels, Belgium, EN 50160, 2019.
- [23] International Electrotechnical Committee. "Power Quality Measurement Methods". Geneva, Switzerland, IEC 61000-4-30, 2021.
- [24] Mendes TM, Duque CA, da Silva LRM, Ferreira DD, Meyer J, Ribeiro PF. "Comparative analysis of the measurement methods for the supraharmonic range". *International Journal of Electrical Power&Energy Systems*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105801>.
- [25] Kalair A, Abas N, Kalair AR, Saleem Z, Khan N. "Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1152-1187, 2017.
- [26] International Electrotechnical Committee. "Requirements for Household Appliances, Electric Tools and Similar Apparatus-Part 1: Emission". Geneva, Switzerland, CISPR 14-1, 2020.
- [27] International Electrotechnical Committee. "Limits and Methods of Measurement of Radio Disturbance Characteristics of Electrical Lighting and Similar Equipment". Geneva, Switzerland, CISPR 15, 2018.
- [28] Klatt M, Stiegler R, Meyer J, Schegner P. "Generic frequency-domain model for the emission of PWM-based power converters in the frequency range from 2 to 150 kHz". *IET Generation, Transmission and Distribution*, 13(24), 5441-5604, 2019.
- [29] Sandrolini, L. Mariscotti A. "Waveform and spectral characteristics of supraharmonic unsymmetrical conducted EMI of switched-mode power supplies". *Electronics*, 11, 1-17, 2022.
- [30] Larsson EOA, Bollen MHJ. "Measurement result from 1 to 48 fluorescent lamps in the frequency range 2 to 150 kHz". *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Bergamo, Italy, 26-29 September, 2010.
- [31] Espin-Delgado A, Rönnerberg S, Busatto T, Ravindran V, Bollen MHJ. "Summation law for supraharmonic currents (2-150 kHz) in low-voltage installations". *Electric Power Systems Research*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106325>.

- [32] International Electrotechnical Committee. "General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto". Geneva, Switzerland, IEC 61000-4-7, 2009.
- [33] International Electrotechnical Committee. "Methods of Measurement of Disturbances and Immunity-Conducted Disturbance Measurements". Geneva, Switzerland, CISPR 16-2-1, 2017.
- [34] International Electrotechnical Committee. "Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods Part 1-1: Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus-Measuring Apparatus". Geneva, Switzerland, CISPR 16-1-1, 2019.
- [35] Verzele P, Knockaert J, Desmet J. "Appropriate methods to analyse Power Conversion Harmonics". *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Bilbao, Spain, 20-22 March 2013.
- [36] International Electrotechnical Committee. "Power Electronics Systems and Equipment-Operation Conditions and Characteristics of Active Infeed Converter (AIC) Applications Including Design Recommendations for Their Emission Values Below 150 kHz". Geneva, Switzerland, IEC TS 62578, 2015.
- [37] Larsson, A. On High Frequency Distortion in Low-Voltage Power Systems. Ph.D. Thesis, Luleå University of Technology, Lulea, Sweden, 2011.
- [38] Yalcin T, Özdemir M, Kostylaand P, Leonowicz Z. "Analysis of supra-harmonics in smartgrids". *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*, Milan, Italy, 6-9 June 2017.
- [39] International Electrotechnical Committee. "LVDC Systems-Assessment of Standard Voltages and Power Quality Requirements". Geneva, Switzerland, IEC TR 63282, 2020.
- [40] International Electrotechnical Committee. "Environment-Compatibility Levels in Industrial Plants for Low-Frequency Conducted Disturbances". Geneva, Switzerland, IEC 61000-2-4, 2002.