

Harmonic and Inter-Harmonic Analysis in Electric Machines

Serhat Berat EFE¹, Adem DALCALI²

¹Department of Electrical Engineering, Bandırma Onyedi Eylül University, Balıkesir, Turkey,
ORCID: 0000-0001-6076-4166

²Department of Electrical and Electronics Engineering, Bandırma Onyedi Eylül University, Balıkesir, Turkey,
ORCID: 0000-0002-9940-0471

Abstract: Ensuring quality conditions in the generation, transmission and distribution of electrical energy is one of the most important requirements for the proper operation of a power system. This is of vital especially for sensitive loads, the number of which is increasing due to technological developments. The fact that the generation and consumption units are connected due to the structure of the interconnected system requires that the concept of energy quality be taken into account by both energy generation companies and consumers. In this study, harmonic and inter-harmonic analysis of the permanent magnet synchronous generator, which is one of the basic units of electrical energy production, has been made. The generator designed for the aforementioned analysis was operated under nominal operating conditions. In addition to the harmonic analysis, interharmonic analysis was also carried out within the scope of the study. According to the analysis results, the 3.5th component was determined as the most dominant harmonics with a rate of 10.27% among the interharmonics. Another interharmonic, 4.5th component, was detected at a rate of 5.19%. While the ratio of the 5th harmonic component among the main harmonics was 1.29%, the ratio of the 5.5th component, which is the interharmonic, was 3.32%.

Keywords: Energy quality, harmonic analysis, inter-harmonics

Elektrik Makinalarında Harmonik ve Ara-Harmonik Analizi

Özet: Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımında kalite koşullarının sağlanması, bir güç sisteminin sorunsuz çalışması için en önemli gerekliliklerden biridir. Özellikle teknolojik gelişmelere bağlı olarak sayıları artan hassas yükler için bu durum hayati önem taşımaktadır. Enterkonnekte sistem yapısı gereği üretim ve tüketim ünitelerinin birbirlerine bağlı olması, enerji kalitesi kavramının hem üretici hem de tüketiciler tarafından dikkate alınmasını gerektirir. Bu çalışmada, elektrik enerjisi üretiminin temel ünitelerinden biri olan sürekli mıknatıslı senkron generatörün harmonik ve ara-harmonik analizi yapılmıştır. Söz konusu analiz amacıyla tasarlanan generatör nominal çalışma koşulları altında çalıştırılmıştır. Çalışma kapsamında harmonik analizinin yanı sıra ara-harmonik analizi de yapılmıştır. Analiz sonucunda, ara-harmoniklerden 3,5'inci bileşen %10,27 oranı ile en baskın harmonik olarak çıkmıştır. Diğer bir ara-harmonik olan 4,5'inci bileşen de % 5,19 oranında tespit edilmiştir. Ana harmoniklerden 5'inci harmonik bileşenin oranı %1,29 iken ara-harmonik olan 5,5 bileşenin oranı % 3,32 belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji kalitesi, harmonik analizi, ara-harmonikler

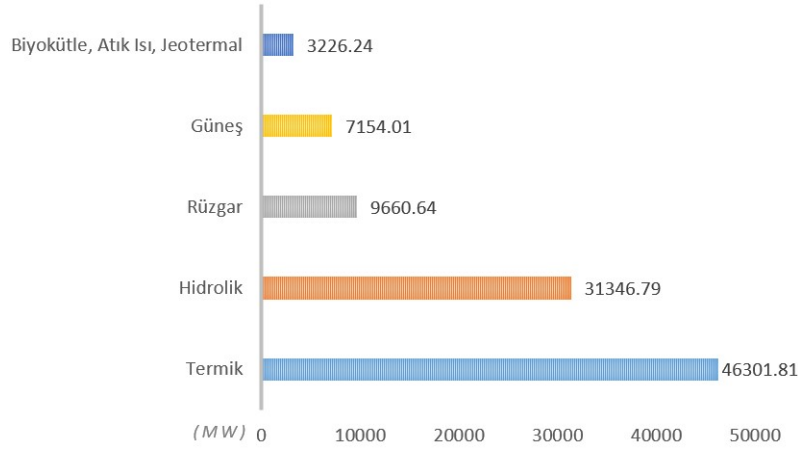
Reference to this paper should be made as follows (bu makaleye aşağıdaki şekilde atıfta bulunulmalı):

Efe, S. B., Dalcalı, A., 'Harmonic and Inter-Harmonic Analysis in Electric Machines', Elec Lett Sci Eng , vol. 17(2) (2021) 117-125.

1. Giriş

Sanayinin ve teknolojinin gelişmesi, nüfusun artması gibi etkenler ile enerjiye olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Artan tüketim, enerji arz güvenliği ve güç kalitesi problemlerini beraberinde getirmektedir. Enerji arz güvenliğinin sağlanması için enerji tüketiminin çeşitlendirilmesi ve üretim miktarının artırılması önlem olabilir. Ancak, özellikle fosil yakıtların çevre kirliliği ve küresel ısınma gibi problemlere sebep olması, ülkeleri yeni arayışlara sevk etmektedir. Mevcut artışlar, öngörüler ve çevresel kaygılar değerlendirildiğinde fosil yakıtlar yerine, yakıt maliyeti olmayan doğa dostu yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılması çözüm olarak düşünülebilir [1,2].

Türkiye özelinde düşünüldüğünde, Türkiye hızlı kentleşmeye, artan nüfusa ve istikrarlı ekonomik büyümeye sahip olan bir ülkedir. Bu göstergelere paralel olarak Türkiye yaklaşık yirmi yıldır dünyanın en hızlı büyüyen enerji pazarlarından biridir. 2000 yılında gerçekleşen brüt ulusal üretim miktarı 124,9 TWh, 2010 yılında 211,2 TWh ve 2020 yılında ise 306,1 TWh'e yükselmiştir. 2021 yılının ilk 6 ayı referans alınarak incelendiğinde üretim miktarında 2020 yılına göre ortalama %11,2'lik artış sağlanmıştır [3,4]. Mayıs 2021 tarihi itibarıyla kurulu güç değeri 97689 MW'a ulaşmıştır. Bu kurulu gücün kaynak bazında dağılımı ise Şekil 1'de verilmiştir [5, 6].



Şekil 1. Kaynak bazında kurulu güç

Yatırım yapılan enerji santrallerinin kurulu gücü toplamı 1546 MW'tır. Bu yatırımların %53,55 rüzgâr, %23,63 hidroelektrik, %14,48 güneş iken sadece %2,18'i termik olarak gerçekleşmiştir [6]. Tüm bu değerlendirmeler dikkate alındığından Türkiye'nin enerji arzını sağlamada kaynaklarını çeşitlendirdiği ve bunu yaparken de yenilenebilir enerji kurulu gücünün payını arttırdığı görülmektedir. Yenilenebilir kaynaklar ile arz güvenliğinin artırılması, kaynak çeşitliliği sağlanması ve zararlı gaz emisyonun azaltılması sağlanabilir. Bununla birlikte, bu kaynakların kullanılmasıyla cari açığın önemli bileşeni olan enerji ithalatının da azaltılması mümkündür. Bu amaçla, 11. Kalkınma planında yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretiminin artırılarak şebekeye entegrasyonunun sağlanması için yatırımların yapılması planlanmıştır [7]. Bu entegrasyon sağlanmasında özellikle güç kalitesinin sağlanması kritik bir önem taşımaktadır. Bu çalışmada, döner elektrik makinalarında harmoniklerin etkilerini detaylı bir şekilde sunulmuştur. Özellikle nehir tipi hidroelektrik santraller ve küçük rüzgar türbinlerinde kullanılan sabit mıknatıslı senkron generatörün (SMSG) harmonik ve ara-harmonik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın devamında öncelikle güç kalitesi ifadesi ve standartları incelenmiştir. Üçüncü bölümde harmoniklerin sınıflandırılması ve etkileri verilmiştir. Bir sonraki bölümde SMSG'nin harmonik ve ara-harmoniklerine ilişkin bulgular detaylandırılmıştır. Son olarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Güç Kalitesi

Gelişen teknolojiyle artan yük ve kaynak çeşitliliği beraberinde güç kalitesi problemlerini ortaya çıkarmıştır. Güç kalitesi ile ilgili farklı kriterlerin dikkate alındığı farklı sınıflandırmalar mevcuttur [8-9]. Güç kalitesinin sağlanması klasik bir tanımla sabit frekansta sinüs dalga formunda kesintisiz enerji aktarımı ile mümkündür. Güç kalitesini gerilim dalgalanması, harmonikler gibi etkenler etkilemektedir [10]. Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsünün (Institute of Electrical and Electronic Engineers-IEEE) hazırladığı IEEE1100 standardına göre

güç kalitesi “hassas elektronik ekipmanlara uygun şekilde güç verilmesi ve topraklaması olarak” tanımlanmaktadır. Tablo 1’de IEEE ve Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission-IEC) tarafından güç kalitesi ve ilgili standartları verilmiştir [11].

Tablo 1. IEEE ve IEC’nin güç kalitesi standartlarının bazıları [8, 10]

Kuruluş	Standart No	Açıklama
IEEE	IEEE 644	AA güç hatlarından güç frekansı elektrik ve manyetik alanlarının ölçümü için standart prosedür
	IEEE C63.12	Elektromanyetik uyumluluk sınırları için önerilen uygulama
	IEEE 518	Harici kaynaklardan denetleyicilere gelen elektriksel gürültü girişlerini en aza indirmek için elektrikli ekipman kurulum kılavuzu
	IEEE 519	Elektrik güç sistemlerinde harmonik kontrol için önerilen uygulamalar ve gereksinimler
	IEEE 1100	Hassas elektronik ekipmanlara güç verme ve topraklama için önerilen uygulama
	IEEE 1159	Elektrik gücü kalitesinin izlenmesi için önerilen uygulama
	IEEE 141	Endüstriyel tesislerde elektrik enerjisi dağıtımı için önerilen uygulama
	IEEE 142	Endüstriyel ve ticari güç sistemlerinin topraklanması için önerilen uygulama
	IEEE 241	Ticari binalarda elektrik güç sistemleri için önerilen uygulama
	IEEE 602	Sağlık tesislerinde elektrik sistemleri için önerilen uygulama
	IEEE 902	Endüstriyel ve ticari güç sistemlerinin bakımı, çalıştırılması ve güvenliği kılavuzu
	IEEE P1433	Güç kalitesi tanımları
	IEEE P1453	Gerilim titreme
	IEEE P1564	Gerilim sarkma indeksleri
IEC	IEC/TR3 61000-2-1	Elektromanyetik uyumluluk- Çevre
	IEC/TR3 61000-3-6	Elektromanyetik uyumluluk -Limitler
	IEC 61000-4-7	Elektromanyetik uyumluluk- Test ve ölçüm teknikleri- Harmonikler ve ara harmonikler ile ilgili genel kılavuzlar ölçümler ve enstrümantasyon
	IEC 61642	Harmoniklerden etkilenen Endüstriyel AA Şebekeler- Filtrelerin ve şönt kapasitörlerinin uygulanması
	IEC SC77A	Düşük frekanslı EMC olayları
	IEC TC77/WG1	Terminoloji
	IEC SC77A/WG1	Harmonikler ve diğer düşük frekans bozuklukları
	IEC SC77A/WG2	Gerilim dalgalanmaları ve diğer düşük frekans bozuklukları
	IEC SC77A/WG8	Şebeke frekansıyla ilgili elektromanyetik girişim
	IEC SC77A/WG9	Güç kalitesi ölçüm yöntemleri

Elektriksel sistemlerin ve şebekenin güvenliği açısından harmoniklerin belirlenen seviyeleri aşmaması gerekmektedir. Bu standartlar; kuruluşlara, gerilim seviyelerine veya ülkelere göre değişiklik gösterebilmektedir. Harmonik bileşenlerin sınırlandırılması ile güç kalitesinin

arttırılması ve ek kayıpların önlenmesi sağlanabilir. IEEE transformatör akım harmonikleri için distorsiyon üst sınırını % 5 olarak belirlemiştir. Ayrıca, kesin bir standart akım veya gerilim sınırı olmamakla birlikte asenkron motorlar için % 5 gerilim harmoniği üst sınırı kabul görmektedir [12, 13].

3. Harmonikler, Ara-harmonikler ve Etkileri

Gelişen teknolojiyle birlikte artan sayıda elektronik elemanlar ve yük çeşitliliği gibi nedenlerle harmonik üreten elemanların sayısı artış göstermektedir. Floresan lambalar, kişisel bilgisayarlar ve motor hız sürücüleri önemli birer harmonik kaynaklarıdır [14]. Harmonikleri, elektrik makinaları açısından değerlendirirsek, harmonikler elektrik makinalarında zaman ve uzay harmoniği olarak incelenmektedir. Elektrik makinalarının en iyi performansı sağlama için endüklenecek elektromotor kuvvetin (emk) saf sinüs biçimli olması beklenir [15,16]. Bu durumun yapısal açıdan sağlanması için sargıların sonsuz sayıda oluğa yerleştirilmesi, nüve malzemesinin ideal BH karakteristiğine sahip olması ve doyuma ulaşmaması sağlanmalıdır. Ancak uygulama aşamasında belirtilen koşulların sağlanması mümkün değildir. Dolayısıyla elde edilen emk dalga şekli uzay harmoniklerini barındıran basamak şeklinde bir yapıdadır [17]. Uzay harmoniği makinanın fiziksel yapısından dolayı oluşan ve yapısal çözümler ile etkisi azaltılabilen harmoniklerdir [18]. Harmonikler elektrik makinalarında ek ısı kayıplarına neden olurlar. Transformatörlerde, gerilim harmonikleri nüvede ek kayıpların oluşmasına sebep olur. İkinci etki ise akım harmonikleri tarafından I^2R kayıplarının artmasıdır. Buna ek olarak harmonik akımlar sargı Eddy akım kayıplarını da arttırmaktadır [11]. Rotorda üretilen harmonik akımlar ile harmonik akımların etkileşimi harmonik torklara, gürültü ve titreşimin oluşmasına neden olur [19]. Motor ve generatörler değerlendirildiğinde, makinanın doğası gereği sargılar tam sinüs gerilimi elde edebilecek şekilde dağıtılamamaktadır. Döner makinalarda harmonikler;

- Bakır ve demir kayıplarının artmasına dolayısıyla makinanın ısınmasına,
- Makine torkunda dalgalanmalara,
- Makinanın gürültülü çalışmasına,
- Rotor devresinde aşırı ısınmaya ve buna bağlı olarak hasar oluşumuna neden olmaktadır [20].

Harmoniklerin ve ara-harmoniklerin tespiti belirli matematiksel modeller ile yapılmaktadır. Bu tanımlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Harmoniklerin matematiksel tanımları [21]

DA bileşen	$f_{\omega} = nf_1 ; \quad n = 0$	n: sıfırdan büyük tamsayı f_{ω} : sinyalin bileşen frekansı f_1 : temel sistem frekansı
Harmonik	$f_{\omega} = nf_1$	
Ara-harmonik	$f_{\omega} \neq nf_1$	
Alt-harmonik	$f_{\omega} > 0 \text{ Hz}$ ve $f_{\omega} < f_1$	

Güç kalitesi çalışmalarında araştırmacılar harmonik bozunumlar üzerine yoğunlaşmaktadır. Ancak etki düzeyleri incelendiğinde ara-harmoniklerin etkilerinin bazı durumlarda harmonik değerlerinin çok daha fazla olduğu görülecektir [21]. Ara harmonikler temel dalga formunun tam sayı katları olmayan harmoniklerdir. Ara harmonikler statik frekans dönüştürücüler, asenkron motorlar, ark ocakları, frekans dönüştürücüler, bilgisayarlarda gözlemlenebilir. Ara harmonikler motorlarda titreşimlere, tork dalgalanmalarına, iletişim parazitlerine, mekanik sistemlerde düşük frekanslı salınımlara ve gerilim dalgalanmalarına neden olurlar [22]. Ara harmoniklerin önemli bir etkisi de asenkron motorların stator sargısında ek güç kaybına neden olmasıdır. Bu güç kaybı

ısı şeklinde olduğundan yalıtımın termal yaşlanmasına neden olurlar. Ara harmonikler, asenkron motorların manyetik devrelerinin doygunluğa ulaştığı durumlar ve transformatörlerin doygunluğa ulaştığı sistemlerde görülebilmektedirler [23,24]. Generatörlerde ise tork dalgalanmalarına ve kontrol sistemlerinde arızalara neden olurlar. Ara harmoniklerin analizinde klasik harmonik analizlerine benzer olarak toplam harmonik bozulma kullanılabilir. Ara harmoniklerin etkisini azaltmak için birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerden pasif filtre yaklaşımı görece ucuz olmakla birlikte performans açısından aktif filtre uygulamaları açık fark yaratmaktadır. Özellikle değişken yük durumları için aktif filtreler tercih edilir. Yapılan çalışmalarda özellikle asenkron makinalarda yapısal çözümler incelenmiştir. Asenkron makinada hava aralığının geometrisi, olukların sayısı ve geometrisi gibi kriterler harmonik akımların büyüklüklerini etkilemektedir. Bunlara ek olarak nüvede kullanılan malzemenin manyetik geçirgenliğinin doğrusal olmaması diğer bir etkili faktördür [25]. Oluk yapısı değerlendirildiğinde yüksüz durumda kapalı rotor oluklarına sahip bir asenkron motorun açık rotor yuvalarına sahip motora göre daha az harmonik akı yoğunluğu oluşturduğu belirlenmiştir [26]. Aynı sayıda oluğa sahip olan motorlardan faz sayısı fazla olan motorun ürettiği manyetik alanın sinüse daha fazla benzediği belirlenmiştir. Dolayısıyla, faz sayısı arttıkça tork harmoniklerinin azalacağı tespit edilmiştir [27]. Elektrik makinalarının tasarımı ile harmoniklerin büyüklüğü azaltılabilir ve verimlilik artırılabilir [28].

Ara harmonik içeren bir gerilimle beslenen sincap kafesli asenkron motorun akım ve güç kayıpları incelendiğinde ara ve alt harmoniklerin ek güç kayıplarına neden olduğu belirlenmiştir [29]. Bu etkilere ek olarak makinede titreşime de neden olmaktadır. Oluşan bu titreşimlerin güç aktarma sistemlerinde tahribata neden olabileceği bulunmuştur [30, 31]. Bir ve üç fazlı transformatörlerin, bir ve üç fazlı asenkron motorların ve universal makinanın ara harmonikler, alt harmonikler ve harmonikler altındaki güç kayıpları, termal analizleri ve elektromanyetik performansları analiz edilmiştir. Zaman harmonikleri düşük güç kalitesine neden olduğundan ek maliyetler oluşturmaktadır [32]. Gerilim dalgalanması bir alt harmonik ile bir ara harmonik bileşenin üst üste binmesi şeklinde tanımlanabilir [33]. Sonlu elemanlar analizi kullanılarak harmonik bileşenlere dayalı gerilim dalgalanmalarının manyetik doygunluğuna etkisi incelenebilir [34].

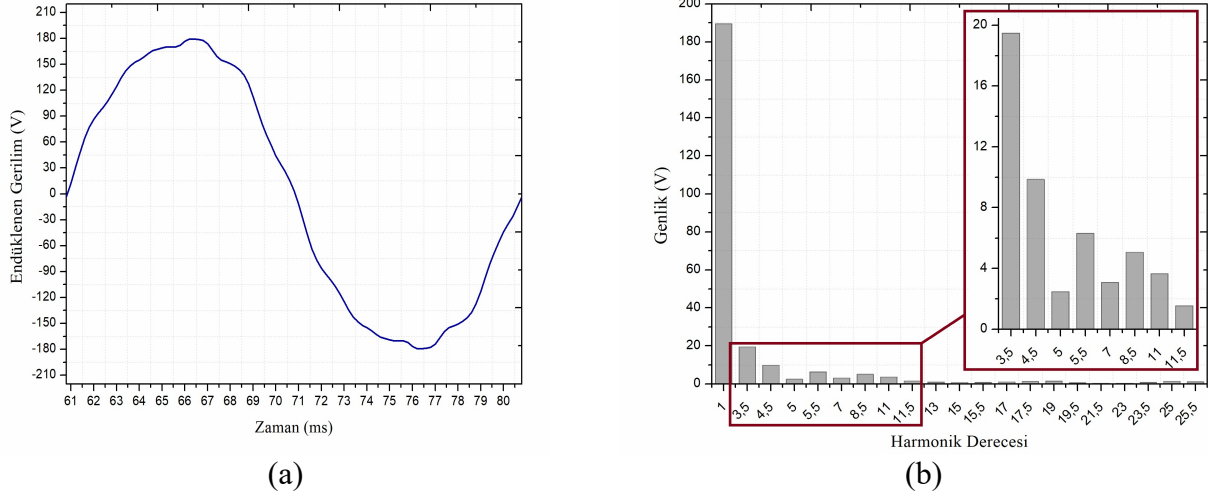
4. Harmonik ve Ara-Harmonik Analizi

Önceki bölümlerde belirtilen hususlar göz önünde bulundurularak, döner elektrik makinalarında harmoniklerin ve ara-harmoniklerin etkilerinin daha detaylı ortaya çıkarılması amacıyla bu çalışmada bilgisayar destekli paket program ile tasarlanan bir SMSG'nin verileri kullanılarak ilgili makinanın harmonik ve ara-harmonik analizi gerçekleştirilmiştir. SMSG'ler yüksek güç yoğunluğuna, yüksek verim ve düşük tork dalgalanmasına sahip olan makinalardır. Sabit mıknatıslı makinalar özellikle düşük devirli ve değişken hızlı uygulamalar için sıklıkla tercih edilmektedir [35]. Bu çalışma kapsamında tasarlanan sabit mıknatıslı senkron generatör iç rotor ve yüzey yerleştirmeli tipte olup özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Tasarım parametreleri ve özellikleri.

Parametre	Değer
Anma gücü (W)	2500
Frekans (Hz)	50
Kutup sayısı	14
Stator dış çapı (mm)	280
Oluk sayısı	84

Tablo 3'te verilen özelliklerde tasarlanan generatörün nominal çalışma koşulları altında çalıştırılması ile elde edilen faz geriliminin dalga formu Şekil 2a'da verilmiştir. Bu dalga formunun Fourier analizlerinde elde edilen harmonik ve ara harmonik spektrumu da Şekil 2b'de verilmiştir.



Şekil 2. Endüklenen gerilim dalga formu ve harmonik spektrumu

Şekil 2b'de verilen harmonik spektrumu incelendiğinde, daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere ara-harmoniklerin etkilerinin en az harmonik etkisi kadar olduğu görülebilecektir. Örneğin 5'inci harmoniğin alt ve üst ara-frekanslarında bulunan 4,5'inci ve 5,5'inci ara harmonik değerleri, 5'inci harmonik değerine göre daha büyük seviyededir. Çalışma kapsamında farklı harmonik ve ara-harmonik gerilim genlik değerleri Şekil 2b'de verilmiş, ana bileşen gerilim değerine göre harmonik ve ara-harmonik seviyelerinin oranları da Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Farklı bileşenlere ait harmonik ve ara-harmonik oranları

Bileşen	Oran (%)	Bileşen	Oran (%)
1 (Temel Bileşen)	100	15,5	0,42
3,5	10,27	17	0,54
4,5	5,19	17,5	0,66
5	1,29	19	0,76
5,5	3,32	19,5	0,31
7	1,6	21,5	0,15
8,5	2,67	23	0,18
11	1,92	23,5	0,43
11,5	0,81	25	0,72
13	0,51	25,5	0,59

5. Sonuç ve Öneriler

Elektrik enerji sistemleri, bağlı yüklerin sorunsuz çalışabilmesi için belirli kalite koşullarını sağlamalıdır. Kalite kavramı hem üretim hem tüketim tarafında ayrı ayrı incelenmelidir. Bu çalışmada, elektrik enerjisi üretim ünitelerinden biri olan SMSG'nin harmonik ve ara-harmonik analizi yapılmıştır. Bu kapsamda öncelikle bir generatör tasarımı yapılmış ve bu makina nominal koşullarda çalıştırılmıştır. Endüklenen gerilim dalga değerleri kullanılarak FFT analizi yapılmış, harmonik ve ara-harmonik değerleri elde edilmiştir.

Elde edilen değerler incelendiğinde, elektrik makinaları çalışmalarında literatürde fazla yer bulmayan ara-harmonik değerlerinin, belirli seviyelerde harmonik değerlerinden yüksek çıktığı görülmüştür. Özellikle 3,5-4,5-5,5 ve 8,5'inci ara-harmonikler baskın çıkmıştır. Ana harmoniklerden 5'inci harmonik bileşenin oranı %1,29 iken ara-harmonik olan 5,5'inci bileşenin oranı % 3,32 olarak belirlenmiştir. Buna göre gerek tasarım gerekse işletme aşamalarında harmoniklerin yanı sıra ara-harmonik analiz ve filtreleme çalışmalarına da önem verilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Referanslar

- [1] Elektrik Üretim Sektör Raporu 2010, <http://www.euas.gov.tr/>Ocak 2011.
- [2] Dalcalı, A., “A Comparative Study of PM Synchronous Generator for Micro Hydropower Plants”, *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9, 17-22, 2021.
- [3] Hepbasli, A., Ozalp, N., "Present Status of Cogeneration", *Energy Sources*, 24(2), 169-177, 2002.
- [4] TEİAŞ, <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>, Erişim: 11. 08.2021..
- [5] Özbay, H., Dalcalı, A., “Effects of COVID-19 on electric energy consumption in Turkey and ANN-based short-term forecasting”, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 29, 78-97, 2021.
- [6] <https://enerji.gov.tr/eigm-raporlari>, Erişim: 10.08.2021.
- [7] Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023), <http://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2019/07/OnbirinciKalkinmaPlani.pdf>, Erişim: 12/08/2021.
- [8] Masoum M. A. S., Fuchs, E. F., “Power Quality in Power Systems and Electrical Machines”, Elsevier, USA, 2015
- [9] Özer, İ., Efe, S. B., Özbay, H., “CNN / Bi-LSTM-based deep learning algorithm for classification of power quality disturbances by using spectrogram images”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, e13204, 1-16, 2021.
- [10] Rüstemli, S., Cengiz, M. S., “Active filter solutions in energy systems”, *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 23, 1587–1607, 2015.
- [11] Sankaran, C., “Power Quality,” CRC Press, USA, 2002.
- [12] Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O., “Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2003.
- [13] Başman, F., “Elektrik Enerji Sistemlerinde Harmonik ve Filtreleme”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2006.

- [14] Moradi, A., Yaghoobi, J., Alduraibi, A., Zare, F., Kumar, D., Sharma, R., “Modelling and prediction of current harmonics generated by power converters in distribution networks”, *IET Gener. Transm. Distrib.* 15, 2191–2202, 2021.
- [15] Kurt, E., Gör, H., Döner, U., “Electromagnetic design of a new axial and radial flux generator with the rotor back-irons”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(17), 7019-7026, 2016.
- [16] Gör, H., Kurt, E., “Waveform characteristics and losses of a new double sided axial and radial flux generator”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(29), 12512-12524, 2016.
- [17] Kindl, V., Ferkova, Z., Cermak, R., “Spatial Harmonics in Multi-Phase Induction Machine”, 2020 ELEKTRO, Italy, 2020.
- [18] Silva, A. M., Ferreira, F. J. T. E., Falcao, G., Rodrigues, M., “Novel Method to Minimize the Air-Gap MMF Spatial Harmonic Content in Three-Phase Windings”, 2018 XIII International Conference on Electrical Machines, 2504-2510, Greece, 2018.
- [19] Leonardo, L. D., Popescu, M., Tursini, M., Parasiliti, F., Carbonieri, M., “Transient Modeling of Induction Motors considering Space Harmonics”, *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2553-2559- Sweden, 2020.
- [20] Wakileh, G. J., “Harmonics in rotating machines”, *Electric Power Systems Research*, 66, 31-37, 2003.
- [21] Efe, S. B., “Analysis of power system interharmonics,” *International Engineering, Science and Education Conference*, 1039–1042, 2016.
- [22] Efe, S. B., “Harmonic filter application for an industrial installation,” *13th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems*, 31–34, 2015.
- [23] Interharmonic Task Force Working Document, <https://grouper.ieee.org/groups/harmonic/iharm/>, Erişim: 28. 08. 2021.
- [24] Hanzelka, Z., Bien, A., “Power Quality Application Guide- Harmonics, Interharmonics”, *Copper Development Association*, 2004.
- [25] Fouladgar, J., Chauveau, E., “The Influence of the Harmonics on the Temperature of Electrical Machines”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(5), 1644- 1647, 2005
- [26] Dlala, E., Bottauscio, O., Chiampi, M., Zucca, M., Belahcen, A., Arkkio, A., “Numerical Investigation of the Effects of Loading and Slot Harmonics on the Core Losses of Induction Machines”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(2), 1063- 1066, 2012.
- [27] Kindl, V., Cermak, R., Ferkova, Z., Skala, B., “Review of Time and Space Harmonics in Multi-Phase Induction Machine”, *Energies*, 13, 1-17, 2020.

- [28] Mai, A., Wagner, B., Streit, F., “Elimination of Current Harmonics in Electrical Machines with Iterative Learning Control”, 10th International Electric Drives Production Conference, Germany, 2020.
- [29] Gnaciński, P., Pepliński, M., Hallmann, D., “Currents and Power Losses of Induction Machine Under Voltage Interharmonics”, 21st European Conference on Power Electronics and Applications, Italy, 2019.
- [30] Gnaciński, P., Pepliński, M., Murawski, L., Szeleziński, A., “Vibration of Induction Machine Supplied With Voltage Containing Subharmonics and Interharmonics”, IEEE Transactions on Energy Conversion, 34(4), 1928-1937, 2019.
- [31] Gnaciński, P., Hallmann, D., Klimczak, P., Muc, A., Pepliński, M., “Effects of Voltage Interharmonics on Cage Induction Motors”, Energies, 14, 1-13, 2021.
- [32] Fuchs, E. F., Roesler, D. J., Masoum, M. A. S. “Are Harmonic Recommendations According to IEEE and IEC Too Restrictive?”, IEEE Transactions on Power Delivery, 19(4), 1775-1786, 2004.
- [33] Ghaseminezhad, M., Doroudi, A., Hosseinian, S. H., Jalilian, A., “Analysis of voltage fluctuation impact on induction motors by an innovative equivalent circuit considering the speed changes”, IET Generation, Transmission & Distribution, 11(2), 512-519, 2017.
- [34] Ghaseminezhad, M., Doroudi, A., Hosseinian, S. H., Jalilian, A., “An Investigation of Induction Motor Saturation under Voltage Fluctuation Conditions”, Journal of Magnetism 22(2), 306-314, 2017.
- [35] Lee, J. I., Bang, T. K., Lee, H. K., Woo, J. H., Nah, J., Choi, J. Y., “Design of the High-Speed PMSG with Two Different Shaft Material Considering Overhang Effect and Mechanical Characteristics”, Appl. Sci., 11, 7670, 2021.