



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Deniz üstü rüzgar çiftlikleri ile entegre sistemler için optimal pasif filtre tasarımları

Optimal passive filter designs for offshore wind farm

Yazar(lar) (Author(s)): Alp KARADENİZ¹

ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0002-0899-6581>

To cite to this article: Karadeniz A., “Deniz üstü Rüzgar Çiftlikleri ile Entegre Sistemler İçin Optimal Pasif Filtre Tasarımları”, *Journal of Polytechnic*, 28(5): 1399-1414, (2025).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Karadeniz A., “Deniz üstü Rüzgar Çiftlikleri ile Entegre Sistemler İçin Optimal Pasif Filtre Tasarımları”, *Politeknik Dergisi*, 28(5): 1399-1414, (2025).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1493020

Deniz üstü Rüzgar Çiftlikleri ile Entegre Sistemler İçin Optimal Pasif Filtre Tasarımları

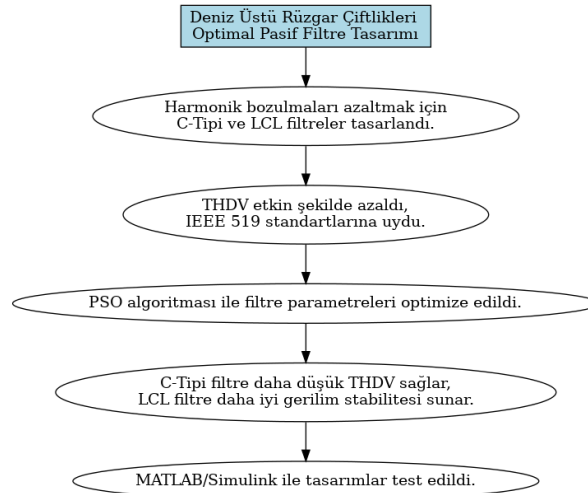
Optimal Passive Filter Designs for Offshore Wind Farm

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ C-Tipi ve LCL filtreler harmonik bozulmaları azaltmak ve güç kalitesini artırmak için tasarlanıp optimize edilmiştir.
- ❖ Önerilen filtreler, THDV'yi düşürerek IEEE 519 standartlarını sağlamış ve şebeke stabilitesini artırmıştır.
- ❖ PSO algoritması, filtre parametrelerini optimize ederek güç kayıplarını azaltıp harmonik azaltımını maksimize etmiştir.
- ❖ C-Tipi filtreler daha düşük THDV, LCL filtreler ise daha iyi gerilim stabilitesi ve güç faktörü sunmuştur.
- ❖ MATLAB/Simulink simülasyonları, filtrelerin etkinliğini doğrulayıp temel bileşenleri modellemiştir.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışma, denizüstü rüzgar çiftliklerinde kullanılan DFIG türbinleri için harmonik analiz ve pasif filtre tasarımı ele alarak, IEEE 519 standartlarına uygun şekilde güç kalitesini iyileştirmek amacıyla PSO algoritmasını kullanmaktadır. / This study focuses on harmonic analysis and passive filter design for DFIG turbines used in offshore wind farms, utilizing the PSO algorithm to improve power quality in compliance with IEEE 519 standards.



Şekil. Makalenin görsel özeti / Figure. The Graphical Abstract of the paper).

Amaç (Aim)

Harmonik bozulmaları analiz ederek güç kalitesini artırmak için optimal pasif filtre tasarlamak. / To analyze harmonic distortions and enhance power quality through optimal passive filter design.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

DFIG tabanlı rüzgar çiftliği modellenmiş, C-Tipi ve LCL filtreler PSO algoritmasıyla optimize edilmiştir. / A DFIG-based wind farm was modeled, and C-Type & LCL filters were optimized using the PSO algorithm.

Özgünlük (Originality)

IEEE 519 uyumlu filtreler farklı rüzgar hızlarında test edilerek karşılaştırılmıştır. / IEEE 519-compliant filters were tested and compared under varying wind speeds.

Bulgular (Findings)

C-Tipi filtreler daha düşük THDV, LCL filtreler daha iyi gerilim stabilitesi sağlamıştır. / C-Type filters achieved lower THDV, while LCL filters improved voltage stability.

Sonuç (Conclusion)

IEEE 519'a uygun filtreler güç kalitesini artırmış, hibrit filtreleme önerilmiştir. / IEEE 519-compliant filters improved power quality; hybrid filtering is recommended.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Çalışma etik kurul veya özel izin gerektirmemektedir. / This study does not require ethical approval or special permissions.

Deniz Üstü Rüzgar Çiftlikleri ile Entegre Sistemler İçin Optimal Pasif Filtre Tasarımları

Araştırma Makalesi / Research Article

Alp KARADENİZ¹

¹Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye.

(Geliş/Received: 31.05.2024 ; Kabul/Accepted:11.02.2025 ; Erken Görünüm/Early View: 03.03.2025)

ÖZ

Günümüzde rüzgar enerjisi, elektrik üretiminin fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltma ve çevresel sürdürülebilirliği artırma potansiyeli nedeniyle enerji pazarında önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle, denizüstü rüzgar çiftlikleri, karasal rüzgar çiftliklerine kıyasla daha yüksek ve daha tutarlı rüzgar hızlarına erişim sağlayarak daha verimli enerji üretimi sunar. Ancak, denizüstü rüzgar çiftliklerinin elektrik şebekelerine entegrasyonu, harmonik bozulma ve aşırı veya düşük gerilim seviyeleri gibi çeşitli güç kalitesi problemleri ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada, (Tip 3) çift beslemeli indüksiyon jeneratörü (DFIG) türbini kullanan denizüstü rüzgar çiftliği için harmonik analiz ve pasif filtre tasarımları ele alınmıştır. İlk olarak, DFIG içeren bir denizüstü rüzgar türbini MATLAB Simulink ortamında modellenmiştir. İkinci olarak, sistemin harmonik kirliliği analiz edilmiştir. Ardından, iki pasif filtre tipi olan C-tipi ve LCL filtreleri optimal olarak tasarlanmıştır. Çalışılan optimizasyon tasarım yaklaşımı, toplam gerilim harmonik bozulması, gerilim seviyeleri ve filtre güç kayıplarını IEEE 519 standartlarında tanımlandığı şekilde minimize etmeyi amaçlamaktadır. Buna ek olarak, literatürdeki en başarılı algoritmalarından biri olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması, optimal filtre çözümlerini bulmak için kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Denizüstü Rüzgar Çiftlikleri, Optimizasyon, Harmonikler, Pasif Filtreler, Güç Kalitesi.

Optimal Passive Filter Designs for Offshore Wind Farm

ABSTRACT

Today, wind energy plays a significant role in the energy market due to its potential to reduce the dependence of electric power generation on fossil fuels and enhance environmental sustainability. Particularly, offshore wind farms offer more efficient energy generation by providing access to higher and more consistent wind speeds compared to onshore wind farms. However, the integration of offshore wind farms into electrical grids presents various power quality problems, such as harmonic distortion and under or over-voltage levels. In this study, harmonic analysis and passive filter designs are addressed for an offshore wind farm utilizing a type 3 doubly-fed induction generator (DFIG) turbine. Firstly, an offshore wind turbine with DFIG is modelled in the MATLAB Simulink environment. Secondly, the harmonic pollution of the system is analyzed. Then, two passive filter types, C-type and LCL filters, are optimally designed. The studied optimization design approach aims to minimize the total voltage harmonic distortion and voltage levels in p.u. as defined in IEEE 519 standards. In addition to that, one of the most widely used metaheuristic optimization algorithm in the literature, the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, is employed to find optimal filter solutions.

Keywords: Offshore Wind Farms, Type 3 DFIG, Optimization, Harmonics, Passive Filters, C-Type, LCL Filter.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyanın iklim değişikliği ile mücadelede karbon nötrlüğüne ulaşmaya odaklanmasıyla birlikte, yenilenebilir enerji, özellikle denizüstü rüzgar enerjisi, önem kazanmaktadır. Petrol şirketleri yenilenebilir enerjiye yatırım yapmakta, politika yapıcılar ise yeni teknolojileri benimsemekte ve denizüstü rüzgar enerjisi, genişleyen kapasitesi ve karasal rüzgar çiftliklerine kıyasla daha az görsel etkisi sayesinde öne çıkmaktadır. Yüzer rüzgar türbinlerinin rekabetçi hale gelmesiyle, denizüstü rüzgar enerjisinin büyüme eğrisi hem denizüstü rüzgar çiftliklerinin sayısının hem de boyutlarının hızla artmasıyla devam etmektedir [1], [2].

Rüzgar Güç Santralleri (RGS), şebekede güvenilirliği sağlamak için sabit voltaj ve frekans gibi yüksek güç

kalitesi standartlarını korumak zorundadır [3-5]. Harmonik bozulma [6], bu bağlamda önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, rüzgar türbini jeneratörleri dört tipe ayrılır; Tip 1 ve Tip 2, yumuşak başlatıcılar kullanarak ani akımları hafifletirken, Tip 3 ve Tip 4, güç dönüştürücüleri ile donatılmıştır ve özellikle denizüstü rüzgar çiftliklerinde yaygın olan Tip 3 (çift beslemeli indüksiyon jeneratörü) jeneratörleri kullanılmaktadır [7], [8].

Bu nedenle, denizüstü rüzgar çiftlikleri ile entegre sistemlerde harmonik bozulmayı hafifletmek için harmonik filtrelerin kullanımı üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır [2, 6, 7, 9-12].

Bu çalışmalardan birinde [2], denizüstü rüzgar çiftliklerinde harmoniklerin kapsamlı analizi ele alınmış,

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta akaradeniz@balikesir.edu.tr

rüzgar enerjisinin enerji krizlerini ve çevre kirliliğini hafifletmedeki rolü vurgulanmıştır. Matlab/Simulink'te detaylı harmonik analiz ve model doğrulaması yoluyla potansiyel rezonans sorunları ele alınmış ve harmonik azaltma stratejileri değerlendirilmiştir. Ana bulgular arasında rüzgar hızı ve kontrol sistemlerinin harmonik üretim üzerindeki etkisi, rezonans noktalarının belirlenmesi ve C-tipi ve aktif güç filtrelerinin harmonikleri hafifletmedeki etkinliği yer almaktadır.

Ayrıca, [6] numaralı çalışmada denizüstü rüzgar santrallerinde (DRS'ler) harmonik sorunları hibrit filtreler kullanarak ele alınmıştır. Hibrit filtrenin rezonansları hafifletme yeteneğini ve tesis içindeki yerleşimini optimize eden model analiz veya harmonik model rezonans analizi temelinde filtre bağlantı noktasını belirleme yöntemi tanıtılmıştır. 400 MW'lık bir denizüstü RGS modelinde test edilen önerilen çözüm, hibrit filtrenin rezonansları hafifletme yeteneğini ve yerleşimini optimize ettiğini göstermektedir.

Başka bir çalışmada [7], rüzgar güç santrallerinde harmonik bozulmaları azaltmak için pasif filtrelerin optimizasyonu üzerine odaklanılmıştır. Anholt Denizüstü Rüzgar Çiftliği test vakası olarak kullanılarak, MATLAB Simulink'te rüzgar güç sistemi modellenmiş ve harmonikleri analiz edilmiştir. C-Tipi filtre ve anahtarlama frekansı tuzak filtresi en etkili olanı olarak belirlenmiş ve çeşitli pasif filtre konfigürasyonları harmonik bozulma seviyeleri, kayıplar ve reaktif güç kapasitesi gibi faktörlere göre optimize edilmiştir.

Buna ek olarak, [9] numaralı çalışmada denizüstü rüzgar santrallerinin harmonik çalışmalarını sistem düzeyinde zaman domain simülasyonları kullanarak inceleyen bir çerçeve sunulmuştur. 400 MW'lık Anholt denizüstü rüzgar santrali ve 3.6 MW türbinleri referans alınarak, sekiz LCL-filtre konfigürasyonunun karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışma, LCL filtresi ayarı için yaygın uygulamaları incelemekte ve filtre özelliklerini iyileştirmek için kapasitif dalların varyasyonlarını araştırmakta olup, ek dalların kayıpları ve harmonik içeriği azaltabileceğini göstermektedir.

Başka bir çalışmada [10], Tip-IV rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlı dönüştürücü kontrolüne aktif filtrelerin entegrasyonu önerilmiştir. Ekstra eleman teoremi kullanılarak, aktif filtreler harmonikleri etkili bir şekilde azaltmak ve sistemde yeterli kararlılık marjını sağlamak için ayarlanmıştır. 270 MW'lık bir denizüstü RGS'de gerçekleştirilen bir vaka çalışması, dönüştürücü ve şebeke gerilim harmoniklerinin RGS düğümlerinde belirlenen planlama seviyelerinin altında başarılı bir şekilde bastırıldığını göstermiştir.

Bir diğer çalışmada [11], denizüstü rüzgar türbinlerinin operasyonel model analizi (OMA) için geliştirilmiş bir Kalman filtresi tabanlı stokastik alt uzay tanımlama (KF-SSI) yöntemi tanıtılmıştır. Birleştirme adımı eklenerek, benzer çevresel koşullar altındaki birden fazla veri seti kullanılarak mod tanımlama hassasiyeti artırılmıştır. Geliştirilmiş çerçeve, multi-MW operasyonel bir denizüstü rüzgar türbininden alınan saha verileri

kullanılarak doğrulanmış ve diğer OMA yöntemlerine kıyasla daha düşük varyans ve gelişmiş kararlılıkla bükülme modlarının doğru tanımlandığını göstermiştir.

Ek olarak, [12] numaralı çalışmada hem şebekeye bağlı hem de izole hibrit yenilenebilir mikro şebekelerde toplam harmonik bozulmayı (THD) azaltmayı hedefleyen pasif filtrelerin kullanımı ele alınmıştır. Çalışma, filtrelerin toplam maliyetini ve THD'yı aynı anda minimize etmek için çok amaçlı çekirge optimizasyon algoritması (MOGOA) kullanmakta ve Pareto çözümlerini TOPSIS prosedürleriyle daha da iyileştirmektedir.

Diğer bir çalışmada [13], denizüstü rüzgâr çiftliklerinde harmonik bozulmayı azaltmak için yapay zeka tabanlı filtreleme yöntemlerini kullanmaktadır. Yapay zeka destekli optimizasyon, geleneksel pasif filtrelerle kıyasla daha dinamik ve adaptif bir harmonik azaltma performansı sunmaktadır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin harmonik kirliliği IEEE 519 standartlarına uygun şekilde önemli ölçüde azalttığını göstermektedir.

Başka bir çalışmada [14], yenilenebilir enerji sistemlerinde pasif filtrelerin optimizasyonu için hibrit algoritmaların kullanımını incelemektedir. Genetik algoritma ve parçacık sürü optimizasyonunun birleştirilmesiyle elde edilen yaklaşım, filtre parametrelerinin daha hassas şekilde belirlenmesini sağlamaktadır. Yapılan testler, önerilen yöntemin toplam harmonik bozulmayı (THD) minimize ederek sistem stabilitesini artırdığını ortaya koymaktadır.

Son olarak diğer bir çalışmada [15], akıllı şebeke uygulamaları için uyarlanabilir LCL filtre tasarımını ele almakta ve sistem dinamiklerine göre filtre parametrelerinin otomatik ayarlanmasını önermektedir. Gerçek zamanlı optimizasyon algoritmaları sayesinde, filtrelerin farklı işletme koşullarına göre uyum sağlayarak güç kalitesini artırdığı gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları, adaptif LCL filtre tasarımının geleneksel sabit parametrelili filtrelerle kıyasla daha iyi harmonik azaltma performansı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Yukarıda belirtilen literatür özetine göre, Tip 3 rüzgar çiftlikleri ile entegre sistemler için yapılan bu çalışmaların genel olarak hibrit filtreler ve kontrol stratejileri ile ilgili olduğu söylenebilir. Ancak, [12] makalesinde çeşitli yenilenebilir güç kaynaklarına odaklanılmış olup, denizüstü rüzgar güç santralleri bu modeller arasında yer almamakta ve literatürde oluşturulan denizüstü rüzgar türbini modeli için pasif filtre türlerinin (C-tipi ve LCL) harmonik azaltma performansının karşılaştırmalı bir değerlendirmesi bulunmamaktadır. Bu çalışmada, Tip 3 denizüstü rüzgar çiftliklerini içeren sistemler için yüksek frekans harmonikleri için etkili bir şekilde kullanılabilecek C-tipi ve LCL filtrelerinin optimal tasarımı ele alınmıştır. İlk olarak, gerilim dalga formunun toplam harmonik bozulmasını (THDV), gerilim büyüklüğünün etkin değerini ve pasif filtrenin gücünü içeren bir amaç

fonksiyonu oluşturulmuştur. Optimal filtre parametrelerini bulmak için literatürde kendini kanıtlamış bir üst-sezgisel optimizasyon algoritması olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması, amaç fonksiyonunu çözmek için kullanılmıştır. Ayrıca, sistem performansı üzerindeki filtre parametre etkileri güç kalitesi gereksinimlerine (THD, gerilim seviyesi, güç faktörü ve güç değerleri) göre incelenmiş ve performans analizi çalışmada sunulmuştur.

2. SİSTEM MODELİ (MODEL OF THE SYSTEM)

Bu bölümde, incelenen sistemin ve rüzgar çiftliğinin modellenmesi tanıtılmaktadır.

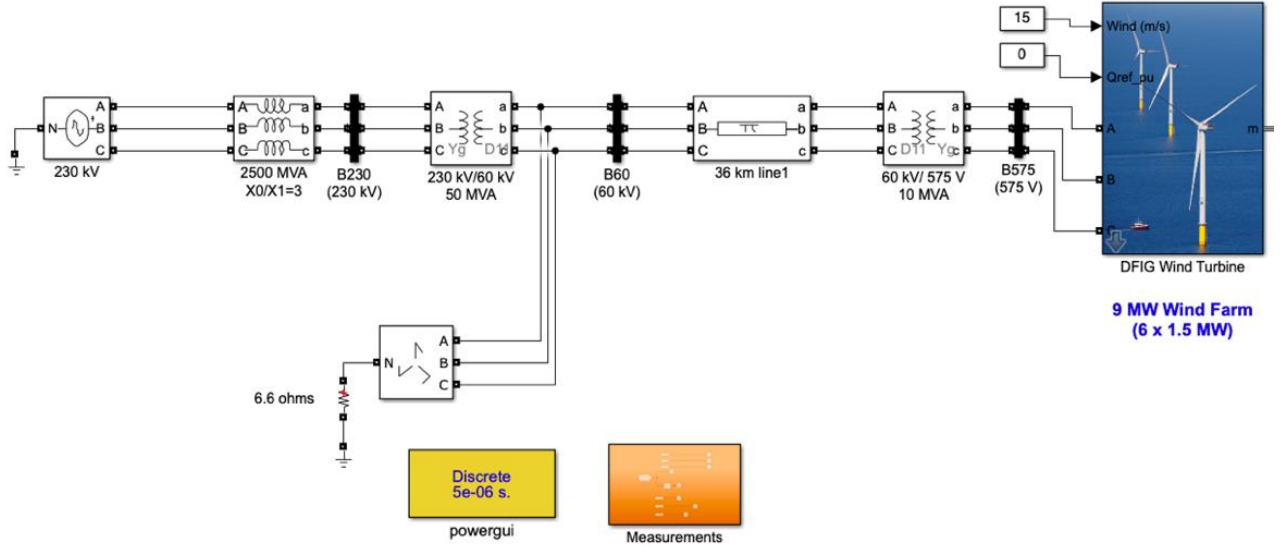
2.1. Güç Sistemi Modelleme (Modelling of The Power System)

Tip 3 DFIG türbinlerine sahip denizüstü rüzgar çiftliğini içeren incelenen sistemin şematik diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Bu sistem, 230 kV Şebeke sistemi, 230/60 kV Y/Δ bağlı 60 MVA transformatör, 60kV/575V Δ/Y bağlı

10 MVA transformatör ve denizüstü rüzgar güç sistemi için 36 km denizaltı kablosu içermektedir.

Sistemde, iki güç transformatörü bulunmaktadır. Her iki transformatörün model parametreleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi, ilk transformatörün 230/60 kV, 60 Hz, Y/Δ bağlantısı ve 60 MVA gibi plaka özellikleri bulunmaktadır. Sarımlarının dirençleri ve endüktansları ile manyetizasyon indüktansı sırasıyla 0.0027 p.u, 0.08 p.u ve 500 p.u'dur. Ek olarak, ikinci transformatörün 60kV/575V, Δ/Y bağlantısı ve 10 MVA gibi plaka özellikleri vardır. Birincil sargısının direnci 0.000833 p.u. ve endüktansı 0.025 p.u. olan bu transformatörün ikincil sargısı için bu parametreler sırasıyla 8.33e-4 p.u ve 0.08 p.u'dur ve manyetizasyon indüktansı 500 p.u'dur. Ayrıca, sistemde, test denizüstü rüzgar çiftliği için kullanılan 36 kilometre uzunluğundaki denizaltı kablunun (Şekil 3) parametreleri ABB veri [16, 17] kataloğundan alınmıştır. Bunlar Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.

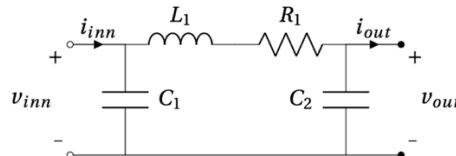
Ayrıca, sıfır sıra değerleri tüm kablolar için aynıdır ve Tablo 2'de görülebilir.



Şekil 1. İncelenen sistemin Simulink modeli (Simulink model of the system).



Şekil 2. Modelde bulunan iki transformatörün model parametreleri (The model parameters of the Transformers).



Şekil 3. Denizaltı kablosu π -modeli (The π -model of the system).

Tablo 1. ABB veri sayfasından alınan kablo verileri (The ABB cable data).

Kablo Tipi	R [$m\Omega/km$]	L [mH/km]	C [$\mu F/km$]
500 mm ² Cu kablo	33.6	0.41	0.24

Tablo 2. ABB veri sayfasından alınan kablo verilerinin sıfır-sıra değerleri (Zero-order values of the cable).

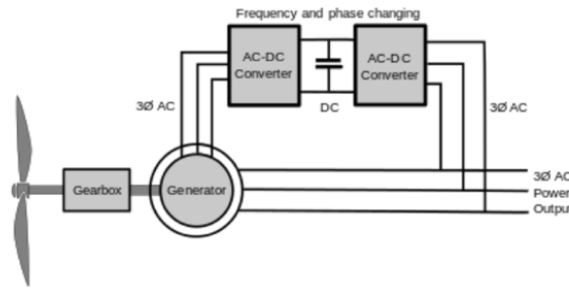
R_0	1000 Ω/km
L_0	4.1264 mH/km
C_0	7.7519 nF/km

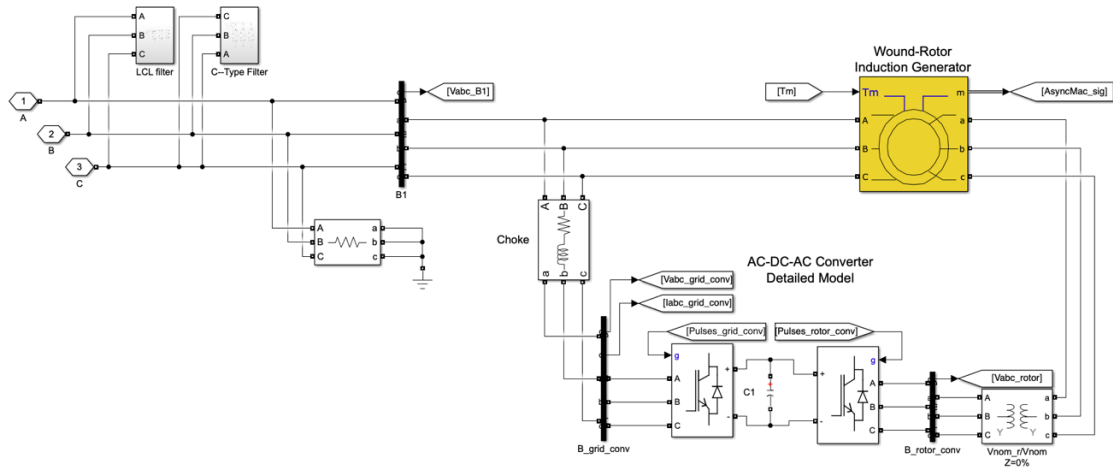
Bu veriler ile deniz altı kablomuz Şekil 3'te gösterilen bir π -modeli olarak modellenmiştir. Ayrıca, bu çalışmada yürütülen analiz dengeli bir şebeke içinde sabit durum koşullarında gerçekleştirildiğinden, sıfır-sıra parametreleri sonucu etkilemez [18].

2.2. Rüzgar Enerjisi Üretim Sistemi Modellemesi (Modelling Of The Wind Power System)

Pratik senaryolarda, DFIG, kolay kurulum, maliyet etkinliği, değişken hızlı, sabit frekanslı işletme ve aktif ve reaktif gücün bağımsız olarak düzenlenmesi gibi avantajları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bir DFIG'in şematik temsili Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu yapılandırma, stator doğrudan güç şebekesine bağliken, rotor bir rotor tarafı dönüştürücüsü (RSC) ve bir şebeke tarafı dönüştürücüsü (GSC) içeren geriye dönük bir gerilim kaynağı dönüştürücüsü aracılığıyla güç şebekesine bağlidir. RSC, aktif ve reaktif gücün teslimatını yönetmek ve güç çekimini optimize etmek için kullanılır. Buna karşılık, GSC, aktif ve reaktif güç teslimatını düzenlemek ve doğru akım (DC) bağlantı gerilimini korumakla sorumludur [19].

İncelenen sistemde, altı adet 1.5 megavatlık rüzgar türbininden oluşan, toplamda 9 megavat kapasiteli bir rüzgar çiftliği, 60 kilovoltluk bir dağıtım sistemine bağlanmıştır. Bu sistem, 36 kilometrelik bir kabloyla 230 kilovoltluk bir şebekeye elektrik iletimi sağlamaktadır. Her bir rüzgar türbini, bir çift beslemeli indüksiyon jeneratörü (DFIG) kullanmaktadır. Bu jeneratör, bir sarılmış rotor indüksiyon jeneratörü ve bir AC/DC/AC IGBT tabanlı PWM dönüştürücülerden oluşur. Stator sargısı doğrudan 60 hertzlik şebekeye bağlanırken, rotor AC/DC/AC dönüştürücü aracılığıyla değişken frekanslı giriş alır. DFIG teknolojisi, türbin hızını optimize ederek düşük rüzgar hızlarından maksimum enerjiyi çıkarmayı ve rüzgar darbeleri sırasında mekanik stresi en aza indirmeyi amaçlar [19]. Simülasyonlar için rüzgar hızı sabit olarak 15 m/s olarak tutulmuştur. Kontrol sistemi, hızı 1.2 birim (pu) seviyesinde korumak için bir tork kontrolörü kullanır. Rüzgar türbininden reaktif güç çıkışı 0 MVar olarak düzenlenir. 15 m/s rüzgar hızında, türbin çıkış gücü, nominal gücünün 1 p.u, pitch açısı 8.7 derece ve jeneratör hızı 1.2 p.u'dür. Şekil 5'te gösterilen detaylı model ve Tablo 3'te sunulan çift beslemeli indüksiyon jeneratörünün (DFIG) parametreleri, Simulink kütüphanesinden alınmıştır [20].

**Şekil 4.** Bir DFIG türü sistemin şematik temsili (The DFIG system).



Şekil 5. DFIG rüzgar türbin bloğunun Simulink gösterimi (Simulink data of wind türbine with DFIG).

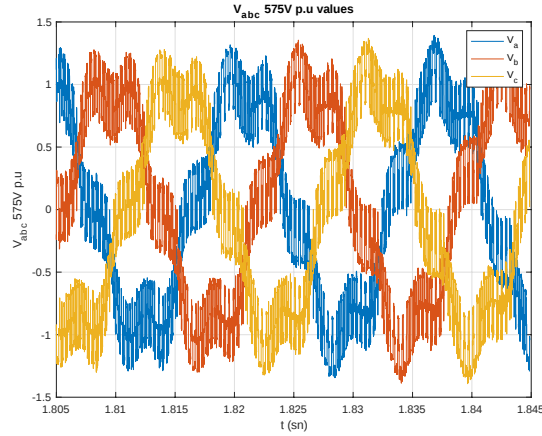
Tablo 3. DFIG Rüzgar türbin parametreleri (The parameters of DFIG).

Nominal Güç	1.5 MW x 6	Nominal DC gerilimi	1150 V
Nominal Hız	12 m/s	Hat filtre kondansatörü (Q=50)	50e3 F
Nominal Gerilim	575V	Şebeke tarafı dönüştürücü nominal gerilimi	575 V
Nominal Frekans	60 Hz	DC verici kondansatörü	0.1 F
Nominal DC verici gerilimi	1150 V	Şebeke tarafı bağlantı indüktansı [L, R]	0.1 H 0.01 Ohm
Stator, rotor sızıntı endüktansı	0.18 p.u. 0.16 p.u.	Mil yay sabiti	1.1
Stator, rotor direnci	0.023 p.u. 0.016 p.u.	Rüzgar türbini atalet sabiti H (s)	0.432s
Anahtarlama Frekansı	2700 Hz	Mil taban hızı	125.66 rad/s

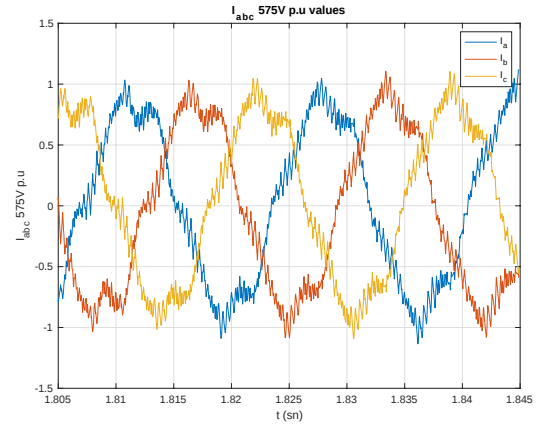
2.3. Filtresiz Durum İçin Sistemin Harmonik Analizi (Without Filter Harmonic Analysis Of The System)

Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8, sırasıyla, pasif filtre olmadan sistemdeki 575 V, 60 kV ve 230 kV baralarında gerilim ve akımın dalga şekillerini ve harmonik spektrumlarını göstermektedir. İlgili gerilimlerin toplam harmonik

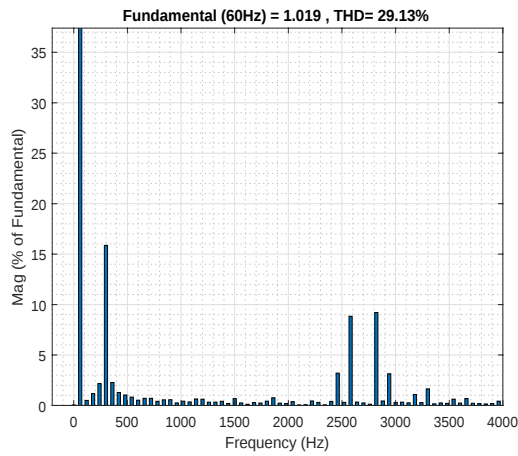
bozulma (THD) değerleri sırasıyla %29.13, %15.46 ve %1.74 iken, ilgili akımların THD değerleri sırasıyla %13.19, %89.28 ve %85.37'dir. Dolayısıyla, bir filtersiz sistemde yüksek derecede bozulmuş gerilim ve akımlar olduğu ve bunların THD değerlerinin IEEE-519 standardında belirtilen sınırların üzerinde olduğu görülebilir [21].



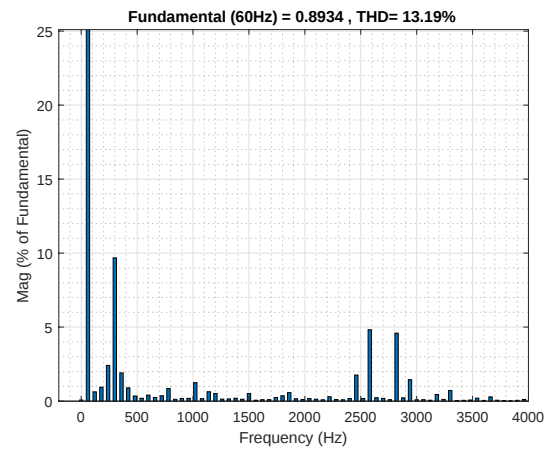
a



b

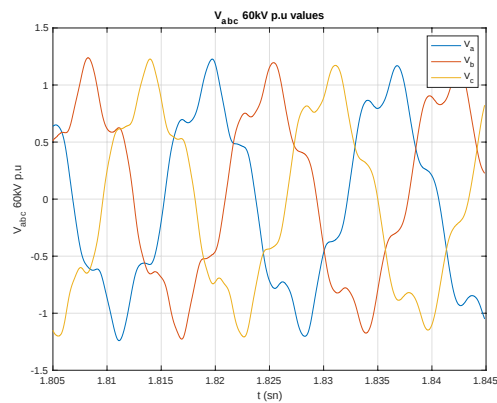


c

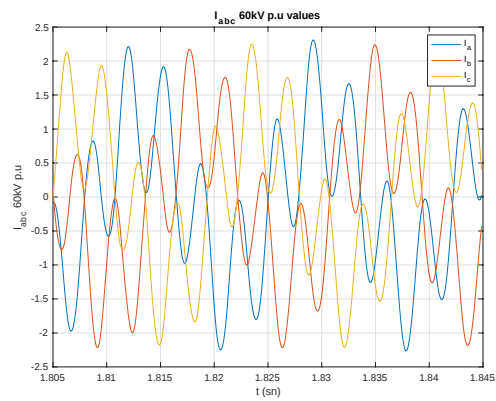


d

Şekil 6. Filtre olmadan sistemin 575 V barasındaki (a) gerilim dalga formları, (b) gerilim harmonik spektrumları, (c) akım dalga formları ve (d) akım harmonik spektrumları (Voltage waveforms (a), voltage harmonic spectra (b), current waveforms (c), and current harmonic spectra (d) at the 575 V bus of the system without a filter).

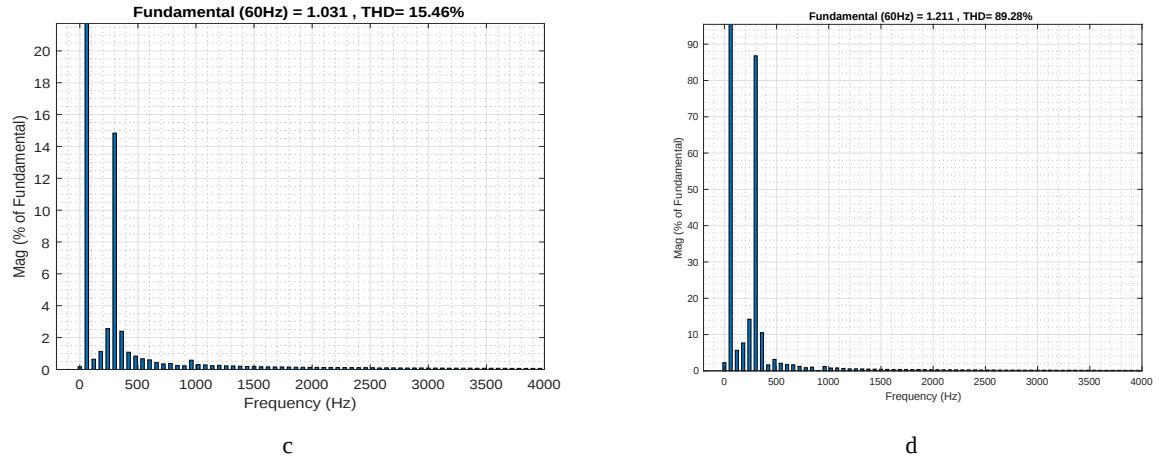


a

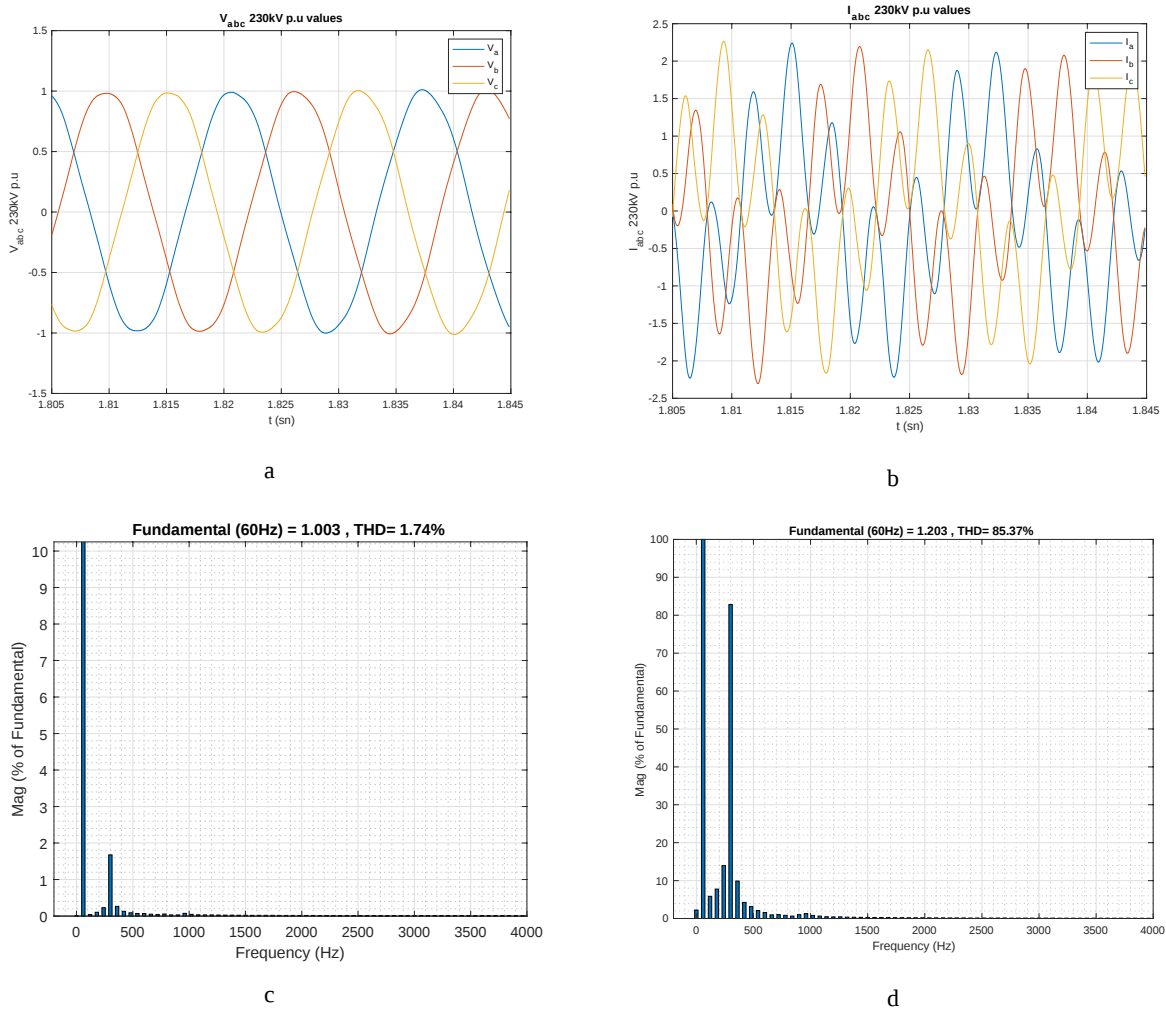


b

Şekil 7. Filtre olmadan sistemin 60 kV barasındaki (a) gerilim dalga formları, (b) gerilim harmonik spektrumları, (c) akım dalga formları ve (d) akım harmonik spektrumları (Voltage waveforms (a), voltage harmonic spectra (b), current waveforms (c), and current harmonic spectra (d) at the 60 kV bus of the system without a filter).



Şekil 7. (Devam). Filtre olmadan sistemin 60 kV barasındaki (a) gerilim dalga formları, (b) gerilim harmonik spektrumları, (c) akım dalga formları ve (d) akım harmonik spektrumları (Voltage waveforms (a), voltage harmonic spectra (b), current waveforms (c), and current harmonic spectra (d) at the 60 kV bus of the system without a filter).



Şekil 8: Filtre olmadan sistemin 230 kV barasındaki (a) gerilim dalga formları, (b) gerilim harmonik spektrumları, (c) akım dalga formları ve (d) akım harmonik spektrumları (Voltage waveforms (a), voltage harmonic spectra (b), current waveforms (c), and current harmonic spectra (d) at the 230 kV bus of the system without a filter).

3. OPTİMAL FİLTRE TASARIMI VE AMAÇ FONKSİYONU OLUŞTURULMASI (OPTIMAL İLTRE DESIGN AND OBJECTİVE FUNCTION)

Bu bölümde, sistemin harmonik azaltma için düşünülen filtre tipleri, optimal tasarımlarının formülasyonu ve optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan algoritma tanıtılmaktadır.

3.1. C Tipi Ve Lcl Filtrelerinin Tasarımı (The Design Of C-Type And Lcl Filters)

Bu çalışmada, yüksek dereceli harmonikler için yüksek frekanslarda telafi kapasitesine sahip iki pasif filtre türü olan C-tipi ve LCL filtreleri seçilmiştir. Şekil 9'da verilen eşdeğer devrelerine göre, kısaca aşağıda tanıtılmışlardır:

3.1.1. C-tipi filtre (The C-type filter)

C-tipi filtre, ikinci mertebeden bir filtre tasarımına dayanır ve temel harmonik kaybını azaltmak için ek bir kapasitans içerir. Ayrıca, C-tipi filtreler dört bileşenle yapılandırılır; X_{C1} , X_L , X_{C2} , and R . Endüktörün ve yardımcı kapasitörün reaktansı, X_L ve X_{C2} , temel frekans için aynı değere sahiptir. Bu nedenle, ana kapasitörün reaktansı, X_{C1} , temel frekansta voltaj regülasyonu için kapasitif reaktif güç sağlar. Filtre, X_{C1} , X_L ve X_{C2} 'nin eşdeğer değeriyle h_t harmonik sırasında tek bir ayarlanabilir filtre olarak davranır. Filtrede, filtrenin sönümlleme direnci, R , filtre kalitesinin (q) ayarlanması için bulunur. Devre parametreleri, h_t ve q arasındaki ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\vec{X}_{C2} = \frac{\vec{X}_{C1}}{h_t^2 - 1} \quad (1)$$

$$\vec{X}_L = \vec{X}_{C2} \quad (2)$$

$$R = \vec{X}_L * \frac{h_t}{q} \quad (3)$$

Denklem (1)-(3) kullanılarak, C-Tipi filtre parametreleri hesaplanır. $\vec{X}_{C1}$, h_t ve q optimizasyon algoritması

tarafından belirlenir ve X_L , X_{C2} ve R denklemler (1)-(3) kullanılarak hesaplanır.

3.1.2. Lcl filtre (The lcl filter design)

LCL filtre konfigürasyonu [22], dönüştürücüler ile şebeke arasındaki filtre olarak geniş çapta kullanılır çünkü dönüştürücü çıkış akımlarını harmonik konusunda arındırmak açısından etkilidir. Ayrıca, göreceli olarak küçük indüktör ve kapasitör değerleri ile üstün performans sergiler. LCL filtresi, daha düşük anahtarlama frekanslarında çalışarak IEEE-519 ve IEEE-1547 gibi standartlarda belirtilen harmonik kısıtlamalara uyarken daha yüksek harmoniklerin üstün şekilde bastırılmasını sağlar [23–25]. Tasarım prosedürü, kesme frekansı ve dönüştürücü indüktansı (L_{inv}) temel alınarak hesaplanan, Denklem (4)'te gösterilen filtre kapasitesinin (C_{filter}) belirlenmesi ile başlar.

$$C_{filter} = \frac{1}{(2\pi \cdot f_{cutoff})^2 \cdot L_{inv}} \quad (4)$$

Sönümlleme indüktansı, L_{damp} , Denklem (5) ile hesaplanır.

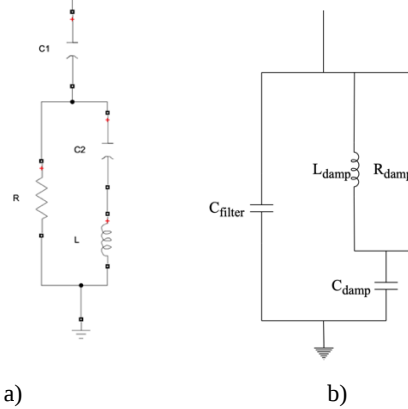
$$L_{damp} = 5 \cdot L_{inv} \quad (5)$$

Sönümlleme kapasitansı, C_{damp} , Denklem (6) ile hesaplanabilir.

$$C_{damp} = \frac{C_{filter}}{2} \quad (6)$$

Daha sonra, sönümlleme direnci, R_{damp} , Denklem (7) ile hesaplanabilir.

$$R_{damp} = \sqrt{\frac{L_{damp}}{C_{damp}}} \quad (7)$$



Şekil 9. Pasif filtre tasarımları a) C-Tipi filtre ve b) LCL Filtresi (Passive filter designs: (a) C-Type filter and (b) LCL filter).

Referans [22]'a göre, dönüştürücü indüktansını belirlemek için Denklem (8) kullanılabilir. Bu denklem,

DC-link gerilimi V_{DC} , anahtarlama frekansı f_{sw} ve dalgalanma akımının pik-pik genlik I_{rpp} gibi çeşitli

parametrelere bağlıdır. Dalgalanma akımı, tepeden tepeye nominal akımın %20'si olarak kabul edilir.

$$L_{inv} = \frac{V_{DC}}{4 \cdot f_{sw} \cdot I_{rpp}} \quad (8)$$

Kısaca, f_{cutoff} optimizasyon algoritması tarafından belirlenir ve L_{inv} , C_{filter} , L_{damp} , C_{damp} ve R_{damp} , Denklem (4)-(8) ile hesaplanır.

3.2- Problem Formülasyonu (The Objective Function)

Bahsedilen C-Tipi ve LCL pasif filtre parametreleri, daha az harmonik kirliliğe sahip bir işletim sistemi elde etmek için en uygun filtre formunu bulmak üzere optimize edilir. Buna ek olarak, tüm baralar için gerilim seviyelerinin yaklaşık olarak 1 p.u olması gerekmektedir. Ana amaç, anlatılan pasif filtreler ile, deniz üstü rüzgar sistem modeli çalıştırılarak optimal pasif filtre parametrelerini bulmaktır. Optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu, 575V barasının THDV, V_{pu} ve filtre güç kaybı değerlerine göre oluşturulur. 575V barası, DFIG'in AC-DC-AC dönüştürücüsü tarafından üretilen harmonik kaynağa en yakın bara olduğu için aday olarak seçilmiştir. Sonuç olarak, optimizasyon problemi amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir:

Amaç Fonksiyonu:

$$\min F(obj) = a * THDV + b * |V_{pu} - 1| + c * |filter_{powerloss}|$$

Kısıtlar:

$$THDV_{h-individual} \leq Max THDV_{individual}$$

$$THDI_{h-individual} \leq Max THDI_{individual}$$

$$THDV_{\%} \leq Max THDV_{\%}$$

$$THDI_{\%} \leq Max THDI_{\%}$$

Burada bahsedilen a, b ve c değerleri THDV ve V_{pu} 'nun katsayılarıdır. V_{pu} , baralarının bir fazdan toprağa gerilim değerinin p.u değeridir. $filter_{powerloss}$, optimal olarak bulunan filtrenin gücüdür. $Max THDV_{individual}$ ve $Max THDI_{individual}$ değerleri, IEEE 519 standartları tarafından sınırlanan gerilim ve akım değerlerinin bireysel harmonik limitleridir. $THDV_{h-individual}$ ve $THDI_{h-individual}$, akım ve gerilimin h'inci harmonik değerleridir. Ayrıca, $Max THDV_{\%}$ ve $Max THDI_{\%}$, uygun gerilim seviyelerine göre IEEE 519 standartları tarafından belirlenir.

3.3.Optimizasyon Algoritması(Optimization Algorithm)

Optimal filtre parametrelerini bulmak için literatürde kabul görmüş bir meta-sezgisel optimizasyon algoritması olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması uygulanmıştır.

3.3.1- Pso algoritması (The PSO algorithm)

PSO, 1995 yılında Dr. Eberhart ve Dr. Kennedy tarafından geliştirilmiş olup, optimal çözümleri bulmak için kuş sürülerinin kolektif davranışını taklit eder. Bu algoritma, potansiyel çözümleri temsil eden ajanların "sürü" içinde iletişim kurarak en iyi çözüme doğru yakınsamasını sağlar. Ajanların hız ve konum özellikleri, geçmiş verilere ve küresel en iyi değerlere dayalı olarak iterasyonel olarak güncellenir. Bu güncellemeler, her ajanın kişisel en iyi değeri ($pbest$) ile birlikte en iyi küresel değeri ($gbest$) dikkate alınarak gerçekleştirilir. Ajanların hız değerleri, Denklem (9)-(11) ile belirtilen matematiksel formüller ve rastgele değişkenler kullanılarak $pbest$ ve $gbest$ değerlerine göre ayarlanır [26–28].

$$v_{id}^{k+1} = w * v_{id}^k + c_1 * U * (pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 * U * (gbest_d^k - x_{id}^k) \quad (9)$$

ve konum değerleri şu şekildedir;

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$d = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}]$$

$$pbest_i = [pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{im}]$$

Bu bağlamda, d m -boyutunda bir sütun vektörüysse, i n -boyutunda bir satır vektörüdür, k iterasyon büyüklüğünü temsil eder ve U 0 ile 1 arasında rastgele değerler içerir. Ek olarak, v_{id}^k i 'nin k 'inci döngüdeki hız değerini, x_{id}^k i 'nin k 'inci döngüsündeki mevcut konumunu, $pbest_{id}^k$ i 'nin k 'inci döngüsündeki kişisel en iyi değerini ve $gbest_d^k$ i 'nin k 'inci döngüsündeki global en iyi değerini ifade eder. Inertia ağırlığı (w) değerleri, Denklem (19) ile azaltılır:

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} * iter \quad (11)$$

Burada, w_{max} ve w_{min} , w 'nin sınırlarıdır; $iter_{max}$ maksimum döngü sayısıdır ve $iter$ şu anki iterasyon numarasıdır [29, 30].

Ayrıca, optimal filtre tasarımında kullanılan PSO algoritmasının akış şeması (Şekil 10) ve pseudo kodu aşağıda verilmiştir.

Pseudo kod:

- *Başlat: N parçacıklı başlangıç popülasyonu oluştur.*
- *Her parçacık için rastgele L, C, R değerleri ata.*
- *İterasyon = 1*
- *While (İterasyon ≤ MaxIter):*
- *Her parçacık için THDV, Vpu ve güç kaybını hesapla.*
- *pbest ve gbest değerlerini güncelle.*
- *Yeni hız ve konumları güncelle:*
- $V = w \cdot V + c1 \cdot r1 \cdot (pbest - X) + c2 \cdot r2 \cdot (gbest - X)$
- $X = X + V$
- *Eğer yeni pozisyon daha iyi ise güncelle.*
- *İterasyon = İterasyon + 1*
- *End While*
- *Sonuç olarak en iyi çözümü döndür.*

4-ANALİZ SONUÇLARI (THE ANALYSIS RESULTS)

Analizler için, PSO algoritması Mac OS işletim sistemine sahip, 16GB RAM, 256GB SSD MacBook Pro üzerinde Matlab/Simulink ortamında çalıştırılmıştır.

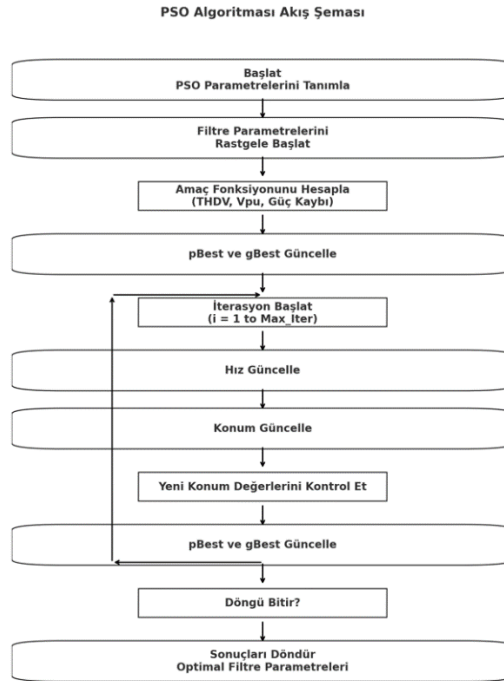
İlk olarak, harmonik bozulmanın toplam harmonik sapma (THDV), gerilim genliğinin efektif değeri ve pasif filtre gücünü birleştiren bir amaç fonksiyonu (AF) formüle edilir.

Filtre parametrelerini optimize etmek PSO algoritması kullanılmıştır. Ayrıca, filtre parametrelerinin sistem performansına etkisini analiz ederek, THD, gerilim seviyeleri, güç faktörü ve güç değerleri gibi güç kalitesi metriklerine göre performans değerlendirmeleri sunulmuştur.

Bu problem için kullandığımız parametreler ayrıntılı olarak Tablo 4 de incelenmiştir.

4.1 Optimal Filtre Tasarımları Ve Harmonik Azaltma Performansları (The Optimal Filter Design)

PCC (ortak bağlantı) noktalarında harmonikleri sönümlendirmek için üst-sezgisel optimizasyon algoritması olan PSO kullanılmıştır. Buna göre, elde edilen optimal C-tipi ve LCL filtre parametreleri Tablo 5'te listelenmiştir. Elde edilen optimal filtrelerle sistemdeki Vpu, THDV'ler, THDI'ler ve 575V, 60 kV ve 230 kV baralarındaki aktif güçler Tablo 5'de sunulmuştur.



Şekil 10. PSO algoritması akış şeması (PSO algorithm flowchart).

Tablo 4. PSO algoritmasında kullanılan parametre değerleri (Parameter values used in the PSO algorithm).

Parametre	Değer
Parçacık Sayısı (N)	30
İterasyon Sayısı	100
Ağırlık Katsayısı (w)	0.9 → 0.4 (Azalan)
Bireysel Öğrenme Faktörü (c1)	2
Sosyal Öğrenme Faktörü (c2)	2
Hız Kısıtı (Vmax)	10% (aralık içinde)

Tablo 5: PSO algoritmalarıyla elde edilen optimal filtre tasarımlarının parametreleri (Optimal filter design parameters obtained using PSO algorithms).

Parametreler	C Tipi Filtre
X_{C1} (Ω)	0.0897
X_{C2} (Ω)	6.067×10^{-5}
X_{L1} (Ω)	6.067×10^{-5}
X_{L2} (Ω)	-
R (Ω)	0.2334
ht	38.45
q	0.01
LCL Filter	
X_{Cdamp} (Ω)	0.4438
X_{Ldamp} (Ω)	0.2356
$X_{Cfilter}$ (Ω)	0.2219
R_{damp} (Ω)	0.3233
f_{cut} (Hz)	122.79
f_{sw} (Hz)	2700

Yukardaki Tablo 5’de, PSO algoritması kullanılarak optimal X_{C1} , X_{C2} , X_{L1} , R , ht ve q ’nin sırasıyla 0.0897 Ω , 6.067×10^{-5} Ω , 6.067×10^{-5} Ω , 0.2334 Ω , 38.45 ve 0.01 olarak hesaplandığını, ve optimal X_{Cdamp} , X_{Ldamp} , $X_{Cfilter}$, R_{damp} , f_{cut} ve f_{sw} ’in sırasıyla 0.4438 Ω , 0.2356 Ω , 0.2219 Ω , 0.3233 Ω , 122.79 Hz ve 2700Hz olduğunu göstermektedir. f_{sw} ’nin 2700-3000 Hz olduğu, bu da yaklaşık olarak 45-50. harmonikler civarında olduğu göz önüne alındığında, beklenen optimal harmonik sıra numaralarının daha yüksek harmonikler civarında olması gerektiği söylenebilir. Tablo 5’ten C-Tipi filtre ayarlı harmonik sayılarının 47 ve 38 olduğu görüldüğü için, optimal sonuçların tutarlı olduğu söylenebilir. Ayrıca, yukarıda bahsedilen sonuçlardan, C-tipi bir filtre yüksek geçişli bir filtre gibi davranır ve X_{C1} ve R değerlerinin baskın olduğu yorumu yapılabilir. Tablo 6 de görüldüğü üzere, PSO algoritmasıyla sağlanan optimal C-tipi filtre için, 230 kV, 60 kV ve 575 V baralarının THDV(%) değerlerinin sırasıyla 0.07%, 0.73% ve 1.38% olduğunu, gerilim p.u. değerlerinin 1.00 p.u., 1.03 p.u. ve 1.05 p.u. olduğunu, güç (P) değerlerinin sırasıyla 7.20, 7.54 ve 7.60 MW olduğunu, THDI(%) değerlerinin ise sırasıyla %2.14, %3.37 ve %3.70 olduğunu görebiliriz. Ayrıca, aynı algoritma ile sağlanan optimal LCL filtresi için, 230 kV, 60 kV ve 575 V baralarının THDV(%) değerlerinin sırasıyla 0.1%, 0.8% ve 1.92%, gerilim p.u. değerlerinin 1.00 p.u., 1.035 p.u. ve 1.039 p.u., güç değerlerinin sırasıyla 7.8, 8.14 ve 8.2

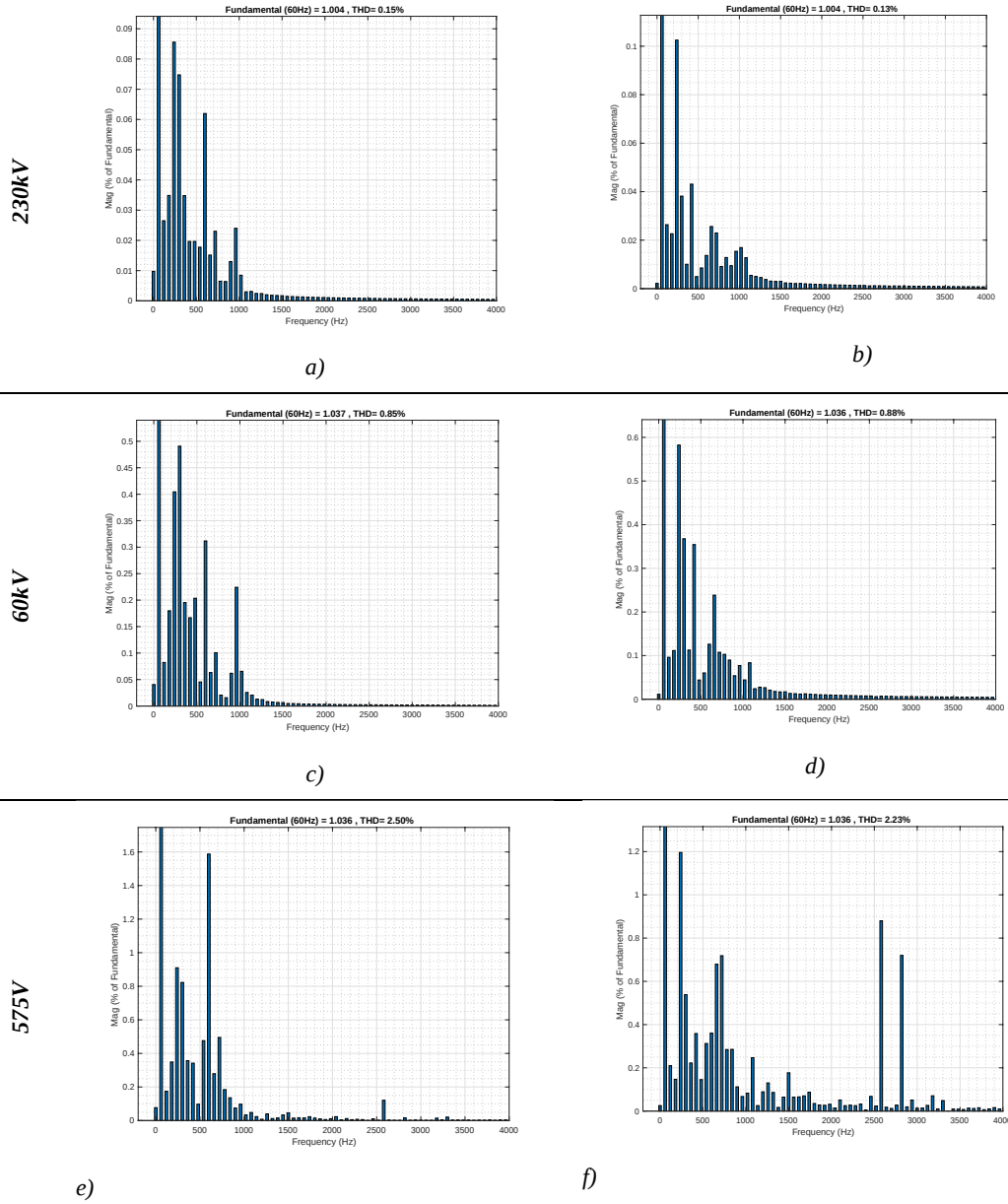
olduğunu, THDI(%) değerlerinin ise sırasıyla %3.09, %3.21 ve %3.51 olduğunu görebiliriz. Tablo 6’dan, THDV değerlerine göre, PSO algoritmasıyla optimal olarak tasarlanan C-tipi filtrelerin en düşük THDV değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, baraların güç değerlerine göre, optimal olarak tasarlanan LCL filtrelerin daha iyi güç değerlerine sahip olduğu gözlemlenmektedir. Buna ek olarak, C-tipi filtreler daha yüksek güç değerlerine sahiptir. Ayrıca, Şekil 11 ve 12’de, üç gerilim seviyesinin gerilim/akım Fourier analizi verilmiştir. 230 kV ve 60 kV baraları için, C-tipi ve LCL filtreler yüksek anahtarlamalı harmonikleri azaltmaktadır. Ancak, 575 V barası için, C-tipi filtre 2580 Hz’de %0.17 ve LCL filtresi 2580 ve 2820 Hz’de sırasıyla %0.9 ve %0.7 olan bireysel harmonikler içermektedir.

Sonuçlara göre, LCL filtresi, C Tipi filtreye kıyasla genellikle daha yüksek THDV ve THDI değerlerine sahiptir. Bu, LCL filtresinin daha fazla harmonik bozulma düzeyine izin verdiğini gösterir. Ancak, LCL filtresi genellikle daha yüksek gerilim değerlerini korur ve daha düşük harmonik akımlara sahiptir. Ayrıca, 230kV, 575V ve 60kV baralarda aktif güçlerin ve harmonik bozulma akımlarının filtreler arasında nasıl değiştiğini görebiliriz.

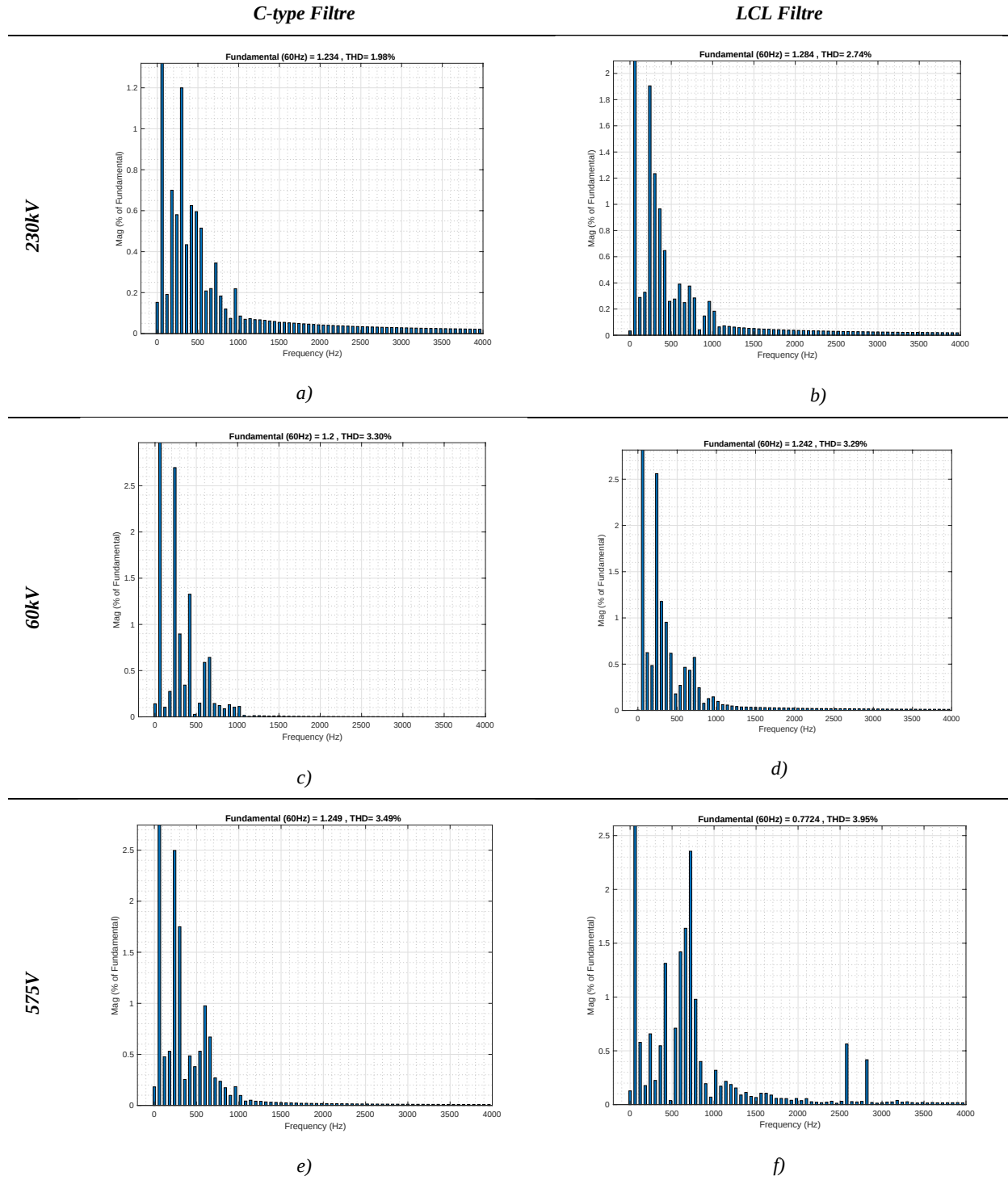
Tablo 6: PSO algoritması ile elde edilen optimal filtrelerle 575V, 60kV ve 230kV baralarının THDV ve Vpu değerleri (THDV and Vpu values of the 575V, 60kV, and 230kV buses obtained with optimal filters using the PSO algorithm.).

PSO		
<u>THDV(%)</u>	Ctype Filter	LCL Filter
230kV Bara	0.07	0.1
575V Bara	1.38	1.92
60kV Bara	0.73	0.8
<u>Vpu</u>		
230kV Bara	1.00	1.00

575V Bara	1.05	1.039
60kV Bara	1.03	1.035
<u>P (MW 10⁶)</u>		
230kV Bara	7.20	7.8
575V Bara	7.60	8.2
60kV Bara	7.54	8.14
<u>THDI(%)</u>		
230kV Bara	2.14	3.09
575V Bara	3.70	3.51
60kV Bara	3.37	3.21

C-tipi Filtre**LCL Filtre****Şekil**

Şekil 11. C-Tipi filtreli sistemdeki a) 230kV, c) 60kV ve e) 575 V baralarının harmonik spektrumları ve LCL filtreli sistemdeki b) 230 kV, d) 60 kV ve f) 575 V baralarının harmonik spektrumları (Harmonic spectrums of (a) 230kV, (c) 60kV, and (e) 575V buses in the system with a C-Type filter, and (b) 230kV, (d) 60kV, and (f) 575V buses in the system with an LCL filter)



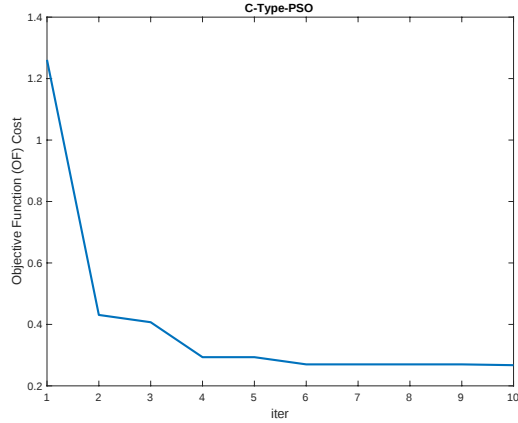
Şekil 12. C-Tipi filtreli sistemdeki a) 230kV, c) 60kV ve e) 575 V baralarının akımın harmonik spektrumları ve LCL filtreli sistemdeki b) 230 kV, d) 60 kV ve f) 575 V baralarının harmonik spektrumları (Current harmonic spectrums of (a) 230kV, (c) 60kV, and (e) 575V buses in the system with a C-Type filter, and (b) 230kV, (d) 60kV, and (f) 575V buses in the system with an LCL filter).

Son olarak, Tablo 7'da PSO algoritmasının optimal LCL ve C-Tipi filtre parametrelerini bulmak için AF maliyet (Cost) ve döngü sayısı (iterasyon) değerleri verilmiştir. LCL filtresi için, maliyet değerleri sırasıyla PSO için 0.4347 ve döngü sayısı değerleri ise 9'dur.

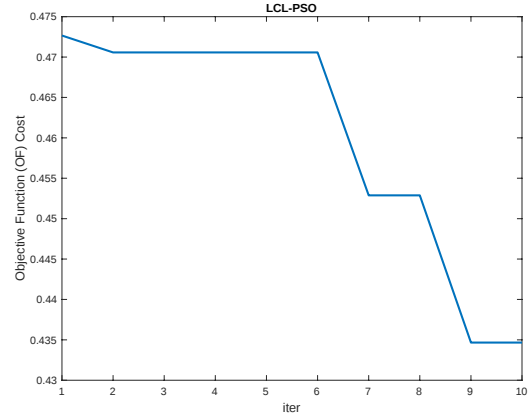
Ayrıca, C-tipi filtre için, maliyet değerleri PSO algoritması için 0.2673, iterasyon değerleri ise 6'dır. Ayrıca, iteratif süreci göstermek için Şekil 13 aşağıda verilmiştir.

Tablo 7: PSO algoritmasının LCL ve C-Tipi filtreler için elde edilen maliyet ve döngü sayıları (The cost and iteration numbers obtained for LCL and C-Type filters using the PSO algorithm).

	LCL	C-Type
	PSO	PSO
Maliyet (Cost)	0.4347	0.2673
Döngü (Iter)	9	6



a



b

Şekil 13: PSO için, a) C Tipi için elde edilen amaç fonksiyonu değerleri ve b) LCL filtresi için elde edilen amaç fonksiyonu değerleri (For PSO: (a) objective function values obtained for the C-Type filter and (b) objective function values obtained for the LCL filter).

4.2 Rüzgar Çiftliği Tarafından Üretilen Güç Varyasyonları İçin Optimal Pasif Filtrelerin Performansı (The Performance Analysis Of Passive Filters)

Test sistemi için, 15 m/s rüzgar hızında, türbin çıkış gücü nominal gücünün 1 p.u, pitch açısı 8.7 derece ve jeneratör hızı 1.2 p.u'dur. Farklı rüzgar hızı değerleri altında optimal LCL filtre performansını Tablo 8'de verilmiştir. Tablo 8, C Tipi filtre için 5m/s rüzgar hızı değeri için, 230kV, 60kV ve 575V hatlarının THDV (%) değerlerini sırasıyla 0.1%, 0.81% ve 1.87% olarak belirtmektedir; bunların Vpu değerleri ise 1.00 p.u, 1.04 p.u ve 1.02 p.u'dur. Buna ek olarak, 15m/s rüzgar hızı değeri için, 230kV, 60kV ve 575V hatlarının THDV (%) değerleri sırasıyla 0.13%, 1.02% ve 2.36% olarak belirtilmiştir; bunların Vpu değerleri ise 1.00 p.u, 1.2 p.u ve 1.07 p.u'dur. 20m/s rüzgar hızı değeri için, 230kV, 60kV ve 575V hatlarının THDV (%) değerleri sırasıyla 0.1%, 0.71% ve 1.68% olarak belirtilmiş; bunların Vpu değerleri ise 1.00 p.u, 1.026 p.u ve 1.01 p.u'dur.

Ayrıca, LCL filtre için 5m/s rüzgar hızı değeri altında, 230kV, 60kV ve 575V hatlarının THDV (%) değerleri sırasıyla 0.11%, 0.96% ve 2.16% olarak belirtilmiş; bunların Vpu değerleri ise 1.004 p.u, 1.05 p.u ve 1.036 p.u'dur. 15m/s rüzgar hızı değeri için, 230kV, 60kV ve 575V hatlarının THDV (%) değerleri sırasıyla 0.13%, 0.88% ve 2.23% olarak belirtilmiş; bunların Vpu değerleri ise 1.004 p.u, 1.03 p.u ve 1.04 p.u'dur. 20m/s

rüzgar hızı değeri için, 230kV, 60kV ve 575V hatlarının THDV (%) değerleri sırasıyla 0.23%, 2.2% ve 3.4% olarak belirtilmiş; bunların Vpu değerleri ise 0.996 p.u, 1.00 p.u ve 0.94 p.u'dur.

Tablo 8'i yorumlarsak, öncelikle, farklı hızlardaki filtre performansını incelediğimizde, genel olarak artan rüzgar hızlarının THDV değerlerini artırdığını görebiliriz. Bu, daha yüksek rüzgar hızlarında sistemdeki harmonik bozulmanın arttığını ve filtrelerin bu bozulmayı kontrol etmek için daha fazla çaba harcadığını gösterir. C Tipi filtre ile LCL filtre arasındaki farklar da dikkate değerdir. 575V hattında, LCL filtresi genellikle daha yüksek THDV değerlerine sahiptir. Bu, LCL filtresinin daha etkili olabileceğini ancak daha yüksek harmonik bozulmalara izin verebileceğini gösterir.

Ancak, Vpu değerlerine baktığımızda, LCL filtresinin genellikle daha düşük birim bazında gerilim değerlerine sahip olduğunu görüyoruz, bu da daha istikrarlı bir gerilim sağladığını gösterir. Ayrıca, farklı voltaj seviyelerindeki THDV ve Vpu değerlerine baktığımızda, 230kV hattının genellikle daha düşük THDV ve daha istikrarlı Vpu değerlerine sahip olduğunu görüyoruz. Bu, yüksek gerilim seviyelerinin genellikle daha az harmonik bozulma ve daha istikrarlı bir gerilim sağladığını gösterir. Sonuç olarak, bu tablo filtrelerin farklı çalışma koşullarında nasıl performans gösterdiğini ve sistemdeki harmonik bozulmayı nasıl kontrol ettiklerini ifade etmektedir.

Tablo 8. C tipi ve LCL filtrelerle sistemlerin, farklı rüzgar hızı değerleri altında 575V, 60kV ve 230kV hatlar için THDV ve Vpu değerleri (THDV and Vpu values for the 575V, 60kV, and 230kV buses under different wind speed conditions with C-Type and LCL filters).

C-Type				LCL		
<u>THDV(%)</u>	5m/s	15m/s	20m/s	5m/s	15m/s	20m/s
230kV Bus	0.1	0.13	0.1	0.11	0.13	0.23
575V Bus	1.87	2.36	1.68	2.16	2.23	3.40
60kV Bus	0.81	1.02	0.71	0.96	0.88	2.20
<u>Vpu</u>						
230kV Bus	1.00	1.00	1.00	1.004	1.004	0.996
575V Bus	1.02	1.07	1.01	1.036	1.04	0.94
60kV Bus	1.04	1.2	1.026	1.05	1.03	1.00

6. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışma, deniz üstü rüzgar çiftliklerinin elektrik şebekelerinde harmonik kirliliği üzerindeki etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, IEEE standardı 519'da belirtilen gerilim ve akım harmonik bozulma sınırlarını göz önünde bulundurarak harmonik bozulmayı ve bara gerilimlerinin etkin değerlerinin saptasını en aza indirmek için optimize edilmiş C tipi ve LCL pasif filtreleri konu almaktadır. Bunun ışığında, deniz üstü rüzgar çiftliklerinin dahil olduğu DFIG türbinleri ile entegre edilmiş elektrik güç sistemi Matlab/SIMULINK ortamında modellenmiştir. Optimal filtre tasarımları, literatürde kabul görmüş parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritması kullanılarak sonuca ulaştırılmıştır. Son olarak, her iki optimal tasarlanmış filtre performansı deniz üstü rüzgar çiftlikleri tarafından üretilen güç varyasyonu için değerlendirilmiştir. Tüm analizlerin sonuçları şu şekilde özetlenebilir:

- C tipi filtrelerin optimal tasarımı, anahtarlama frekansı (f_{sw}) etrafında bir ayarlama frekansına sahiptir ve yüksek geçiş filtresi gibi davranır.
- Elde edilen optimal LCL filtresi, sistemin 100-300 Hz civarında baskın harmoniklere sahip olması nedeniyle yaklaşık 120 Hz civarında bir parametreye sahiptir.
- Her iki filtre tasarımı da harmonik değerlerin azalması ve gerilim p.u. değerlerinin yaklaşık 1 p.u. olarak kalması açısından benzer bir performans sergiler. Ancak, filtre güç kaybı açısından C tipi filtrelerden daha iyi performans gösterir, bu da hafifçe daha iyi bir performansı işaret eder.
- Her iki filtre ile 230kV ve 60kV hatları anahtarlama frekanslarından muafken, 575V hatları %0.1 ile %1 arasında bireysel harmoniklere sahiptir. Ayrıca, 230kV, 60kV ve 575V hatlarında güç değerleri 575V'den 230kV'ye 36 km denizaltı kablosu ile iletim güç kaybı nedeniyle azalmıştır.
- Farklı rüzgar hızlarında, her iki filtre de benzer şekilde performans gösterir ve IEEE 519 standartlarına uygunluk sağlanır. Ayrıca, C tipi filtre için THDV değerleri nominal rüzgar hızı değerlerinden daha yüksek veya daha düşük olduğunda azalır.
- LCL filtresi için, daha yüksek rüzgar hızı değerleri daha yüksek THDV değerlerine yol açar, daha düşük rüzgar hızı değerleri ise daha düşük THDV değerleri hesaplar.

Gelecek çalışmalar için, farklı LCL filtre tipleri araştırılabilir ve hibrit yenilenebilir enerji sistemleri ile birlikte optimal olarak sisteme entegre edilebilir. Ayrıca, değişen çevresel koşulların ve şebeke yapılandırılmalarının filtre performansı üzerindeki etkisini araştırmak, önerilen çözümlerin dayanıklılığı ve uyarlanabilirliği hakkında daha derinlemesine bilgi sağlayabilir. Ayrıca, teorik bulguları doğrulamak ve pratik uygulanabilirliği sağlamak için deneysel düzenekler ve saha testleri aracılığıyla gerçek dünya doğrulaması yapılması değerli olacaktır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Balıkesir Üniversitesi 2024 BAP projesi tarafından finanse edilmiştir.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Alp Karadeniz: Matematiksel model, teknik yöntem, model analizi, kodlama, içeriği yazma.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI

(DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] G. Van Kuik, B. Ummels, and R. Hendriks, "Perspectives on Wind Energy," (2008).
- [2] C. Shan, "Harmonic analysis of collection grid in offshore wind installations," (2017).
- [3] PWC, "Unlocking Europe's offshore wind potential Moving towards a subsidy Free industry," *PWC, Tech.Rep.*, vol. May., (2017).
- [4] E. Ebrahimzadeh, F. Blaabjerg, X. Wang, and C. L. Bak, "Harmonic stability and resonance analysis in large PMSG-based wind power plants," *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 12–23, Jan. (2018).

- [5] Ł. H. Kocewiak, B. L. Ø. Kramer, O. Holmstrøm, K. H. Jensen, and L. Shuai, "Resonance damping in array cable systems by wind turbine active filtering in large systems", *IEEE Trans Sustain.*, 1069–1077, Jun. (2017).
- [6] K. N. B. M. Hasan, K. Rauma, A. Luna, J. I. Candela, and P. Rodríguez, "Harmonic compensation analysis in offshore wind power plants using hybrid filters," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 50, no. 3, pp. 2050–2060, (2014).
- [7] K. Radhakrishnan, "Passive Filter Design and Optimisation for Harmonic Mitigation in Wind Power Plants," *Institutt for elkraftteknikk*, vol. Master Thesis, (2016).
- [8] D. Gautam, V. Vittal, and T. Harbour, "Impact of Increased Penetration of DFIG-Based Wind Turbine Generators on Transient and Small Signal Stability of Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1426–1434, (2009).
- [9] H. Brantsæter, Ł. Kocewiak, A. R. Årdal, and E. Tedeschi, "Passive filter design and offshore wind turbine modelling for system level harmonic studies," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, pp. 401–410., (2015).
- [10] E. Guest, K. H. Jensen, and T. W. Rasmussen, "Mitigation of harmonic voltage amplification in offshore wind power plants by wind turbines with embedded active filters," *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 11, no. 2, pp. 785–794, Apr. (2020).
- [11] A. A. W. van Vondelen, A. Iliopoulos, S. T. Navalkar, D. C. van der Hoek, and J. W. van Wingerden, "Modal analysis of an operational offshore wind turbine using enhanced Kalman filter-based subspace identification," *Wind Energy*, vol. 26, no. 9, pp. 923–945, Sep. (2023).
- [12] M. M. Elkholy, M. A. El-Hameed, and A. A. El-Fergany, "Harmonic analysis of hybrid renewable microgrids comprising optimal design of passive filters and uncertainties," *Electric Power Systems Research*, vol. 163, pp. 491–501, Oct. (2018),
- [13] C. Zhang, X. Wang, and F. Blaabjerg, "Harmonic Mitigation in Offshore Wind Farms using AI-based Filtering Methods," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 39, no. 2, pp. 1456–1468, (2023).
- [14] Y. Li, H. Chen, and J. Wu, "Optimization of Passive Filters in Renewable Energy Systems using Hybrid Algorithms," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 12, no. 1, pp. 225–237, (2024).
- [15] T. Kim, M. R. Al Rashidi, and A. Zobaa, "Adaptive LCL Filter Design for Smart Grid Applications," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 15, no. 3, pp. 1930–1942, (2024).
- [16] ABB, "XLPE Submarine Cable Systems Attachment to XLPE Land Cable Systems - User's Guide," vol. Rev 5, (2010).
- [17] ABB, "XLPE Land Cable Systems-User's Guide," vol. . vol. Rev5, (2010).
- [18] A. M. Meinich, F. Marafao, and U. E. Paulista, "Harmonic Propagation and Production in Offshore Wind Farms." *NTNU, Master Thesis*, July (2018).
- [19] J. Lee, Y. Yoo, M. Yoon, and G. Jang, "Advanced fault ride-through strategy by an MMC HVDC transmission for off-shore wind farm interconnection," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 12, Jun. (2019)
- [20] Matlab, "Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)," <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/wind-farm-dfig-detailed-model.html>.
- [21] A. Karadeniz and M. E. Balci, "Comparative evaluation of common passive filter types regarding maximization of transformer's loading capability under non-sinusoidal conditions," *Electric Power Systems Research*, vol. 158, pp. 324–334, (2018).
- [22] A. Teigmoen, "Harmonic Resonance Analysis of Offshore Wind Farm Utilizing Type-IV Wind Turbines," (2021).
- [23] IEEE standards, "IEEE Standards 1547 Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage," (2018).
- [24] X. J. Zong, P. A. Gray, and P. W. Lehn, "New metric recommended for IEEE Standard 1547 to limit harmonics injected into distorted grids," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 963–972, (2015).
- [25] A. R. Oliva and J. C. Balda, "A PV dispersed generator: a power quality analysis within the IEEE 519," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 2, pp. 525–530, (2003).
- [26] M. R. AlRashidi and M. E. El-Hawary, "A survey of particle swarm optimization applications in electric power systems," *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 13, no. 4, pp. 913–918, (2008).
- [27] H. H. Zeineldin and A. F. Zobaa, "Particle swarm optimization of passive filters for industrial plants in distribution networks," *Electric Power Components and Systems*, vol. 39, no. 16, pp. 1795–1808, (2011).
- [28] A. Karadeniz, K. Eker, B. Üniversitesi, M. Fakültesi, and E.-E. M. Bölümü, "Rüzgar ve Termik Santrallerden Oluşan Enerji Sistemlerinde Ekonomik Güç Dağılımının Big-Bang Big-Crunch, PSO ve IMO Algoritmaları ile İrdelenmesi," *Journal of Polytechnic*, vol. 19, no. 3, pp. 261–268, (2016).
- [29] A. Eid, "Allocation of distributed generations in radial distribution systems using adaptive PSO and modified GSA multi-objective optimizations," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, no. 6, pp. 4771–4786, Dec. (2020).
- [30] G. D. Singh *et al.*, "A novel framework for capacitated SDN controller placement: Balancing latency and reliability with PSO algorithm," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 87, pp. 77–92, Jan. (2024).