

Mikro şebekelerde arıza durumunda kararlılık analizi

Microgrid stability analysis for faults

Abdurrahman Berke ÜLGER^{1*}, Oben DAĞ²

¹ Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul Arel Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

berkeulger20@istanbularel.edu.tr

² Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Arel Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

obendag@arel.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 14.12.2023

Bölüm/Section: Mühendislik, Mimarlık ve Doğa Bilimleri/Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Kabul Tarihi/Accepted: 29.01.2024

Araştırma Makalesi/Research Article

Özet

Günümüzde enerji tüketiminin artması, enerji piyasasındaki serbestlik ve teknolojinin gelişmesi yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip dağıtık üretim kaynaklarının artışına sebep olmaktadır. Mikroşebekeler (MG), bu enerji ortamında yerel ve merkezi olmayan enerji üretimini, büyük ve merkezi bir şebekeye bağlanmasını sağlamaktadır. Rüzgar türbinleri ve fotovoltaik sistemler gibi yenilenebilir enerji kaynakları, enerji üretim birimleri olarak kullanıldığında, MG'lerin geleneksel güç sistemlerinde güvenilir çalışması büyük bir endişeye sebep olmaktadır. Tüketicileri besleyen gerilimin yüksek kalitesi ve frekans kararlılığının güvencesi, MG'lerin optimum şekilde çalışması için birinci derece bir taleptir. Bu durum hem dağıtım şebekesi operatörleri hem de son tüketiciler için kalıcı bir endişe kaynağıdır. Üretilen gücün talep edilen güce eşit olmaması, her MG sektörünün sorunudur. Gerilim ve frekans kontrolü, üretilen veya tüketilen aktif ve reaktif güçleri ayarlayarak hem gerilimin hem de frekansın ayar noktası değerleri etrafında önceden belirlenen sınırlar içinde kalmasını sağlamaktır. MG'lerin kararlı gerilim ve frekans değerleri ile çalıştırılması ve güç kalitesinin normlara uygun olması temel gereksinimlerdenidir. Bu normların sağlanması için, MG'lerde gerilim ve frekans kontrolü önem arz etmektedir. Bu makalenin amacı MG sistemin şebeke kaynaklı gerilim düşüşlerinin ve yükselişlerinin, adalanma sırasında meydana getirdiği sinyalizasyon hatalarını ortaya çıkarmaktır. Ayrıca MG'lerde bulunan enerji depolama sistemlerinin kararlılık üzerine etkileri de incelenmektedir. Tüm benzetimler MATLAB/SIMULINK ortamında yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mikro şebeke, dağıtık üretim kaynakları, harmonik, ada mod, enerji depolama sistemi.

Abstract

The expansion of dispersed production units powered by renewable energy sources and the liberalization of energy market technologies are both outcomes of today's surging energy usage. With the use of microgrids (MGs), decentralized and localized power generation in this energy environment can be linked to a vast and centralized grid. Reliability of MGs in conventional power systems is a major concern when energy generation units are wind turbines and solar systems, which are renewable energy sources. An essential condition for MGs to function optimally is to provide consumers with voltage that is both of high quality and stable frequency. This is a concern for distribution network operators to consumers and end users. Every MG sector faces the same problem: the power produced does not match the power demanded. Maintaining a voltage and frequency within specified ranges relative to adjustment point values is the goal of voltage and frequency control, which also involves adjusting the consumption or production of reactive and active forces. Maintaining standard power quality and operating the MGs at stable voltage and frequency values are of the utmost importance. Maintaining these parameters in MGs requires careful regulation of voltage and frequency. This article's goal is to help

¹ Bu makale Abdurrahman Berke Ülger'in "Mikro şebekelerde arıza durumlarında kararlılık analizi vaka çalışması" başlıklı Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

* Yazılan yazar/Corresponding author: Abdurrahman Berke ÜLGER

¹ orcid.org/0000-0003-3261-4368; ² orcid.org/0000-0001-8590-7100

DOI: <https://doi.org/10.56723/dyad.1404438>

spot processing issues brought on by voltage dips and spikes in the MG system as a result of the MG. Research into the stability-altering impacts of MG energy storage technologies is ongoing as well. All simulations were performed within the MATLAB/SIMULINK software suite.

Keywords: Microgrid, distributed production sources, harmonics, islanded mode, energy storage system.

1. Giriş

Küçük otonom (izole mod) şebekeler, ekonomik veya teknik nedenlerden dolayı ana güç şebeke sistemi ile bağlantının olmadığı uzak yerlerde, onlarca yıl varlığını sürdürmüştür [1]. Fakat günümüzde kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgar türbini, fotovoltaik paneller, yakıt hücreleri vb.) kullanıldığı dağıtık üretim kaynaklarının (DER) şebekeye entegre edilmesine yönelik artan ilgi, yeşil enerji kullanımının da desteklenmesi ile gelişim göstermiştir. Yakın gelecekte ise enerji ağları, yenilenebilir enerji, talep yanıtı, enerji depolama ve elektrikli ulaşım gibi akıllı şebeke teknolojilerinin entegrasyonundan büyük ölçüde etkilenecektir. Akıllı şebeke olarak bilinen gelişmiş bir elektrik sistemi, enerji üretimi ve dağıtımının sürdürülebilirliğini, güvenilirliğini, verimliliğini, karşılanabilirliğini artırmak amacıyla veri toplamak ve işlemek için bilgi ve iletişim teknolojilerinden yararlanır.

Avrupa Komisyonu Akıllı Şebekeler Çalışma Grubu'na göre akıllı şebeke, tüketiciler ve jeneratörler de dahil olmak üzere bağlı tüm kullanıcıların işlemlerini akıllı bir şekilde sisteme entegre ederek güvenli, güvenilir ve yüksek kaliteli bir güç sistemi oluşturabilen bir elektrik ağıdır. Minimum kayıpla ekonomik açıdan verim sağlamaktadır [2].

MG'ler olarak bilinen çok sayıda alt sistem, akıllı şebekeler tarafından entegre edilmektedir. Dağıtık bir enerji kaynağı ve çeşitli yükler, bağımsız olarak veya ana şebeke ile birlikte çalışabilen, MG'ler olarak bilinen bir elektrik sistemini oluşturur. Dağıtık üretim yoluyla artan güvenilirlik, daha kısa iletim mesafeleri sayesinde artan verimlilik ve alternatif enerji kaynaklarının daha kolay entegrasyonu, MG'lerin avantajlarından yalnızca birkaçıdır [3].

MG, düşük veya orta voltaj seviyelerinde çalışan otonom bir elektrik dağıtım sistemidir. DER'leri, enerji depolama sistemlerini ve yükleri içerir. DER'ler; fotovoltaik sistemler ve rüzgar türbinleri gibi yenilenebilir kaynaklarını ve yakıt hücreleri, dizel jeneratörler dahil olmak üzere yenilenemeyen enerji kaynaklarını kapsamaktadır.

Tipik bir yenilenebilir enerji tabanlı MG, Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu MG'ler farklı kontrol stratejileri gerektiren şebekeye bağlı mod, ada modu ve izole mod olmak üzere üç farklı ortamda çalışmaktadır [3]–[5].

Bir MG'nin güç sektörüne entegrasi ana sistem üzerinde aşağıdakiler gibi birkaç işlevsel avantaj sağlar;

- Azaltılmış karbon emisyonu
- Planlanmış ve planlanmamış operasyonel faaliyetlerde, yüklere sürekli bağımsız güç kaynağı sağlamak; yedek güç kaynağı olmak
- Ana şebekenin sürdürülebilir çalışmasına yardımcı olmak ve güç sisteminin kalitesini iyileştirmek.

Fakat bu işlevsel avantajların gerçekleştirilmesi için uygulanması amaçlanan yüksek kalitede gerilim isteği, işletme kararlılığını sağlamada bazı zorluklar çıkarmaktadır.

MG'ler, ana güç sistemleriyle karşılaştırıldığında farklı atalet özelliklerine sahiptir. Klasik güç sistemlerinde, senkron jeneratörlerin dönen kütleleri kullanılarak enerji depolanabilir. Bu enerji, arıza durumları sırasında güç kararlılığı ve güç kalitesiyle ilgili sorunları azaltmak için gereklidir. Tersine, rüzgar ve fotovoltaik sistemler gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayanan MG'lerde atalet çok azdır veya hiç yoktur. Sonuç olarak MG'lerin tek başına çalışma sırasında ortaya çıkan dalgalanmaları kontrol altına alabilmeleri için enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Düşük atalet sorununun tam olarak tanımlanması, endişenin etkili bir şekilde ele alınması açısından önemlidir. Atalet, hızdaki değişikliklere karşı direncin ölçülmesidir. Hız ve frekans sapması değişim oranı ataletle ters orantılıdır. Güç ağlarının kesintiler sırasında frekansı ve voltajı sürdürme yeteneği, senkron jeneratörlerin önemli ataletine ve hızlı yönetimine atfedilmektedir. Senkron jeneratörler, yüksek rotor ataletlerinden dolayı kinetik enerji depolamak için önemli bir kapasiteye sahiptir. Yükte bir artış olduğunda, senkron jeneratörde elektriksel ve mekanik güç arasındaki uyumsuzluk, hızın azalmasına neden olmaktadır. Dengesizliği dengelemek için rotorun depolanan kinetik enerjisi kullanılmaktadır. Daha sonra regülatör, giriş mekanik gücünü artırır. Bu da mekanik ve elektriksel güçlerin eşdeğer olduğu denge durumunu sağlar. Sonuçta sistem yeni bir frekans seviyesinde kararlı bir duruma ulaşır. Reaktif güce ihtiyaç duyulduğunda voltajın yönetimi ve ayarlanması benzer bir şekilde gerçekleştirilir. Öte yandan, DER'lerin içerisinde bulunan yenilenebilir enerji kaynakları, şebeke sistemine doğrudan bağlantı için uygun olmayan biçimde enerji üretir [1]. Bu bağlamda MG içerisindeki DER'ler, şebeke sistemine güç elektroniği arayüz elemanları ile bağlanır. Gerilim kaynaklı eviriciler gibi fotovoltaik tabanlı DER'lerde kullanılan eviriciler dinamik ve dönen kütlelere sahip değildir. Sonuç olarak eylemsizlikleri yoktur. Bu gibi durumlarda kontrol tedbirlerinin ihtiyatlı kullanılması zorunlu hale gelir. Sarkma kontrolü ve akım kısıtlamasını içeren evirici anahtarları düşük atalet sergiler. Evirici tabanlı gerilim kaynaklarıyla beslenen MG'ler, düşük ataletleri nedeniyle gerilim ve frekans kararsızlığı sorunları yaşamaktadır. Bu eviriciler kesintiler sırasında voltaj ve frekans regülasyonunu sağlayamaz. Kararsızlık konusu, özellikle voltaj ve frekanstaki dalgalanmalarla ilgili

olarak önemli bir güç kalitesi sorunudur [3]. Bu karmaşıklığın yanında arz ve talep belirsizliği altındaki birimlerin planlanması, çift yönlü güç akışının hesaba katılması, DER'lerin potansiyel faydalarının önemli ölçüde etkilenmemesi, planlanmış (zamansal) ve planlanmamış durumlarda MG'nin şebekeye bağlı moda geçişi, verimli talep katılımı faaliyetlerinde sorunsuz bir iletişim için özel koruma şemaları ve kontrol sistemleri gerekmektedir [6]. Elektrik gücündeki dalgalanmalar, harmonikler gibi hem geçici hem de sürekli olarak güç kalitesi sorunlarına yol açmaktadır [7].

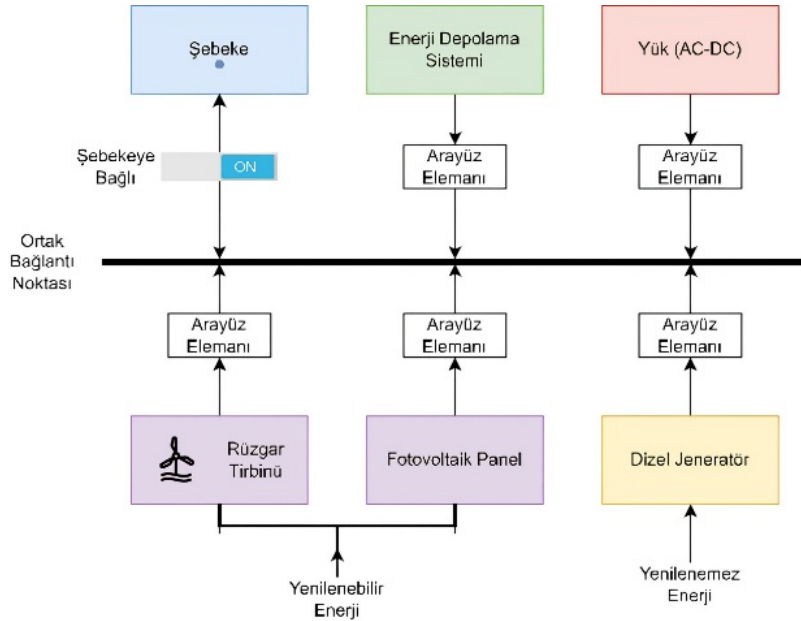
Yakın gelecekte güneş enerjisi, rüzgar türbinleri, hidroelektrik enerji, biyoyakıtlar ve atık ürünlerin yakıt olarak kullanılması gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın olarak kullanılması beklenmektedir. Bununla birlikte, MG'lerde DER'lerin sayısı arttıkça, MG'lerin güvenilir işleyişi ve yönetimi önemli bir endişe haline gelmektedir. Eviricilerin dahil edilmesi, sistemin modellenmesinde, kontrolünde, kararlılığında güç kalitesi kaygılarıyla ilgili çeşitli zorluklar ortaya çıkarmaktadır. MG operasyonlarında güç kalitesini koruma söz konusu olduğunda, harmonikler önemli bir endişe kaynağıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarında harmonikler hem doğrusal olmayan yüklerden hem de güç elektroniği arayüzlerinden kaynaklanabilmektedir.

Gerilim dalga formlarındaki harmonikleri azaltmanın en yaygın yöntemi seçici harmonik eliminasyon tekniğidir [8],[9]. Ortadan kaldırılacak harmonik sıraların sayısı arttıkça bu prosedürün karmaşıklığı ve hesaplama gereksinimleri de artmaktadır. Sayısal çözüm prosedürünü değiştirmek için Walsh fonksiyonu yöntemi ve sinüs dalgası yaklaşımı gibi çeşitli stratejiler önerilmektedir [10],[11]. Ayrıca sinir ağları, çevrimiçi hesaplamalı bir yaklaşım olarak kullanılmaktadır [12]. Ek olarak, darbe genişliği modülasyon açılarının gerçek zamanlı hesaplanması için ikinci dereceden eğri uydurma ve evrimsel algoritma bazlı teknikler kullanılabilir [13],[14]. MG'lerde gerilim harmoniklerinin azaltılmasına yönelik çeşitli çalışmalar mevcut olmakla birlikte, bu çalışmalarda belirli yerlerde süresiz çözümlerin olması veya kaçınılması gereken harmonik sıralarının sayısı arttıkça, çevrim başına daha fazla sayıda anahtarlama işlemine ihtiyaç duyulması gibi kısıtlamalar bulunmaktadır [15].

Bu makale MG sistemlerin çalışma modları üzerinden harmonik bozulmaları ve atalet momenti yetersizliği içeren zayıf şebekelerin güncel sorunlarına dikkat çekmek ve bu sorunların MATLAB/Simulink benzetim ortamında incelenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Enerji depolama sistemler, günümüz çalışmalarda ve sinyalizasyon hatalarında etkin bir rol oynadığı vurgulanmaktadır.

Bu makalenin organizasyonu aşağıdaki gibidir:

Bölüm 2'de MG sistemlerin çalışma karakteristiği incelenmektedir. Kontrol modları Bölüm 3'te, MG güç kalitesi problemleri Bölüm 4'te gösterilmektedir. Çalışma karakteristiği ve modları anlatılan MG'lerin ada mod geçiş durumunda meydana gelen gerilim ve frekans dalgalanma problemi, Bölüm 5'te benzetim çalışması üzerinde üç farklı senaryo ile tanıtılmaktadır. Bölüm 6'da tartışmalar ve sonuçlar not edilmektedir.



Şekil 1. Tipik bir MG yapısı.

2. Mikroşebeke çalışma karakteristiği

Ana şebeke güç sistemi kararlılık problemleri, IEEE ortak çalışma grupları tarafından; rotor açısı kararlılığı, gerilim kararlılığı ve frekans kararlılığı olmak üzere üç kategoride sınıflandırılır [16]. Rotor açısı kararlılığı, jeneratörlerin bir

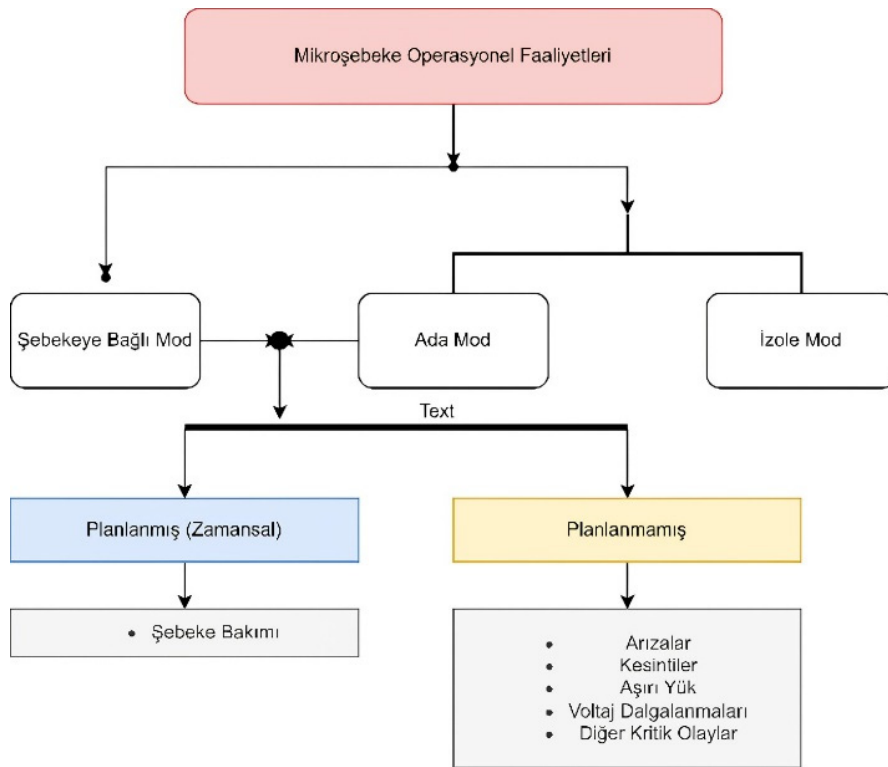
bozulmaya maruz kaldıktan sonra senkronizasyonda kalma yeteneğini ifade eder. Frekans kararlılığı, güç sisteminin çeşitli koşullar altında sabit frekansı koruyabilme yeteneğini gösterir. Gerilim kararlılığı, güç sisteminin kesintilere maruz kaldıktan sonra tüm baralarda sabit gerilimi sürdürme kabiliyetini anlatır. Bu da her veri yolundaki yük talebi ile güç kaynağı arasındaki dengedir.

MG'de, DER'ler, ana güç kaynağıdır. Bu nedenle DER'lerin dinamik özellikleri, MG dinamik davranışlarını belirler.

Arayüz modlarına göre DER'ler iki kategoriye ayrılabilir:

- İnvirtör arayüzlü DER'ler.
- Doğrudan MG'ye bağlanan DER'ler.

Fotovoltaik paneller, küçük doğrudan tahrikli rüzgar türbinleri, mikro gaz türbinleri, piller, volan enerji depolaması ve süper kapasitörler; eviriciler tarafından MG'ye bağlanır. Çift beslemeli asenkron jeneratör, dizel jeneratör ve küçük hidro üniteler ise inverter olmadan MG'ye bağlanır. MG oluşturmak için genellikle mümkün olduğu kadar yenilenebilir enerji kaynağı kullanılır. Bu nedenle MG'de, MG'nin çalışma özelliklerini ana şebekeden oldukça farklı kılan evirici arayüzlü dağıtık üretim yaygın olarak kullanılır.



Şekil 2. MG operasyonel faaliyetleri.

MG'lerin çalışma özellikleri aşağıda kısaca anlatılmaktadır:

- MG hem şebekeye bağlı modda hem de ada modunda çalışabilmektedir. Şebeke bağlantılı modda, MG güç akışı çift yönlüdür. Ada modunda ise MG güç kaynağı, yükün talebini karşılamaktadır. MG çalışma modları Şekil 2'de gösterilmektedir.
- DER'lerin çeşitliliği nedeniyle, farklı DER'ler, çeşitli MG yapılarını oluşturabilmektedir. Dolayısıyla, bir MG için, kararlılık problemlerinin çeşitlendirme özelliklerine yol açan çeşitli çalışma modları mevcuttur.
- MG'nin gerilim ve frekans regülasyonu, dağıtık üretim kontrol stratejilerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Farklı kontrol stratejilerine sahip DER'lerin gerilim ve frekans düzenleme özellikleri çok farklıdır.
- MG'nin zaman çerçevesi, ana şebekeden daha geniştir. Evirici arayüzlü DER'lerin yanıt süresi, geleneksel üretim kaynaklarına göre çok daha hızlıdır. Bu nedenle bir bozulma meydana geldiğinde, MG'nin dinamik davranışları; mikro saniyelik elektromanyetik geçici sürecini içermektedir.
- Senkron jeneratörlerle karşılaştırıldığında, evirici arayüzlü DER'lerin çıkış empedansı ve aşırı akım kapasitesi çok küçüktür. Dolayısıyla bu DER'lerin koruma yanıt süresi, senkron jeneratörlerden çok daha hızlıdır. Bu durum, MG'de büyük parazite maruz kaldığında farklı bir çalışma süreciyle sonuçlanır. Bu, MG'nin geçici kararlılık analizi için evirici arayüzlü DER'lerin en önemli özelliklerinden biridir.

- f. Düşük MG ataleti dolayısıyla büyük bozulma meydana gelmesi, DER'lerin enerji taleplerinin karşılamasında farklılıklar oluşturmaktadır. Enerji depolama, DER'lerin kararlılığını korumak için kullanılır [17].

3. Mikroşebeke kontrolü

Rüzgar ve PV sistemleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının giderek artan entegrasyonu, MG'nin güvenilir işletimi ve kontrolü konusunda ciddi endişelere yol açmaktadır. İnterörlerin eklenmesiyle sistem modelleme, kontrol, kararlılık, koruma ve güç kalitesi konularında birtakım zorluklar yaşanmaktadır. Arz ve talebi verimli bir şekilde dengeleyen istikrarlı, tutarlı ve kullanımı kolay bir sistem oluşturmak için gelişmiş yönetim teknikleri gerekmektedir. Bu, MG'lerde enerji paylarının farklı dağıtık enerji kaynakları veya yenilenebilir enerji kaynakları arasında bölünmesini mümkün kılmaktadır.

MG'ler üç farklı modda çalışabilir. Bunlardan en önemlileri farklı kontrol stratejileri gerektiren ada mod ve şebekeye bağlı moddur. Ada modunda kontrol sorunu çok daha karmaşık hale gelmektedir. Dahası, yalıtılmış bir MG'de çok sayıda DER'in enerjisini verimli bir şekilde kontrol etmenin teknolojik zorluğu, enerji mühendislerinin karşısına çıkmaktadır. Bir MG, ana şebekeye bağlanma ve bağlantıyı kesme yeteneğine sahiptir. Bu, planlı şebeke bakımı veya arızalar, gerilim çökmeleri, elektrik kesintileri ve gerilim değişimleri gibi önemli durumlarda gerçekleşmektedir. Bu işlem sırasında MG'de minimum kesinti olması veya hiç kesinti olmaması arzu edilmektedir. Buna ek olarak, bir MG, sistemin istikrarı yeniden kazanıldığında ana güç şebekesine zahmetsizce yeniden katılma yeteneğine sahiptir. Ana şebekeye bağlı mod sırasında şebeke, frekansı ve gerilimi sağlamaktadır.

Ancak ada modunda frekans ve gerilim geri bildirimini sağlayacak bir ana şebeke mevcut değildir. Bu nedenle MG kontrol sisteminin, bu değişkenleri bağımsız olarak sağlaması gerekmektedir. MG'nin düşük ataleti bu durumda endişe kaynağıdır. Geleneksel güç sistemlerindeki DER'ler ile senkron jeneratörler arasındaki atalet eşitsizliği nedeniyle, MG işlemleri sırasında frekans salınımları ve gerilim dalgalanmaları gibi güç kalitesi sorunları ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle, MG'nin kontrolü, güvenilir bir güç sistemi sağlamak için bu koşulları yönetebilme yeteneğine sahip olmalıdır [18].

Enerji depolamaya dayalı enerji yönetimi sayesinde MG, dağıtık üretim ile elektrik şebekesi arasındaki iş birliğini etkili bir şekilde gerçekleştirebilmektedir. Dağıtık yenilenebilir enerji kaynaklarının da elektrik şebekesine yüksek oranda nüfuz etmesinden kaynaklanan olumsuz etkileri azaltabilmektedir. Dağıtık yenilenebilir enerjinin kesintili güç çıktıları, şebeke işletimi ve yönetimine birçok sorun getirmektedir. Bu sorun, dağıtık yenilenebilir enerjinin yüksek oranda yaygınlaştığı bazı yerel dağıtım sistemlerinde daha ciddi hale gelmektedir. Yenilenebilir enerjiye dayalı MG'lerde enerji depolamanın uygulanması son yıllarda büyük ilgi uyandırmaktadır. Referans [19],[20]'te gösterildiği gibi enerji depolama, MG sisteminin ataletini artırabilme ve bozulmalarla başa çıkma yeteneğine sahiptir.

MG kontrolünün, kararlı ve güvenli çalışmayı sağlamak için birden fazla mod içermesi gerekmektedir:

Şebeke Senkronizasyonu: MG kontrol uygulamasında, MG geriliminin büyüklüğü, frekansı ve fazı, bağlanmadan önce şebeke gerilimiyle eşleştirilmektedir. Gerilimler belirli bir tolerans dahilinde eşleştirilmezse, bağlantıda kararsızlığa neden olan, tehlikeli çalışma ve ekipman hasarıyla sonuçlanabilecek büyük geçişler meydana gelebilmektedir.

Şebeke Formu: MG kontrol uygulamasında; belirli üretim üniteleri, bir AC sistemde gerilim ve frekans kontrolü, bir DC sistemde yalnızca gerilim kontrolü altındadır. Şebeke oluşturma kontrolü mevcut değilse, ada mod bir MG, güvenli ve kararlı bir şekilde çalışamaz.

Şebeke Takibi: MG kontrol uygulamasında, belirli üretim birimleri bir AC sistem üzerinde aktif ve reaktif güç kontrolü, DC sistem üzerinde güç kontrolü altındadır. Şebekeyi izleyen üniteler, gerilim ve frekans kontrolüne doğrudan katkıda bulunmamaktadır ve bunun yerine terminallerindeki gerilim ve frekans koşullarını takip etmektedir.

Kısıtlama: MG kontrol uygulaması, üretimi ve/veya yük gücünü azaltmaktadır. Üretimi/yükü azaltmanın ana nedeni, planlanmamış olaylar meydana geldiğinde veya işletim koşulları şebekeyi zorladığında güvenlik ve kararlılığı korumaktır [21],[22].

4. Mikroşebekelerde güç kalitesi problemleri ve harmonikler

Güç kalitesi, genel olarak nominal gerilim ve frekansta sinüzoidal dalga formunu korumak için bara geriliminin ölçülmesi, analizi ve iyileştirilmesi ile ilgilidir [23]. DER'lerde güç kalitesi sorunları, güç elektroniği tabanlı anahtarların ve doğrusal olmayan yüklerin artan nüfuzu nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Kesintili dağıtık üretimlerin (güneş ve rüzgar) varlığı da bir MG'nin güç kalitesini etkilemektedir [24].

Şebekeye bağlı modda, MG'deki yükler hem şebekeden hem de DER'lerden enerji almaktadır. Ana güç şebekesine bağlantı kaybı olduğunda sürekli bir enerji tedarikini sürdürmek için, MG'nin ada moduna sorunsuz bir şekilde geçmesi gerekmektedir. Bu olaylar gerilim düşüşlerine, arızalara ve elektrik kesintilerine dönüşebilmektedir. Ana şebeke ile bağlantı kesildiğinde MG kaynaklarının her birisinin faz açıları değişiklik gösterir. Bu durum frekansın azalmasına yol açmaktadır. Kontrolörlerin yetersiz uygulanması, MG işletiminde istikrarın bozulmasına neden olmaktadır [18].

Sistem üzerinde meydana gelen gerilim ve frekans dalgalanmaları yavaş dinamik yanıtta ve DER'lerin düşük ataletinden dolayı meydana gelmektedir. Depolama ve esnek AC iletim sistem cihazları, yukarıda belirtilen soruna uygun çözümlerdir. Bu kontrol şemalarının modlar arası geçişi, yüklere hafif bir şekilde veya hiç dikkat dağıtmadan gerçekleştirmesi gerekmektedir [3]. Bu geçişler her zaman planlı (bakım vb.) olmamaktadır. Arızalar, gerilim düşüşleri, kesintiler, aşırı yüklenme durumu, gerilim dalgalanmaları ve diğer kritik olaylar MG'nin ana şebekeden izolasyonunu gerektirmektedir [25].

MG'lerde kullanılan PV, rüzgar türbinleri, hidro üniteler gibi çok sayıda küçük ölçekli jeneratörler kullanılmaktadır. Bu mikro kaynaklar çevre dostudur ancak güneş, rüzgar vb. gibi yenilenebilir bazı enerji kaynaklarının kullanımı nedeniyle, doğası gereği kesintilidir. Bu mikro kaynaklar ve yük kümesi, belirlendikleri alana güç sağlamak amacıyla kontrol edilebilir oldukları için kullanılmaktadır [26]. MG gerilim ve frekans kontrol stratejileri yakın zamana kadar tek yönlü güç akışı varsayımı üzerine geliştirilmekteydi. Ancak yenilenebilir DER'ler sayesinde bazı aşırı durumlarda, üretim fazlası enerjinin tüketicilerden MG yoluyla tedarik şebekesine doğru ters bir güç akışı gerçekleştirmesi sağlanmaktadır [27].

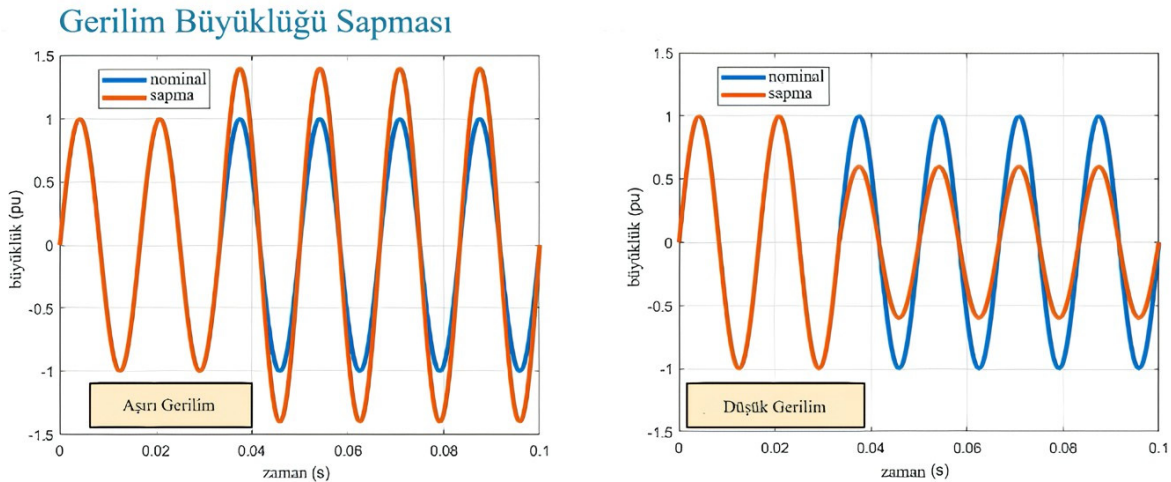
Ayrıca ada mod geçiş tespiti, şebekeye bağlı eviricilerin önemli bir özelliğidir. Ada mod algılama hatası, jeneratörlere ve yüklere zarar vererek durumu kritik hale getirebilmektedir. Kasıtsız bir ada mod olayı sırasında, ana şebeke MG'den izole edilerek, iki ayrı ve bağımsız sistemin oluşması sağlamaktadır. İstenmeyen ada mod, frekans ve gerilimdeki önemli dalgalanmalar nedeniyle hizmet ve müşteri ekipmanı, bakım personeli ve genel halk için çeşitli sorunlara yol açabilecek riskler oluşturmaktadır [28].

Bunun yanı sıra elektrik şebekelerinde DER'lerin kullanımının ciddi şekilde artmasıyla birlikte sorunlar sıklıkla ortaya çıkabilmektedir. DER'leri kullanırken, üretim seviyelerindeki hızlı değişiklikler ve kaynağın kesintisi nedeniyle gerilim regülasyonu ve frekansın etkilenmesi meydana gelmektedir. Doğru adresleme koordinasyonu, düzgün bir şekilde sağlanmazsa sistemin güvenliği ve güvenilirliği üzerinde olumsuz etki yaratmaktadır [4]–[6].

MG güç kalitesi sorunları da geleneksel dağıtım sistemindeki güç kalitesi sorunlarına benzer. Bu arızalar; gerilimdeki düşmeler/yükselmeler, titremeler, harmonik bozulmalar, gerilim kesintileridir [29]. Herhangi bir arıza durumunda meydana gelen gerilim düşmelerinde genlik %10-%90 arasında değişebilir ve süresi bir dakikaya kadar sürebilmektedir [30]. Gerilim yükselmesi, güç frekansında RMS geriliminde veya akımında 0,5 döngüden bir dakikaya kadar bir süre boyunca meydana gelen artış olarak tanımlanır. Tipik büyüklükler 1,1 ila 1,8 artış arasındadır [30]–[32]. Tipik bir sistemde hacimli bir endüktif yükün ani anahtarlama veya devasa kapasitör kümelerine enerji verilmesi gibi rahatsızlıklar, sarkma ve şişmeye neden olmaktadır. Gerilim düşmesi ve yükselmesi, hassas ekipmanın arızalanmasına, sigortalının atmasına veya devre kesicilerin atmasına neden olabilecek, dengesiz büyük akım oluşturan elektrik kesintisine neden olmaktadır.

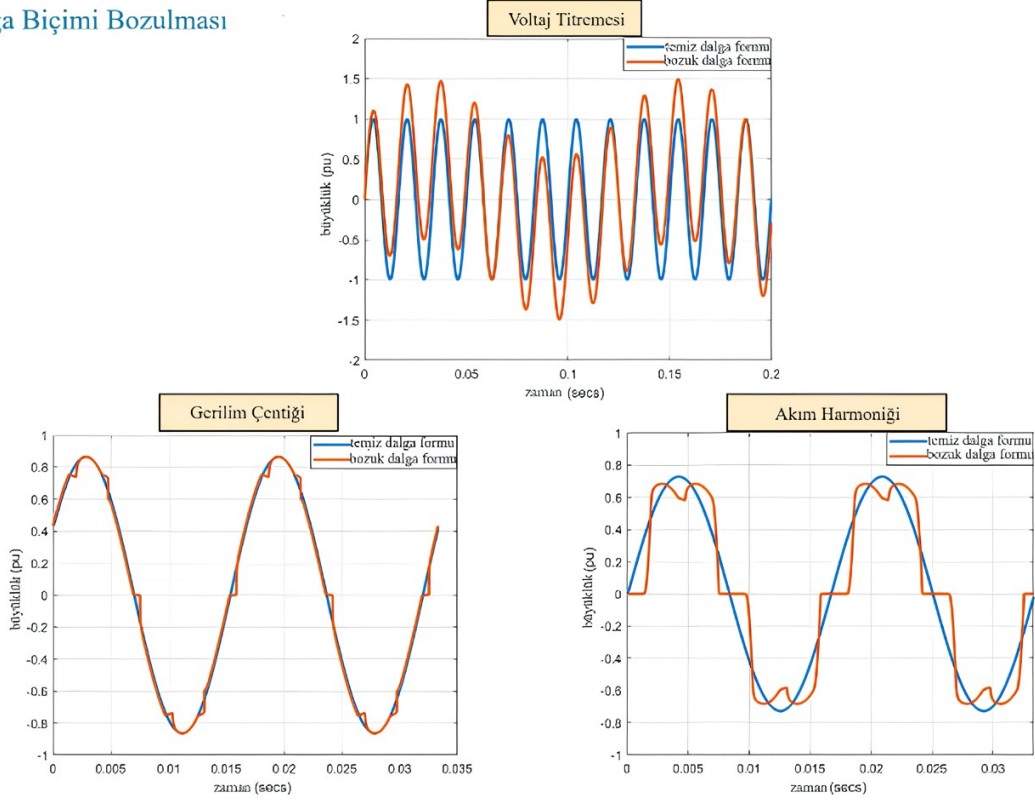
MG'nin işletilmesinde en zorlu durumlardan biri, ada modunda aktif ve reaktif güç kontrolünün sağlanamamasıdır. Yerel güvenilirlik ve kararlılık için MG çalışması sırasında, bir gerilime karşı reaktif güç düşüş denetleyicisi kullanarak, gerilimi düzenlemek gerekmektedir [33]. Çünkü her bir dağıtık üretim kaynağı, ada mod çalışma sırasında düşük frekans karakteristiği içermektedir [34]. Evirici tabanlı DER'ler için sarkma tabanlı aktif güç-frekans ve reaktif güç-gerilim kontrolörleri geliştirilmiştir [35]. Bu kontrolörler DER'ler arasında iletişim olmadan, MG'nin merkezi olmayan çalışmasına izin verir.

Yukarıda bahsedilen nedenlere ilişkin örnek bozulmalar Şekil 3 ve 4'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Gerilim büyüklüğü üzerinde temel sapma örnekleri 1.

Dalga Biçimi Bozulması



Şekil 4. Gerilim büyüklüğü üzerinde temel sapma örnekleri 2.

Şekil 3’te gösterilen gerilim ve frekans üzerindeki temel sapma örneklerinin sol üst grafiğinde, gerilim büyüklüğünün uzun bir süre boyunca nominal büyüklükten daha büyük olduğu bir aşırı gerilim grafiği, sağ üst grafikte ise gerilim büyüklüğünün uzun bir süre boyunca nominal büyüklükten daha düşük olduğu bir düşük gerilim grafiği görülmektedir. Bu koşulların hepsi elektrikli ekipmanın çalışmasıyla ilgili sorunlara neden olma potansiyeline sahiptir ve bu nedenle istenmeyen koşullardır. Şekil 4’te ise üç tür dalga şekli bozulması görülmektedir. Gerilim titremesi, gerilim çentigi ve akım harmonikleri titremesi, elektrik sistemlerinde hızla değişen yüklerden kaynaklanmaktadır.

Yukarıdaki problemlerde incelenmesi gereken en önemli etken harmoniklerdir. Harmonik bozulma olarak anılan ve enerji sisteminde salınım oluşturan bileşenler sonucu meydana gelen harmonik kirliliği, özellikle teknolojinin gelişmesiyle ve bu teknoloji içerisinde kullanılan güç elektroniği elemanlarının yaygın kullanımı ile artış göstermektedir. Harmonikler, herhangi bir önlem alınmazsa, elektrik şebekesinin güvenilir ve tutarlı bir şekilde çalışma kabiliyeti için bir tehdit oluşturur [36]. Güç elektroniği cihazları, güç sistemi ağındaki harmonik görünümünün ana nedenidir. Literatürde, çeşitli harmonik indirgeme teknikleri, aktif veya pasif güç filtreleme olarak sınıflandırılır. Aktif filtreler herhangi bir sıradaki harmonikleri gidermek için kullanılırken, pasif filtreler daha yüksek dereceli harmonikleri azaltmak için kullanılmaktadır. [17].

Harmoniklerin güç sisteminde meydana getirdiği sorunların giderilmesi için bu bileşenlerin ölçümü ve analizleri çok önemlidir. Ele alınan sistemlerde, hangi noktalardan ölçüm yapılacağı, bunların analizlerinin nasıl gerçekleştirileceği dikkat edilmesi gereken konulardır. Çalışmalar gerçekleştirilirken uluslararası ve ulusal kuruluşların belirlediği standartlar temel alınarak, ölçüm süreleri, ölçüm ve analiz yöntemleri uygun standartlara göre seçilmelidir [37]. Bu amaçla, bazı ülkeler harmonikleri bir koz (güç) olarak belirlemişler ve harmonik standartlarını oluşturmuşlardır. Ülkemizde elektrik iletim sistemi kullanıcılarının uymakla yükümlü oldukları harmonik sınır değerleri ve harmonik ölçüm sınır değerleri “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliği ve Kalitesi Yönetmeliği” [17] ile “Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği” [38] tarafından belirlenmektedir. Akım harmonik sınır değerleri Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliği ve Kalitesi Yönetmeliği’nde, gerilim harmonik sınır değerleri de Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği’nde yer almaktadır. Standartlarda ölçüm noktası olarak ölçüm yapılacak sistemin ortak bağlantı noktası tercih edilmektedir. İncelenen sistemlerde, hangi noktalardan ne kadar süre ile ölçüm alınacağı ve bunların analizlerinin nasıl yapılacağı da önem arz etmektedir. Doğrusal olmayan elemanlar ile tam sinüsoidal olmayan kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasıyla, sistemdeki akım ve gerilim dalga şeklinin bozulduğu bilinmektedir. Bozulan bu dalga şekillerini Fourier Analizi olarak bilinen yöntem ile temsil etmek mümkündür [39].

Fransız fizikçi ve matematikçi J. Fourier, sinüsoidal olmayan periyodik dalgaların; genlik ve frekansları farklı birçok sinüsoidal dalgaların toplamından oluştuğunu, başka bir deyişle; sinüsoidal olmayan periyodik dalgaların genlik ve frekansları değişik (temel dalga frekansının tam katları) olan sinüsoidal dalgalara ayrılabileceğini göstermiştir.

Periyodik fonksiyonlar Fourier serisine açıldıklarında, birinci terimi bir sabit, diğer terimleri ise bir değişkenin katlarının *sinüs* ve *cosinüs* büyüklüklerinden oluşan bir seri halinde yazılmaktadır.

$$i_s(t) = I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (1)$$

$$v_s(t) = v_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (2)$$

Akım ve gerilim harmonikleri simetrik olduklarından, *cosinüs* terimlerin değeri sıfır olacaktır. Ayrıca ifadenin sadeleştirilmesi açısından doğru akım bileşenleri ihmal edilirse, güç sistemlerinde akım ve gerilimin anlık değerlerinin Fourier açılımı aşağıdaki şekilde yazılmaktadır.

$$i_s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2I_{sn}} \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (3)$$

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2V_{sn}} \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (4)$$

Burada V_{sn} ve I_{sn} , n . harmonik derecesi için gerilim ve akımın etkin değerleri, ω_1 temel frekansa ait açılmal frekans, θ_n ile δ_n ise n . harmonik için gerilim ve akıma ait faz açılarıdır.

Toplam akımın etkin değeri:

$$i_s = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{sn}^2} \quad (5)$$

ifadesinden elde edilmektedir.

Harmonik akımlarının etkin değeri:

$$I_h = \sqrt{i_{s2}^2 + i_{s3}^2 + i_{s4}^2 + \dots} \quad (6)$$

olarak bulunmaktadır.

Uygulamada harmonik ifadelerinde bazı sadeleştirmeler yapmak mümkündür. Örneğin dengeli güç sistemlerinde yarım dalga simetrisinden dolayı çift harmoniklerin etkisi sıfırdır. Trafolar tarafından üretilen 3 ve 3'ün katları harmoniklerin şebeke üzerindeki etkileri ise çeşitli trafo bağlantıları ile giderilebilmektedir. Bunların dışında elektrik üretim aşamasında alternatörlerin meydana getirdiği harmonikler de, alternatör sarım şekillerini değiştirerek giderilebilmektedir. Alternatör faz sargılarının toplu sarım yerine dağıtık sarımlı yapılmaları, üretilen gerilim dalga şeklini *trapez* yerine *sinüsoidal* forma yaklaştırmaktadır [21].

Enerji kalitesinin ölçülebilmesi ve bozulmaların sınırlandırılabilmesi için akım ve gerilim harmoniklerinin tanımlanması gerekmektedir. Toplam harmonik bozulma (THD), harmonikli bileşenlerin efektif (rms) değerlerinin, temel bileşen efektif (rms) değerine bölünmesiyle elde edilir ve genellikle yüzde olarak gösterilir. THD ifadesinin yardımı ile temel sinüs bileşenimizin harmonik bileşenlerin toplanması ile ilk formundan ne derece sapmaya maruz kalacağı görülebilir.

Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüsoidal dalga için THD değeri sıfırdır. Yani denklem 7 ve denklem 8'den de anlaşılacağı gibi harmonik bileşenlerin olmadığı sistemlerde THD herhangi bir değere ulaşmayacaktır [40]. Uluslararası IEC 519-1992'ye göre akım THD'si $I_{THD} < \%15-20$ ve gerilim THD'si $U_{THD} < \%3-5$ olmalıdır [35]. Gerilim için THD denklem 7'de verilmektedir [41].

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (7)$$

Burada;

THD_V : Gerilimin toplam harmonik bozunumu,

V_n : Devreye uygulanan gerilimin n 'inci mertebedeki harmoniğinin etkin değerini,

V_1 : Devreye uygulanan gerilimin temel frekanstaki etkin değerini göstermektedir.

Akım için THD denklem 8’de verilmektedir [41].

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (8)$$

Burada;

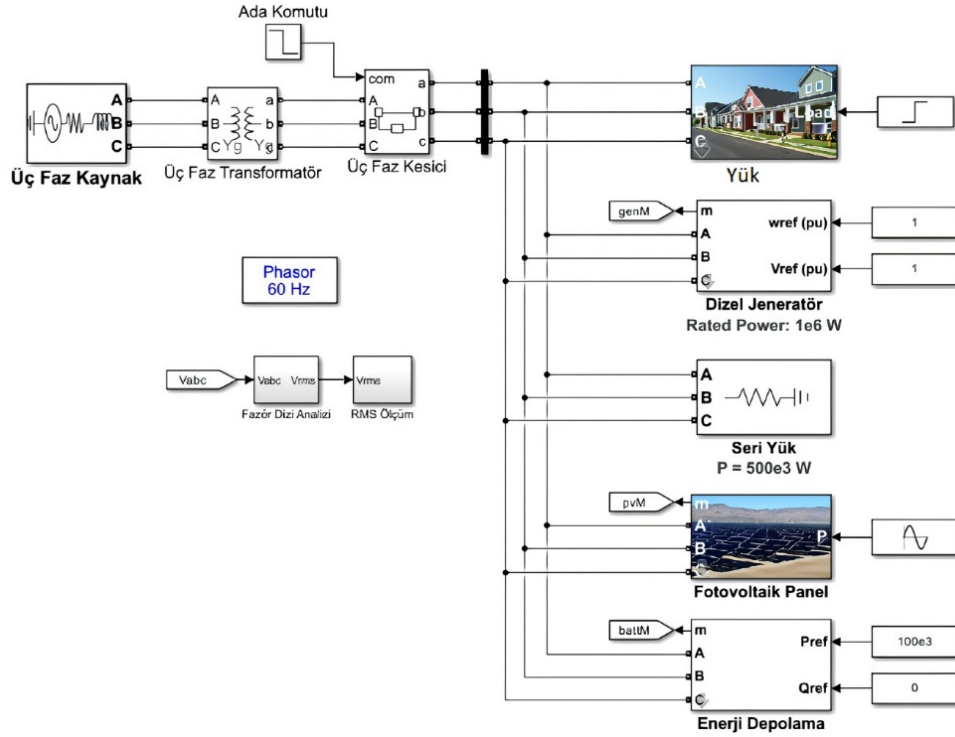
THD_I : Akımın toplam harmonik bozunumu,

I_n : Devreden geçen akımın n’inci mertebedeki harmoniğinin etkin değerini,

I_1 : Devreden geçen akımın temel frekanstaki etkin değerini ifade etmektedir.

5. Benzetim çalışması

Bu bölümde Şekil 5’te gösterilen orta ölçek bir MG’nin kontrol modları, enerji kaynağı modellemesi, güç dönüştürücüleri, kontrol algoritmaları, güç kompanzasyonu, şebeke bağlantısı, pil yönetim sistemlerinin incelenmesi MATLAB/SIMULINK ile gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışması, bir adet 500 kW değerinde bir enerji depolama sistemi, bir adet 500 kW değerinde fotovoltaik panel dizisi ve 1 MW değerinde bir dizel jeneratör seti ile yapılmıştır [42]. Frekans kontrolü, 60 Hz sistem frekansında sabit tutulacak şekilde kabul edilmektedir. Simülasyon örnek zamanlaması ise 60 saniye kabul edilmektedir. Benzetim çalışması esnasında hesaplanacak THD oranları MATLAB/SIMULINK güç bloğu (powergui) içerisindeki fft (hızlı Fourier dönüşümü) analiz sekmesi üzerinden hesaplanmaktadır.



Şekil 5. Matlab-Simulink örnek MG [42]

Şekil 5’te gösterilen ve benzetimi yapılan MG, bir ana elektrik şebekesinden bağımsız veya ona bağlı olarak çalışmaktadır ve yerleştirilmiş bir alan içinde yer alan enerji üretim sistemidir. MG hem yenilenebilir hem de geleneksel üretim kaynakları içermektedir. Bununla birlikte yenilenebilir kaynakların değişkenliğini dengelemek için enerji depolama da mevcuttur. Enerji depolama kaynağında bulunan batarya doluluk oranı her bir senaryoda yüzde 80 kabul edilmektedir. Gerilim düşmesi ve gerilim yükselmesi kontrolünün özelliklerine ilişkin kapsamlı bir çalışma gelecek bölümde sunulmaktadır.

Benzetim çalışması senaryo sıralaması aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

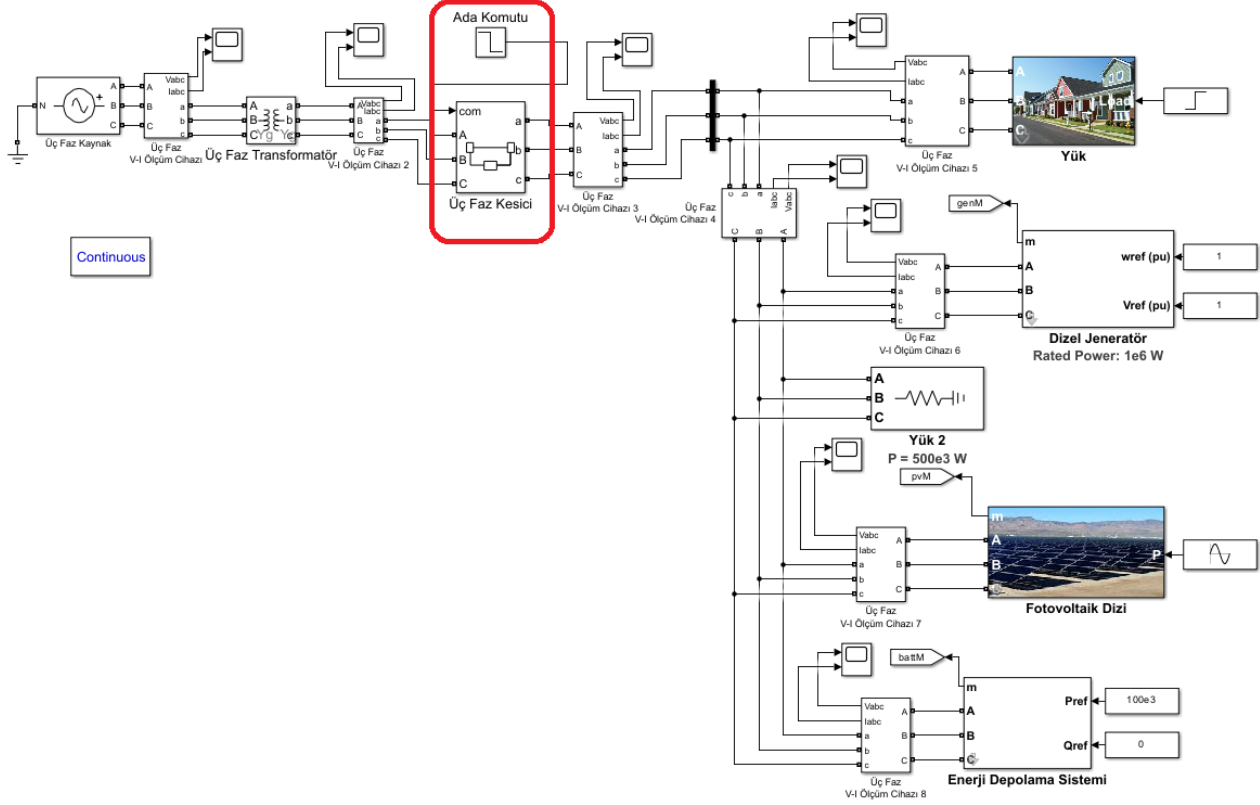
- İlk olarak, MG sistemin 15. saniyede, ana şebeke sistemi üzerinden planlı ayrılması sonucunda gerilim ve akım dalgalanmaları gözlemlenmektedir ve THD analizi yapılmaktadır.
- İkinci senaryoda MG sistemin 15. Saniyede, geleneksel şebeke sisteminden plansız (arıza durumu) ayrılma durumu incelenmektedir. Arıza durumu ana şebeke sistemi üzerinde meydana gelen gerilim düşmesi ve gerilim yükselme

durumları sonucunda, MG sistemin ada mod geçişi sırasında meydana gelen gerilim ve akım dalgalanmaları incelenmektedir. THD analizleri yapılarak bozulma oranları gözlemlenmektedir.

• Üçüncü senaryoda ise enerji depolama sisteminin MG sistemin frekansı üzerinde gösterdiği etki analiz edilmektedir.

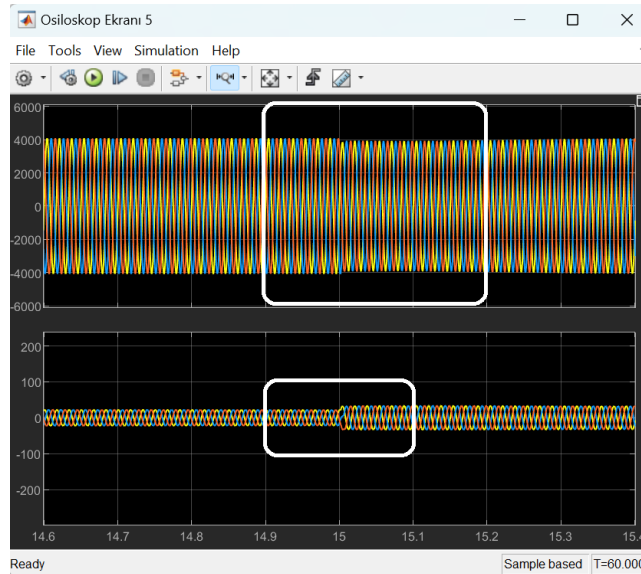
THD, temel sinyale göre ne kadar bozulma olduğunun bir ölçüsüdür. Ölçüm sonuçlarında ortaya çıkan değer sıfıra eşit veya sıfırdan büyük olmak zorundadır.

5.1. Senaryo 1: Mikroşebekenin ana şebeke sistemi üzerinden planlı ayrılması

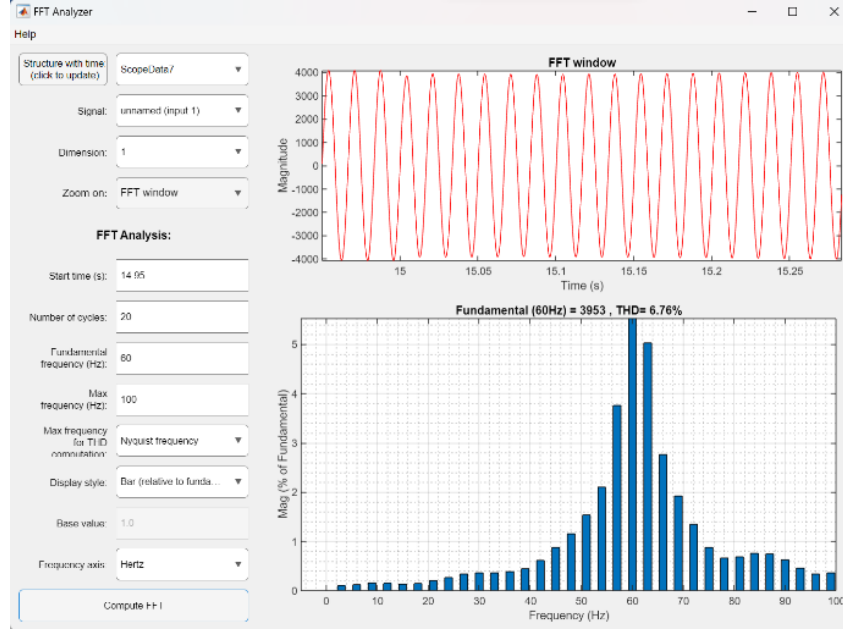


Şekil 6. Olay örgüsü 1: Üç fazlı kesici ile MG sistemin planlı ayrılması.

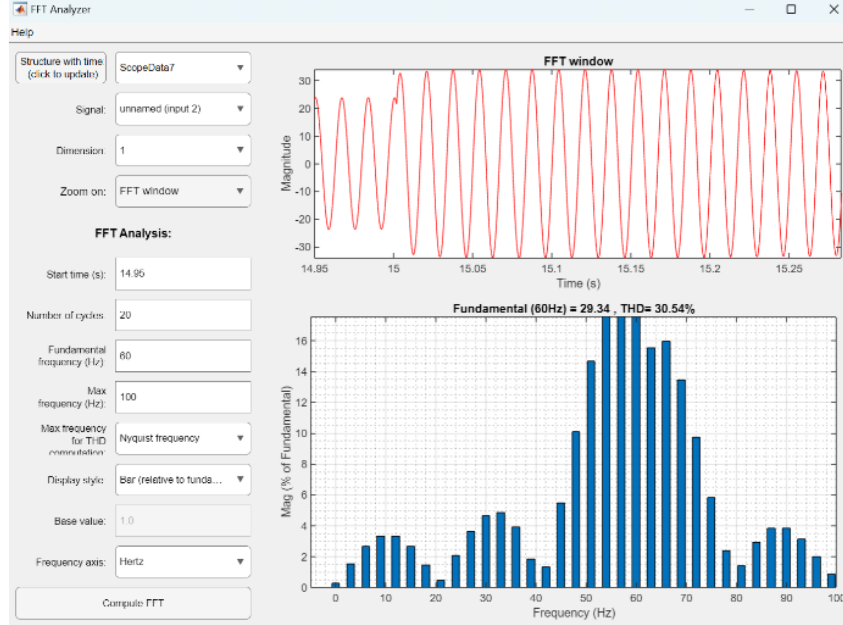
Birinci senaryoda MG sistemi, Şekil 6'da gösterilen üç fazlı kesici yardımıyla ana şebeke sisteminden 15. saniyesinde ada moduna geçmektedir. Planlı ayrılma sonucu MG gerilim ve akım ölçüm sonuçları ile THD bozulma yüzdesi Şekil 8 ve 9'da gösterilmektedir.



Şekil 7. MG'nin 15. Saniyede planlı ayrılması sonucu meydana gelen gerilim ve akım dalgalanmaları.



Şekil 8. MG'nin planlı ayrılması sonucu MG gerilimi için tek fazın THD yüzdesi

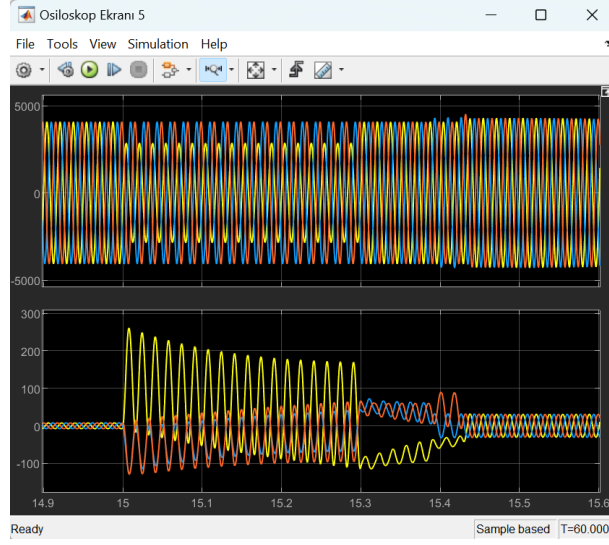


Şekil 9. MG'nin planlı ayrılması sonucu MG akımı için tek fazın THD yüzdesi

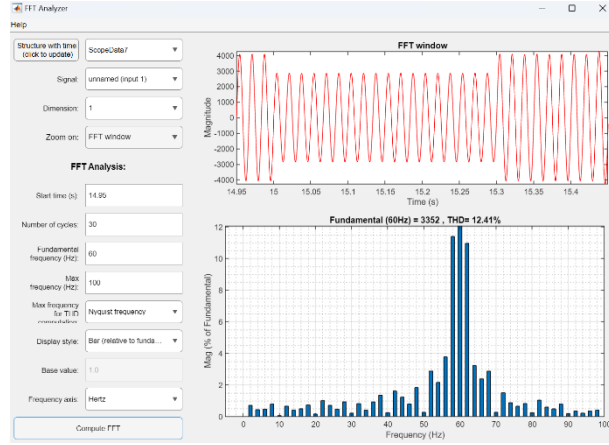
Şekil 7'de ölçüm ekranında MG sistemin şebekeye bağlı moddan planlı (bakım vb.) olarak, 15. saniyede ayrılması durumunda meydana gelen gerilim ve akım grafiklerindeki dalgalanmalar gösterilmektedir. Şekil 8 üzerinde kırmızı renk ile gösterilen grafik tek fazın genlik görüntüsüdür. Altta mavi sütunlar bulunan bar grafik ise harmoniklerin temel frekansı üzerinden göstermiş oldukları değişimi belirtmektedir ve Fft frekans spektrumunu göstermektedir. Gerilim grafiğinin tek fazı üzerinde yapılan THD oranı için başlangıç zamanı 14.95'inci saniyede başlanarak 20 adet sayıkl incelenmektedir. İncelenen ve planlı olarak ada moda geçen MG geriliminin tek faz ölçümü için THD yüzdesi %6.76'dır. Şekil 9'da ise akım grafiğinin tek fazı üzerinde yapılan THD oranı incelenmektedir. Başlangıç zamanı 14.95 olarak seçilip 20 sayıkl gözlemlenerek hesaplanan THD yüzdesi %30.54 tür.

5.2. Senaryo 2: MG sistemin geleneksel şebeke sistemi üzerinden plansız (arıza durumu) ayrılması

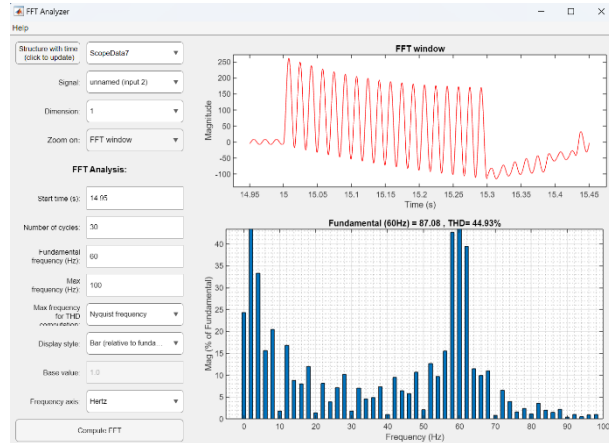
İkinci senaryoda ise, MG sistemlerin ana şebeke sistemlerinden plansız (arıza durumu) ayrılmasının benzetim çalışması yapılmaktadır. Benzetim çalışmasında iki farklı arıza durumu incelenmektedir. İncelenen ilk arıza durumunda MG'nin geleneksel şebeke kaynaklı tek faz gerilim düşmesi sonucu adalanması ve bu adalanma sırasında meydana gelen şebeke gerilim ve akım dalgalanmaları Şekil 10'da gözlemlenmektedir. Gerilim düşmesi 15. saniyede meydana gelip arıza süresi planlı olup 0.3 saniye devam ettirilmektedir.



Şekil 10. Ana şebeke kaynaklı arıza (gerilim düşümü) sonucu ada moda geçen MG'nin gerilim ve akım dalgalanmaları.



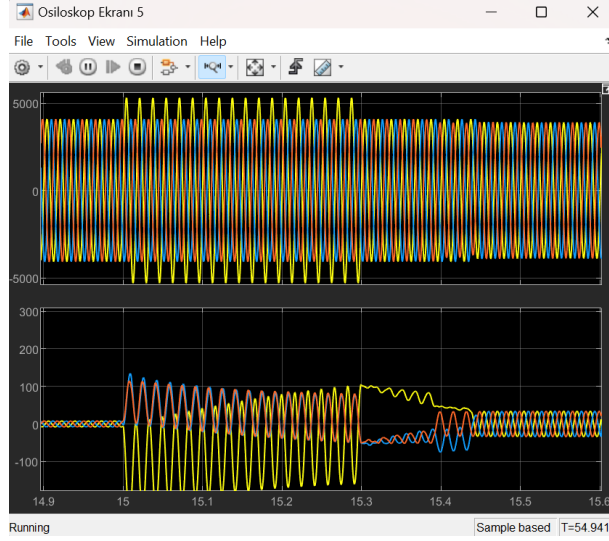
Şekil 11. MG'nin plansız ayrılması (gerilim düşmesi) sonucu MG gerilimi için tek fazın THD yüzdesi.



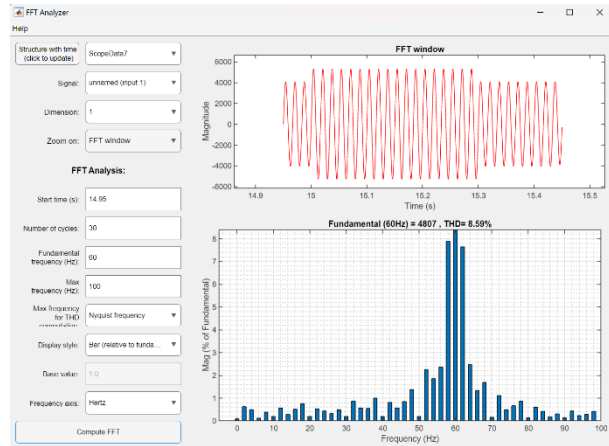
Şekil 12. MG'nin plansız ayrılması (gerilim düşmesi) sonucu MG akımı için tek fazın THD yüzdesi.

Şekil 11 ve 12'de gerilim ve akım bozulma yüzdeleri gösterilmektedir. Şekil 11 üzerinde kırmızı renk ile gösterilen grafik tek fazın genlik görüntüsüdür. İncelenen gerilim grafiğinin tek fazı üzerinde yapılan THD oranı için başlangıç zamanı 14.95'inci saniyede başlanarak bozulmanın bittiği noktaya kadar 30 adet sayıkl incelenmektedir. İncelenen tek faz gerilim grafiğinin alt tarafında bulunan mavi sütunlu bar grafiği ise arıza sonucu ada moda geçen MG geriliminin tek faz ölçümü için THD yüzdesini göstermektedir ve %12.41 dir. Şekil 12'de ise akım grafiğinin tek fazı üzerinde yapılan THD oranı incelenmektedir. Başlangıç zamanı 14.95 olarak seçilip bozulmanın bittiği noktaya kadar 30 sayıkl gözlemlenerek hesaplanan THD yüzdesi %44.93 tür.

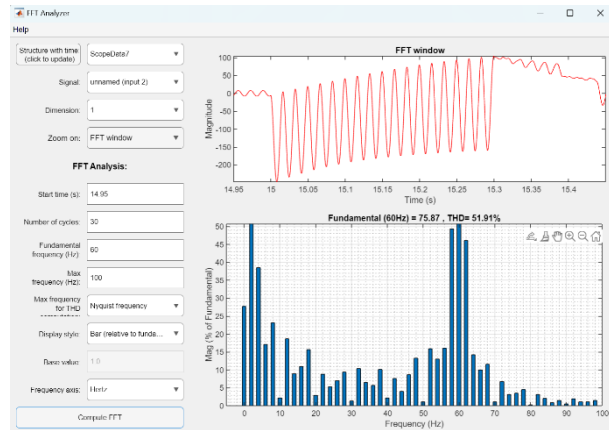
İkinci arıza durumunda ise MG'nin geleneksel şebeke kaynaklı tek faz gerilim yükselmesi sonucu adalanması ve bu adalanma sırasında meydana gelen şebeke gerilim ve akım dalgalanmaları incelenmektedir. Şekil 13'te MG ölçüm sonuçları gözlemlenmektedir. Gerilim yükselmesi 15. saniyede meydana gelip arıza süresi planlı olup 0.3 saniye devam ettirilmektedir.



Şekil 13. Ana şebeke kaynaklı arıza (gerilim yükselmesi) sonucu ada moda geçen MG'nin gerilim ve akım dalgalanmaları.



Şekil 14. MG'nin plansız ayrılması (gerilim yükselmesi) sonucu MG gerilimi için tek fazın THD yüzdesi.

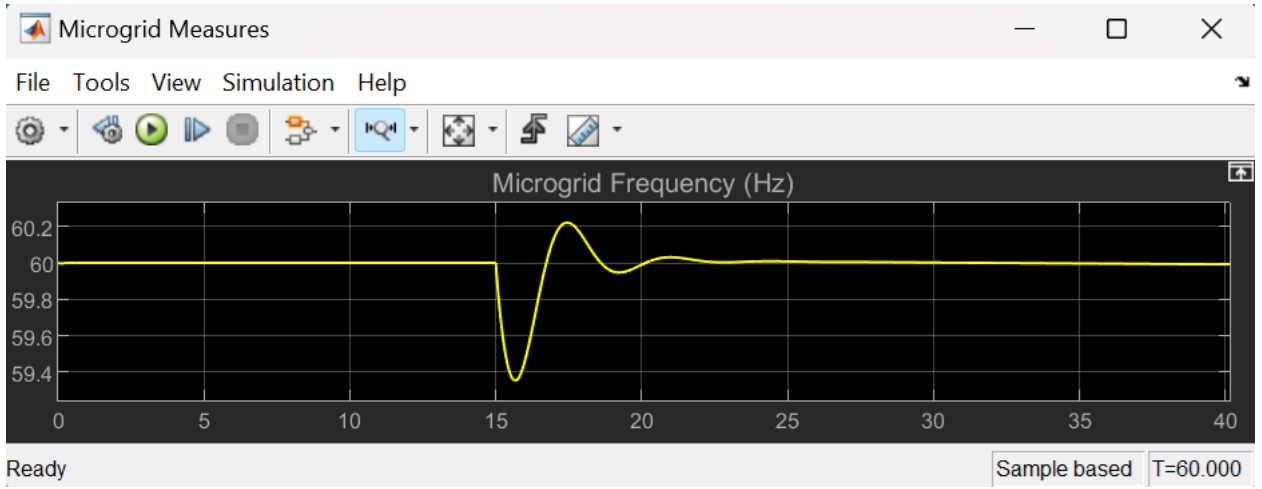


Şekil 15. MG'nin plansız ayrılması (gerilim yükselmesi) sonucu MG akımı için tek fazın THD yüzdesi.

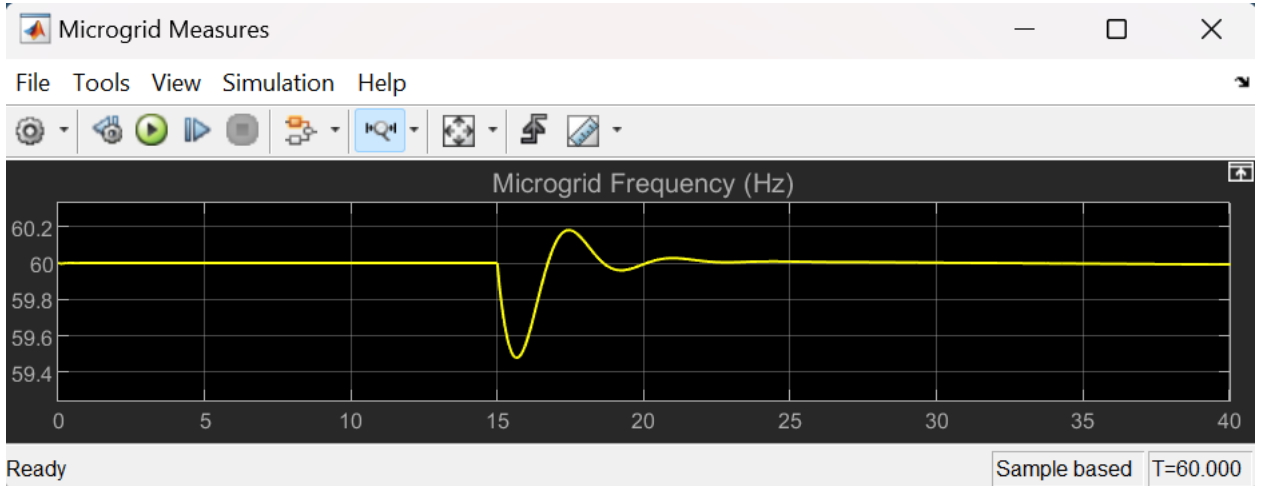
Şekil 14 ve 15’de gerilim ve akım bozulma yüzdeleri gösterilmektedir. Şekil 14 üzerinde kırmızı renk ile gösterilen grafik tek fazın genlik görüntüsüdür. İncelenen gerilim grafiğinin tek fazı üzerinde yapılan THD oranı için başlangıç zamanı 14.95’inci saniyede başlanarak bozulmanın bittiği noktaya kadar 30 adet saykıl incelenmektedir. İncelenen tek faz gerilim grafiğinin alt tarafında bulunan mavi sütunlu bar grafiği ise arıza sonucu ada moda geçen MG geriliminin tek faz ölçümü için THD yüzdesini göstermektedir ve %8.59 dur. Şekil 15’de ise akım grafiğinin tek fazı üzerinde yapılan THD oranı incelenmektedir. Başlangıç zamanı 14.95 olarak seçilip bozulmanın bittiği noktaya kadar 30 saykıl gözlemlenerek hesaplanan THD yüzdesi %51.91 dir.

5.3. Senaryo 3: Enerji depolama sisteminin MG sistem frekansına etkisi

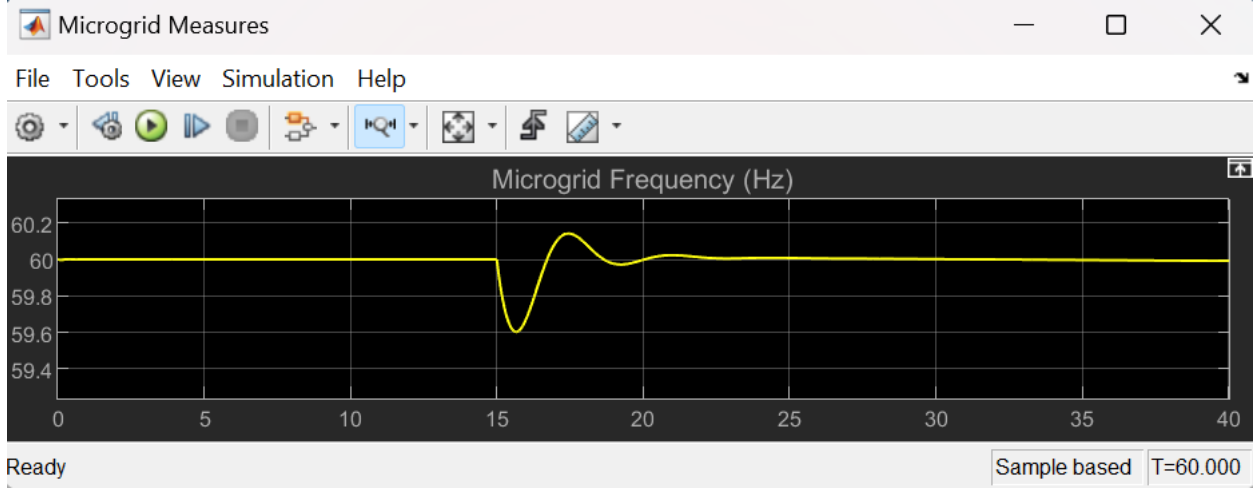
Senaryo 3’te ise enerji depolama sistemlerinin MG frekansı üzerine etkisi incelenmektedir. Yukarıda benzetim çalışması yapılan MG sistemin ada mod geçişinde meydana gelen frekans dalgalanması incelenmektedir. MG sistemi üzerinde incelenen enerji depolama sistemi 500 kW anma gücüne sahiptir. İlk ölçüm sonuçları MG sistemi üzerinde enerji depolama sisteminin etkisinin bulunmadığı ada moda geçişi bize göstermektedir. İkinci ölçüm sonuçlarında 50 kW, üçüncü ölçüm sonucunda 100 kW, dördüncü ölçüm sonucu 150 kW, beşinci ölçüm sonucu 200 kw ve altıncı ölçüm sonucu ise 250 kW anma gücüne sahip enerji depolama sisteminin ada moda geçiş durumunda şebeke frekansı üzerine etkisini göstermektedir.



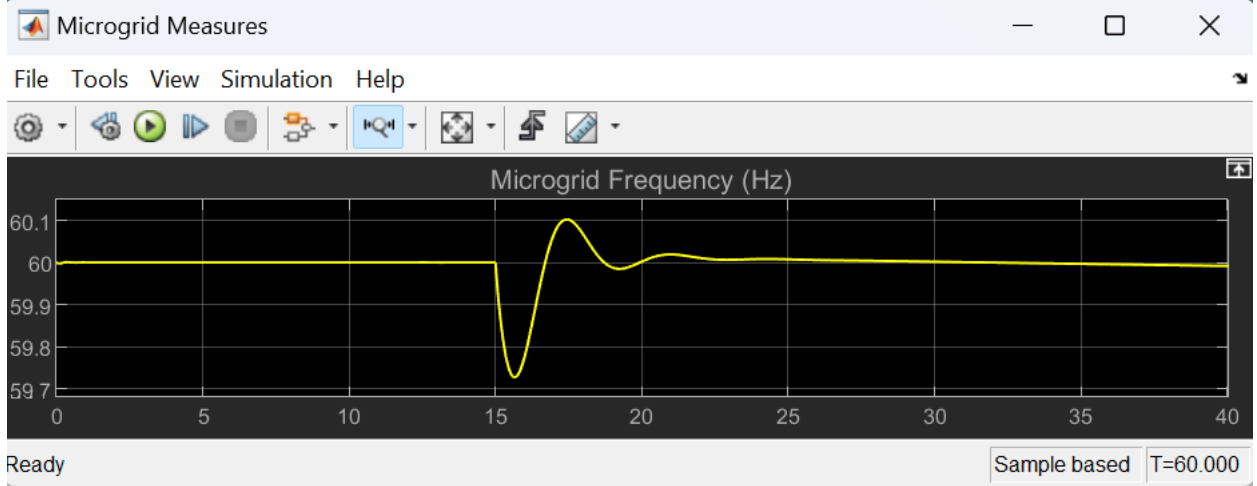
Şekil 16. Enerji depolama sisteminin dahil olmadığı MG frekansı.



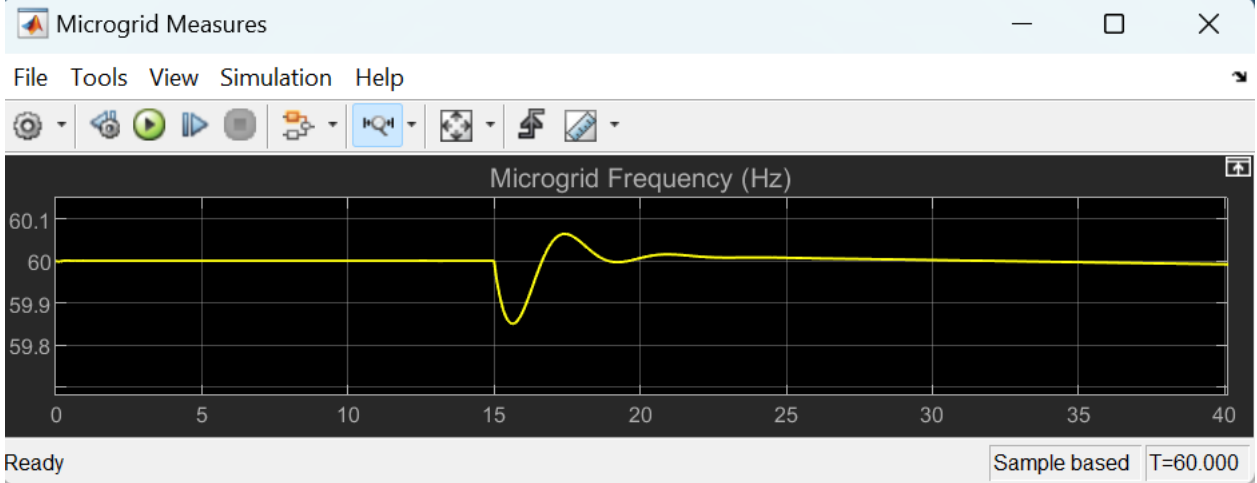
Şekil 17. 50 kW anma gücüne sahip enerji depolama sisteminin dahil olduğu MG frekansı.



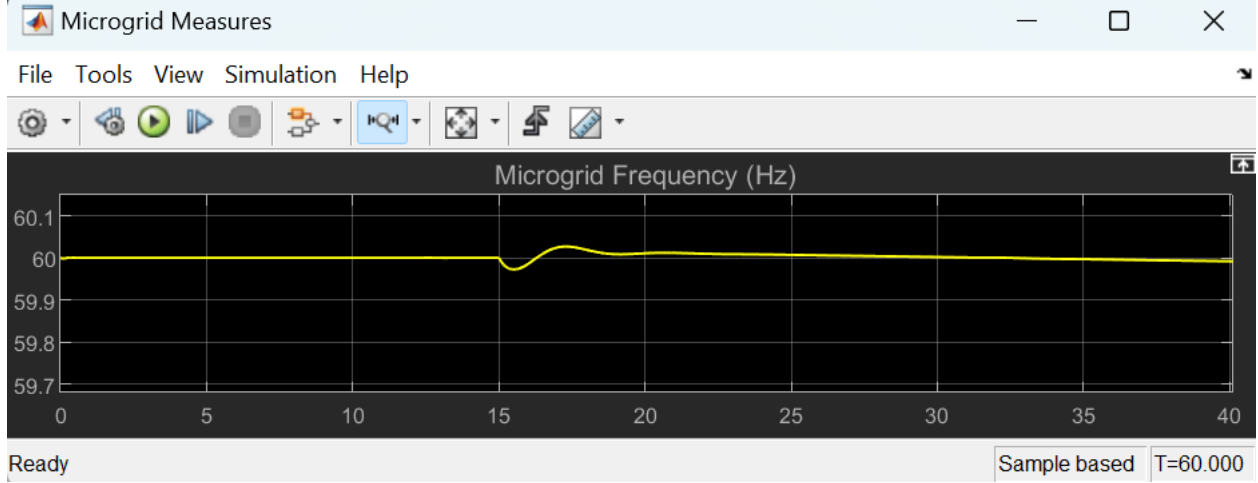
Şekil 18. 100 kW anma gücüne sahip enerji depolama sisteminin dahil olduğu MG frekansı.



Şekil 19. 150 kW anma gücüne sahip enerji depolama sisteminin dahil olduğu MG frekansı.



Şekil 20. 200 kW anma gücüne sahip enerji depolama sisteminin dahil olduğu MG frekansı.



Şekil 21. 250 kW anma gücüne sahip enerji depolama sisteminin dahil olduğu MG frekansı.

Şekil 16, 17, 18, 19, 20 ve 21 ölçümleri Şekil 6'da gösterilen MG sistemin 15. saniyesinde meydana gelen ada mod geçiş esnasında MG frekansını göstermektedir. Ölçüm sonuçlarına bakıldığında ada modu, şebekeye bağlı mod ve ikisi arasındaki geçişi içeren işletme sürecine göre enerji depolama desteği altında MG'nin, frekans dalgalanmalarını çözümlenmede umut verici bir kullanım modeli olacağı gösterilmektedir.

6. Sonuçlar

Bu konuda yapılmış birçok çalışma olmasına rağmen, harmonikler güç sistemlerinde hala ciddi bir problem olarak kabul edilmektedir. Yapılan analizler ile MG sistemlerin planlı ve plansız ada moduna alma sırasında meydana gelen gerilim ve akım dalgalanmalarının MG sistemi için tehdit haline geldiği gözlemlenmektedir. Uluslararası IEC 519-1992'ye göre limit değerlerinin üzerinde bulunan harmonik oranlarında elektrik devre veya sistemleri için tehlikeli ve büyük zararlar oluşturabilecektir. Analiz sonucunda incelenen THD oranları göstermektedir ki harmonik oluşumların önüne geçmek için MG sistemlerde kontrol stratejileri, harmonik giderici güç elektroniği ara yüz elemanları, enerji depolama sistemlerinin kullanımı ve filtreler oldukça önem arz etmektedir.

Günümüzde araştırmacılar, geleneksel şebeke sistemlerine kıyasla iletim kaybı olmaması ve stabilite analizinin kolay olması nedeniyle MG üretim sistemine odaklanmaktadır. MG sistemleri uzaktan uygulamaları kolaylaştırır ve kirlilik içermeyen enerjiye erişime izin verir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ivme kazandırır. Üstelik elektrik şebekesinin arızalanması durumunda MG en iyi alternatiflerden biridir. Ancak uygun kontrol tekniklerinin ve tasarımın bulunmaması, yenilenebilir tabanlı MG sistemini yönetmek zor olabilir. Bu çalışmada, şebekeye bağlı MG sistemin planlı ve plansız (şebekeye bağlı gerilim düşmesi ve yükselmesi) adalanma durumunda meydana gelen harmoniklerin THD büyüklükleri incelendiği sinyal bozulma analizi yapılmaktadır. Bunu yanı sıra enerji depolama sistemlerinin MG frekansı üzerine etkileri incelenmektedir. MG'nin gerilim ve frekans kontrolü, adalama ve koruma açısından kararlılık konuları, MG'deki teknik zorluklar, MG'nin etkili bir şekilde uygulanmasının önemi tartışılmaktadır. Güç paylaşımı amacıyla bazı uygun kontrol mekanizmaları uygulanmazsa, düşük atalet ada modunda ciddi sinyalizasyon sapmalarına yol açmaktadır. Bu bağlamda, güç elektroniği dönüştürücü uygulamaları, enerji depolama sistemlerine dayalı kontrol çalışmaları ve stratejilerinin desteklenmesi ve MG'lere entegrasyonu, son müşterilerin hizmet kalitesinde görülen iyileşmelere potansiyel olarak katkıda bulunacaktır. Gelecekteki güç sistemi konfigürasyonunda MG, geleneksel güç sistemiyle karşılaştırıldığında net ekonomik ve çevresel faydalar sağlayacaktır. MG konseptinin ve teknolojilerinin geliştirilmesi, çok sayıda ekonomik, ticari ve teknik zorluğun yakın iş birliği ile çözülmesi için daha fazla çaba gerektirir ve araştırmacılar arasında bu faaliyetlerle ilgili bilgi alışverişi, MG araştırmalarının ilerlemesi için oldukça faydalıdır.

7. Yazar katkı beyanı

Çalışma Abdurrahman Berke ÜLGER'in yüksek lisans tezi kapsamında Oben DAĞ danışmanlığında yapılmıştır. Benzetim çalışmasının hazırlanması Oben DAĞ'ın yönlendirmesi doğrultusunda Abdurrahman Berke ÜLGER tarafından gerçekleştirilmiştir. Sonuçların değerlendirilmesi, makale yazımı ve revizyonu Abdurrahman Berke ÜLGER ve Oben DAĞ tarafından yapılmıştır.

8. Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Makale için etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

9. Kaynaklar

- [1] Olivares DE, Mehrizi-Sani A, Etemadi AH, Canizares CA, Iravani R. “Trends in microgrid control”. *IEEE Trans. Smart Grid*, 5(4), 1905-1919, 2014.
- [2] Ilic-Spong M, Christensen J and Eichorn KL. “Secondary voltage control using pilot point information”. *IEEE Trans. PowerSyst*, 3(2), 660 -668, 1988.
- [3] Dağ O, Mirafzal B. “On Stability of Islanded Low-Inertia Microgrids”. *Clemson University Power Systems Conference (PSC)*, Clemson, SC, USA, 08-11 March 2016.
- [4] Lasseter RH. “Microgrids”. *IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting*, New York, NY, USA, 27-31 January 2002.
- [5] Tsikalakis AG and Hatziargyriou ND. “Centralized control for optimizing microgrids operation”. *IEEE Trans. Energy Convers*, 23(1), 241-248, 2008.
- [6] Vasilaskis A, Zaferiratou I, Lagos DT, Hatziargyriou ND, “The Evolution of Research in Microgrids Control”. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 7, 331-343, 2020.
- [7] Blaabjerg F, Teodorescu R, Liserre M and Timbus AV. “Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems”. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 53(5), 1398-1409, 2006.
- [8] Enjeti PN, Ziogas PD, Lindsay F. “Programmed PWM techniques to eliminate harmonics: a critical evaluation”. *IEEE Trans. Ind. Appl*, 26(2), 302-316, 1990.
- [9] Mahrous EA, Rahim NA, Hew WP. “Three phase three level voltage source inverter with low switching frequency based on the two level inverter topology”. *IET Electr. Power Appl*, 1(4), 637-641, 2007.
- [10] Liang TJ, O’Connell RM, Hoft RG. “Inverter harmonic reduction using Walsh function harmonic elimination method”. *IEEE Trans. Power Electron*, 12(6), 971-982, 1997.
- [11] Taufiq JA, Mellitt B, Goodman CJ. “Novel algorithm for generating near optimal PWM waveforms for AC traction drives”. *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, 133(2), 85-94, 1986.
- [12] Trzynadlowski AM, Legowski S. “Application of neural networks to the optimal control of three phase voltage controlled inverters”. *IEEE Trans. Power Electron*, 9(4), 397-404, 1994.
- [13] Salam Z. “An online harmonics elimination PWM scheme for three-phase voltage source inverter using quadratic curve fitting”. *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, Busan, Korea (South), 02-06 November 2004.
- [14] Maswood AI, Wei S, Rahman MA. “A flexible way to generate PWM-SHE switching patterns using genetic algorithm”. *Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Anaheim, CA, USA, 04-08 March 2001.
- [15] Ray RN, Chatterjee, Goswami SK. “Reduction of voltage harmonic using optimisation-based combined approach”. *IET Power Electronics*, 3(3), 334-344, 2008.
- [16] Kundur P, Paserba J, Ajarapu V, Andersson G, Bose A, Canizares C, et al. “Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions”. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19, 3, 1387-401, 2004.
- [17] Farooq H, Zhou C and Farrag ME. “Analyzing the harmonic distortion in a distribution system caused by the non-linear residential loads”. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 2(1), 46-51, 2012.
- [18] Sadeque F, Gursoy M, Mirafzal B. “Survey of Control Methods for Grid-Forming Inverters – Advancements from 2020 to 2023”. *2023 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC)*, Manhattan, KS, USA, 27-28 April 2023.
- [19] Katiraei F, Iravani MR, Lehn PW, “Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process” *IEEE Trans. Power Delivery*, 1, 248-257, 2005.
- [20] Tang X, Deng W, Qi Z. “Research on Micro-Grid Voltage Stability Control Based on Supercapacitors Energy Storage”. *2009 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Tokyo, Japan, 15-18 November 2009.
- [21] Eren S, Pahlevani M, Knight AM. “Digital Real-Time Harmonic Estimator for Power Converters in Future Micro-Grids”. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6), 6398-6407, 2018.
- [22] Melo FC, vd. “Harmonic Distortion Analysis in a Low Voltage Grid-Connected Photovoltaic System”. *IEEE Latin America Transactions*, 13(1), 136-142, 2015.
- [23] Jain S. *Power quality: An introduction*. Editörler: Dwivedi SK, Jain S, Gupta KK, Chaturvedi P. Modeling and Control of Power Electronics Converter System for Power Quality Improvement, 1-29, New York, USA, Academic Press, 2018.
- [24] Saeed MH, Fangzong W, Kalwar BA, Iqbal S. “A Review on Microgrids’ Challenges & Perspectives”. *IEEE Access*, 9, 166502-166517, 2021.
- [25] Micallef A, Apap M, Spiteri-Staines C and Guerrero JM. “Mitigation of harmonics in grid-connected and islanded microgrids via virtual admittances and impedances”. *IEEE Trans. Smart Grid*, 8(2), 651-661, 2017.
- [26] Naz MN, Mushtaq MI, Naeem M, Iqbal M, Altaf MW, Haneef M. “Multicriteria decision making for resource management in renewable energy assisted microgrids”. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 71, 323-341, 2017.
- [27] Neagu BC, Grigora G, Ivanov O. “An Efficient Peer-to-Peer Based Blockchain Approach for Prosumers Energy Trading in Microgrids”. *8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, Cluj-Napoca, Romania, 21-23 May 2019.

- [28] Mohanty SR, Kishor N, Ray PK, Catalao JPS. “Comparative Study of Advanced Signal Processing Techniques for Islanding detection in a Hybrid Distributed Generation System”. *IEEE Transactions on sustainable Energy*, 6, 122-131, 2015.
- [29] Batrinu F, Carpaneto E, Chicco G, De Donno M, Napoli R, Porumb R, et al. “New Nested Evolutionary Programming Approach for Voltage Control Optimization with Distributed Generation”. *12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference Conference*, Dubrovnik, Croatia, 2-15 May 2004.
- [30] Boonchiam P, Mithulananthan N. “Understanding of Dynamic Voltage Restorers through MATLAB Simulation”. *Thammasat Int. J. Sc. Tech*, 11(3), 1-6, 2006.
- [31] IEEE. “1159-1995 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”. IEEE, 1995, 1995.
- [32] Ghosh A, Ledwich G. *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [33] Zamora R, Srivastava AK. “Controls for microgrids with storage: Review, challenges, and research needs”. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 14(7), 2009-2018, 2010.
- [34] Rath SS, Panda G, Ray PK, Mohanty A. “A comprehensive review on microgrid protection: Issues and challenges”. *3rd International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Clean Energy Technologies*, Shillong, Meghalaya, India, 05-07 March 2021.
- [35] Karimi MH, Taher SA, Arani ZD, Guerrero JM. “Imbalance power sharing improvement in autonomous microgrids consisting of gridfeeding and grid-supporting inverters”. *7th Iran Wind Energy Conf.*, Shahrood, Iran, 17-18 May 2021.
- [36] IEEE. “519-2014 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”. IEEE, 2014.
- [37] IEEE. “1159-2009 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”. IEEE, 2009.
- [38] Sinvula R, Abo-Al-Ez KM, Kahn MT. “Total Harmonics Distortion (THD) with PV System Integration in Smart Grids: Case Study”. *2019 International Conference on the Domestic Use of Energy*, Wellington, South Africa, 25-27 March 2019.
- [39] Alhamrouni I, Wahab W, Salem M, Rahman NHA, Awalın L. “Modeling of Micro-grid with the consideration of total harmonic distortion analysis”. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 15(2), 581-592, 2019.
- [40] Kocatepe C, Uzunoglu M, Yumurtacı R, Karakaş A, Arıkan O. *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*. İstanbul, Türkiye, Birsen Yayınevi, 2003.
- [41] ABB. “Technical Application Papers No.8 Power factor correction and harmonic filtering in electrical plants”. <https://library.e.abb.com/public/4704e67320c08992c1257870002e4700/1SDC007107G0202.pdf> (09.06.2016).
- [42] MathWorks. “Systems-Level Microgrid Simulation from Simple One-Line Diagram”. www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/67060-systems-level-microgrid-simulation-from-simple-one-line-diagram (09.06.2016).