

Şebekeye Bağlı Dağıtık Üretim Sistemleri için Akıllı Ada Çalışma Tespit Yöntemlerinin İncelenmesi

Asiye KAYMAZ ÖZCANLI^{1,*} 

¹Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 34445, Beyoğlu/İSTANBUL

Article Info

Research article
Received: 27/10/2022
Revision: 16/04/2023
Accepted: 16/04/2023

Keywords

Islanding
IDM
DG
Microgrid
NDZ

Makale Bilgisi

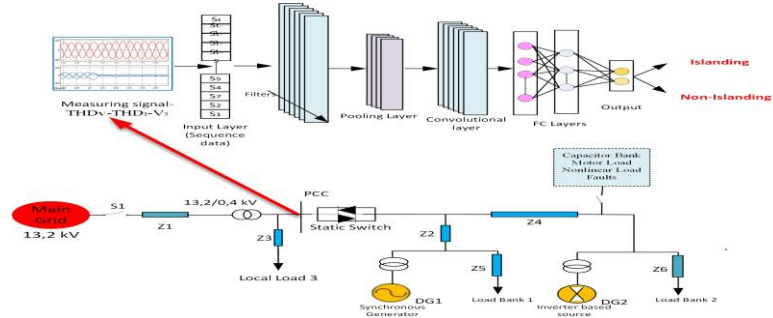
Araştırma makalesi
Başvuru: 27/10/2022
Düzeltilme: 16/04/2023
Kabul: 16/04/2023

Anahtar Kelimeler

Ada Çalışma
Ada Çalışma Yöntemleri
Dağıtık Üretim
Mikro şebeke
Algılama Dışı Bölge

Grafik Özet /Graphical/Tabular Abstract

Bu çalışmada, literatürde sunulan akıllı ada çalışma tespit yöntemleri detaylı olarak incelenmiş ve önerilen yöntemler algılama dışı bölge, tespit süresi, işletme maliyeti, doğruluk ve güç kalitesi bakımından analiz edilmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, gerçek zamanlı deneysel çalışmalar, önerilen yöntemlerin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla detaylı olarak incelenmiştir. Böylelikle ortaya konulan yöntemlerin pratikte uygulanabilirliği konusunda araştırmacılara önemli bir kaynak oluşturulmuştur. / In this study, intelligent islanding detection methods is presented in the literature and the methods are analyzed in terms of NDZ, detection time, computational cost, accuracy and power quality. Unlike other reviews, real time simulations of islanding detection are examined to assess applicability of the proposed methods. Furthermore, the review article is an important reference resource for researchers.



Resim A: Akıllı Yöntemlere Dayalı Ada Çalışma Tespiti Örneği/ Figure A: Islanding Detection Based on Intelligent Methods

Önemli noktalar (Highlights)

- Mikro şebekelerde ve dağıtık üretimlerde ada çalışmanın temel prensipleri aktarılmıştır. / Islanding detection standards and criteria are presented in distributed generation and microgrids.
- Yapay zekaya dayalı ada çalışma yöntemleri incelenmiştir. / Intelligent islanding detection methods are presented.
- Ada çalışmaya bağlı yöntemlerin uygulanabilirliği gerçek zamanlı simülasyonu yapılan çalışmalar üzerinden tartışılmıştır. Applicability of the proposed methods are discussed on real time simulations and hardware in the loop systems.

Amaç (Aim): Literatürdeki akıllı yöntemlere dayalı ada çalışma tespit yöntemlerinin önemli noktalarını ortaya koymak ve karşılaşılan zorluklara getirilen çözümleri incelemektir. / The aim of the study is to present intelligent islanding detection methods in the literature and to investigate the solutions for challenges.

Özgünlük (Originality): Ada çalışma tespit yöntemlerinin uygulanabilirliği gerçek zamanlı simülasyon çalışmaları üzerinden değerlendirilmiştir. / The applicability of the islanding detection methods survey on real time hardware in the loop systems.

Results (Bulgular): Akıllı yöntemlere dayalı ada çalışma tespit metotları geleneksel metotlara göre hızlı ve yüksek doğrulukta sonuçlar vermiştir. / Intelligent islanding detection methods demonstrate high accuracy and fast detection speed according to conventional methods.

Sonuç (Conclusion): Literatürde yapay zekaya dayalı çok sayıda yöntem önerilmekle birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme entegrasyonunun artmasıyla daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. / In recent years, many intelligent islanding detection methods have been presented in the literature. Novel methods are needed due to the rapid integration of renewable energy resources to power system.



Şebekeye Bağlı Dağıtık Üretim Sistemleri için Akıllı Ada Çalışma Tespit Yöntemlerinin İncelenmesi

Asiye KAYMAZ ÖZCANLI^{1,*}

¹Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 34445, Beyoğlu/İSTANBUL

Article Info

Research article
Received: 27/10/2022
Revision: 16/04/2023
Accepted: 16/04/2023

Keywords

Islanding
IDM
DG
Microgrid
NDZ

Öz

Mikro şebekeler fotovoltaik, rüzgâr ve hidrolik gibi enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunu sağlayan ve şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız çalışabilen, geleceğin enerji sisteminin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Mikro şebeke konsepti; fosil yakıt kullanımı, hat kayıpları, karbon ayak izi, emisyon azaltma ve enerji verimliliğini artırma hedefi ile geleceğin akıllı şebekeleri için büyük bir potansiyele sahiptir. Bununla birlikte dağıtık üretimin güç sistemine entegrasyonu, güç sisteminin kontrolü işletilmesi ve korunmasında bazı dezavantajlara ve risklere neden olabilmektedir. Bu konudaki en büyük problemlerden biri, şebekeye bağlı çalışan mikro şebekenin herhangi bir arıza durumunda ana şebekeden ayrılarak çalışmaya devam ettiği istenmeyen ada çalışma durumudur. İstenmeyen ada çalışma durumu, güç sisteminde frekans kararsızlığına neden olarak, personel güvenliği ve güç sistemindeki ekipmanları için tehdit unsuru oluşturabilir. Bu durumu önlemek amacıyla ada çalışmanın ivedilikle tespit edilerek ana şebeke ile mikro şebekenin bağlantısı fiziksel olarak kesilmelidir. Literatürde birçok ada çalışma tespit yöntemi önerilmiştir. Bu çalışmada, literatürde sunulan akıllı ada çalışma tespit yöntemleri detaylı olarak incelenmiş ve önerilen yöntemler algılama dışı bölge, tespit süresi, işletme maliyeti, doğruluk ve güç kalitesi bakımından analiz edilmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, gerçek zamanlı deneysel çalışmalar, önerilen yöntemlerin uygulanabilirliğini göstermek amacıyla detaylı olarak incelenmiştir. Böylelikle ortaya konulan yöntemlerin pratikte uygulanabilirliği konusunda araştırmacılara önemli bir kaynak oluşturulmuştur.

A Comprehensive Review of Intelligent Islanding Detection Methods for Grid Integrated Distributed Generation Systems

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 27/10/2022
Düzeltilme: 16/04/2023
Kabul: 16/04/2023

Anahtar Kelimeler

Ada Çalışma
Ada Çalışma Yöntemleri
Dağıtık Üretim
Mikro şebeke
Algılama Dışı Bölge

Abstract

Microgrid is an important part of the modern power system, which integrates renewable energy sources such as photovoltaic, wind and hydro into the grid and can operate both grid connected and stand-alone mode. Microgrid concept has great potential for smart grid with the aim of fossil fuel use, line losses, decarbonization, and increasing energy efficiency. However, the integration of distributed generation into the power system may cause some disadvantages and risks in the operation, control and protection of the power system. One of the most important problems is the unintentional islanding situation, in which the micro grid operates by disconnecting from the main grid in case of any failure. Unintentional islanding can cause instability frequency in the power system and threat to personnel safety and equipment. To overcome this situation, islanding must be detected immediately and microgrids must be electrically separated from the main utility network. There are many islanding detection methods in the literature. In this work, intelligent islanding detection methods are presented in a comprehensive review and the proposed methods are extensively analyzed in terms of non-detection zone, detection time, applicability in multi-DG systems, accuracy, and power quality. Unlike other studies, real-time experimental studies are examined to demonstrate the applicability of the proposed methods. Hence, the review will be a vital guideline for researchers and field engineering.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya üzerinde yaşanan enerji krizleri yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacı gün geçtikçe arttırmaktadır. Rusya ve Ukrayna arasında başlayan savaş nedeniyle Avrupa'da meydana gelen

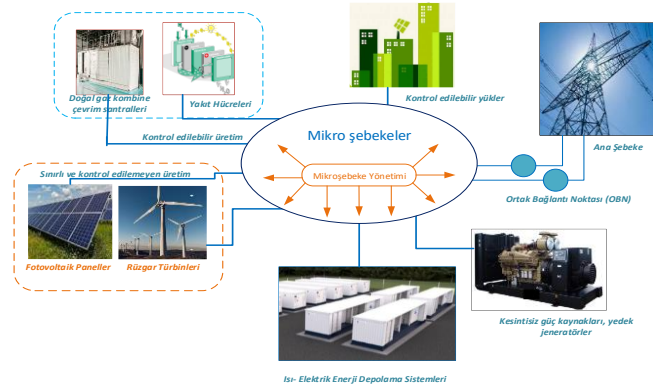
doğalgaz krizi bu ihtiyacın ne kadar önemli olduğunu bir kez daha gözler önüne sermiştir. Bu kriz sonrası uluslararası enerji ajansı (IEA) tarafından Rus gazının kullanımının azaltılmasına

yönelik on maddelik eylem planı hazırlanmıştır. Bu rapordaki maddelerden birinde ise rüzgâr ve güneşe bağlı kuruluşların hızlandırılmasıyla elde edilecek 35 TWh'lik enerji üretimiyle yıllık on milyon metre küplük gaz kullanımının azaltılabileceği belirtilmiştir [1]. Diğer yandan artan bu enerji üretiminin diğer yandan mevcut şebekeye bağlantısının önceden planlanarak ortaya çıkabilecek sorunlara çözüm üretilmesi gerekmektedir. Elektrik enerji sistemine dağıtık üretilere (DÜ) bağlı enerji kaynaklarının da katılması mevcut sistemi yapısal olarak değiştirmektedir. Dağıtık sistemlerin bireysel olarak kullanılması işletme, koruma ve kontrol açısından birçok zorluğu da beraberinde getirmektedir. Bunun yerine farklı DÜ'lerin bir arada bulunduğu yükleri ve depolama sistemlerini içinde barındıran, gerektiğinde otonom olarak şebeke ile paralel veya şebekeden bağımsız çalışabilen mikro şebeke kavramı ortaya çıkmıştır [2]. Mikro şebekeler; sınırlı ve kontrol edilemeyen rüzgâr ve güneş gibi DÜ'leri, üretimi kontrol edilebilen yakıt hücreleri, doğal gaz kombine çevrim santralleri bunun yanı sıra yedek güç üniteleri, enerji depolama sistemleri, elektrikli araç şarj istasyonları, kontrollü ve kontrolsüz yükleri içinde barındırabilir. Ayrıca mikro şebekeler kojenerasyon santralleri, dizel jeneratörler gibi DÜ'leri bünyesinde bulundurabilir ve ısı enerjisinden yararlanılarak üretilen enerjilerle verimliliği arttırabilir. Şekil 1'de örnek bir mikro şebeke konsepti gösterilmiştir. Acil durum yüklerine yedek güç sağlayan jeneratörlere benzer şekilde, mikro şebekeler de DÜ'lerin yük talebine daha yakın kurularak tüketici yüklerini beslemek için kullanılır. Bu sayede hat kayıplarını azaltmada ve sistemin verimliliğini arttırmada önemli etkiye sahiptirler. Mikro şebekelerin dağıtım şebekesine entegre edilmesi güç sisteminde ekonomik, süreklilik ve güvenilirlik açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte geleneksel şebeke sisteminin yapısal olarak değişmesi, mevcut güç sisteminin işletme, kontrol ve koruma mekanizmalarını devre dışı bırakmaktadır [3]. Koruma sistemi için ortaya çıkan en önemli problemlerden biri istenmeyen ada çalışma durumudur. Ada çalışma, şebeke ile paralel çalışan

DÜ'lerin herhangi bir sebeple şebekeden ayrılarak yerel yükleri beslemeye devam ettiği durumdur. Bu durum istemli veya istemsiz olarak meydana gelebilmektedir. Güç sisteminde bakım onarım gibi önceden planlanarak DÜ'lerin ana şebeke ile bağlantısının kesilmesi, istemli ada çalışma, beklenmedik olaylar sebebi ile DÜ'lerin aniden şebekeden ayrılması, istemsiz ada çalışma olarak tanımlanır. İstenmeyen bir ada çalışmaya geçiş düzensiz bir çalışmaya sebep olarak gerilim, frekans ve diğer güç sistemi parametreleri kabul edilmeyen limitlere sahip olabilmektedir. İstenmeyen ada çalışma durumu, güç sisteminde ana şebeke tarafında meydana gelen herhangi bir arıza, gerilim ve frekans değerlerinde herhangi bir nedenle meydana gelecek kabul edilemeyen değerlerin olması durumunda meydana gelebilir.

Bu çalışmada DÜ'lerin şebekeye entegrasyonunda meydana gelebilecek en önemli problemlerden biri olan istenmeyen ada çalışma durumu incelenmiştir. Bu amaçla ada çalışmaya neden olan durumlar, ada çalışma durumunda ortaya çıkabilecek problemler ve bu problemleri ortadan kaldırmak amacıyla önerilen ada çalışma tespit yöntemleri sırasıyla detaylandırılmıştır. Bu çalışmanın literatürdeki diğer ada çalışma tespit yöntemini inceleyen makalelerden farkını şu şekilde özetleyebiliriz. İlk olarak incelenen makaleler son yıllarda ortaya konulan farklı ve güncel çalışmalardan derlenmiştir. İkinci olarak literatürde önerilen ada çalışma yöntemleri çok sayıda performans kriteri göz önüne alınarak kapsamlı şekilde karşılaştırılmıştır. Son olarak olarak laboratuvar ortamında uygulaması yapılan ada çalışma tespit yöntemleri ayrı bir bölümde detaylı şekilde incelenmiştir. Böylelikle ortaya konulan yöntemlerin pratikte uygulanabilirliği konusunda araştırmacılara önemli bir kaynak oluşturulmuştur.

Çalışmanın ikinci kısmında ada çalışma standartları ve kriterleri, üçüncü kısmında ada çalışma tespit metotları, dördüncü kısmında ada çalışma tespit yöntemlerinin gerçek zamanlı uygulama çalışmaları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ise beşinci kısımda değerlendirilmiştir.



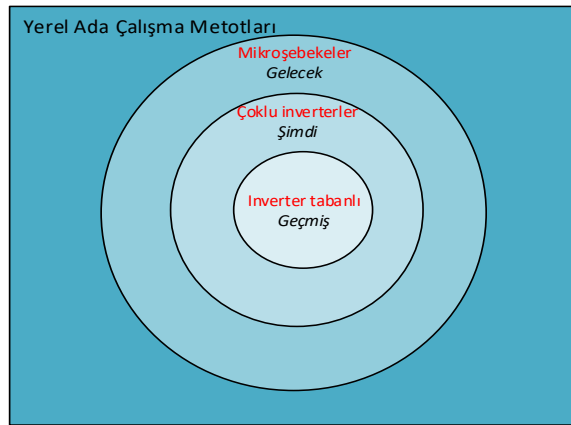
Resim 1. Mikro Şebekeler (Microgrids)

2. ADA ÇALIŞMA STANDARTLARI ve KRİTERLERİ (ISLANDING DETECTION STANDARDS AND CRITERIA)

Ada çalışma tespit metotları zaman içinde değişerek ihtiyaç durumuna göre farklı amaçlar için oluşturulmuştur. Geçmişten günümüze ada çalışma tespit metotlarını Şekil 2’de gösterilen sistemler için sınıflandırmak mümkündür. Bu üç farklı kategoriye ait oluşturulan yerel ada çalışma metotları farklı sistem bileşenlerini içermektedir ve bu da her bir kategori için önerilen çözümleri farklı kılmaktadır [4]. Geçmişte sunulan ada çalışma tespit yöntemleri inverter kaynaklı tek bir DÜ’nün bulunduğu eski sistemler için önerilmiştir. Başlangıçta tek inverter kaynaklı güneşe bağlı DÜ’ler için herhangi bir istenmeyen ada çalışma durumunda önceden belirlenen bir süre zarfında ada çalışma tespit

edilerek dağıtık kaynağının kapatılması planlanmıştır. Son yıllarda ise yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimin giderek artması mikro şebeke gibi sistemlerin yaygınlaşması ile ada çalışma durumunda bile dağıtık kaynakların yerel yükleri beslemeye devam etmesi istenmektedir. Bu da geçmişte önerilen çözümlerin etkisiz kalmasına sebep olmuştur.

Yenilenebilir enerjideki şebeke entegrasyonunun artması ve birden çok inverter kaynaklı DÜ’lerin birlikte kullanımı yeni ada çalışma tespit yöntemlerine olan ihtiyacı arttırmıştır. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında birden fazla inverterin bulunduğu durumlar için önerilen yöntemlerin büyük çoğunluğu her bir inverter kaynağın çıkışındaki duruma dayalı tespit yapmaktadır [5].



Şekil 2. Yerel ada çalışma tespit yöntemlerinin geçmişten günümüze hiyerarşisi [2] (The hierarchical of islanding detection methods)

Bu sistem gerçek mikro şebekeler için efektif bir çözüm sunamamaktadır. Şekil 3’te farklı kaynaklardan oluşan, statik anahtarlı mikro şebeke örneği ile gösterilmiştir. Statik anahtar sayesinde akıllı ada çalışma tespit yöntemleri, ada çalışmaya geçişteki belirlenen kontrol algoritmaları ve koruma metotları uygulanabilmektedir. Bu örnekte ortaya

konulan ada çalışma tespit metotları DÜ’lerin çıkışlarındaki ölçümlerden ziyade ana şebekenin ortak bağlantı noktasındaki (OBN) ölçümler dikkate alınarak uygulanmaktadır. Bu sayede tek bir noktadan alınan ölçüm ile uygulaması ve maliyeti daha düşük ada çalışma yöntemi elde edilmektedir.

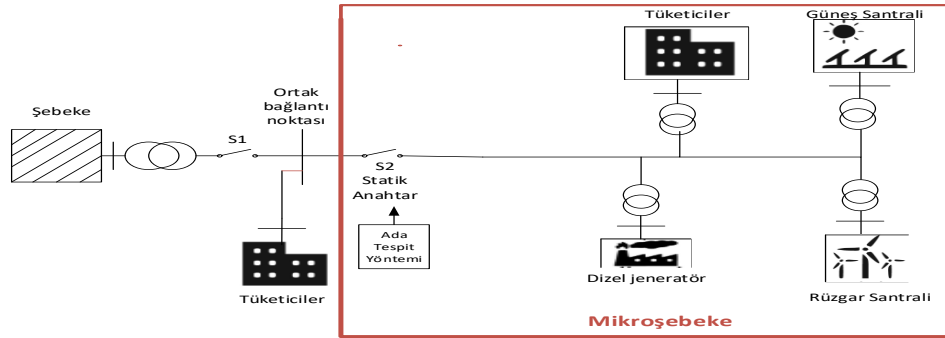
Ada çalışmanın mümkün olduğu kadar hızlı şekilde tespit edilmesi aşağıdaki nedenlerden dolayı hayati önem taşımaktadır.

- DÜ'lerin ada çalışma durumunda hala devrede olması nedeniyle hat üzerindeki enerji herhangi bir hat bakım işçisinin güvenliği açısından tehlike oluşturabilir.
- Ada çalışma durumunda şebekedeki gerilim ve frekans kontrolünün kaybedilmesi sonucu tüketici makineleri ve ekipmanlarına ciddi zarar meydana gelebilir.
- Gerilim ve frekans seviyelerinin korunamaması durumunda DÜ kaynaklarında ve diğer ekipmanlarda bozulmalara sebep olabilir.

Mikro şebekeler başlığı altında bu konuda geliştirilen ortak bir standart bulunmamaktadır. Bununla birlikte bazı ülkeler ve kuruluşlar bu konuda kendi test sistemlerini oluşturup belirli test standartlarına göre ada tespitinin esnekliğini ve uygulanabilirliğini değerlendirmişlerdir. Bu uluslararası standartlardan bazıları IEEE Std. 1547-2003, IEC 62116, UL 1741, Kore standartıdır. Ortaya konulan standartlarda müsaade edilen frekans ve gerilim aralığı ile maksimum ada tespit süresi Tablo 1'de verilmiştir [6]. IEEE 1547-2003 standardına göre herhangi bir ada çalışma durumu 2 saniyeden kısa sürede tespit edilmeli ve şebeke ile dağıtık üretim arasındaki fiziksel bağlantı kesmek için röleye sinyal göndermelidir. Geliştirilen

yöntem ada çalışmayı diğer şebeke bozukluklarından ayırt etmeli ve DÜ'nün şebeke ile bağlantı durumunu, güç kalitesini, ekipman zararını, frekans ve voltaj kararsızlığını gözetmelidir. Bu konuda ortaya konulan sınırlı sayıda çalışma olup en önemlisi IEEE-1547 numaralı standardıdır ve özellikle mikro şebeke için eksiklikler barındırmaktadır [7]. Bu da önerilen yöntemlerin test edilmesini ve uygulanabilirliğini zorlaştırmaktadır.

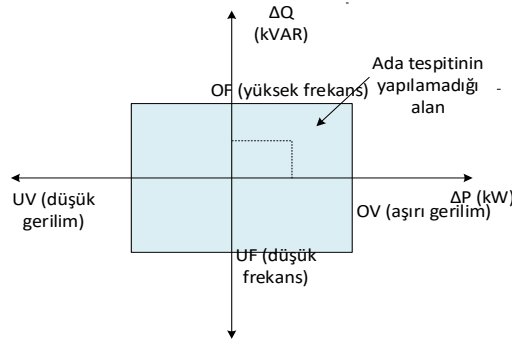
Ada çalışma tespit yönteminde değerlendirilen başlıca performans kriterleri bulunmaktadır [6]. Ada çalışmanın tespit edilemediği alan literatürde ADB olarak isimlendirilmiş ve ada çalışmanın meydana geldiği halde tespit edilemediği bölgeyi ifade etmiştir [8]. Bu bölge, DÜ ile yerel yük tüketimi arasındaki güç uyumsuzluğu ile ilgilidir. OBN'deki aktif güç değişimi (ΔP) ve reaktif güç değişimi (ΔQ) yani üretilen güç ile tüketilen güç arasındaki fark ada çalışmanın tespit edilemediği alanı hesaplamak için kullanılan birer kriterdir. Üretim ve tüketim arasındaki fark sıfıra yaklaştıkça OBN'de gerilim, akım, frekans gibi büyüklüklerdeki değişim küçüldüğünden ada çalışmayı tespit etmek güçleşir. Şekil 4'te aşırı ve düşük gerilim, alçak ve yüksek frekans örneğinde ADB örnek olarak gösterilmiştir. Ada çalışma tespiti üretilen aktif ve reaktif gücün yükler tarafından tamamen tüketildiği en kötü durumda bile yapılabilir. İyi bir ada çalışma tespiti için ADB'nin mümkün olduğunca düşük olması istenir.



Şekil 3. Mikro şebekede ada çalışma durumu (Islanding detection of microgrids)

Tablo 1. Ada Tespitinde Kullanılan Standartlar (Standards of Islanding Detection Methods)

Parametreler	IEEE Std. 1547-2003	IEEE Std. 929-2000	IEC 62116
Kalite Faktörü	1	2,5	1
Ada Tespit Süresi (t)	$t < 2$ s	$t < 2$ s	$t < 2$ s
Frekans aralığı	$59.3 \leq f \leq 60.5$ Hz	$59.3 \leq f \leq 60.5$ Hz	$f_0 - 1.5 \text{ Hz} \leq f \leq f_0 + 1.5 \text{ Hz}$
Gerilim aralığı	$0.88 \leq V \leq 1.10$	$0.88 \leq V \leq 1.10$	$0.85 \leq V \leq 1.15$



Resim 4. Ada Çalışmanın Tespit Edilemediği Bölge (ADB) (None Detection Zone (NDZ))

Ada çalışma tespit yönteminin performansını belirleyen bir diğer kriter ise tespit süresidir. Bu süre mikro şebekenin ana şebekeden ayrılmasının ardından ada çalışmanın tespit edildiği ana kadar geçen zamanı ifade eder. Önerilen yöntemin efektif olabilmesi için bu sürenin de oldukça düşük olması gerekir. IEEE 1547-2003, IEC 62116 gibi standartlarda bu sürenin 2 saniye değerinin altında olması gerektiği belirtilmiştir [7]. Bu süre ne kadar kısa olursa plansız ada çalışma durumlarında sistemin tekrar senkronizasyonun sağlanması o kadar kolay gerçekleştirilir.

Hatalı tespit, mikro şebekenin ana şebeke ile bağlantısının devam ettiği halde ada çalışma tespit edilememesi durumu ifade eder. Bu durum ise yükün kapatılıp açılması veya diğer şebeke arızaları durumunda belirlenen parametreler normal sınırları aştığı için yaşanır. Güç kalitesine etki ada çalışma performansını etkileyen bir diğer faktördür. Bazı yöntemlerde sisteme verilen enjekteler güç çıkışını bozmakta ve kalitesini kötüleştirmektedir.

Son olarak ada çalışma tespit yöntemi değerlendirilirken dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta sadece birden fazla DÜ için değil farklı tipte DÜ'leri içeren sistemler için de uygulanabilir ve esnek olmasıdır. Bunun yanı sıra mevcut sistem topolojisinin değişmesi durumunda da ada çalışmayı tespit edebilecek kapasiteye sahip olmalıdır. Yukarıdaki performans değerlendirmeleri şu şekilde özetlenebilir.

- Düşük ADB' ye sahip olmalı
- Yüksek hızda tespit yapabilmeli
- Farklı tipte DÜ'ler için uygulanabilmeli
- Uygulama maliyeti düşük olmalı
- Güç kalitesine olumsuz etkisi olmamalı

Dimensional measurements of keyseats obtained after the experiments were made with Global Classic 091508 model coordinate measuring machine (CMM). Before the measurements, the

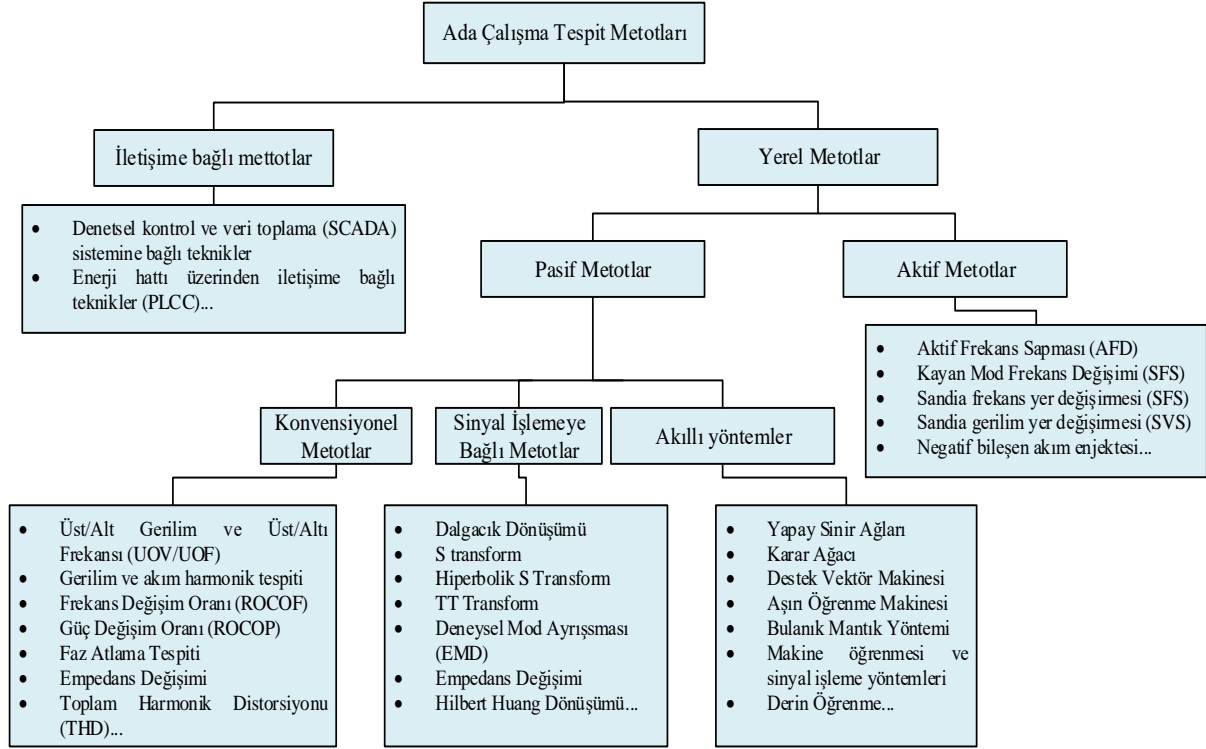
calibration process was performed at the angle of A90B-90. The plane formed from the ground surface of the workpiece was leveled and the position of the workpiece was fixed by verifying with the "line" formed from one side of the keyseat. "t1" measurement results were obtained by calculating the plane on the ground and the extreme point of the outer diameter. The "b" measurement results were obtained with the lines obtained by contacting two points on the side surfaces of the keyseat. Radius (R) measurements were obtained with circles created by touching three points, and the distance measurement between the circles and the "L" dimension were checked. Perpendicular to the ground "line" was formed from the side walls of the keyseat, and perpendicularity checks were made with the plane on the floor. All calibration and measurement processes were carried out at 21°C. The experimental setup and workflow are shown in Figure 3.

3. ADA ÇALIŞMA TESPİT YÖNTEMLERİ (ISLANDING DETECTION METHODS)

Ada çalışma tespit yöntemlerinin temel amacı şebeke ve DÜ tarafındaki bazı elektriksel parametrelerin izlenerek ada çalışmanın meydana gelip gelmediğini tanımlamaktır. Ada çalışma yöntemleri literatürde iletişime bağlı yöntemler ve yerel yöntemler olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. İletişime bağlı metotlar, elektrik şebeke seviyesinde operatör tarafından ada bilgisi ve röle kontrolü, merkezi denetleme kontrol ve veri toplama (SCADA) gibi iletişim sistemleri ile izlenerek yapılır. Bu metotlar en esnek yöntemlerdir ve sıfır ADB' ye sahiptir. Bu yöntemin en önemli dezavantajı şebekeye uygulamasında yüksek maliyete sahip olmasıdır. Bu yöntem birden fazla inverter bağlı yüksek güçlü DÜ'ler için çok elverişli olsa da mikro şebeke gibi küçük sistemler için ekonomik olarak uygun değildir. Yerel yöntemlerde ada çalışma tespiti için kullanılan sistem parametreleri OBN'den veya DÜ

kaynaklarının çıkışındaki yerel ölçümlerden elde edilir. Bu yöntemler ise kendi arasında aktif, pasif yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır. Literatürde ayrıca aktif ve pasif yöntemlerin dezavantajlarının üstesinden gelmek amacıyla bu yöntemler birlikte kullanılmış ve hibrit yöntem ismiyle sunulmuştur [9],[10]. Bazı çalışmalarda ise akıllı yöntemler ile

sinyal işlemeyle ilgili yöntemler birleştirilerek ada çalışma tespit edilmiştir [11],[12]. Şekil 5'te bazı ada çalışma tespit yöntemleri sınıflandırılmıştır. Bu yöntemlerin temel özellikleri ile ilgili detaylı bilgiler bir sonraki bölümde incelenmiştir. Tablo 2'de ise bu sınıfların avantaj ve dezavantajları verilmiştir.



Şekil 5. Ada çalışma tespit metotları (Islanding Detection Methods)

Tablo 2. Ada Çalışma Tespit Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Comparison of Islanding Detection Methods)

	Referans	Metotlar	Dağıtık Sistem	Avantajları	Dezavantajları
Uzaktan Metotlar	[13], [14]	SCADA, PLCC, transfer trip	Çoklu DÜ'ler	Yüksek doğruluk, hızlı tespit, etkili, güvenilir, gerçek zamanlı kontrol, güç kalitesini etkilemez	Kompleks, maliyeti yüksek, büyük güçlü sistemler için uygun
Geleneksel Pasif Metotlar	[15]	UVP/OVP	İnverter DÜ	Hızlı, uygulama kolaylığı	Eşik değer belirleme, geniş ADB
	[16]	UFP/OFP	İnverter DÜ		
	[17]	ROCOF	Senkron DÜ		
Aktif Metotlar	[18],[19]	Harmonik ölç.	İnverter DÜ	Sıfır ADB, yüksek doğruluk, uygulama kolaylığı	Güç kalitesine olumsuz etki
	[20],[21]	Reaktif güç enjektörü	İnverter DÜ		
	[22],[23]	Sandia frekans yer değiştirmesi	İnverter DÜ		

3.1. İletişime Dayalı Metotlar (Communication Methods)

Uzaktan metotlarda ana şebeke ile DÜ'ler arasında haberleşme sinyalleri kullanılır [14]. Yöntem ada çalışma tespiti için kesin ve etkili çözümler sunmaktadır. En önemli avantajı sıfır ADB'ye sahip olması ve güç kalitesini etkilememesidir. Bununla birlikte iletişim altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle tek DÜ'nün bulunduğu düşük güçlü dağıtım sistemleri için kurulum maliyeti yüksektir [24]. Bu yöntem temel olarak enerji hattı iletim sistemi (PLCC) [25] ve denetsel kontrol ve veri toplama (SCADA) [13] sistemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bazı çalışmalarda fazör ölçüm üniteleri (PMU) kullanılarak DÜ'ler ve ana şebeke arasındaki veri transferi ile DÜ'ler şebekeden izole edilmiştir [9],[5]. Bir diğer ada çalışma tespiti rüzgâr ve güneşe bağlı DÜ'lerin bulunduğu bir sistemde devre kesicilerin merkezi bir kontrol ünitesi tarafından kontrol edilmesiyle daha düşük maliyetle gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde devre kesiciler gerçek zamanlı olarak önceden belirlenen frekans, akım ve gerilim eşik değerleri dikkate alınarak kontrol edilmiştir [14].

3.2. Aktif Metotlar (Active Methods)

Aktif yöntemde, sisteme ilave bir sinyal enjektisi edilerek meydana gelen değişimler izlenmekte ve böylece olağan dışı durumlar tespit edilerek ada çalışma tespit edilmektedir. Bu tespit sistemi etkili sonuçlar vermesine rağmen hem maliyet açısından hem de uygulama yönünden çeşitli zorluklara sahiptir. Ayrıca sisteme dışarıdan enjekte edilen sinyaller güç kalitesinin bozulmasına sebep olabilmektedir. Birden fazla DÜ'nün olduğu durumlarda ise enjekte edilen sinyallerin karşılıklı etkileşimi nedeniyle yanlış açmalara sebep olabilmekte ve sistem kararlılığında bozucu etkiye neden olabilmektedir. Aktif metotlar pasif metotlara göre yüksek güvenilirliğe rağmen tespit süreleri bazı pasif metotlara göre daha yavaştır [26]. Hem senkron hem de inverter bazlı dağıtım sisteminin bir arada bulunduğu mikro şebeke modeli için ada çalışma tespiti önerilmiş, sisteme enjekte edilen harmonik sinyal ile sistemdeki gerilim değişimi ve frekans izlenerek ada çalışma tespiti yapılmıştır [27]. Diğer bir makalede ise OBN'de ölçülen gerilim değişimi kontrol edilerek aktif ada tespit yöntemi önerilmiş ve sadece inverter kaynaklı DÜ'nün olduğu mikro şebeke için uygulanmıştır

[28]. Bu yöntemin sağladığı en büyük avantaj, ADB'yi neredeyse sıfıra kadar indirebilmeleri ve düşük hata oranı sağlamasıdır. Bunun yanında şebekeye ilave bir sinyal aktarıldığından güç kalitesini etkilemesi kaçınılmazdır. Ayrıca ilave güç elektroniği ekipmanlarına ihtiyaç duyulur ve uygulanması pasif metotlara göre daha karmaşıktır.

3.3. Pasif Metotlar (Passive Methods)

Pasif yöntemde ana şebeke ile mikro şebeke arasında bulunan OBN'de ölçülen elektriksel parametreler (akım, gerilim, güç, frekans, harmonik bozunum...) kullanılarak ada çalışma tespit edilir [29]. Geleneksel pasif ada çalışma tespit yöntemlerinde önceden belirlenen bir eşik değer ile bu ölçülen değerler karşılaştırılıp normal olmayan bir durumda röleye açma sinyali gönderilir. Bu yöntemin dikkat çeken özellikleri uygulama kolaylığı ve güç kalitesini etkilememesidir. Şekil 6'da bu sistemin şematik gösterimi yer almaktadır. Geleneksel yöntemlerin geniş bir ADB'ye sahip olması, eşik değer belirleme zorluğu ve sistemdeki düşük aktif reaktif dengesizliğinde ada çalışma tespitinin başarısız olması gibi eksiklikleri bulunmaktadır. Ada çalışmayı tespit edebilecek parametrelerin belirlenmesi bu yöntemin zorluklarından biridir. Diğer bir konu ise eşik değere bağlı yöntemlerde doğru eşik değer limitlerinin belirlenmesidir. Bu eşik değer hem düşük güç değişimleri için uygun olmalı hem de ada olmayan olayları ayırt edebilmelidir. Şebekede meydana gelen ada olayları bazı geçici hal karakteristikleri ile benzer karakteristiğe sahip olabilmektedir, bu da röleye yanlış açma sinyali vermektedir. Pasif ada tespit yöntemlerini de kendi içerisinde konvensiyonel metotlar, sinyal işlemeye bağlı metotlar ve akıllı metotlar olarak sınıflandırılmaktadır. Konvensiyonel metotlarda akım, gerilim, frekans, toplam harmonik bozunum (THD) gibi parametreler izlenip ada çalışma tespitine uygun bir algoritma belirlenerek, herhangi bir akıllı yöntem kullanmadan önce belirlenen eşik değere göre ada çalışma tespit edilmektedir. Sinyal işlemeye dayalı metotlarda güç sistemindeki akım veya gerilime bağlı sinyaller farklı matematiksel metotlar ile çeşitli formlara dönüştürülür ve bu dönüştürülen sinyaller ada çalışmanın meydana gelip gelmediğini tespit etmede kullanılır. Fourier analizi, S-Dönüşüm, Dalgacık Dönüşümü en yaygın olarak kullanılan sinyal işleme metotları olarak gösterilebilir [30]. Akıllı metotlar ise genellikle

yapay zekâ yöntemlerinden faydalanılarak elektriksel parametrelerin farklı algoritmalar ile eğitilmesiyle oluşturulur. Hali hazırda elektrik güç sistemlerinde ortaya çıkan problemlerin çözümü için güç sistemlerinin işletilmesi, planlanması, kontrolü gibi konularda yapay zekaya başvurulmaktadır [31],[32]. Son yıllarda veri setinden güç sistem özelliklerini analiz eden akıllı yöntemler ada çalışmayı tespit etmek için de kullanılmıştır. Bu yöntemler detaylı olarak bir sonraki bölümde incelenmiştir [33].

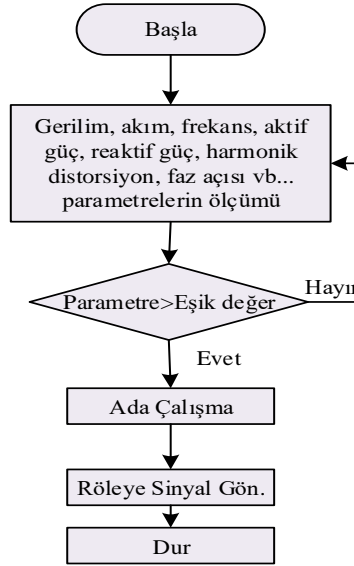
3.3.1 Konvansiyonel Metotlar (Conventional Methods)

Literatürde en yaygın kullanılan pasif ada tespit yöntemleri düşük yüksek gerilim değişimi (UV/OV), alçak yüksek frekans (UF/OF), frekans değişim oranı (ROCOF) ve güç değişim oranı (ROCOP) 'dır. Bu yöntemler basit ve düşük maliyetli uygulama imkânına sahip olsa da en önemli dezavantajları geniş ADB'ye sahip olmalarıdır. Yeni bir çalışmada, ROCOF'a bağlı ada çalışma tespiti iletişime bağlı ölçüm üniteleri kullanılarak yapılmıştır [34]. Son yıllarda literatürde bu problemi ortadan kaldırmak ve ADB'yi en aza indirmek amacıyla yapay zekaya bağlı akıllı yöntemler ada çalışma tespitinde yoğun olarak kullanılmıştır. Birden fazla inverter kaynaklı DÜ'nün bulunduğu şebekede, DÜ'nün çıkışındaki gerilim ve frekanstaki değişim göz önüne alınarak gerilim değişiminin ortalama değeri olarak adlandırılan yeni bir parametre ile ada tespit algoritması oluşturulmuştur [35]. Gösterdiği sonuçlar açısından sıfır ADB ve hızlı tespit sağlasa da önerilen yöntemde dağıtık sistemin ya da yüklerin devreden çıkarılması söz konusudur ve bu önemli bir dezavantajdır. Küçük çaplı senkron generatörlerin bulunduğu çalışmada mikroşebeke modeli için önerilen yeni yöntemde senkron generatörün çıkışındaki eşdeğer direncin türevi ada tespit indeksi olarak kullanılmıştır [36]. Pasif yöntem için belirlenen eşik değer mikroşebeke yükünün gerilim ve frekansındaki sapmalara bağlı olarak adaptif şekilde elde edilmiştir. Önerilen yöntem, ada tespitini şebeke arızalarından, kararlı ve kararsız güç salınımlarından başarılı şekilde ayırabilmektedir. Ayrıca düşük ADB ve ada tespit süresi sağlamaktadır. Birden fazla senkron generatör için uygulanabilir olsa da inverter bazlı mikroşebeke için bir çalışma yapılmamıştır. Farklı bir çalışmada geleneksel ada yöntemlerinden farklı olarak DÜ kaynağının çıkışı yerine OBN'deki elektriksel parametreler ada çalışma tespiti için

kullanılmıştır [18]. Bu çalışmada OBN'deki harmonikler incelenmiş olup şebekeye paralel çalışmadan ada çalışmaya geçişte 5. Harmonikte önemli değişimler olduğu görülmüştür. Buradan hareketle 5. harmonik belirlenen eşik değerinden büyük olduğunda ada çalışma tespiti yapılmıştır ve statik anahtara açma sinyali verilmiştir. Önerilen yaygın laboratuvar ortamında da test edilmiş olup, IEEE1547 standardının gereklerini sağlamıştır. Bu çalışma inverter kaynaklı tek dağıtık sistem için uygulanmış olup, birden fazla kaynak durumu incelenmemiştir. Harmonikleri dikkate alan bir diğer pasif ada tespit yöntemi OBN'deki veriler izlenerek inverter kaynaklı PV sistem için uygulanmıştır. Gerilim THD'sinin belirlenen eşik değerinin üzerinde olması durumunda akım toplam harmonik distorsiyonuna bakılarak ada tespiti yapılmıştır [37].

3.3.2 Sinyal İşlemeye Dayalı Metotlar (Signal Processing Based Schemes)

Sinyal işleme tekniklerine dayalı ada çalışma tespitinde elektriksel sinyaller farklı matematiksel modeller ile alt sinyallere ayrılır ve böylece ada çalışmaya bağlı özellikler ortaya çıkarılır. Ortaya çıkan bu alt sinyaller ile doğrudan ada çalışma tespiti yapılabilmektedir [38], [39]. Bunun yanı sıra bu alt sinyaller yapay zekaya bağlı algoritmalar için giriş verisi olarak kullanılıp ada ve ada olmayan durumlar çıktı verisi olarak sınıflandırılabilir. Sinyal işlemede kullanılan matematiksel modellere Fourier Dönüşümü, Dalgacık Dönüşüm, S Dönüşümü örnek gösterilebilir [40]. Bu yöntemler çeşitli ada çalışma tespit uygulamalarında kullanılmış olup yüksek doğruluk sağlamıştır. Bunun yanı sıra bazı çalışmalarda gürültülü ortamlar için doğruluğun düştüğü gözlemlenmiştir [39]. Sinyal işlemeye dayalı metotlar son yıllarda akıllı yöntemlere dayalı metotlar ile hibrit olarak önerilmiş olup bir sonraki bölümde örneklerine yer verilmiştir.

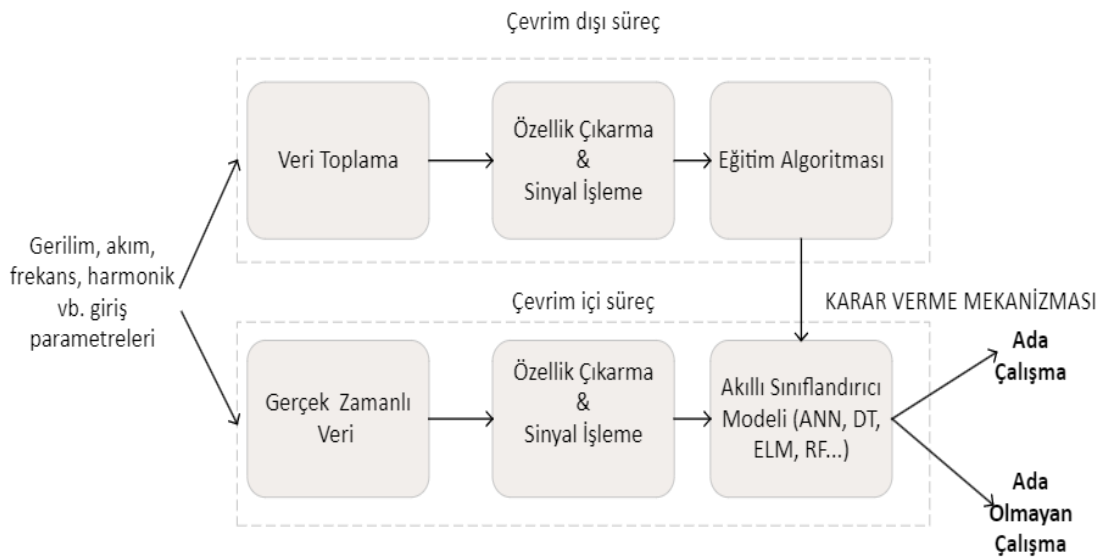


Şekil 6 Geleneksel pasif ada çalışma tespitine ait akış şeması (Schematic of conventional islanding detection methods)

3.3.3. Akıllı Yöntemlere Dayalı Metotlar (Computational Intelligent Methods)

Ada tespit çalışmasında akıllı yöntemlere dayalı metotlar, OBN’de veya DÜ’lerin çıkışında ölçülen elektriksel parametrelerin kaydedilmesiyle oluşturulan veri setine göre sınıflandırma yapmaktadır. Bu veri seti bazen gerçek hayattaki uygulamalardan alınarak elde edilse de güç sisteminde çok sayıda meydana gelen farklı olayın veri olarak kaydedilmesinin zorluğu nedeniyle sentetik olarak oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu veri setleri belirlenen akıllı yöntemler ile çevrimdışı olarak eğitilmekte ve test edilmektedir. En iyi performans sonucuna göre önerilen akıllı yöntemin hiper parametreleri tespit edilmektedir. Ada çalışma

tespitinde kullanılan akıllı yöntemlerin genel çalışma prensibi Şekil 7’de verilmiştir. Önerilen yöntem çalışmalarının bazılarında anlık elektriksel verilerin kaydedilmesi ile eğitim işlemi yapılırken, diğer çalışmalarda ise sinyal işlemeye bağlı yöntemler kullanılarak önce özellikler ortaya çıkarılmış daha sonra eğitim işlemi uygulanmıştır. Literatürdeki çalışmalardan bazıları bu yöntemleri sadece simülasyon üzerinde test etmiştir. Diğer yandan bazı çalışmalarda önerilen akıllı metotlar çalışmanın doğruluğunu daha iyi ortaya koyması amacıyla gerçek zamanlı uygulamalar ile test edilmiştir. Bu çalışmalar da ayrı bir başlık altında Bölüm 3.4’te incelenmiştir.



Şekil 7. Akıllı Yöntemlere Dayalı Pasif Ada Çalışma Tespiti (Schematic of Intelligent Islanding Detection Methods)

Literatürde güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan akıllı yöntemlere karar ağacı, genetik algoritma, bulanık mantık, aşırı öğrenme makinesi, yapay sinir ağları, derin öğrenme algoritmaları (SAE, LSTM, CNN) örnek olarak verilebilir [33]. Ada çalışma tespitinde de kullanılan bu algoritmaların avantaj ve dezavantajları literatürdeki çalışmalarda konvensiyonel yöntemlerle karşılaştırılarak verilmiştir [37]. Laghari ve arkadaşları 3.3 kV seviyesinde çalışan iki adet hidro türbinin şebekeye paralel ve ada modunda çalışmasını dağıtım seviyesinde incelemiştir [41]. Önerilen modelde yapay sinir ağları kullanılmış ve ağı giriş parametreleri olarak frekans, gerilim, aktif ve reaktif güç değişimi seçilmiştir. Önerilen modelde 220 farklı senaryo ile eğitim veri seti oluşturulmuştur. Arıza durumları oluşturulan durumlarda hesaba katılsa da açma kapama durumları bu olasılıklarda dikkate alınmamıştır. Yapılan performans testlerinde ada çalışma tespiti için başarılı sonuçlara ulaşılmıştır. Merlin ve arkadaşları, yapay sinir ağları kullanarak senkron generatör kaynaklı DÜ'ler için yeni bir pasif ada tespit yöntemi sunmuştur [42]. Önerilen yöntem şebekeye bağlı tek bir senkron generatörün olduğu sistemde test edilmiş ve yapay sinir ağı için kullanılan veri, DÜ'nün çıkışındaki gerilim sinyalinden farklı işletme koşulları dikkate alınarak elde edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre önerilen yöntemin performansı aktif güç dengesizliğine bağlıdır, ayrıca ada tespit süresinin de aktif güç dengesizliği azaldıkça uzadığı görülmüştür. Önerilen yöntem güçlü bir performans sergilese de sadece tek kaynaklı dağıtık sistemin olması yöntemin esnekliğini engellemektedir. Bu çalışmanın devamı olarak önerilen yöntemin Labview platformu üzerinde gerçek zamanlı uygulaması yapılmıştır [43]. Gerçekleştirilen yapay sinir ağı algoritması tasarlanan dijital röle üzerine uygulanmıştır. Bu sayede röle üzerinde farklı topolojiler denenerek ada tespit yönteminin doğruluğu artırılmıştır. Simülasyon ve gerçek zamanlı uygulama arasında tespit süresi farkı yaklaşık olarak 0.02 s olmuştur ki bu da koruma mühendisliğinde ada çalışmaya karşı alınacak önlemlerde dikkate alınması gereken fazla zamanı ortaya koymuştur. Ayrıca çalışmanın simülasyon sonuçları ve gerçek zamanlı uygulama sonuçları birbirine yakındır ve pratikte uygulanabilirliğini göstermektedir. Çalışmalardan bazılarında yapay sinir ağı girişini oluşturmak için ayrık zamanlı dalgacık dönüşümü (DWT) kullanılmıştır [44],[45].

Dağıtık sistemin çıkışındaki frekans sinyalinin dalgacık dönüşümü ile ada çalışmanın çeşitli özellikleri ortaya çıkarılmış ve bu özellikler sinir ağı giriş için kullanılmıştır. Motor kalkışı, doğrusal olmayan yükler, kapasitör anahtarlama gibi farklı işletme koşulları dikkate alınmış ve test sonuçlarına göre yüksek doğrulukta performans sağlanmıştır. Bununla birlikte önerilen yöntem sadece inverter kaynaklı DÜ durumu için test edilmiştir [44]. Diğer yöntemde ise ada tespit yönteminde, diğer yayınlardan farklı olarak DWT ve ANN ile bir optimizasyon yöntemi birleştirilmiştir [45]. Diğer bir akıllı yöntemin kullanıldığı başka bir makalede, önerilen pasif ada tespit yöntemi yapay zeka algoritmalarından karar ağacı kullanılmış ve birden fazla DÜ'nün bağlı olduğu sistemde farklı çalışma koşulları dikkate alınarak geliştirilmiştir [46]. Önerilen yöntemde OBN'den alınan gerilim, akım, frekans, güç ve THD gibi 11 farklı ölçüm parametresi dikkate alınmış olup, veriler farklı şebeke topolojileri dikkate alınarak elde edilmiştir. Test sonuçlarına göre düşük ADB elde edilirken ada durumunun tespit edilmesinde %16 gibi hata oranı ortaya çıkmıştır. Ayrıca çok fazla ölçüm indeksi kullanıldığından önerilen yöntemin uygulanabilirliği var olan röleler ve dağıtım sistemi ile hızlı cevapların alınabilmesi açısından mümkün görünmemektedir. Bazı çalışmalarda bulanık mantık tekniği sinir ağları ile birleştirilerek ada tespit yönteminde kullanılmıştır [47], [48]. Bu çalışmaların birinde OBN'deki gerilim, akım, frekans ve THD değerlerini dikkate alınırken, ikinci yayında DÜ'nün çıkışındaki THD değeri dikkate alınmıştır [47]. Çalışmanın ilkinde %78 gibi bir doğruluk elde edilirken, ikinci çalışmada %98'lere varan doğruluğa ulaşılmış fakat geniş bir ADB alanı meydana gelmiştir. Bu da ada tespitinin yapılamadığı alanı genişletmektedir. Ada çalışmayı tespit etmek için destek vektör makinesi (DVM) tek inverter kaynaklı DÜ'lerin olduğu sisteme uygulanmıştır. Önerilen yöntem geniş güç değişimlerinde başarısız olması sebebiyle aşırı/düşük gerilim ve frekans röleleri ile donatılmıştır [49]. Diğer çalışmada ada çalışmayı tespit etmek için ilk kez zaman serisi sinyalleri görüntüye dönüştürülerek DVM ile eğitilmiştir [50]. Sinyal işlemeye dayalı yöntemlerden Slantlet dönüşümü giriş özelliklerinin daha iyi şekilde ortaya çıkarılması için farklı türde makine öğrenmesi algoritmaları ile ada çalışma tespitinde kullanılmıştır [51]. Literatürde yaygın olarak tercih

edilen bir diğer makine öğrenmesi yöntemi aşırı öğrenme makineleri (AÖM) ada çalışmayı diğer şebeke olaylarından ayırt etmek için kullanılmıştır [52], [53], [54], [55]. Aşırı öğrenme makinesinin önerildiği çalışmada farklı tip DÜ'lerin olduğu IEEE 13 baralı dağıtım sistemi kullanılmıştır [52]. Önerilen yöntemde olması muhtemel bütün ada durumları için simülasyon çalışması yapılmış olup, OBN'deki akım ve gerilim sinyalleri dikkate alınarak güç değişimi, frekans değişimi gibi 45 farklı özellik kullanılarak oluşturulan 1864 adet veri ile eğitim gerçekleştirilmiş ve ada durumu sınıflandırılmıştır. Çok sayıda özellik hesaplanarak gerçekleştirilen bu çalışmayı gürültü ve kompleks işlemler zorlaştırmaktadır, bu nedenle farklı metodlardan yararlanılarak en etkili özellikler optimizasyon yöntemiyle ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlarda 75ms ortalama tespit süresi ve %95 civarında doğruluk sağlanmıştır. Diğer çalışmada AÖM ile yüzde yüze yakın doğruluk elde edilse de önerilen yöntemin performansı gürültülü ortamda düşmüştür. Bu çalışma 500 farklı örnek durum ile test edilmiştir [53]. Düşük sayıda kullanılan veri setleri öğrenmenin ezberlenmesine sebep olmaktadır. Yeni örneklerin test edilmesinde ise test doğruluğu önemli oranda düşmektedir. Düşük veri setinin kullanıldığı bir diğer çalışmada ise ayrık dalgacık dönüşümü ile giriş sinyalindeki bozukluklar ortaya çıkarılmış ve yapay sinir ağları ile eğitim gerçekleştirilmiştir [56]. [51] numaralı yayında faz uzayı tekniği ve AÖM kullanılarak ada tespit yöntemi geliştirilmiştir. İleri yönlü sinir ağı yapısının kullanıldığı bu öğrenmede, birden fazla AÖM birleştirilerek gruplar şeklinde halinde sınıflandırma yapılmıştır. Diğer makine öğrenmesi yöntemleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek doğrulukla ve daha hızlı bir ada tespiti gerçekleştirilmiştir. Genetik algoritma farklı tipte DÜ kaynaklarının olduğu şebeke sistemi için ada çalışma tespitinde kullanılmış ve önerilen yöntem sentetik olarak oluşturulan yaklaşık 2500'e yakın veri seti ile test edilmiştir [57]. Yapay sinir ağlarında kullanılan çok katmanlı algılayıcılar dalgacık dönüşümü ile birleştirilerek inverter kaynaklı DÜ sistemi için ada çalışmanın tespitinde kullanılmıştır [58]. Khamis ve arkadaşlarının önerdiği yayınlarda akıllı yönteme dayalı iki farklı ada çalışma tespit metodu önerilmiştir [59], [60]. Çalışmalarda yapay ve olasılıksal sinir ağları sınıflandırıcı olarak kullanılırken faz uzay ve dalgacık dönüşümleri giriş parametrelerinin özelliklerini ortaya çıkarmak için kullanılmıştır. Önerilen yöntemlerin performansı

yaklaşık 4000-veri seti ile analiz edilmiştir. Ayrık dalgacık dönüşümü ile faz uzayı tekniğinden faydalanılan çalışmada sinir ağı için farklı girdiler oluşturulmuştur ve bu metodlar karşılaştırılmıştır [59]. Bu teknik gerilim sinyalinin ada çalışma durumu dışında kalan bütün özelliklerini ortaya çıkarmada kullanılmıştır. Sinir ağında 3166 örnek durumun %80'i eğitim aşamasında kullanılırken geri kalanı ise test ve doğrulama aşamasında kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre faz uzayı tekniği ile oluşturulan sinir ağı, dalgacık dönüşümle oluşturulan ağa göre yüksek doğrulukta bir performans sergilemiştir.

Son yıllarda derin öğrenmeye bağlı algoritmalar da ada çalışma tespitinde kullanılmıştır. Derin öğrenme yöntemi, yapay sinir ağlarına bağlı bir makine öğrenmesi olup, lineer olmayan ve aralarında karmaşık ilişkiler bulunan problemlerde özellikle çok sayıda verinin olduğu işlemlerde farklı eğitim algoritmaları ile uygulanmaktadır. Derin öğrenme algoritmaları geleneksel sinir ağlarından farklı olarak kompleks veri setlerini birden fazla katman kullanarak ham veriden gerekli bilgilerin ortaya çıkarılmasına olanak sağlamaktadır [61]. Yaygın olarak kullanılan derin öğrenme mimarilerine evrimsel sinir ağı, yığılmış oto kodlayıcılar (SAE), sınırlı Boltzmann makinesi (RBM), tekrarlayan sinir ağı (RNN) örnek olarak verilebilir. Literatürde SAE'nin kullanıldığı ada çalışma tespit yönteminde yüksek doğruluk elde edilmesine rağmen, önerilen yöntemde ada olmayan çalışma durumları için kapasitör anahtarlama, arızalar, doğrusal olmayan yüklerin anahtarlama gibi sıklıkla karşılaşılan şebeke olayları dikkate alınmamıştır [62]. Önerilen yöntem karar ağacı ve destek vektör makinesi ile karşılaştırıldığında daha yüksek tespit süresine ve doğruluğa ulaşılmıştır. Çok katmanlı ileri yönlü yapay sinir ağının kullanıldığı yöntemde girdiler dalgacık dönüşümü kullanılarak OBN'deki gerilim sinyallerinin alt birimlere dönüştürülmesiyle oluşturulmuştur. Önerilen yöntem inverter kaynaklı güneş üretim kaynağının bağlı olduğu dağıtık sistem için oluşturulmuştur [62]. Benzer bir yayında DÜ'lerin çıkışında ölçülen akımın simetrik bileşenleri dalgacık dönüşümü ile ayrıştırılmış ve çok katmanlı derin sinir ağı ile eğitilmiştir [63]. Diğer bir derin öğrenme algoritması olan uzun kısa dönemli hafıza (LSTM) ağları da DÜ'lerin çıkışlarındaki sinyallerin ayrık dalgacık dönüşümü ile analiz edilmesiyle ada çalışma tespitinde kullanılmıştır [64], [65]. Bukhari ve arkadaşlarının önerdiği

çalışmada önerilen yöntemin etkinliği IEC mikro şebekesi ve IEEE 34 baralı sistemi üzerinde ayrı ayrı test edilerek doğruluk, gürültü, ADB ve tespit süresi dikkate alınarak analiz edilmiştir. LSTM yönteminde katman sayısı arttırıldıkça doğruluğun arttığı gözlemlenmiştir fakat test verisinde ezberleme problemi nedeniyle doğruluk performansı kötüleşmiştir. LSTM yönteminin kullanıldığı başka bir yayında ise OBN'den anlık olarak ölçümü alınan parametreler herhangi bir dönüşüm aracı kullanılmadan eğitilmiş ve farklı tipte DÜ'lerin olduğu mikro şebeke üzerinde test edilmiştir. Diğer yayınlardan farklı olarak şebekeye ilave DÜ kaynakları eklenmesi durumunda da test

edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [66]. Aynı yazarın diğer bir yayınında diğer bir derin öğrenme algoritması olan CNN yöntemi ada çalışma tespitinde kullanılmış ve LSTM yöntemi ile birleştirilerek derin öğrenme yöntemlerinin performansları karşılaştırılmıştır [67]. Akıllı yöntemler çalışmaların bazılarında sinyal işlemeye dayalı tekniklerle birleştirilerek hibrit yöntemler olarak sunulmuştur [68]. Literatürdeki çalışmalardan bazılarının özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Bazı akıllı yöntemlere dayalı ada çalışma tespit metotlarının karşılaştırılması (Comparison of different intelligent islanding detection methods)

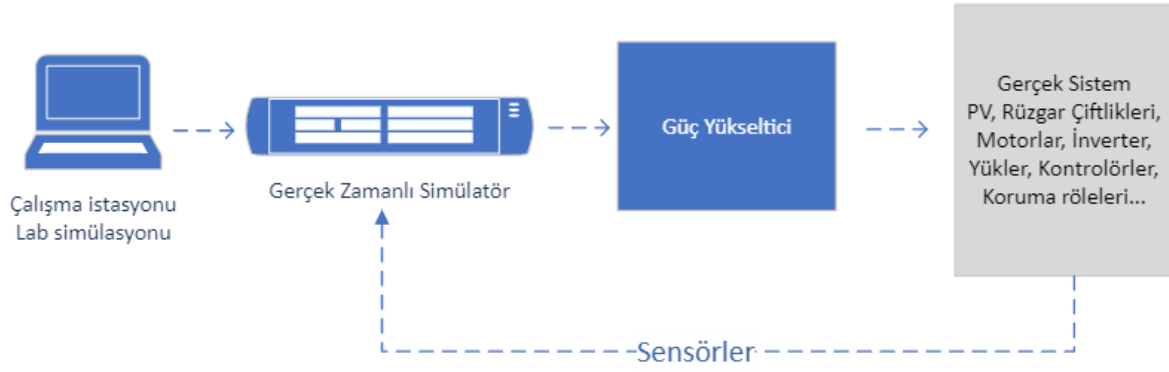
Ref.	Metot	Bağlantı	Topoloji	Hız	ADB	Karşılaştırılan Yöntemler
[53]	AÖM with S-Transform	DÜ	SDÜ and İDÜ	78.5 ms	x	ANN, SVM
[58]	Multi-ANN with WT	OBN	İDÜ	~50 ms	%6	x
[62]	SAE	OBN	İDÜ	180 ms	x	DT, SVM
[64]	LSTM STFT	DÜ	SDÜ and İDÜ	2-10 ms	x	DT, SVM, ANN
[66]	Multi-LSTM	OBN	SDÜ and İDÜ	~50 ms	Yaklaşık sıfır	SVM, DT, ANN
[67]	CNN-LSTM	OBN	SDÜ and İDÜ	~50 ms	Yaklaşık sıfır	LSTM
[69]	ANFIS	OBN	İDÜ	~40 ms	$I_{ndz}=\%49$	ANN, ANFIS
[70]	SVM	OBN	İDÜ s	~40 ms	$I_{ndz}=\%9.5$	ANN, ANFIS
[71]	Feedback mechanism	OBN	İDÜ	~700 ms	x	x
[72]	Adaboost	OBN	SGs	~219 ms	$+0.5\% \leq \Delta P \leq +8$	SVM, Bayes
[73]	Adaboost	OBN	İDÜs	x	x	UOV/UOF, Adaboost
[74]	GWO-ANN	DÜ	SDÜ and İDÜ	~100 ms	x	SVM, AÖM
[75]	ANN	OBN	İDÜ	40 ms	%11,3	SVM, ANFIS
[76]	Adaptif sinyal tahmini	OBN	SDÜ and İDÜ	220 ms	$\Delta Q = \pm 1.2\%$	Prony, ESPIRIT

SDÜ: Senkron kaynaklı DÜ, OBN: Ortak bağlantı noktası, İDÜ: İnverter kaynaklı DÜ

4. ADA ÇALIŞMA TESPİT METOTLARININ LABORATUVAR ORTAMINDA TEST EDİLMESİ (REAL-TIME SIMULATION OF ISLANDING DETECTION METHODS)

Gerçek zamanlı döngüde donanımsal benzetim (HIL), tasarlanan kontrol algoritmalarının gerçek donanımlar olmadan, zaman ve maliyet kaybının azaltılarak test etme imkânı sağlayan tekniklerin genel ismidir. Son yıllarda araştırma ve endüstride otomotiv, havacılık, robotik, elektrik gibi alanlarda

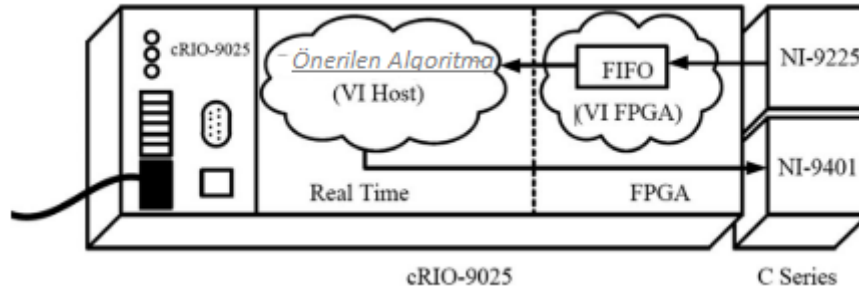
yaygın olarak kullanılmaktadır. Geliştirilen karmaşık gömülü sistem tasarımlarının sahadaki testinden önce gerçek zamanlı olarak bilgisayarlar üzerinde test edilmesine ve gerekli kontrollerin gerçekleştirilmesine imkân sağlamaktadır. Bu sayede zaman, maliyet ve riskler büyük oranda düşürülmektedir [77]. Örnek bir gerçek zamanlı güç donanımsal benzetimin çalışması Şekil'8 de verilmiştir.



Şekil 8. Ada çalışma tespiti için örnek gerçek zamanlı HIL sisteminin şeması [40] (Schematic of real time hardware in the loop for islanding detection)

Literatürdeki çalışmaların büyük çoğunluğu ada çalışma tespiti için önerilen yöntemi simülasyon üzerinde test etmişlerdir. Diğer yandan bazı çalışmalarda ada çalışmanın tespiti simülasyon çalışmasının yanı sıra gerçek zamanlı simülatörler ile laboratuvar ortamında test edilmiştir ve önerilen yöntemlerin uygulanabilirliği tartışılmıştır. Akıllı rölenin karar ağacı yöntemiyle eğitilmesine bağlı oluşturulan bir ada çalışma tespit metodunda önerilen yöntemin simülasyon çalışmasında %99.7 olarak hesaplanan güvenilirlik indeksi, gerçek zamanlı donanımsal simülasyon çevriminde %96.6

olarak hesaplanmıştır [78]. Yapay sinir ağlarına dayalı önerilen ada çalışma tespit yönteminde laboratuvar ortamında ada çalışmayı tespit etme süresi simülasyon sırasındaki tespit süresinden yaklaşık 5 ile 40 ms daha düşük hesaplanmıştır [43]. Gerçek zamanlı donanım aracı olarak cRIO-9025 FPGA (Alanda programlanabilir kapı dizisi), gerilim sinyallerini elde etmek için gerekli analog dijital dönüştürücü NI-9225 ve yapay zeka algoritması tarafından üretilen sinyali çıkışa aktaran NI-9401 modülleri kullanılmıştır. Bu çalışmaya ait ada çalışma test modeli Şekil 9’da verilmiştir.



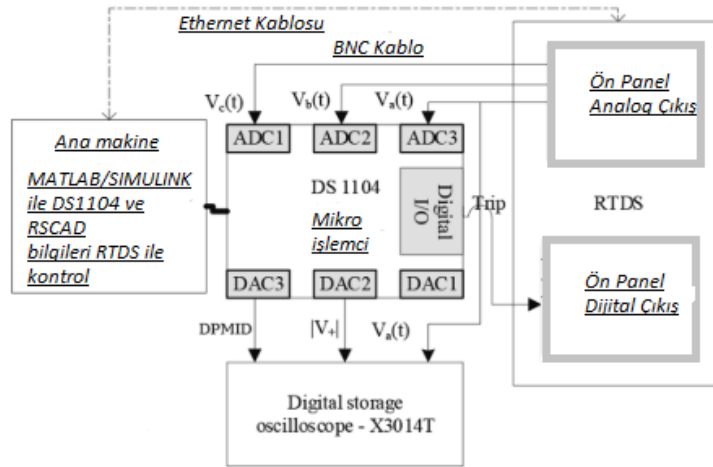
Şekil 9. FPGA ile gerçekleştirilen ada çalışma tespitinin blok şeması [43] (Block diagrams of the islanding detection method with FPGA)

Diğer bir uygulama çalışmasında OBN’deki beşinci harmonik değeri dikkate alınarak önerilen bir ada çalışma tespit metodu SEL 735 dijital rölesi kullanılarak mikroşebeke laboratuvarında test edilmiştir. Önerilen algoritma ile gerçekleştirilen testlerin sonucuna göre ada çalışmayı ortalama 300 ms’de tespit etmiştir [18]. Bununla birlikte simülasyon ve gerçek zamanlı uygulama sonuçları değerlendirildiğinde önerilen dijital rölenin pratik olarak uygulanabilirliği ortaya konulmuştur. Mikro şebekeler için önerilen bir diğer ada çalışma tespit metodu, gerilimin önceden belirlenen eşik değeri aşması durumunda maksimum güç noktasını takip

eden (MPPT) algoritmayı tetikleyecek şekilde tasarlanmış ve dijital röleler ile donatılan gerçek zamanlı HIL çalışması ile doğrulanmıştır [79]. Ada çalışma IEEE 1547 ve UL1471 standartlarında tanımlanan çeşitli senaryolar ile yaklaşık 300 ms’de tespit edilmiş ve neredeyse sıfıra yakın ADB performansı elde edilmiştir. Ada çalışma tespitinin deneysel olarak gerçekleştirildiği bir diğer önemli çalışma ulusal yenilenebilir enerji laboratuvarı (NREL) tarafından gerçekleştirilmiş olup, şebekeye bağlı birden fazla PV inverterin olduğu sistemde ada çalışmanın etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir [80],[81]. İlk kez birden fazla inverterin olduğu

dağıtık şebeke sistemi gerçek zamanlı olarak test edilmiştir. Gerçekleştirilen 244 testin tamamında ada çalışma yaklaşık 700 ms ile tespit edilerek IEEE 1547 standardında belirtilen maksimum 2 saniye koşulunu rahatlıkla sağlamıştır. Yılmaz ve arkadaşlarının dalgacık dönüşüm kullanarak önerdiği ada çalışma tespit yöntemi PV bağlı inverter sistemi üzerinde gerçek zamanlı olarak test edilmiştir [80]. Önerilen yöntemin karşılaştırılan diğer yöntemlere göre ada çalışmayı daha hızlı tespit ettiği deneysel olarak doğrulanmıştır. Yazarın diğer bir çalışmasında sinyal işlemeye dayalı bir diğer ada çalışma tespit yöntemi yakıt hücresi içeren bir mikro şebeke üzerinde uygulanmıştır [38]. Yazarların diğer bir çalışmasında sinyal işlemeye dayalı ada çalışma tespit yöntemi yakıt hücresi içeren bir mikro şebeke üzerinde uygulanmıştır [82]. Ayrık dalgacık dönüşümün kullanıldığı diğer çalışmada ise sinyal işleme dayalı yöntem MATLAB/Simulink aracılığı ile Xilinx sistem generatörü kullanılarak doğrulanmıştır [83]. Önerilen yöntemin etkinliği sıfır güç değişimi, gürültülü ortam, arıza durumları, kapasitör ve asenkron motor anahtarlama gibi farklı ada ve ada olmayan çalışma koşulları için test edilmiştir. Önerilen yöntem ada çalışmayı 75 ms ile tespit etmekte ve sıfır ADB durumunda da tespit yapabilmektedir. Chaitanya ve arkadaşlarının önerdiği ada çalışma tespit yönteminde makine öğrenmesi yöntemlerinden en yakın komşu algoritması sınıflandırıcı olarak kullanılmıştır. Önerilen yöntemin doğruluğu hem simülasyon üzerinde farklı bir şebeke sistemi üzerinde araştırılmış hem de HIL test sistemi OPAL-RT

simülatörleri ile kurularak test edilmiştir [84]. Karar ağacı öğrenme metodunun önerildiği bir başka çalışmada ADB'yi düşürmek için HIL sistemine dayalı bir ada çalışma tespiti yapılmıştır. Çalışma sonuçlarında gerçek zamanlı simülasyon ve özellik tanıma algoritmasının birleşimi ile başarılı bir donanım uygulaması gerçekleştirilmiştir [85]. Gerçek zamanlı dijital simülatör ile doğrulan bir başka çalışmada RTDS (Gerçek zamanlı dijital simülatör) ve DSP/FPGA donanımları ile PV kaynakların ve dönüştürücülerin kontrolü sağlanmıştır [73]. Birden fazla güneş panelinin olduğu dağıtık sistem için Adaboost algoritması önerilmiştir. DÜ sisteminin çıkışındaki gerilim bileşenlerinin kullanıldığı ada çalışma tespit yönteminde gerçek zamanlı simülatör üzerinde oluşturulan mikro şebekede ada ve ada olmayan durumlar simule edilmiştir. FPGA üzerinde programlanan kontrol algoritmasına göre ada çalışma durumu için kesiciye açma sinyali gönderilmiştir. Ayrıca Verilog HDL dili ile programlanan donanım sayesinde hesaplama maliyeti düşürülmüştür [86]. Fazör ölçüm cihazları ile dağıtım generatörlerinin bağlı olduğu baralarda gerilim fazörü ölçülerek ada çalışma tespiti yapılmıştır. Önerilen yöntem çevrimiçi alınan sinyalleri kullanarak Teager-Kaiser isimli geliştirilen yöntemle ada çalışmayı başarılı şekilde diğer bozukluklardan ayırt etmiştir [79]. Modelin HIL testi Matlab/Simulink RTDS ile gerçekleştirilmiş, ada çalışmayı tespit cihazı olarak ise DS1104 mikroişlemci kullanılmıştır. Önerilen çalışmanın gerçek zamanlı blok diyagramı Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 10. RTDS ile gerçekleştirilen için ada çalışma tespit simülatörü [79] (Block diagrams of real time digital simulator for the islanding detection method)

Çoklu dağıtık üretimin bağlı olduğu sistem için geliştirilen yöntemde önerilen algoritma Raspberry PI ile uygulanmıştır. Ve OP-4510 gerçek zamanlı simülatörler ile MATLAB/Simulink kullanılarak test edilmiştir. [87]. Görünür gücün pozitif bileşenindeki değişimi dikkate alan bir diğer ada çalışma tespit yönteminde de sonuçlar OPAL-RT simülatör kullanılarak doğrulanmıştır [88]. Önerilen yöntemin simülasyon ve deneysel sonuçları arasındaki benzerlik önerilen yöntemin gerçek zamanlı olarak uygulanabilirliğini ortaya koymuştur. Yazarların diğer bir çalışmasında ise dağıtık üretimlerin çıkışlarındaki ve şebeke tarafındaki gerilim ve akım sinyalinin gerçek zamanlı olarak ölçülmesine dayalı bir ada çalışma tespiti önerilmiştir [89]. Geleneksel yöntemlere dayalı önerilen sistemde önceden belirlenen bir eşik değere göre ada çalışma tespit edilmektedir. Benzer şekilde bu çalışma da deneysel olarak OPAL-RT simülatörler ile doğrulanmıştır. Aktif ada çalışma tespit yönteminin önerildiği çalışmada Typhoon HIL 604 platformu üzerinde modelin performansı

test edilmiştir [90]. 840 kW'lık bir inverter ve PV kontrol ünitesi ile test edilen sistemde herhangi bir istenmeyen ada çalışma durumu 500 milisaniyenin altında tespit edilmiş ve inverterin çalışması durdurulmuştur. Simülasyon ve deneysel sonuçlar arasında altı milisaniyelik bir fark olduğu ortaya konmuştur.

Akıllı yöntemlere dayalı ada çalışma tespit metodları üzerinde son yıllarda çok sayıda çalışma yapılmıştır. Özellikle gerçek zamanlı olarak deneysel uygulaması gerçekleştirilen yöntemlerde, akıllı yöntemlere dayalı metodların deneysel olarak da başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bununla birlikte simülasyon sonuçlarındaki ada çalışma tespit süresi ile gerçek zamanlı deneysel uygulamalardaki ada çalışma tespit süresi arasında farklılıklar oluşmaktadır. Çalışma sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde ada çalışma tespit yöntemlerinde hibrit tekniklerin kullanımı işlem karmaşıklığına neden olurken performansın artmasına önemli katkı sağlamıştır.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

İn Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke entegrasyonunda karşılaşılan en önemli problemlerden biri ada çalışmanın tespit edilmesidir. Güç sisteminin kesintisiz sürdürülebilir ve efektif bir şekilde işletilerek, belirlenen kontrol yöntemlerinin zamanında devreye girebilmesi için ada çalışmayı hızlı şekilde tespit edebilen, maliyeti düşük, ADB'nin minimum olduğu efektif yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada ada çalışma durumunu tespit etmek için ortaya konulan yöntemler incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bir ada çalışma tespit metodunun etkinliği, yanlış açma yüzdesi, maliyeti, uygulama pratikliği, matematiksel işlem yoğunluğu, ADB durumu, mikro şebekeye uygulanma kapasitesi, güç kalitesine etkisi önemli değerlendirme kriterleri olmuştur. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında konvansiyonel metodların yerini, uygulaması basit, hızı yüksek, maliyeti düşük pasif ada çalışma metodlarının aldığı görülmektedir. Özellikle makine öğrenmesine dayalı metodlar sinyal işleme dayalı teknikler ile kullanılarak ada çalışmanın tespiti için önerilmiştir. Ölçümü yapılan elektriksel parametreler sinyal işleme teknikleri kullanılarak özelliklerin daha iyi şekilde ortaya çıkarılması sağlanmıştır. Öte yandan sinyal işleme tekniklerinin kullanıldığı bazı

durumlarda gürültülü ortamlarda performansın düştüğü tespit edilmiştir. Makine öğrenmesine dayalı yöntemler ile başarılı sonuçlar elde edilmesine karşın kullanılan veri setinin özelliği, senaryoların türü ve sayısı uygulanan yöntemin performansını doğrudan etkilemektedir. Bunun yanı sıra akıllı yöntemlere dayalı metodlar geleneksel yöntemlerdeki eşik değer belirleme problemini ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca çok sayıda DÜ'nün olduğu karmaşık güç sistemleri için bile akıllı yöntemler ile gerçekleştirilen ada tespit çalışmaları 5 ms ile 500 ms arasında değişen hızda tespit yapabilmektedir. Diğer bir avantaj ise akıllı yöntemlerin geleneksel ada çalışma tespit yöntemlerinin diğer bir problemi olan ADB'yi ciddi oranda azaltması veya ortadan kaldırmasıdır. Geleceğe yönelik çalışmalar için akıllı yöntemlere dayalı geniş veri ihtiyacının ortadan kaldırılması, yanlış açma oranlarının düşürülmesi, sinyal işleme dayalı yöntemlerde gürültü probleminin olumsuz etkisinin giderilmesi gibi konulara alternatif çözümler getirilmelidir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Asiye KAYMAZ ÖZCANLI Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (References)

- [1] International Energy Agency, "A 10-Point Plan to Reduce the European Union's Reliance on Russian Natural Gas," 2022. [Online]. Available: www.iea.org
- [2] [R. Lasseter et al., "The CERTS microgrid concept, white paper on integration of distributed energy resources," California Energy Commission, Office of Power Technologies-US Department of Energy, LBNL-50829, <http://certs.lbl.gov>, p. 29, 2002.
- [3] M. R. Tur and F. Yaprakdal, "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Bir Sistemde Güç Kalitesi Analizi, Kontrolü ve İzlemesi," Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, vol. 8, no. 3, pp. 572–587, 2020, doi: 10.29109/gujsc.722014.
- [4] J. M. Lee, "Islanding Detection Methods for Microgrids," p. 125, 2011.
- [5] D. Kumar and P. S. Bhowmik, "Artificial neural network and phasor data-based islanding detection in smart grid," IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 12, no. 21, pp. 5843–5850, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6299.
- [6] J. A. Laghari, H. Mokhlis, M. Karimi, A. H. A. Bakar, and H. Mohamad, "Computational Intelligence based techniques for islanding detection of distributed generation in distribution network: A review," Energy Conversion and Management, vol. 88, pp.

- 139–152, 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.08.024.
- [7] "IEEE Std 1547-2018-IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces," 2018.
- [8] A. Yılmaz and G. Bayrak, "Mikro Şebekelerde Ada Mod Çalışmanın Geliştirilen Sürekli Dalgacık Dönüşümü Yöntemi ile Gerçek Zamanlı Olarak Tespiti," no. December, 2019.
- [9] R. M. Radhakrishnan, A. Sankar, and S. Rajan, "A combined islanding detection algorithm for grid connected multiple microgrids for enhanced microgrid utilisation," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 30, no. 2, pp. 1–22, 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12232.
- [10] K. H. Reddy, "Variable converter Pulse Island test in integrated distributed generation of electrical energy system: Variable converter pulse based island detection," International Transactions on Electrical Energy Systems, no. January, pp. 1–16, 2021, doi: 10.1002/2050-7038.12920.
- [11] R. Zamani, M. E. Hamedani Golshan, H. Haes Alhelou, and N. Hatziargyriou, "A novel hybrid islanding detection method using dynamic characteristics of synchronous generator and signal processing technique," Electric Power Systems Research, vol. 175, no. May, p. 105911, 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.105911.
- [12] D. P. Mishra, S. R. Samantaray, and G. Joos, "A combined wavelet and data-mining based intelligent protection scheme for microgrid," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 5, pp. 2295–2304, 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2487501.
- [13] A. Etxegarai, P. Eguía, and I. Zamora, "Analysis of remote islanding detection methods for distributed resources," Renewable Energy and Power Quality Journal, vol. 1, no. 9, pp. 1142–1147, 2011, doi: 10.24084/repqj09.580.
- [14] G. Bayrak and E. Kabalci, "Implementation of a new remote islanding detection method for wind-solar hybrid power plants," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58, pp. 1–15, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.227.
- [15] Z. Ye, A. Kolwalkar, Y. Zhang, P. Du, and R. Walling, "Evaluation of anti-

- islanding schemes based on nondetection zone concept,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1171–1176, 2004, doi: 10.1109/TPEL.2004.833436.
- [16] J. C. M. Vieira, D. Salles, and W. Freitas, “Power imbalance application region method for distributed synchronous generator anti-islanding protection design and evaluation,” *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 10, pp. 1952–1960, 2011, doi: 10.1016/j.epsr.2011.06.009.
- [17] W. Freitas, W. Xu, C. M. Affonso, and Z. Huang, “Comparative analysis between ROCOF and vector surge relays for distributed generation applications,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2 II, pp. 1315–1324, 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.834869.
- [18] J. Merino, P. Mendoza-Araya, G. Venkataramanan, and M. Baysal, “Islanding Detection in Microgrids Using Harmonic Signatures,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 5, pp. 2102–2109, 2015, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2383412.
- [19] R. Haider, C. H. Kim, T. Ghanbari, S. Basit, and A. Bukhari, “Harmonic signature based islanding detection in grid-connected distributed generation systems using Kalman filter,” pp. 1813–1822, 2018, doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5381.
- [20] S. Park, M. Kwon, and S. Choi, “Reactive Power P&O Anti-Islanding Method for a Grid-Connected Inverter with Critical Load,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 1, pp. 204–212, 2018, doi: 10.1109/TPEL.2018.2818441.
- [21] X. Chen, Y. Li, and P. Crossley, “A novel hybrid islanding detection method for grid-connected microgrids with multiple inverter-based distributed generators based on adaptive reactive power disturbance and passive criteria,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 9, pp. 9342–9356, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2886930.
- [22] H. Vahedi, M. Karrari, and G. B. Gharehpetian, “Accurate SFS Parameter Design Criterion for Inverter-Based Distributed Generation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 3, pp. 1050–1059, 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2391193.
- [23] N. Ikken, N. Tariba, A. Bouknadel, A. Haddou, H. El Omari, and H. El Omari, “A fuzzy rule based approach for islanding detection in grid connected inverter systems,” vol. 11, no. 6, pp. 4759–4766, 2021, doi: 10.11591/ijece.v11i6.pp4759-4766.
- [24] M. S. Kim, R. Haider, G. J. Cho, C. H. Kim, C. Y. Won, and J. S. Chai, “Comprehensive review of islanding detection methods for distributed generation systems,” *Energies*, vol. 12, no. 5, pp. 1–21, 2019, doi: 10.3390/en12050837.
- [25] S. Perlenfein, M. Ropp, J. Neely, S. Gonzalez, and L. Rashkin, “Subharmonic power line carrier (PLC) based island detection,” *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, vol. 2015-May, no. May, pp. 2230–2236, 2015, doi: 10.1109/APEC.2015.7104659.
- [26] C. Li, C. Cao, Y. Cao, Y. Kuang, L. Zeng, and B. Fang, “A review of islanding detection methods for microgrid,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 211–220, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.04.026.
- [27] S. Chandak, P. Bhowmik, M. Mishra, and P. K. Rout, “Autonomous microgrid operation subsequent to an anti-islanding scheme,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 39, no. December 2017, pp. 430–448, 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.03.009.
- [28] A. M. Massoud, K. H. Ahmed, S. J. Finney, and B. W. Williams, “Harmonic distortion-based island detection technique for inverter-based distributed generation,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, no. 4, pp. 493–507, 2009, doi: 10.1049/iet-rpg.2008.0101.
- [29] R. H. Lasseter, “Microgrids and distributed generation,” *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 16, no. 2, pp. 225–234, 2010, doi: 10.1080/10798587.2010.10643078.
- [30] A. Hussain, C. H. Kim, and A. Mehdi, “A Comprehensive Review of Intelligent Islanding Schemes and Feature Selection Techniques for Distributed Generation System,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 146603–146624, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3123382.
- [31] Y. Bicer, I. Dincer, and M. Aydin, “Maximizing performance of fuel cell using artificial neural network approach for smart grid applications,” *Energy*, vol. 116, pp.

- 1205–1217, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.10.050.
- [32] F. Yaprakdal and M. Baysal, “Optimal Operational Scheduling of Reconfigurable Microgrids in Presence of Renewable Energy Sources,” *Energies*, no. May, 2019, doi: 10.3390/en12101858.
- [33] B. K. Panigrahi, A. Bhuyan, J. Shukla, P. K. Ray, and S. Pati, “A comprehensive review on intelligent islanding detection techniques for renewable energy integrated power system,” *International Journal of Energy Research*, vol. 45, no. 10, pp. 14085–14116, 2021, doi: 10.1002/er.6641.
- [34] M. W. Altaf, M. T. Arif, S. Saha, S. N. Islam, M. E. Haque, and A. M. T. Oo, “Effective ROCOF Based Islanding Detection Technique for Different Types of Microgrid,” *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, vol. 2021-October, no. 2, pp. 1809–1821, 2021, doi: 10.1109/IAS48185.2021.9677270.
- [35] A. G. Abd-Elkader, S. M. Saleh, and M. B. Magdi Eiteba, “A passive islanding detection strategy for multi-distributed generations,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 99, no. November 2017, pp. 146–155, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.01.005.
- [36] R. Bekhradian, M. Davarpanah, and M. Sanaye-Pasand, “Novel Approach for Secure Islanding Detection in Synchronous Generator Based Microgrids,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8977, no. c, pp. 1–1, 2018, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2869300.
- [37] R. Somalwar, S. G. Kadwane, and D. K. Mohanta, “Harmonics-Based Enhanced Passive Islanding Method for Grid-Connected System,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 45, no. 14, pp. 1554–1563, 2017, doi: 10.1080/15325008.2017.1361485.
- [38] A. Yılmaz and G. Bayrak, “An Improved Cwt-Based Islanding Detection Method for a Developed Microgrid in Real-Time,” *Mugla Journal of Science and Technology*, no. June, 2020, doi: 10.22531/muglajsci.654432.
- [39] P. K. Ray, S. R. Mohanty, and N. Kishor, “Disturbance detection in grid-connected distributed generation system using wavelet and S-transform,” *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 3, pp. 805–819, 2011, doi: 10.1016/j.epsr.2010.11.011.
- [40] S. Raza, H. Mokhlis, H. Arof, J. A. Laghari, and L. Wang, “Application of signal processing techniques for islanding detection of distributed generation in distribution network: A review,” *Energy Conversion and Management*, vol. 96, pp. 613–624, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.03.029.
- [41] J. A. Laghari, H. Mokhlis, M. Karimi, A. H. A. Bakar, and A. Shahriari, “Artificial neural network based islanding detection technique for mini hydro type distributed generation,” *IET Seminar Digest*, vol. 2014, no. CP659, 2014, doi: 10.1049/cp.2014.1469.
- [42] V. L. Merlin, R. C. Santos, A. P. Grilo, J. C. M. Vieira, D. V. Coury, and M. Oleskovicz, “A new artificial neural network based method for islanding detection of distributed generators,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 75, pp. 139–151, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.08.016.
- [43] N. B. Hartmann, R. C. Dos Santos, A. P. Grilo, and J. C. M. Vieira, “Hardware Implementation and Real-Time Evaluation of an ANN-Based Algorithm for Anti-Islanding Protection of Distributed Generators,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 6, pp. 5051–5059, 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2767524.
- [44] F. Hashemi and M. Mohammadi, “Islanding detection approach with negligible non-detection zone based on feature extraction discrete wavelet transform and artificial neural network,” *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2016.
- [45] M. Tarafdar Hagh, H. Ebrahimian, and N. Ghadimi, “Hybrid intelligent water drop bundled wavelet neural network to solve the islanding detection by inverter-based DG,” *Frontiers in Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 75–90, 2015, doi: 10.1007/s11708-014-0337-3.
- [46] K. El-Arroudi, G. Joos, I. Kamwa, and D. T. McGillis, “Intelligent-based approach to islanding detection in distributed generation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 828–835, 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.893592.
- [47] D. Mlakic, H. R. Baghaee, and S. Nikolovski, “A Novel ANFIS-based

- Islanding Detection for Inverter-Interfaced Microgrids,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, no. c, p. 1, 2018, doi: 10.1109/TSG.2018.2859360.
- [48] R. K. Patnaik and P. K. Dash, “Impact of wind farms on disturbance detection and classification in distributed generation using modified Adaline network and an adaptive neuro-fuzzy information system,” *Applied Soft Computing Journal*, vol. 30, pp. 549–566, 2015, doi: 10.1016/j.asoc.2015.02.009.
- [49] B. Matic-cuka and M. Kezunovic, “Islanding Detection for Inverter-Based Distributed Generation Using Support Vector Machine Method,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 6, pp. 2676–2686, 2014.
- [50] S. K. G. Manikonda and D. N. Gaonkar, “Islanding detection method based on image classification technique using histogram of oriented gradient features,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 14, pp. 2790–2799, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.1824.
- [51] M. Ahmadipour, H. Hizam, M. Lutfi Othman, M. A. M. Radzi, and N. Chireh, “A novel islanding detection technique using modified Slantlet transform in multi-distributed generation,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 112, no. April, pp. 460–475, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.05.008.
- [52] S. Chandak, M. Mishra, S. Nayak, and P. K. Rout, “Optimal feature selection for islanding detection in distributed generation,” *IET Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 85–95, 2018, doi: 10.1049/iet-stg.2018.0021.
- [53] M. Mishra and P. K. Rout, “Fast discrete s-transform and extreme learning machine based approach to islanding detection in grid-connected distributed generation,” *Energy Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 757–789, 2019, doi: 10.1007/s12667-018-0285-9.
- [54] A. Khamis, Y. Xu, Z. Y. Dong, and R. Zhang, “Faster Detection of Microgrid Islanding Events Using an Adaptive Ensemble Classifier,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 1889–1899, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2601656.
- [55] T. S. Menezes, R. A. S. Fernandes, and D. V. Coury, “Intelligent islanding detection with grid topology adaptation and minimum non-detection zone,” *Electric Power Systems Research*, vol. 187, no. February, p. 106470, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106470.
- [56] M. Heidari, G. Seifossadat, and M. Razaz, “An intelligence-based islanding detection method using DWT and ANN,” *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 23, no. 2, pp. 381–394, 2015, doi: 10.3906/elk-1210-107.
- [57] E. C. Pedrino, T. Yamada, T. R. Lunardi, and J. C. de M. Vieira, “Islanding detection of distributed generation by using multi-gene genetic programming based classifier,” *Applied Soft Computing Journal*, vol. 74, pp. 206–215, 2019, doi: 10.1016/j.asoc.2018.10.016.
- [58] E. Shahryari, M. Nooshyar, and B. Sobhani, “Combination of neural network and wavelet transform for islanding detection of distributed generation in a small-scale network,” *International Journal of Ambient Energy*, vol. 40, no. 3, pp. 263–273, 2019, doi: 10.1080/01430750.2017.1392348.
- [59] A. Khamis, H. Shareef, A. Mohamed, and E. Bizkevelci, “Islanding detection in a distributed generation integrated power system using phase space technique and probabilistic neural network,” *Neurocomputing*, vol. 148, pp. 587–599, 2015, doi: 10.1016/j.neucom.2014.07.004.
- [60] A. Khamis, H. Shareef, and A. Mohamed, “Islanding detection and load shedding scheme for radial distribution systems integrated with dispersed generations,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 9, no. 15, pp. 2261–2275, 2015, doi: 10.1049/iet-gtd.2015.0263.
- [61] Y. Bengio, “Learning Deep Architectures for AI,” *Foundations and Trends_R in Machine Learning*, vol. 2, no. 1, 2009, doi: 10.1561/2200000006.
- [62] X. Kong, X. Xu, Z. Yan, S. Chen, H. Yang, and D. Han, “Deep learning hybrid method for islanding detection in distributed generation,” *Applied Energy*, vol. 210, no. April 2017, pp. 776–785, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.014.
- [63] A. Najjar, H. K. Karegar, and S. Esmailbeigi, “Intelligent Islanding Detection Scheme for Microgrid Based on Deep Learning and Wavelet Transform,”

- 2020 10th Smart Grid Conference, SGC 2020, 2020, doi: 10.1109/SGC52076.2020.9335761.
- [64] A. A. Abdelsalam, A. A. Salem, E. S. Oda, and A. A. Eldesouky, "Islanding Detection of Microgrid Incorporating Inverter Based DGs Using Long Short-Term Memory Network," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 106471–106486, 2020, doi: 10.1109/access.2020.3000872.
- [65] S. B. A. Bukhari, K. K. Mehmood, A. Wadood, and H. Park, "Intelligent islanding detection of microgrids using long short-term memory networks," *Energies*, vol. 14, no. 18. 2021. doi: 10.3390/en14185762.
- [66] A. K. Özcanlı and M. Baysal, "A novel Multi-LSTM based deep learning method for islanding detection in the microgrid," *Electric Power Systems Research*, vol. 202, no. August 2021, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107574.
- [67] B. Özcanlı, Asiye Kaymaz and M. Baysal, "Islanding detection in microgrid using deep learning based on 1D CNN and CNN-LSTM networks," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, p. 110456, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100839>.
- [68] S. D. Kermany, M. Joorabian, S. Deilami, and M. A. S. Masoum, "Hybrid Islanding Detection in Microgrid with Multiple Connection Points to Smart Grids Using Fuzzy-Neural Network," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 2640–2651, 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2617344.
- [69] D. Mlakic, H. R. Baghaee, and S. Nikolovski, "A Novel ANFIS-based Islanding Detection for Inverter Interfaced Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, no. c, p. 1, 2018, doi: 10.1109/TSG.2018.2859360.
- [70] H. R. Baghaee, D. Mlakic, S. Nikolovski, and T. Dragicevic, "Anti-Islanding Protection of PV-Based Microgrids Consisting of PHEVs Using SVMs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 1, pp. 483–500, 2020, doi: 10.1109/TSG.2019.2924290.
- [71] V. R. Reddy and E. S. Sreeraj, "A Feedback-Based Passive Islanding Detection Technique for One-Cycle-Controlled Single-Phase Inverter Used in Photovoltaic Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 8, pp. 6541–6549, 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2938464.
- [72] S. A. Chavoshi, R. Noroozian, and A. Emiri, "Islanding detection of synchronous distributed generation resources using AdaBoost algorithm," *International transactions on electrical energy systems*, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1002/etep.
- [73] J. Ke, Z. Zhengxuan, Y. Zhe, F. Yu, B. Tianshu, and Z. Jiankang, "Intelligent islanding detection method for photovoltaic power system based on Adaboost algorithm," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 18, pp. 3630–3640, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6841.
- [74] S. Admasie, S. Basit, A. Bukhari, T. Gush, R. Haider, and C. H. Kim, "Intelligent Islanding Detection of Multi-distributed Generation Using Artificial Neural Network Based on Intrinsic Mode Function Feature," vol. XX, no. Xx, pp. 1–10, doi: 10.35833/MPCE.2019.000255.
- [75] F. Hashemi, M. Mohammadi, and A. Kargarian, "Islanding detection method for microgrid based on extracted features from differential transient rate of change of frequency," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, no. 4, pp. 891–904, 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.0795.
- [76] M. Bakhshi, R. Noroozian, and G. B. Gharehpetian, "Islanding detection scheme based on adaptive identifier signal estimation method," *ISA Transactions*, vol. 71, pp. 328–340, 2017, doi: 10.1016/j.isatra.2017.08.020.
- [77] M. O. Faruque et al., "Real-Time Simulation Technologies for Power Systems Design, Testing, and Analysis," *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 63–73, 2015, doi: 10.1109/JPETS.2015.2427370.
- [78] S. C. Paiva, R. L. de A. Ribeiro, D. K. Alves, F. B. Costa, and T. de O. A. Rocha, "A wavelet-based hybrid islanding detection system applied for distributed generators interconnected to AC microgrids," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 121. 2020. doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106032.
- [79] R. Bakhshi-Jafarabadi, J. Sadeh, and M. Popov, "Maximum power point tracking injection method for islanding detection of grid-connected photovoltaic systems in microgrid," *IEEE Transactions*

- on Power Delivery, vol. 36, no. 1, pp. 168–179, 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.2976739.
- [80] A. Hoke, A. Nelson, B. Miller, S. Chakraborty, F. Bell, and M. McCarty, “Experimental Evaluation of PV Inverter Anti-Islanding with Grid Support Functions in Multi-Inverter Island Scenarios,” no. July, p. 69, 2016.
- [81] A. F. Hoke, A. Nelson, S. Chakraborty, F. Bell, and M. McCarty, “An Islanding Detection Test Platform for Multi-Inverter Islands Using Power HIL,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 10, pp. 7944–7953, 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2801855.
- [82] A. Yılmaz and G. Bayrak, “A new signal processing-based islanding detection method using pyramidal algorithm with undecimated wavelet transform for distributed generators of hydrogen energy,” *International Journal of Hydrogen Energy*, no. xxxx, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.114.
- [83] P. Buduma, S. J. Pinto, and G. Panda, “Wavelet based Islanding Detection in a Three-Phase Grid Collaborative Inverter System using FPGA Platform,” *India International Conference on Power Electronics, IICPE*, vol. 2018-Decem, pp. 2–7, 2018, doi: 10.1109/IICPE.2018.8709550.
- [84] B. K. Chaitanya, A. Yadav, and M. Pazoki, “Reliable Islanding Detection Scheme for Distributed Generation Based on Pattern-Recognition,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 8, pp. 5230–5238, 2021, doi: 10.1109/TII.2020.3029675.
- [85] Q. Cui, K. El-Arroudi, and G. Joós, “Real-time hardware-in-the-loop simulation for islanding detection schemes in hybrid distributed generation systems,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, no. 12, pp. 3050–3056, 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1562.
- [86] P. Kumar, V. Kumar, and R. Pratap, “FPGA implementation of an Islanding detection technique for microgrid using periodic maxima of superimposed voltage components,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 14, no. 9, pp. 1673–1683, 2020, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5914.
- [87] P. Agnihotri and S. Biswas, “A novel CSoDoA based passive islanding detection technique for multi-DER AC microgrid control,” *Advanced Control and Automation Technologies*, vol. 5, no. 1, 2023.
- [88] M. Kumar and J. Kumar, “Islanding event detection technique based on change in apparent power in microgrid environment,” *Electrical Engineering*, 2023, doi: 10.1007/s00202-023-01750-5.
- [89] M. Kumar and J. Kumar, “A Solution to Islanding Event Detection Using Superimposed Negative Sequence Components-Based Scheme,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, doi: 10.1007/s13369-023-07787-9.
- [90] M. B. Shamseh, R. Inzunza, and T. Ambo, “A Novel Islanding Detection Technique Based on Positive-Feedback Negative Sequence Current Injection,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 7, pp. 8611–8624, 2022, doi: 10.1109/TPEL.2022.3146342.