

## PAPER DETAILS

TITLE: Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Bir Sistemde Güç Kalitesi Analizi, Kontrolü ve İzlemesi

AUTHORS: Mehmet Rida TÜR,Fatma YAPRDAKDAL

PAGES: 572-587

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1057205>



## Investigation of Power Quality in a System Based on Renewable Energy Sources

Mehmet Rıda TÜR<sup>1,\*</sup> Fatma YAPRAKDAL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Batman University, Technical Sciences Vocational School, Department of Electricity and Energy, 72050, Batman /Turkey

<sup>2</sup>Akdeniz University, 07070 Antalya/Türkiye

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article

Received: 17/04/2020

Revision: 12/06/2020

Accepted: 03/07/2020

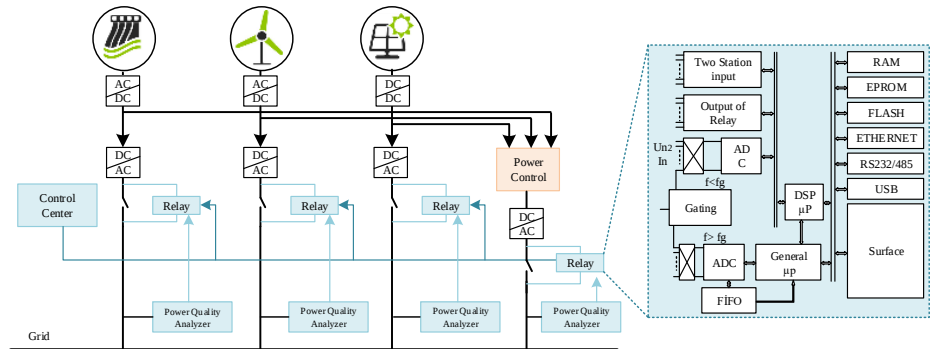
#### Highlights

- LabVIEW
- ADALINE
- Dynamic Methods

#### Keywords

Power Quality  
Distributed Energy  
Renewable energy  
sources  
Microgrid  
Protection Relay

In this study, technological developments that can be made for the development of the network infrastructure by providing an overview of these dynamic new situations changes in classical and smart networks, stabilizers, relay design, control technologies, power quality analysis and monitoring. It also focuses on topologies and control methods for energy quality regulators in power systems, especially applicable control technologies in distributed power plants according to the new features of power quality. Finally, the trends and expectations of power quality monitoring technology, which are important for reliable and efficient operation in smart grids, are presented.



**Figure 1.** Power mains ports and protection relay analyzer with protection functions

**Purpose:** In this study, the power quality problem has become an important issue to be addressed in modern electrical networks. It requires global solutions to monitor and diagnose power quality to prevent and detect failures. Thus, large amounts of heterogeneous information must be transferred and processed very quickly and automatically to provide useful information and answers to power quality problems.

**Theory and Methods:** The impact factor of fluctuations in power quality has also been analyzed. LabVIEW, a monitoring and analysis tool, has also been developed. As mentioned earlier, harmonics threaten the power quality of the electrical grid and damage the safety of the equipment. Harmonic signals need to be balanced to improve power quality.

**Results:** A comprehensive analysis of quality-oriented solutions and relay systems in power systems has been made. The vision is for this analysis to serve as a resource for control theorists and power engineers to work together and create a sustainable and secure future for the supply of electrical power in every corner of the world. A content of open questions for future work is provided.

**Conclusion:** It has been determined that power quality monitoring techniques are mainly used to monitor harmonics, but relay systems and ADALINE are the most effective monitoring techniques. In addition, approaches to the fact that static and dynamic methods are economically distributable in power systems are analyzed. In addition, it is aimed to prepare infrastructures for the use of different technologies, which are preferred to use the latest methodologies or techniques used to monitor power quality events and parameters, communication and control techniques for different power quality problems.



## Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Bir Sistemde Güç Kalitesinin İncelenmesi

Mehmet Rıda TÜR<sup>1</sup>, \* Fatma YAPRAKDAL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, 72050, Batman /Türkiye

<sup>2</sup>Akdeniz Üniversitesi, 07070 Antalya/Türkiye

### Öz

Güç sistemlerinde şebekeye bağlı doğrusal olmayan elektriksel yükler pratikte güç elektroniği devre elemanları üzerinde önemli ölçüde güç kalitesi sorunları oluşturmaktadır. Artan enerji talebine bağlı olarak yenilenebilir enerjinin kurulu güçteki üretim oranındaki artış günden güne bu etkilerin giderek daha ciddi boyutlara ulaşmasına sebep olmaktadır. Enerji kalitesi konusunda yapılan bu detaylı çalışma ile genel olarak teoride ve pratikte enerji kalitesi izlemenin büyük bir önem taşıdığı vurgulanmıştır. Bu çalışma, klasik ve akıllı şebekelerde bu dinamik değişimler karşısında dengeleyiciler, röle tasarımı, kontrol teknolojileri, güç kalitesi analizi ve izlemesine genel bir bakış sunarak şebeke alt yapısının gelişimine yönelik yapılabilecek yatırımlara ve teknolojik katkılara ışık tutmayı hedeflemektedir. Ayrıca, güç sistemlerinde enerji kalitesi düzenleyicilerine yönelik topolojilere ve kontrol yöntemlerine, özellikle de güç kalitesinin yeni özelliklerine göre dağıtılmış enerji santrallerinde uygulanabilir kontrol teknolojilerine odaklanmaktadır. Son olarak, akıllı şebekelerde güvenilir ve verimli çalışma için önemli olan güç kalitesi izleme teknolojisinin eğilimleri ve beklentileri sunulmuştur.

### Investigation of Power Quality in a System Based on Renewable Energy Sources

#### Abstract

In the power systems, non-linear electrical loads connected to the grid in practice pose significant power quality problems on power electronics circuit elements. Due to the increasing energy demand and the increase in the production rate of renewable energy in installed power, these effects are becoming more and more serious day by day. With this in-depth study of energy quality, studies in general emphasized that monitoring energy quality in theory and practice is of great importance. This study aims to shed light on the investments and technological developments that can be made for the development of the network infrastructure by providing an overview of these dynamic new situations changes in classical and smart networks, stabilizers, relay design, control technologies, power quality analysis and monitoring. It also focuses on topologies and control methods for energy quality regulators in power systems, especially applicable control technologies in distributed power plants according to the new features of power quality. Finally, the trends and expectations of power quality monitoring technology, which are important for reliable and efficient operation in smart grids, are presented.

#### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 17/04/2020  
Düzeltilme: 12/06/2020  
Kabul: 03/07/2020

#### Anahtar Kelimeler

Güç kalitesi  
Dağıtık Enerji  
Yenilenebilir enerji kaynaklar  
Mikro şebeke  
Koruma Rölesi

#### Keywords

Power Quality  
Distributed Energy  
Renewable energy sources  
Microgrid  
Protection Relay

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güç kalitesi sorunu, yapılan incelemenin türüne veya sisteme entegre olan bileşenin etkisine bağlı olarak değişebilir. Örneğin bir elektrik santralının güç kalitesi, elektrik enerjisinin güvenilir bir şekilde iletimi olarak tanımlanabilir. Ancak santralin üretim gücü, cihazın öngörülen şekilde çalışması için gerekli olan elektrik enerjisini verimli bir şekilde sağlamasına bağlıdır. Ayrıca elektrik enerjisi üretiminde kalite, temelde elektrik enerjisi tüketicileri için sağlanması nedeniyle sürdürülebilir ve kesintisiz bir şekilde sunulması prensibine dayandırılır. Bu nedenle, güç kalitesi sorunu "son tüketiciye ait cihazların arızasına veya çalışmamasına neden olacak gerilim, akım ve frekanstaki dengesizlikler" olarak tanımlanabilir.

Güç kalitesi ile ilgili en önemli sorun, genellikle gerilim genliğinde değişiklikler gösteren gerilim dalgalanmalarıdır. Normal tolerans seviyelerinin ötesinde gerilimde ani bir artış anlamına gelen bu problem, besleme gerilimi genliğinde azalmaya işaret etmektedir [1] ve sorunun birçok varyasyonu bulunmaktadır. Genel olarak, gerilimdeki en uzun süreli bozulma birkaç saniyeden az sürmektedir [2]. Bunun ana nedeni, dalgalanmalar gibi ani değişikliklerdir ve gerilim, akım veya her ikisi de sabit bir durumda olması olabilmektedir.

"Güç kalitesi" terimi, üretilen elektrik enerjisinin güvenilirliğini ve elektrik iletim ve dağıtım şebekelerinde ölçülen gerilim ile akım büyüklüklerinin ideal özelliklerini ifade eder. Bu terim aynı zamanda, ortaya çıkabilecek aksaklıklar neticesinde, müşteri ve bağlı ekipman üzerinde oluşan olumsuz etkiler ve istenmeyen tüm sapmaları da içermektedir. Güç kalitesinin bir başka sorunu da uzun süreli gerilim kesintileridir. Yaklaşık birkaç milisaniye seviyesinde olan akımdaki toplam kesinti veya azalma durumu, veri işleme sürecinde doğrudan hataya neden olmaktadır. Ayrıca, sistemlerdeki diğer bir yaygın problem, distorsiyon olarak tanımlanan bozulmalarıdır. Bu sorun, güç sisteminin ana dalga formu ile çakışan ve sistemde veri kaybına neden olan yüksek frekanslı sinyaller olarak tanımlanır [3]. Flicker olarak tanımlanan bir diğer sorun ise, güç kaynağından nominal değerinin %90-110'u arasındaki gerilimin dalgalanmalarıdır ve genellikle sistemin yük tarafına zarar vermektedir [4]. Güç sistemlerinde yaşanan kesintiler, her durumda uzun süre çalışan ve sıfır gerilim durumlarıdır. Bunun nedeni ise, bir elektrik sisteminde devrenin enerjisiz kalması ve güç dağıtımının kesintiye uğraması veya şebeke elektriğinin kesintiye uğraması olabilmektedir. Bir kesinti durumu, doğrudan veri kaybına, kalite bozulmasına ve sistemde kullanılan ekipmanda hasara yol açması kaçınılmaz bir durumdur [5]. Bu kesintiler genellikle iki gruba ayrılır; kısa süreli kesintiler ve uzun süreli kesintiler. Enerji kaynağı birkaç milisaniyeden bir veya iki saniyeye kadar bir sürede devre dışı olursa kısa kesintiler meydana gelir. Bunun nedeni genellikle koruma cihazlarının açılması ve şebekenin hatalı bir kısmını devre dışı bırakmak gibi durumlardır. Ancak büyük kesintiler daha ciddi olarak büyük hatalara neden olur ki bunlar; yalıtım arızası, yıldırım ve izolatör bozulmalarıdır [6]. Diğer yandan, güç kaynağının 1 ila 2 saniyeden daha uzun sürmesi durumunda güç sistemi şebeke donanımı bozulması, fırtınalar ve/veya diğer çevresel etmenlerden kaynaklı kesinti meydana gelirse, sistemdeki ekipmanların çalışması tamamıyla durdurulabilmektedir [7].

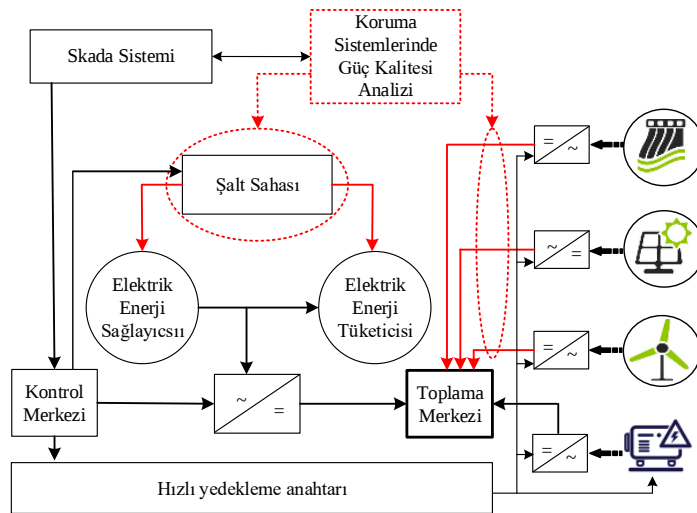
Yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) toplam enerji dengesindeki artan payı karşısında, son kullanıcıya yeterli enerji kalitesi ve enerji güvenliği sağlama zorunluluğu getirmektedir. Bu sorun, tek tek Avrupa ülkelerinin hükümetleri ve Avrupa Komisyonu tarafından kabul edilen birçok belge ile vurgulanmıştır. Modern akıllı şebekelerde, yüklerin çeşitliliği ve yüksek verimli tüketim taleplerinin yanı sıra güç elektroniği ara yüzleri üzerinden YEK'e dayalı üretim ve şebeke bağlantı teknolojisinin kullanılması, güç kalitesini yönetmede büyük zorluklar yaratmıştır [8-12]. Çeşitli enerji kaynaklarının ve tüketicilerin şebekeye Şekil 1'de sunulan genel şema, başarılı bir şekilde entegrasyonu, elektrik satmak isteyen enerji satıcılarının ve elektriği ekonomik olarak verimli bir şekilde kullanmak isteyen tüketicilerin taleplerinin karşılanmasını gerektirir. Şebeke dengelenmeli ve müşteriye sağlanan enerji kalite standartlarını karşılamalıdır. Ayrıca, tüketicilere gerekli elektriği sağlama ihtiyacı, güç kalitesini izleme gereksinimini de beraberinde getirir. YEK'leri güç dağıtım şebekelerine dahil ederken, şebekedeki birçok düğüm noktasında güç kalitesi analizi sağlamak çok önemlidir.

Bu çalışmada, dağıtık enerji kaynaklarına sahip güç şebekelerinde güç kalitesi izleme ile ilgili temel olarak üç önemli konu bulunmaktadır. Bunlar, mevcut elektrik şebekesinin yapısı, gerilim bozulmalarının ve şebeke bileşenlerinin bozulmaya yatkınlığı olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir düğüm noktasında güç kalitesi izlemesinin gerekli olduğuna dair sonuçlar çıkarılarak, efektif bir kontrol mekanizması tasarlanması hedeflenmektedir. Ayrıca, güç kalitesi analiz fonksiyonlarını koruma rölesine entegre etmek için gerekli teknik çözümler açıklanmıştır.

## 2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARINDA GÜÇ KALİTESİ (POWER QUALITY IN RENEWABLE ENERGY SOURCES)

Güç kalitesi, özellikle 90'lı yılların başından beri önemli bir konu haline gelmiştir ve günümüzde kamu hizmetleri, ekipman üreticileri ve müşteriler için bir endişe kaynağıdır. Güç kalitesine ilginin artmasına farklı faktörler katkıda bulunmuştur. Bunlar aşağıda özetlenmektedir:

- Ekipmanlar yaşanan bozulmalara karşı daha hassastır (özellikle bilgisayarlar, işlemci ve dijital elektronikler).
- Güç elektroniği dönüştürücülerini içeren cihazlar, doğrusal olmayan davranışlarından dolayı daha fazla harmonik bozukluğa neden olmaktadır.
- Nihai tüketici artık sadece bir yük değil, bir müşteri ve elektrik enerjisi kullanıcısı olarak, bazı kalite gereksinimlerini karşılaması gereken bir taraftır, bunun için yeni düzenlemeler gereklidir.
- Dağıtılmış enerji üretim sistemlerinin (yenilenebilir enerji kaynakları gibi) piyasaya sürülmesinden dolayı elektrik şebekesindeki karmaşık yapı büyük bir şekilde artmaktadır ve piyasa liberalleştirilmektedir, bu da piyasadaki aktör sayısını arttırmaktadır.

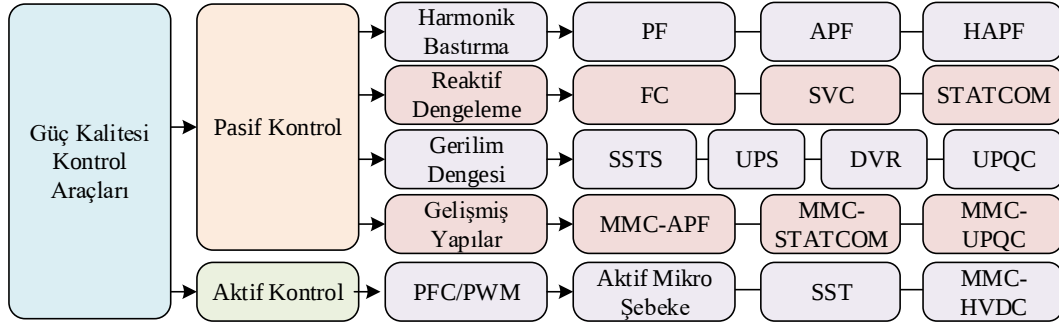


**Şekil 1.** Dağıtılmış yenilenebilir enerji kaynaklarını ve entegre bir koruma, izleme ve kontrol sistemi

YEK'lerin doğası gereği, güneş panelleri ile bir Doğru Akım (DA) gerilimi ve süper kapasitörler şeklinde enerji sistemleri veya rüzgar türbinleri ve dalga türbinleri gibi değişken frekanslı bir Alternatif Akım (AA) gerilimi üretmesi kaçınılmaz bir problemdir [13,14]. YEK'lere dayalı üretilen enerjilerinin şebekeye enjekte edilebilmesi için senkronize edilmesi gerekir veya dengeli bir alternatif akıma dönüştürülmesi gerekmektedir. AA-DA dönüşümü ve DA-AA dönüşümü sağlayan invertörler, dönüştürme işlemi sırasında harmonik, gerilim sarkması ve aşma şeklinde kontrol bozuklukları ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, güç şebekelerine bağlı olan birçok yük, çekilen akımın fider gerilimi ile doğrusal olmayan bir bağımlılık oluşmaktadır. Bu doğrusal olmayan yük durumu, şebekeye enjekte edilen daha yüksek akım harmoniklerinin oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, iletim hatlarında empedans sıfır olmadığından dolayı gerilim harmonikleri ortaya çıkmaktadır. Özellikle önemli olan, bu harmoniklerin şebekeye bağlı ekipman üzerindeki olası olumsuz etkilerinin ölçülmesi ve analizinin yapılmasıdır. Fakat fider bazlı gerilimdeki harmonik içeriğini ölçen güç kalitesi analizörleri, YEK'lerin şebekeye bağlandığı her noktada uygulanamayacak kadar yüksek bir maliyet gerektirmektedir. Diğer yandan, dağıtılmış yenilenebilir üretimin güç koşullandırması için süper kapasitörlere dayanan basit bir güç yumuşatma stratejisi ile yapılmaktadır [15,16]. Enerji yönetim sistemlerinde rüzgar hızı tahmini ve güç kalitesine entegre değerlendirmeler, analitik ölçüm teknolojisine dayalı enerji yönetim sisteminin inşası dahil olmak üzere hibrid YEK'lere optimum yönetilen bir katman olarak önerilmektedir [17-19]. Güç şebekesi yönetiminin artan karmaşıklığı, artan şebeke güvenilirliği, verimlilik ve güvenlik gibi endişeler yapının akıllı şebekeye doğru ilerlemesinde büyük adımı tetiklenmiştir [20]. Akıllı şebekeler geleneksel güç sistemi ile karşılaştırıldığında, çeşitli enerji girişleri, çoklu yük özellikleri ve çeşitli enerji dönüşüm teknolojilerini birleştiren mikro şebeke veya dağıtılmış enerji santrali, kimyasal enerji, termodinamik ve elektrodinamiklerin birbirine bağlanması ile doğrusal olmayan ve karmaşık bir sistem olduğu bilinmektedir. Mikro şebekeler, dağıtılmış enerji üretim sistemleri entegrasyonu ve güç kalitesini güvence altına alma gibi kritik yüklere enerji güvencesi sağlama gereksinimi nedeniyle dikkat çekmektedir [21-23].

Doğal kaynakların sınırlandırılması için, dağıtık generatörlerin (DG) karmaşıklık, çeşitlilik ve istikrarsızlık özellikleri oluşmaktadır. Buna göre, güç kalitesinin korunmasında yeni özelliklerle ilgili bazı yeni sorunlar





**Şekil 3:** Güç kalitesi dengeleyicilerinin sınıflandırma diyagramı

Pasif kontrol teknolojisi, mevcut güç kalitesi sorunlarının etkisini ortadan kaldırmak veya hafifletmek için ekstra cihazlar eklenmesi ile karakterize edilmektedir. Günümüzde harmonikleri azaltma teknikleri esas olarak pasif güç filtresi (PGF) [18,24], aktif güç filtresi (AGF) [25, 26] ve hibrid aktif güç filtresi (HAGF) [27,28] tekniklerini içermektedir. [29] 'da belirtildiği gibi, HAGF tek rezonans enjeksiyon hibrid aktif güç filtresi, çift rezonans enjeksiyon hibrid aktif güç filtresi ve çok dallı enjeksiyon hibrid aktif güç filtresi olarak sınıflandırılabilir. HAGF, PGF ve AGF'nin avantajlarını birleştirerek, entegre filtre sisteminde tatmin edici performanstan ödün vermeden aktif kontrolün nominal kapasitesini ve gerilimini etkili bir şekilde azaltır. Gerilimin dağıtım şebekesinde harmonik akımları bastırması, reaktif gücü dengelemesi için etkili bir yöntemdir. Reaktif güç dengeleyici ise, gerilim dalgalanması ve titremeyi baskılayabilir. Dağıtım şebekesinde kullanıma hazır değişken dengeleyicileri arasında sabit kapasitör (SK) [30, 31], statik değişken dengeleyiciler (SDD) [32,33] ve statik senkron dengeleyiciler (STATCOM) [34,35] bulunur. Bu cihazlar arasında STATCOM, şebeke gerilimi dalgalanması bastırma ve dengesiz yük dengeleme gibi çoklu fonksiyonlara sahip olduğu için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu eğilim, yüksek kararlılık, güvenilirlik ve güç yoğunluğu nedeniyle modüler harmonik bastırma ve VAR telafi sistemleri geliştirmeye yönelik olmuştur. Geçici güç kalitesi problemleri arasında gerilim düşmesi ve kısa süreli kesinti en yaygın ve zararlı formlar olarak algılanmaktadır. Katı hal transfer anahtarı (KHTA) gerilim düşüşünün derinliğini ve süresini etkili bir şekilde azaltabilir [36,37]. Kesintisiz güç kaynağı (UPS), dağıtım şebekesindeki düşük güçlü cihazlar için gerilim dalgalanmalarını sınırlamak için en etkili araçtır [38,39]. Dinamik gerilim regülatörü (DGR) anlık gerilim düşüşünü ve yükselmesini doğrudan ve hızlı bir şekilde telafi edebilir [40,41]. APF ve AGF serilerinden oluşan birleşik güç kalitesi kontrolörü (UPQC) şebeke için gerilim ve akımın kapsamlı telafisini yapabilir [42,43]. Modüler çok seviyeli dönüştürücüye (MSD) dayalı kademeli güç dönüştürücüler bilimsel araştırmalarda ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak incelenmiştir. Aynı modül yapısı nedeniyle MSD, yüksek ve orta gerilim dönüştürücülerin üretim zorluklarını ve maliyetini büyük ölçüde azaltır. Geleneksel güç kalitesi dengeleyicileri ile karşılaştırıldığında, MSD bazlı dengeleyiciler standardizasyon, genişletilebilirlik, yedeklik, hata geçişi, gerilim seviyesi ve filtreleme gereksinimi gibi özel avantajları vardır [44,45]. Bir yandan, modüler güç kalitesi dengeleyici, alt modüldeki güç anahtarının ve enerji depolama elemanının nominal gerilimini etkili bir şekilde azaltabilir, bu da düşük maliyetli anahtarlama cihazlarının kullanımına izin verir. Diğer taraftan, kademeli yapı, orta ve yüksek gerilim iletim sistemlerinde çeşitlendirilmiş güç kalitesi dengeleyicisinin uygulamasını doğrudan genişletir. Halen MSD'ye dayalı AGF, STATCOM, UPQC başlangıç düzeyinde tartışılmaktadır [46-49]. Yeni topolojiler nedeniyle, geleneksel güç dönüştürücülerinden farklı birçok yeni sorunun ele alınması gerekmektedir. Daha doğrusu, çok seviyeli yapı kaçınılmaz olarak karmaşık bir kontrol sistemi gerektirir, çünkü büyük miktarlarda veri kısa sürede işlenmelidir. Bu, güç kalitesi kontrolü alanında MSD'nin mühendislik uygulamasını ve geliştirilmesini sınırlar.

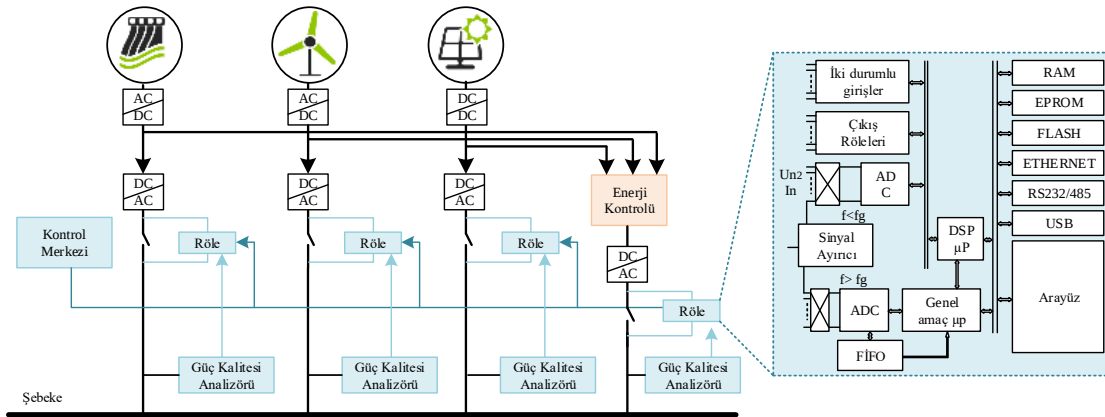
Aktif kontrol teknolojisi, çoğu güç kalitesi problemini önlemek için şebeke ekipmanının empedans özelliklerini geliştirmek için kullanılır. İletim ve dağıtım şebekesi bileşenleri, birbirine bağlı ve akıllı olacağından, gelecekteki elektrikli ekipmanların, özellikle de güç elektroniği dönüştürme sisteminin neden olduğu güç kalitesi sorunları önemli ölçüde azaltılacaktır. Şu anda, güç faktörü düzeltilmesi ve darbe genişlik modülasyonu teknolojisi doğrultucu cihazların güç kalitesini artırmıştır [50,51]. Aktif kontrol kullanan dağıtılmış üretim ve mikro şebeke invertörleri sadece dağıtılmış sistemdeki çıkış gerilimi ve akım kalitesini artırmakla kalmaz, aynı zamanda bağlantılı şebeke için bir miktar ilave dengeleme kapasitesi sağlar [52,53]. Ayrıca, potansiyel katı hal transformatörü, güç tüketici tarafı ile güç dağıtım tarafı arasındaki güç

kalitesi sorunlarının iletimini ve emisyonunu engelleyecektir. MSD tabanlı yüksek gerilim doğru akım (YGDA)) iletimi ve çok terminalli YGDA teknolojisi sayesinde tüm güç şebekesinin güç kalitesi seviyesi artırılabilecektir. Bunların göze çarpan en önemli özellikleri, yani modülerlik ve ölçeklenebilirlik nedeniyle MTDC ve DA şebekeleri için temel yapı taşı haline gelmiştir. Bu nedenle, MSD tabanlı MTDC sistemleri, sistem performansını iyileştirmek için mevcut güç sistemine yaygın olarak yerleştirilmelidir [54-58]. Elektrik üretim endüstrisinin serbestleştirilmesi ve elektrik enerjisinin rekabetçi piyasalara girişi, yan hizmetlerin oluşumunu zorunlu kılmıştır. Bu hizmetlerin amacı, elektrik arz güvenilirliğini ve kalitesini korumaya yardımcı olmak ve özellikle frekans kontrolünü sağlamaktır. Bu kontrol, üretim ve tüketim arasındaki dengeyi sağlamak amacıyla aktif gücün belirli bir oranda rezerv tutulması ile sağlanır. Sağlanan bu rezerv gereksiniminin ekonomik analizinde yük alma ve yük atma faaliyetleri dikkate alınarak değerlendirilmeler yapılmaktadır [59].

### 3.1. Güç Kalitesi Dengeleyici Koruma Rölesi İşlevlerinin Entegrasyonu (Integration of Power Quality Compensators Protection Relay Functions)

Güç kalitesi analizörü ile entegre koruma rölesinin geliştirilmesindeki ana sorun, 2 kHz'e kadar harmonik ve harmonik içerikli hat gerilim ve akım sinyalleri frekans spektrumu belirlemesi için verimli algoritmaların hazırlanması gerekliliğidir. Güç kalitesi izlemenin kullanımı, güç kalitesi analiz fonksiyonlarının koruma rölesine dahil edilmesini son kullanıcı için ihmal edilebilir. Bu nedenle, ek donanımın maliyeti, yazılıma eklenen ekstra işlevsellik yükü ile mümkün olduğunca düşük olmalıdır.

Güç kalitesi izleme ve kontrol probleminin çözümü, geleneksel koruma rölelerini güç kalitesi analiz fonksiyonları ile donatmak ile sağlanmaktadır. Şebekeye dahil olan tüm cihazların bağlantı noktalarındaki durumu Şekil 4'te işaretlenmiş eviricilerin çıkışında kırmızı renk olarak işaretlenmiştir. DSP mikroişlemci teknolojisindeki büyük ilerleme, son kullanıcı için çok küçük bir ek maliyetle güç kalitesi analiz yazılımının, özellikle harmoniklerin ve düzeylerinin belirlenmesinin uygulanmasını sağlar. Dijital alanda sinyali yeniden örnekleme gibi gelişmiş sinyal işleme algoritmaları tasarım hedeflerine ulaşmasını sağlayarak analizin yapılmasına olanak sağlanmaktadır. Geliştirilen koruma rölesinin maliyetini düşük tutmak için, geliştirilen algoritmalar donanıma minimum gereksinimler getirmelidir. Birleşik koruma rölesi ve güç kalitesi analizörünün yapısı Şekil 4'te gösterilmiştir.



**Şekil 4:** Koruma fonksiyonlarını güç kalitesi analizi ile güç şebekesi bağlantı noktaları ve koruma rölesi analizörü

Güç kalitesi analizörü ve koruma rölesinin mimarileri yapı ve çalışma sistemi olarak çok benzerdir. Sadece Şekil 4'te farklı bir renkle işaretlenmiş geçici gerilim dalgalanma ölçüm modülünde farklılık gösterilmektedir. Her iki cihazda uygulanan temel sinyal parametreline yazılımı spektrum tespiti için Fourier tekniklerini kullanırken, koruma röleleri ek olarak koruma algoritmaları yazılımı ve güç kalitesi analizörleri daha ayrıntılı spektrum analizi ve istatistiksel yazılım içermektedir. Güç kalitesi analizörleri, 2 kHz'e kadar sinyalin harmonik ve içeriğini doğru bir şekilde ölçmek için daha geniş giriş bant genişliğine sahiptir. Koruma rölesi ve güç kalitesi analizörünü tek bir cihazda uygun maliyetli bir şekilde birleştirmek için, dijital alanda aşırı örnekleme ve etkili örnekleme oranını değiştirme gibi gelişmiş sinyal işleme tekniklerinin kullanılması gerekir. Modern mikroişlemci kontrollü koruma röleleri, koruma algoritmaları

tarafından kullanılan RMS gibi sinyal parametrelerini elde etmek için analog akım ve gerilim sinyallerinin örneklemesini ve örnek seri dijital sinyal işlemlerini kullanır. Bu bakımdan, örnek dizilerinden sinyal parametrelerinin hesaplamasını da yapan bağımsız güç kalitesi analizörlerine benzerler. Dijital dönüştürücülere hızlı ve yüksek çözünürlüklü analog kullanılabilirliği, koruma rölesi ve güç kalitesi analizörü için eşit derecede uygun olan uygun maliyetli sinyal ön uç tasarımı sağlamaktadır.

#### 4. YEK'LERE DAYALI GÜÇ KALİTESİ ANALİZİ VE İZLENME (ENERGY QUALITY BASED POWER QUALITY ANALYSIS AND MONITORING)

Geçtiğimiz on yıl içinde, dağıtım seviyesindeki yenilenebilir enerji teknolojilerinde önemli bir ölçüde büyüme kaydedildi; güç sektöründe özellikle güneş ve rüzgar enerjisindeki büyük ölçekli maliyet düşüşleri sayesinde bu artışa öncülük ediyor. Ancak, sanayi ve binalar gibi son kullanım sektörlerinde yenilenebilir kaynakların alımı daha yavaş olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi 2018 yılında bir önceki yıla göre 450 terawatt saat (TWh) (veya %7) artışla büyümeye devam etti ve toplam enerji üretiminin dörtte birinden fazlasını oluşturdu. Güneş PV, rüzgar ve hidro üretiminden elde edilen büyüme, artışın %90'ını oluşturmaktadır. IEA'nın 2019 yılı tahmini, yıllık yenilenebilir ilavelerin güçlü bir şekilde büyümeye devam edeceğini düşünse de 2018'de yaklaşık 180 gigawatt (GW) yeni yenilenebilir güç kapasitesi eklendi. Belirtilen Politikalar Senaryosunda, Tablo 1'de gösterildiği gibi 2040 yılında küresel olarak yaklaşık üçte ikisi yenilenebilir enerji olan yaklaşık 8.500 GW yeni güç kapasitesi eklenmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları çoğu bölgedeki kapasite artışlarını oluşturmaktadır. Bu artış, Avrupa Birliği ve Çin'deki ilavelerin yaklaşık %80'ini içerir, ancak Güneydoğu Asya ve Orta Doğu'daki ilavelerin yarısından daha azını sağlarlar. Güneş PV, Çin ve Hindistan da dahil olmak üzere çoğu bölgede yenilenebilir kapasite ilavesinden en büyük payı almaktadır. Sürdürülebilir Kalkınma Senaryosunda, yenilenebilir enerji kaynakları tüm bölgelerde, esas olarak nükleer enerji ve karbon yakalama teknolojileriyle tamamlanan kapasite artışlarının yaklaşık %80'ini oluşturmaktadır [60].

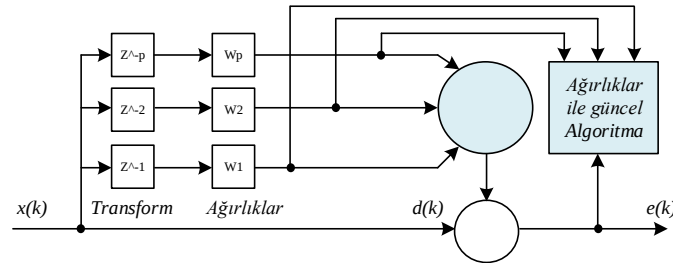
**Tablo 1.** Yenilenebilir enerji kaynaklarındaki gelişmeler

|                               | Belirtilen Politikalar |         |         | Sürdürülebilir Kalkınma |         | Değişim                |                         |
|-------------------------------|------------------------|---------|---------|-------------------------|---------|------------------------|-------------------------|
|                               | 2018                   | 2019-30 | 2031-40 | 2019-30                 | 2031-40 | Belirtilen Politikalar | Sürdürülebilir Kalkınma |
| Yenilenebilir enerji üretimi  | 304                    | 329     | 378     | 528                     | 636     | 24%                    | 109%                    |
| Rüzgar                        | 89                     | 111     | 122     | 180                     | 223     | 37%                    | 151%                    |
| Güneş-FV                      | 135                    | 116     | 125     | 179                     | 191     | -7%                    | 41%                     |
| Diğer yenilenebilir kaynaklar | 25                     | 117     | 139     | 124                     | 145     | 456%                   | 480%                    |
| Toplam                        | 329                    | 456     | 517     | 652                     | 781     | 57%                    | 137%                    |
| Kümülatif                     |                        | 5477    | 5166    | 7829                    | 7802    |                        |                         |

YEK'e dayalı güç üretimi, rüzgar ve güneş kaynaklarının kısmi öngörülemezlik özelliklerinin ve kontrol edilemeyen değişkenliğin bir kombinasyonu nedeniyle hem rüzgar hem de PV güç üretiminin performansında dalgalanmalara bağlı enerji kesintileri yaşanır [61,62]. Bu iki tür yenilenebilir enerji kaynağının çıktıları, rüzgar hızı ve güneş enerjisindeki farklılıklar nedeniyle büyük değişkenlikler göstermektedir. Bu değişimler, doğrudan gerilim ve frekans dalgalanmalarına neden olmaktadır. Bu dalgalanmaları hafifletmek için, elektrik şebekesinin arz ve talebini anlık olarak dengelemek için ek enerji gerekmektedir. Bu ek, güç sistemlerinde beklenmedik olaylar karşısında, güç sistemine yedekte tutulan hazır enerji olarak tanımlanır [63]. Rüzgar ve güneş kaynaklarından hava ve üretim çıktısını çeşitli zaman aralıklarında daha doğru tahmin etmeyi amaçlayan gelişmiş hava ve üretim tahmin teknolojileri, rüzgar ve güneş kaynaklarının kısmi öngörülemezlik özelliklerini azaltmak için başka bir çözüm olabilir [64]. Güç kalitesi sorunu düşük penetrasyon için cihaz düzeyinde kalır ve bu durumda çözüm genellikle cihaza özgü olur [65]. Eşit bir güç kalitesini sağlamak için uygun ve kontrollü bir izleme gereklidir. Monitör ve analiz sistemleri güç kalitesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda, güç kalitesi endeksinin dalgalı durumu izlenmiştir [66]. Bu, zaman alanı sinyallerinin alınmasına dayanan frekans spektrumu analiz yöntemi ile yapılmıştır. Güç kalitesindeki dalgalanmaların etki faktörü de analiz edilmiştir. Bir izleme ve analiz aracı olan LabVIEW de geliştirilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, harmonikler elektrik şebekesinin güç kalitesini tehdit eder ve ekipmanın güvenliğine zarar vermektedir. Güç kalitesini artırmak için harmonik sinyallerin dengelenmesi gerekir.

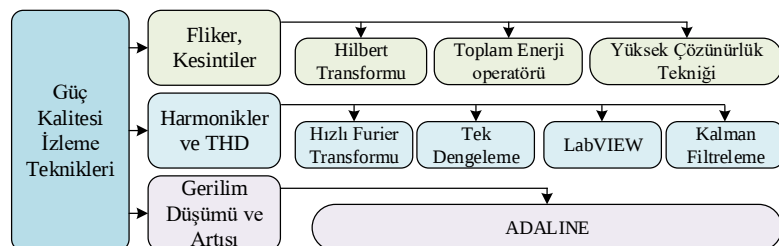
Tablo 2. Güç kalitesini analiz yöntemleri karşılaştırması

| Yöntem                                 | Özelliği                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Referans   |
|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Hızlı Fourier Dönüşümü                 | Algoritmaları ayırık fourier hesaplamasının temeline dayanır. Bu algoritma, ayırık fourier dönüşümünden daha verimlidir. Diğer taraftan, Dalgacıklar verileri veya sinyali farklı frekans bileşenlerine ayıran ve her bir bileşeni kendi ölçeğine uygun bir çözünürlükle inceleyen matematiksel işlevlerdir ve ayırık fourier dönüşümünden daha verimlidir | [67], [68] |
| Dalgacık Dönüşümü                      | Verileri veya sinyali farklı frekans bileşenlerine ayıran ve her bir bileşeni kendi ölçeğine uygun bir çözünürlükle inceleyen matematiksel işlevlerdir.                                                                                                                                                                                                    | [69], [70] |
| Tekil Değer Ayırışması                 | Bozulma aralıklarının bölümlere dayalı olarak bozulma aralıklarının felaket noktalarını tanımlamak için uygulanır                                                                                                                                                                                                                                          | [71], [72] |
| Yapay Sinir Ağı                        | Geleneksel aktif güç filtrelerine kıyasla uygulama kolaylığı ve hızlı dinamik tepki sağlar. Akıllı kontrolde sinir ağı uygulamalarının derinlemesine analizi ve güç kalitesi telafisi için olanak sunulur. Hem referans telafi akımları hem de filtre için akım kontrolörü yapay sinir ağı tekniği kullanılır.                                             | [73]       |
| Uyarlanabilir Doğrusal Birleştiricidir | Gerilim düşmesi, yükselmesi, geçici akımları, kesilmeleri algılamak için de etkilidir. Bu yöntem, güç kalitesi tespiti için bir eşik değeri ayarlama ihtiyacını ortadan kaldırır. Daha doğrusu yüksek bir izleme yeteneği sağlar. ADALINE girişi, gecikmeli sinyallerdir ve Şekil 5'te gösterilen çıkış, sinyalin tahmin edilen değerini ifade etmektedir  | [74], [75] |
| Hilbert Transform                      | Sinyalin zarfını izlemek için kullanılan bir algoritmadır. HT yöntemi, anlık spektrumun her bir frekans bileşenini 90 derece kaydırır. Bu yöntem, bir analog sinyalin tüm geçiş filtresi kullanılarak belirli bir frekans bandında kullanılabilir hem toplam enerji operatörü hem de HT gerilim titremesi problemini izlemek için kullanışlıdır            | [76], [77] |



Şekil 5: ADALINE tabanlı algılama şeması

Doğrusal olmayan bir operatör olan toplam enerji operatörü algoritması, sinyalin anlık enerji içeriğini izlemek için kullanılır. Sinyali üreten mekanik işlemin ölçümü toplam enerji operatörü tarafından faydalı bir şekilde yapılabilir. Bu operatörün değeri, sinyal genliği ve frekansının çarpımının karesidir. Bozuk sinyal iki ayrı sinyale ayrılır: düzgünleştirilmiş sürüm ve ayrıntılı bir sürüm. Yüksek frekans, toplam enerji operatörü kullanılarak düzleştirilmiş versiyondan düşük frekans bozukluklarının tespit edilebildiği detaylı versiyonda tespit edilebilir. Şekil 6'da güç kalitesi izleme teknikleri özetlenmiştir.

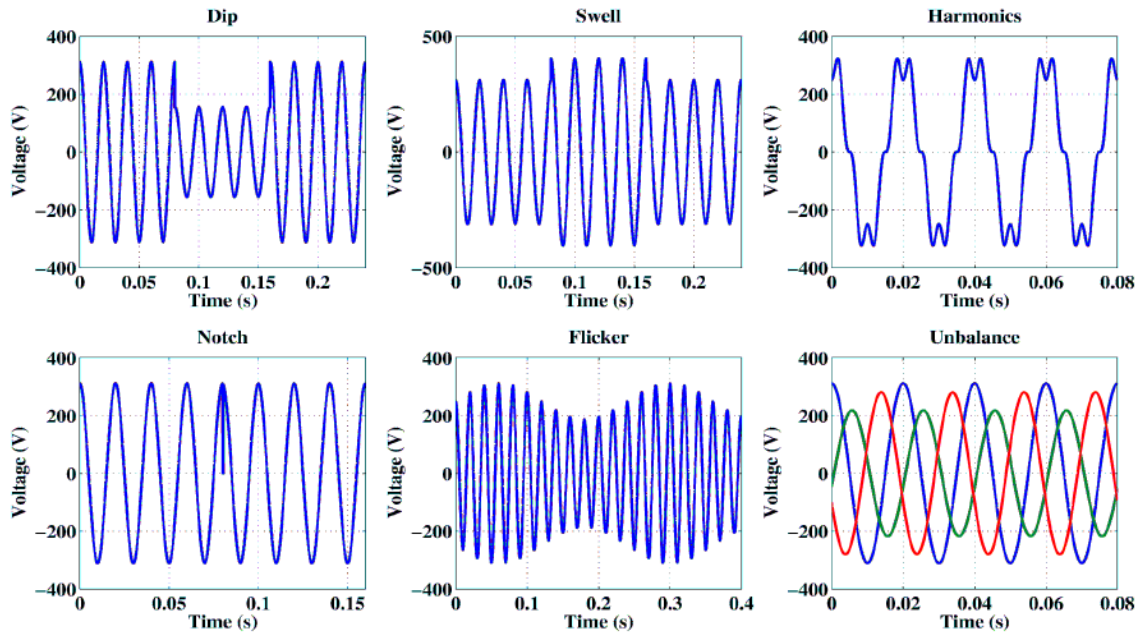


Şekil 6: Güç kalitesi izleme teknikleri

Gerilim ve akım dalga biçimleri ideal görünümlerinden farklı olduğunda güç kalitesi sorunları ortaya çıkar. İdeal olarak, gerilim ve akımlar nominal değerlerine göre sabit bir genlik ve frekans ile sinüzoidal olmalıdır. Ayrıca, gerilim ve akım dalga biçimlerinin fazda olması ve üç fazlı sistemlerde dengelenmeleri gerekir. Düşük güç kalitesine yol açan temel bozukluklar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir ve sıralanabilir:

- *Geçici akımlar (süre temel döngüden (20 ms) azdır);* Darbeli geçişler ve salınımlı geçişler.
- *Kısa süre değişimleri (süre 1 dakikadan azdır);* Kesintiler (genlik, nominal değer %10'undan azdır), Düşüşler veya Sarkmalar (genlik %90 ile %10 arasında), Şişme (genlik %110- %180).
- *Uzun süre değişimleri (süre 1 dakikadan fazladır);* Kesintiler (karartma), Düşük gerilimler (genlik %90'dan azdır), Aşırı gerilimler (genlik %110'dan fazladır).
- *Dengesizlikler (üç fazlı sistemlerde);* Dalga biçimi bozulması, Harmonikler, İnterharmonikler, Çentikler DA bileşeni, Yüksek frekanslı gürültü.
- *Gerilim dalgalanmaları (titreme) ve Frekans sapmaları.*

Bu bozulmalardan bazıları Şekil 7'de gösterilmektedir. Güç kalitesi günümüzde güvenlik, güvenilirlik, düşük kurulum maliyeti ve işletme gibi diğer konular kadar bir gereksinimdir. Ölçülemeyen bir şeyi geliştirmek mümkün olmadığından, güç kalitesi izleme sistemleri, metodolojileri ve düzenlemeleri gereklidir.



**Şekil 7:** Elektrik şebekelerinde yaşanan tipik bozukluklar

Güç kalitesi analizörlerinin tasarımındaki eğilim, yerel ölçümler için tek bir ve maliyetli bir cihazdan (bu tür ekipmanların sağladığı bilgileri anlayabilen ve yönetebilen, güç kalitesi konusunda güçlü bir arka plana sahip iyi eğitilmiş bir profesyonel bir kontrol tarafından işletilmektedir), Şebekeye yayılmış birden fazla cihaz ve güçlü iletişim özellikleri ile küresel dağıtılmış çözüm önerilmektedir. Ayrıca, tüm bilgileri işlemek için standartları baz alarak sorunların nedenlerine ve konumlarına, olumsuz eğilimlere uyum hakkında teşhis ve raporlar sağlamak için akıllı algoritmalara sahip güçlü yazılım araçları mevcuttur. Bu sistemlerde iletişimin önemi nedeniyle, güç kalitesi izleme uygulamaları için IEC 61850 gibi elektrik sistemi iletişimi için bir standartlar benimsenmiştir.

#### 4.1. YEK'lerde Dinamik Yöntemler (Dynamic Methods in RES)

Geleneksel güç sistemlerinde güç, statik ve dinamik yöntemler kullanılarak ekonomik olarak dağıtılabilir. Statik optimal dağıtım sadece belirli bir zamanda güç sistemi için optimal bir hedefe ulaşmaya çalışır, ancak farklı zaman anlarında sistem arasındaki içsel bağlantı dikkate alınmaz; dinamik optimum dağıtımında ise, bir jeneratörün tırmanma hızı üzerindeki sınır gibi farklı zaman anlarında sistemin kuplaj etkisini dikkate alır. Bu nedenle, hesaplama sonuçları gerçek gereksinimlerle daha uyumluyken, hesaplama işlemi dinamik dağıtımda daha karmaşıktır. Ayrıca, rüzgar enerjisi içeren güç sistemlerinin ekonomik dağıtımı, rüzgar

hızındaki rasgele değişiklikler nedeniyle dinamik modelleri benimsemektedir. Buna ek olarak, dinamik ekonomik dağıtım, rüzgar enerjisi çiftliğinin çıktı verilerinin her an optimum sürede bilgisi gerektirir. Bu nedenle, bir rüzgar enerjisi için çıktı öngörme hatasını en aza indirmek ve böylece ekonomik sevkیات zorluğunu azaltmak için yapay akıllı yöntemler geliştirilmiştir. Problemi çözmek için Kuantum Genetik Algoritma ve Güç Pareto Evrimsel Algoritması gibi teknikler benimsenmiştir.

YEK'ler yüksek değişkenliğe ve kesintilere sahiptir ve tak ve çalıştır şeklinde çalıştırılması gerekir. Buna göre, kontrolörlerinin hem tasarımı hem de uygulamada yerel, merkezi olmayan ve modüler olması gerekir. Başka bir deyişle, ne bir YEK kontrolörünün tasarımı diğerine bağlı olmamalı ne de gelecekte üçüncü bir YEK eklendiğinde bu iki kontrolörden birinin güncellenmesi gerekmemelidir. Gelecekteki şebeke için genel kontrol mimarisinin, bu merkezi olmayan tak ve çalıştır YEK kontrolörleri ile dağıtılmış geniş alan kontrolörlerinin bir kombinasyonu olması gerekir. Güç sisteminin dört temel bileşeninin dinamik modelleri- yani üretim, iletim, yük ve enerji depolama- geliştirilmektedir. Üretim birimleri geleneksel enerji santralleri ile beraber rüzgar/güneş gibi YEK'ler olarak sınıflandırılır. Enerji üretim ister rüzgar/güneş enerjisine dayalı olsun, ister geleneksel üretim tesisi veya enerji depolama tesislerinin içinde birçok üretim birimi ve depolama cihazı bulunmaktadır.

Aşağıda gösterildiği gibi, bir güç sisteminin  $k$ -th bileşeninin dinamik modeli için, bu bileşenin bir jeneratör, yük, depolama, rüzgar çiftliği veya güneş çiftliği için genel bir formu şu şekilde yazılabilir:

$$\sum_k : \begin{cases} \mathbf{i}_k = \mathbf{f}_k(\mathbf{I}_k, \mathbf{V}_k, \mathbf{u}_k; \mathbf{a}_k), \\ \mathbf{p}_k + \mathbf{j} \mathbf{q}_k = \mathbf{g}_k(\mathbf{I}_k, \mathbf{V}_k; \mathbf{a}_k), \end{cases} \quad 1$$

$K$  parametresi 1'den  $N$ 'e kadar olan sayıları tanımlamaktadır. Her bileşen için iki ve fonksiyonunun ayrıntıları kısaca açıklanacaktır.  $N$  bileşenleri bir iletim ağı ile birbirine bağlanır.  $Y$  değeri şebeke girişi matrisini göstermektedir. İletim hatlarındaki güç dengesi Kirchhoff yasalarına göre hesaplanır.  $U_k$ 'nin kararlı durum değerinin, genellik kaybı olmadan sıfır olduğu varsayılır.

YEK üretimin yaygınlaşmasıyla, güç sistemi araştırmalarında kontrol ve optimizasyon için birçok ilginç fırsat ortaya çıkmaktadır. Bir yandan, şebekeyi elektrik kesintilerine karşı daha dayanıklı hale getirmek için geniş alan kontrolü zorunlu hale gelirken, diğer yandan yerel tak ve çalıştır tipi kontrolörler yenilenebilir enerji kaynakları için gerekli hale geliyor. Bu makalede, güç sistemlerinde kaliteye yönelik çözümler ve röle sistemleri hakkında kapsayıcı bir analiz yapılmıştır. Buradaki vizyon, bu analizi kontrol kuramcılarının ve güç mühendislerinin birlikte çalışması ve dünyanın her köşesinde elektrik enerjisi temini için sürdürülebilir ve güvenli bir gelecek yaratması için bir kaynak görevi görmesidir. Gelecekteki çalışmalar için açık soruların bir içeriği sunulmaktadır.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Güç kalitesi problemi, modern elektrik şebekelerinde ele alınması gereken önemli bir konu haline gelmiştir. Arızaları önlemek ve tespit etmek için güç kalitesini izlemek ve teşhis etmek için global çözümler gerektirmektedir. Böylece, güç kalitesi sorunlarına faydalı bilgiler ve yanıtlar sağlamak için büyük miktarlarda olan heterojen bilgiyi çok hızlı ve otomatik bir şekilde aktarılmalı ve işlenmelidir. Bu gereksinimler güncel sistem tabanlı çözümlerin uygunluğunu göstermektedir. Bu makalede, güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtılmış üretim sistemleri için güç kalitesi konuları ele alınmıştır. Güç kalitesi sorunları, kaynakları ve parametreleri hakkında ayrıntılı bir araştırma sunulmuştur. Daha sonra, yenilenebilir enerji sistemlerinde güç kalitesi sorunları, güç kalitesini izleme teknikleri, bu amaçla kullanılan cihazlar ve güç kalitesi sorunlarının azaltılması için uygulamalar açıklanmıştır. Güç kalitesi izleme tekniklerinin ağırlıklı olarak harmonikleri izlemek için kullanıldığı, ancak röle sistemleri ve ADALINE en etkili izleme tekniğinin olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, güç sistemlerinde, statik ve dinamik yöntemlerin ekonomik olarak dağıtılabilir olduğu konusunda yaklaşımlar analiz edildi. Bunun yanında, güç kalitesi olaylarını ve parametrelerini izlemek için kullanılan son metodolojileri veya teknikleri, farklı güç kalitesi sorunları için iletişim ve kontrol tekniklerini kullanmak için tercih edilen farklı teknolojilerin kullanımına yönelik alt yapıların hazırlanması hedeflenmektedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] E. Styvaktakis, M. H. Bollen, and I. Y. Gu, "Classification of power system events: Voltage dips," in *Harmonics and Quality of Power*, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on, 2000, pp. 745-750.
- [2] N. Edomah, "Effects of voltage sags, swell and other disturbances on electrical equipment and their economic implications," in *IEEE Proc. of 20th International Conference on Electricity Distribution*, 2009.
- [3] R. Thallam and G. Heydt, "Power acceptability and voltage sag indices in the three-phase sense," in *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2000. IEEE, 2000, pp. 905-910.
- [4] C.-I. Chen, Y.-C. Chen, and C.-N. Chen, "A high-resolution technique for flicker measurement in power quality monitoring," in *Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2013 8th IEEE Conference on, 2013, pp. 528-533.
- [5] Steven Warren Blume, *Electric power system basics: for the nonelectrical professional*. John Wiley & Sons, pp. 199, 2007
- [6] Bollen, M., "Understanding Power Quality Problems – Voltage Sags and Interruptions", IEEE Press Series on Power Engineering – John Wiley and Sons, Piscataway, USA (2000).
- [7] Delgado, J., "Gestão da Qualidade Total Aplicada ao Sector do Fornecimento da Energia Eléctrica", Thesis submitted to fulfilment of the requirements for the degree of PhD. in Electrotechnical Engineering, Coimbra, September 2002.
- [8] Y. Yan, Y. Qian, H. Sharif and D. Tipper, "IEEE Communications Surveys & Tutorials", Volume: 15, Issue: 1, First Quarter 2013, 10.1109/SURV.2012.021312.00034
- [9] Miller TJE, *Reactive power control in electric system* Wiley, New York, 1982.
- [10] Wang ZA, Yang J, Liu JJ., *Harmonic suppression and reactive power compensation*. Machinery Industry Press, Beijing (in Chinese), 2006.
- [11] Green MA., "Third generation photovoltaics: comparative evaluation of advanced solar conversion options". In: *Proceedings of the 29th IEEE photovoltaic specialists conference*, New Orleans, 19–24 May 2002, pp 1330–1334, 2002.
- [12] Zhao ZM, Liu JZ, Sun XY (2005) *Solar photovoltaic power generation and its application*. Science Press, Beijing (in Chinese)
- [13] Ackerman T. ed., "Wind Power in Power Systems", ISBN 0-470-85508-8, John Wiley & Sons, England, 2005.
- [14] Gilbert M., "Renewable and efficient electric power systems", ISBN 0-471-28060-7, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.
- [15] Jordi Pegueroles-Queralt, et. al., "A Power Smoothing System Based on Supercapacitors for Renewable Distributed Generation", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume: 62 , Issue: 1 , Jan. 2015

- [16] Lie Zhang, et. al., “A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 81, Part 2, January 2018, Pages 1868-1878
- [17] Ozcanli, AK, Yaprakdal, F, Baysal, M. Deep learning methods and applications for electrical power systems: A comprehensive review. *Int J Energy Res*. 2020; 1– 22. <https://doi.org/10.1002/er.5331>
- [18] El-Saadany EF, Salama MMA, Chikhani AY (2000) Passive filter design for harmonic reactive power compensation in single-phase circuits supplying
- [19] Ali Moradi Amani, Nozhatalzaman Gaeini, Mahdi Jalili, Xinghuo Yu, “Voltage Control in Distributed Generation Systems Based on Complex Network Approach” *Energy Procedia*, volume 110, March 2017, Pages 334-339
- [20] Francisc Zavoda, “Advanced distribution automation (ADA) applications and power quality in Smart Grids” *CICED 2010 Proceedings IEEE*, 22 March 2011, China
- [21] Yaprakdal, F.; Yilmaz, M.B.; Baysal, M.; Anvari-Moghaddam, A. A Deep Neural Network-Assisted Approach to Enhance Short-Term Optimal Operational Scheduling of a Microgrid. *Sustainability* 2020, 12, 1653.
- [22] Qiang Fu, “Microgrid Generation Capacity Design With Renewables and Energy Storage Addressing Power Quality and Surety” *IEEE Transactions on Smart Grid*, volume: 3 , Issue: 4 , Dec. 2012
- [23] Yaprakdal, F.; Baysal, M.; Anvari-Moghaddam, A. Optimal Operational Scheduling of Reconfigurable Microgrids in Presence of Renewable Energy Sources. *Energies* 2019, 12, 1858.
- [24] H.L. Jou, J.C. Wu, K.D. Wu, “Parallel operation of passive power filter and hybrid power filter for harmonic suppression” *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, Volume 148, Issue 1, 2001
- [25] Akagi H., “Trend in active power line conditioners”. *IEEE Trans Power Electron* 9(3):263–268, 1994.
- [26] Khadkikar V, Chandra A., “A new control philosophy for a unified power quality conditioner (UPQC) to coordinate loadreactive power demand between shunt and series inverters”. *IEEE Trans Power Deliv* 23(4):2522–2534, 2008.
- [27] Zeng Xiang, et. al. “Design, control and comparative analysis of an LCLC coupling hybrid active power filter” *The Institution of Engineering and Technology*, vol 23,1, 2020.
- [28] Tur, M.R., Wadi, M., Shobole, A. and Ay S., “Load Frequency Control of Two Area Interconnected Power System Using Fuzzy Logic Control and PID Controller” *IEEE ICRERA* 14-17 Oct. 2018, France
- [29] Zhao W., “Harmonic suppression and reactive power compensation theory and application research in high voltage distribution networks”. *Ph D Thesis, Hunan University, Changsha*, 2010.
- [30] Faleh A. and Marcelo G. S., “Current Balancing Algorithm for Three-Phase Multilevel Current Source Inverters”, *Energies* 2020, 13(4), 860; <https://doi.org/10.3390/en13040860>
- [31] Zhongjie G., Wei W., Laijun C., Zhaojian W. and Shengwei M., “Operation of Distribution Network Considering Compressed Air Energy Storage Unit and its Reactive Power Support Capability” *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1 - 1 (Early Access), 10.1109/TSG.2020.2966742, 2020

- [32] Ricardo M., Arias V., Jennifer V., Mejía L., “Harmonic failure in the filter of Static Var Compensator” *Engineering Failure Analysis* Volume 107, January 2020, 104207
- [33] Gyuyi L, Talor ER, “Characteristic of static, thyristorcontrolled shunt compensators for power transmission system applications”. *IEEE Trans Power Appar Syst* 99(5):1795–1804, 1980.
- [34] Sasidharan S., et. al., “Power system loading margin enhancement by optimal STATCOM integration – A case study”, *Computers & Electrical Engineering*, Volume 81, January 2020, 106521
- [35] Ghosh A, Ledwich G., “Load compensating DSTATCOM in weak AC systems”. *IEEE Trans Power Deliv* 18(4):1302–1309, 2003.
- [36] Tesfahun M., “Power Quality Improvement in Distribution System Using Dynamic Voltage Restorer”, *Handbook of Research on New Solutions and Technologies in Electrical Distribution Networks*, pp.16, 10.4018/978-1-7998-1230-2.ch003, 2020
- [37] Chan K, Kara A, Kieboom G, “Power quality improvement with solid state transfer switches”. In: *Proceedings of the 8th international conference on harmonics and quality of power*, vol 1, Athens, pp 210–215, 14–18 Oct 1998.
- [38] B. Singh, et.al., “A review of single-phase improved power quality AC-DC converters”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume: 50 , Issue: 5 , Oct. 2003
- [39] Bashi SM, Jasni J, Weng OY., “Voltage regulation of uninterrupted power supplies. In: *Proceedings of the IEEE student conference on research and development*” (SCORED’03), Putrajaya, pp 385–389, 25–26 Aug 2003
- [40] P. Sundaramoorthi, V. Prasannamoorthy, R. Kathiravan, “Design and Implementation of Battery Based Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Issues in Domestic Grid” *TEST Engineering and Management*, ISSN: 0193-4120 Page No. 3148-3152, 2020
- [41] Liu JW, Choi SS, Chen S., “Design of step dynamic voltage regulator for power quality enhancement”. *IEEE Trans Power Deliv* 18(4):1403–1409, 2003.
- [42] Surya P.T. and Satish K.P. “A New Topology of Interline Unified Power-Quality Conditioner for Multi Feeder System”, *Advances in Decision Sciences, Image Processing, Security and Computer Vision* pp 507-519, 2019
- [43] Fujita H, Akagi H. “The unified power quality conditioner: the integration of series and shunt-active filters”. *IEEE Trans Power Electron* 13(2):315–322, 1998.
- [44] Lesnicar A, Marquardt R, “An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE Bologna power technology conference*, vol 3, 6 pp Bologna, 23–26 June 2003,
- [45] Kouro S, Malinowski M, Gopakumar K et al., “Recent advances and industrial applications of multilevel converters”. *IEEE Trans Ind Electron* 57(8):2553–2580, 2010
- [46] Yongchun Y., et. al., “Energy Storage Characteristic Analysis of Voltage Sags Compensation for UPQC Based on MMC for Medium Voltage Distribution System” *Energies* 2018, 11(4), 923; <https://doi.org/10.3390/en11040923>
- [47] Ghetti FT, Ferreira AA, Brage HAC, et al. (2012) A study of shunt active power filter based on modular multilevel converter (MMC). In: *Proceedings of the 10th IEEE/IAS international conference on industry applications (INDUSCON’12)*, Fortaleza, 5–7 Nov 2012, 6 pp

- [48] Lawan, A.U., “Power compensation for vector-based current control of a modular multilevel converter (MMC) based STATCOM”, *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*; Yogyakarta Vol. 10, Iss. 4, (Dec 2019): 1781-1796.
- [49] Nieves M, Maza JM, Mauricio JM, et al. (2014) Enhanced control strategy for MMC-based STATCOM for unbalanced load compensation. In: *Proceedings of the 16th European conference on power electronics and applications (EPE'14-ECCE Europe)*, Lappeenranta, 26–28 Aug 2014, 10 pp
- [50] Wanfeng Z., Guang F., Yan F.L. and Bin W., “A digital power factor correction (PFC) control strategy optimized for DSP”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, volume: 19 , Issue: 6 , Nov. 2004.
- [51] Long YB, Xiao XN, Xu YH et al., “MMC-UPQC: application of modular multilevel converter on unified power quality conditioner”. In: *Proceedings of the 2013 IEEE Power and Energy Society general meeting (PES'13)*, Vancouver, 5 pp, 21–23 July 2013.
- [52] Tur, M.R. and Bayindir, R., “A Review of Active Power and Frequency Control in Smart Grid” 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (IEEE GPECOM2019), June 12-15, 2019, Cappadocia, Turkey
- [53] Yao K, Ruan XB, Zou C et al (2012) Three-phase single-switch boost PFC converters with high input power factor. *Proc CSEE* 32(6):97–105 (in Chinese)
- [54] Sheng L., Zheng X., Wen H., Geng T., Yinglin X., “Electromechanical Transient Modeling of Modular Multilevel Converter Based Multi-Terminal HVDC Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, volume: 29 , Issue: 1 , Jan. 2014.
- [55] Zeng Z, Zhao RX, Yang H et al (2012) A multi-functional gridconnected inverter and its application to customized power quality of microgrid. *Power Syst Technol* 36(5):58–67
- [56] Lei Z., et. al., “Modeling, control, and protection of modular multilevel converter-based multi-terminal HVDC systems: A review”, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, volume: 3 , Issue: 4 , Dec. 2017.
- [57] Leung CK, Dutta S, Baek S et al (2010) Design considerations of high voltage and high frequency three phase transformer for solid state transformer application. In: *Proceedings of the 2010 IEEE energy conversion congress and exposition (ECCE'10)*, Atlanta, 12–16 Sept 2010, pp 1551–1558
- [58] Xiaoqian L., Qiang S., Wenhua L., Hong R., Shukai X. And Licheng L., “Protection of Nonpermanent Faults on DC Overhead Lines in MMC-Based HVDC Systems” *IEEE Transactions on Power Delivery*, volume: 28, Issue: 1 , Jan. 2013.
- [59] *World Energy Outlook 2019*, International Energy Agency 9 rue de la Fédération 75739 Paris Cedex 15 France
- [60] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 53, pp. 1398-1409, 2006.
- [61] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 19, pp. 1184-1194, 2004
- [62] M.R. Tur, S. Ay, A. Shobole, M. Wadi, “Güç Sistemlerinde ünite tahsisi için döner rezerv gereksinimi optimal değerinin kayıp parametrelerin dikkate alınarak hesaplanması”, *Journal of the*

Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University . 2018, Vol. 2018 Issue 18, Part 2, p1-20. 20p.

- [63] I. E. C. (IEC). (August 13). Grid Integration of Large-Capacity Renewable Energy Sources and Use of Large-Capacity Electrical Energy Storage [White Paper]. Available: <http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-gridintegrationlargecapacity-LR-en.pdf>
- [64] Eklas H., Mehmet Rida T., Sanjeevikumar P., Selim A., Imtiaj K., “Analysis and Mitigation of Power Quality Issues in Distributed Generation Systems Using Custom Power Devices”, IEEE Access, Volume: 6, 2018
- [65] K. Suslov, N. Solonina, and A. Smirnov, "Distributed power quality monitoring," in Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014 IEEE 16th International Conference on, 2014, pp. 517-520.
- [66] F.-s. Zhang, Z. Geng, and Y. Ge, "FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system," PROCEEDINGS-CHINESE SOCIETY OF ELECTRICAL ENGINEERING, vol. 19, pp. 63-66, 1999
- [67] T. Lobos, T. Kozina, and H.-J. Koglin, "Power system harmonics estimation using linear least squares method and SVD," IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 148, pp. 567-572, 2001.
- [68] William D. Stanley, Technical Analysis & Applications with MATLAB, Thomson Delmar Learning, Canada, pp. 429-446, 2005.
- [69] J.B. Reddy & D.K. Mohanta, B.M. Karan, Power System Disturbance Recognition Using Wavelet and S-Transform Techniques, International Journal of EEPs (1)1007, 2004.
- [70] Randall Shaffer, Fundamentals of Power Electronics with MATLAB, Thomson Delmar Learning, Boston-Massachusetts, pp. 33-36, 2007.
- [71] Liu, Z.; Cui, Y.; Li, W. A classification method for complex power quality disturbances using EEMD and rank wavelet SVM. IEEE Trans. Smart Grid 2015, 6, 1678–1685
- [72] Arrillaga J. & Watson N.R, Power System Quality Assessment, John Wiley & Sons Inc, New York, 1985.
- [73] L.-l. ZHANG and G.-z. WANG, "New Artificial Neural Network Approach for Measuring Harmonics [J]," Proceedings of Electric Power System and Automation, vol. 2, p. 009, 2004.
- [74] D. Castaldo, D. Gallo, C. Landi, R. Langella, and A. Testa, "Power quality analysis: a distributed measurement system," in Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, 2003, p. 6 pp. Vol. 3.
- [75] W. Huang and Y. Dai, "Energy Operator and Wavelet Transform Approach to Online Detection of Power Quality Disturbances," in Signal Processing, 2006 8th International Conference on.
- [76] M.R. Tür, “Solution Methods and Recommendations for Power Quality Analysis in Power Systems”, Journal of Engineering and Technology 2;2 (2018) 1-9
- [77] W. Tong, S. Yuan, Z. Li, and X. Song, "Detection of voltage flicker based on hilbert transform and wavelet denoising," in Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on, 2008, pp. 2286-2289.