

# Şebeke Bağlantılı Bir Fotovoltaik Sistemin Arıza Sonrası Yeniden Bağlanabilme Yeteneğinin Değiştirilmiş Bir PI Kontrolör Kullanılarak İyileştirilmesi

<sup>1</sup>Burak Taş ve <sup>2</sup>Gökay Bayrak

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bakırçay Üniversitesi, 16300, İzmir, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Akıllı Şebekeler Lab., Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, TÜRKİYE

## Özet

Güç kalitesi olaylarının incelenmesi, güç sistemlerinin kararlılığı, arızaların minimum sürede giderilmesi ve cihazların zarar görmesinin engellenmesi açısından çok önemlidir. Bu amaçla güç kalitesinin iyileştirilebilmesi için esnek alternatif akım iletim sistemi (FACTS) cihazları geliştirilmiştir. Bu cihazlar içerisinde statik senkron kompanzator (STATCOM) kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, şebeke bağlantılı fotovoltaik bir güç sistemi üzerinde meydana gelen arıza sırasında sisteme reaktif güç veren veya sistemden reaktif güç çeken STATCOM'un gerilim ve akımın kararlı hale getirilmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sistemden reaktif güç çekerek/vererek arıza sonrası yeniden bağlanabilme kapasitesinin (ASYBK) geliştirilmesi için STATCOM'un devreye alınması ya da devreden çıkarılması amacıyla değiştirilmiş bir PI kontrolörü kullanılmıştır. Ayrıca iletim hattındaki mesafenin değiştirilmesi ya da PI kontrolöre ait kazanç katsayılarının değiştirilmesiyle STATCOM'un akım-gerilim kararlılığına etkisi gözlemlenmiştir. Özellikle PI parametrelerinde yapılan düzenlemelerle sistemin çok daha kararlı hale geldiği sonucuna ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Güç kalitesi, Arıza Sonrası Yeniden Bağlanabilme Kapasitesi, STATCOM

## Abstract

Investigation of power quality events is very important in terms of stability of power systems, elimination of faults in minimum time and prevention of damage to devices. For this purpose, flexible alternating current transmission system (FACTS) devices have been developed to improve power quality. Among these devices, the static synchronous compensator (STATCOM) has a critical importance. In this paper, the effect of STATCOM, which supplies reactive power to the system or absorbs reactive power from the system during a fault on a grid-connected photovoltaic power system, on the stabilization of voltage and current has been investigated. A modified PI controller is used to enable or disable STATCOM to improve the fault ride through (FRT) by absorbing/supplying reactive power from the system. In addition, the effect of STATCOM on current-voltage stability was observed by changing the distance in the transmission line or changing the gain coefficients of the PI controller. It has been concluded that the system has become much more stable, especially with the adjustments made in the PI parameters.

**Keywords:** Power quality, Fault Ride Through Capacity, STATCOM

## 1. Giriş

Dünyada fosil yakıtların tükenmesi ve ciddi enerji açığının ortaya çıkması, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini artırmıştır. Ülkeler, rüzgar, güneş, dalga enerjisi gibi kaynağı tükenmeyen enerji alanlarına büyük yatırımlar gerçekleştirmişlerdir. 2021 yılı Ağustos ayı sonu itibariyle

\***Sorumlu Yazar:** Adres: Bursa Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bursa, TÜRKİYE.  
**E-mail:** gokay.bayrak@btu.edu.tr, **Tel:** +902243003507

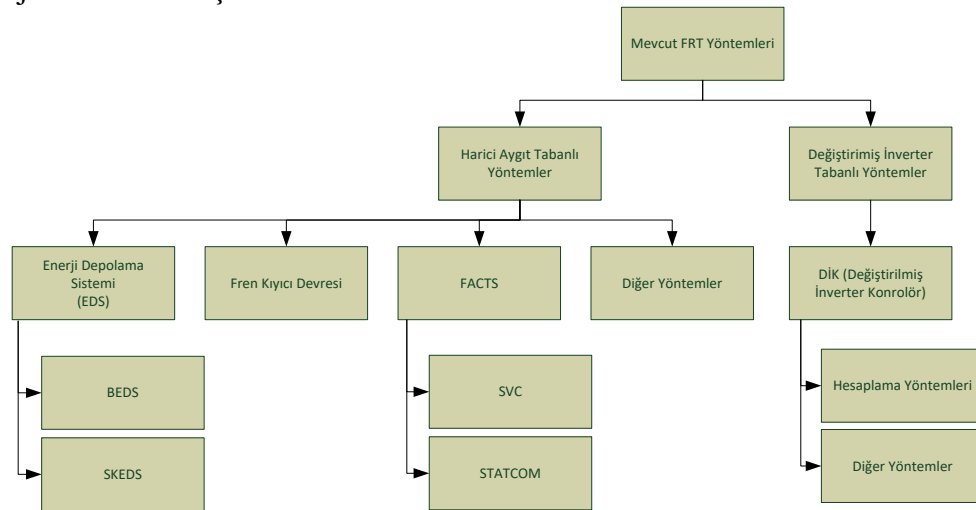
Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam üretilen enerjideki payı %18,33’e ulaşmıştır [1].

**Tablo 1.** 2021 Ağustos ayı sonu itibarıyla Türkiye’de elektrik enerjisi üretimi yapılan kaynaklar [1]

| Enerji Türü   | Yüzde (%) |
|---------------|-----------|
| Doğal gaz     | 31,25     |
| Hidrolik      | 19,34     |
| Yenilenebilir | 18,33     |
| İthal kömür   | 16,43     |
| Linyit        | 12,60     |
| Taş kömürü    | 1,20      |
| Sıvı yakıtlar | 0,10      |

İlk gelişim zamanlarında dağıtık halde kurulan yenilenebilir enerji santralleri, zaman içerisinde güç talebinin artması ve yüksek miktarda güç tüketen yüklerin (fabrika, hastane, okul vb.) kesintisiz beslenebilmesi için şebekeyle bağlantılı hale getirilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke bağlantısının sağlanmasıyla birlikte, bulutlanma süresi ve rüzgar devamlılığının bilinmemesi, güneş panellerin tozlanması, rüzgar türbinlerine veya yakınlarına yıldırım düşmesi gibi istenmeyen durumlar güç kalitesini olumsuz etkilemiştir. Sistemin kararlılığı, güvenilirliği, arızanın tespiti ve giderilmesi, güç kalitesinin incelenmesi ve geliştirilmesinde önemli parametrelerdir [2]. Özellikle şebeke bağlantılı fotovoltaik (FV) sistemlerde bulutlanma, tozlanma, ışınım ve modül sıcaklığı gibi meteorolojik dış etkenlerden ve FV sistemden kaynaklanan güç kalitesi problemleri, FV sistemin şebekenin güç kalitesini etkilemeyecek şekilde çalıştırılması ile giderilebilir. Bu nedenle, arıza sonrası yeniden bağlanabilme kapasitesinin (ASYBK) geliştirilmesi konusunda son yıllarda önemli çalışmalar yapılmaktadır[3-6].

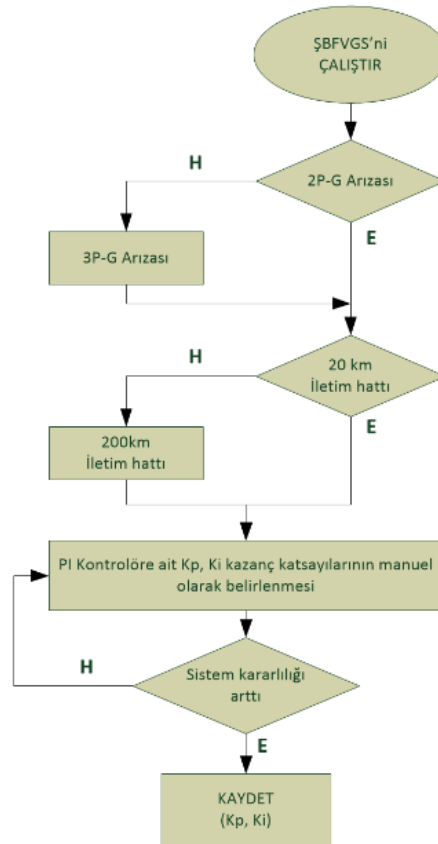
Güç kalitesinin iyileştirilmesi için yüksek hız performansına sahip güç elektroniği altyapısını kullanan esnek alternatif akım iletim sistemi (FACTS) yöntemleri geliştirilmiştir [7,8]. Bu yöntemler, sisteme harici bir cihaz ekleyerek ya da doğrudan yazılımsal bir çözümle olmak üzere iki farklı şekilde uygulanmaktadır. Şekil 1’de genel hatlarıyla ASYBK’nın geliştirilmesine yönelik çözüm stratejileri özetlenmiştir.



**Şekil 1.** Mevcut ASYBK çözüm stratejileri [9]

ASYBK çözümlerinin gerçek hayatta uygulanabilirliği açısından, cihaz içerisinde fazla yer kaplaması, aşırı ısınma, yüksek maliyet gibi bazı kısıtlar mevcuttur. Bu yüzden sistem kararlılığını ve güvenilirliğini artırmakla beraber ısınma, yer kaplama ve maliyet gibi konularda da kullanıcıları sıkıntıya sokmayan veya bu problemleri minimum düzeye indiren yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır [10,11].

Şekil 2’de akış diyagramı verilen bu çalışmada, şebeke bağlantılı bir FV sistemin ASYBK’sının geliştirilmesi amacıyla değiştirilmiş bir PI kontrolör önerilmiştir. İlgili kontrolör ile FV sisteme arıza durumunda aktif/reaktif güç desteği sağlayan STATCOM yapısının şebeke güç kalitesini etkilemeden çalışabilmesi amaçlanmıştır. Matlab Simulink ortamında farklı şebeke koşulları altında modellenen sistemden alınan sonuçlar değerlendirilmiştir. Önerilen yöntem ile şebeke bağlantılı bir FV sistemin ASYBK’sının önemli ölçüde geliştirildiği görülmüştür.



Şekil 2. ŞBFVGS'nin 2 farklı arıza durumunda PI kontrolörün kararlılığa etkisini gösteren akış diyagramı

## 2. Materyal ve Metot

FACTS yöntemleri içerisinde harici bir aygıt olarak sisteme eklenen STATCOM, çok önemli bir çözüm yöntemidir. STATCOM, şarj edilmiş doğru akım (DA) kaynağı olarak kullanılan kondansatör, bu kondansatörden sisteme verilen gerilimi/akımı dönüştüren inverter trafo üzerinden alternatif akım (AA) sistemine bağlanmaktadır. STATCOM çıkış akımı (endüktif veya kapasitif), AA sistem geriliminden bağımsız olarak kontrol edilebilir. Bu özelliği STATCOM'u, bir diğer

FACTS aygıtı olan statik var senkron kompanzator (SVC) daha üstün konuma getirmiştir.

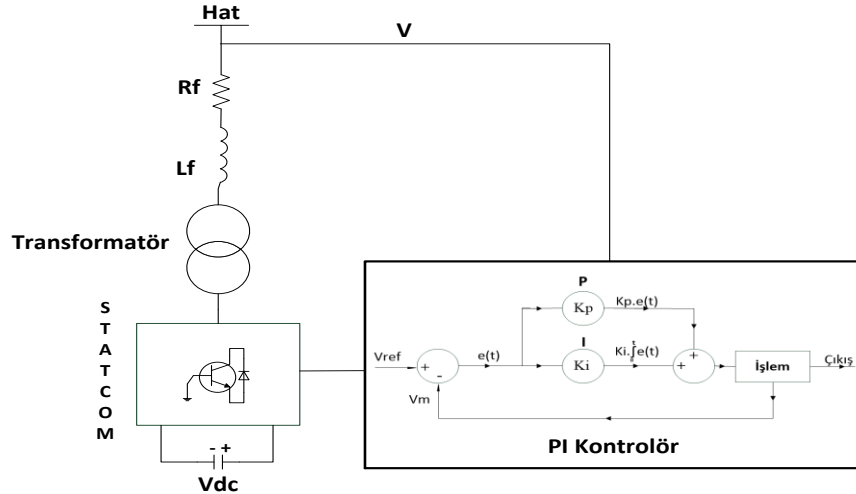
### 2.1. Statik Senkron Kompanzator (STATCOM)

Şekil 3’de gösterilen STATCOM’un genel yapısında yer alan inverter çıkış gerilimi ( $V_e$ ), AA sistem hat geriliminden ( $V_h$ ) büyük ise ( $V_e > V_h$ ) STATCOM’dan iletim sistemine reaktif güç sağlanır ve STATCOM kapasitif bir yük gibi davranır. Hat gerilimi, inverter çıkış geriliminden büyük ise ( $V_e < V_h$ ) iletim sisteminden STATCOM’a reaktif güç aktarımı gerçekleşecektir. Bu durumda STATCOM endüktif bir yük gibi davranır. Eğer bu iki gerilim değeri birbirine eşit ise ( $V_e = V_h$ ) herhangi bir reaktif güç alışverişi gerçekleşmez. STATCOM ile iletim hattı arasındaki empedans  $X$ ,  $V_e$  ile  $V_h$  arasındaki faz açısı  $\alpha$  (alfa) olmak üzere, STATCOM’un sağladığı güç aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$Q = \frac{V_h \cdot (V_e \cdot \cos \alpha - V_h)}{X}$$
$$P = \frac{V_h \cdot V_e}{X} \cdot \sin \alpha$$

### 2.2. STATCOM’un PI Kontrolör ile Tasarımı

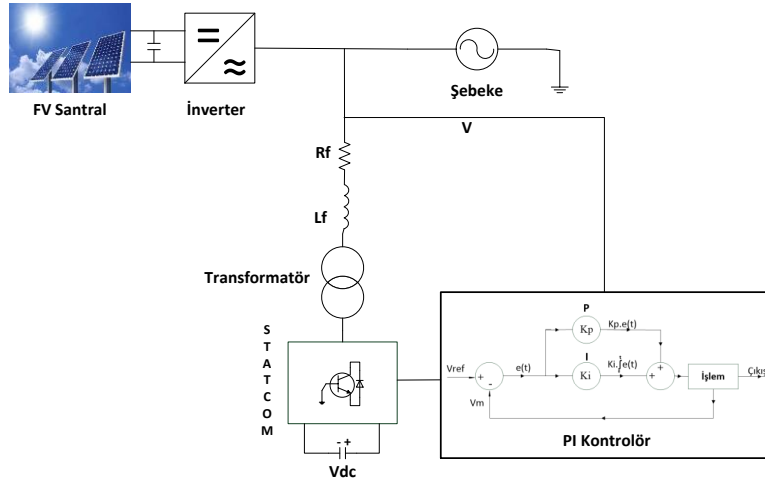
Çalışmada, sistemde herhangi bir durumda oluşabilecek gerilim ve akım dalgalanmalarını tolere etmek için iletim hattına STATCOM bağlantısı sağlanmıştır. STATCOM’un devreye alınması veya devreden çıkarılması için çeşitli kontrolörlere ihtiyaç duyulmaktadır. PI kontrolör, matematiksel kontrolör metodu olarak güç sistemlerinde sıkça kullanılmaktadır. Şekil 3’te iletim hattına bağlantısı sağlanmış PI kontrolörlü STATCOM’un genel devre şeması gösterilmiştir.



Şekil 3. İletim hattına bağlı PI kontrolörlü STATCOM

Sistemde kararlı olarak kabul edilen referans gerilim değerinden ( $V_{ref}$ ) ölçülen gerilim değeri ( $V_m$ ) çıkarılarak hata fonksiyonu ( $e(t)$ ) elde edilir. Elde edilen  $e(t)$ , PI kontrolörde P (proportional-örantısal) ve I (integral) fonksiyonlarından geçirilerek  $K_p$  ve  $K_i$  kazanç katsayıları ile çarpılır ve bu iki fonksiyon toplanır. Böylece sinyalin hatası minimize edilerek sistem kararlılığı artırılır. Hata fonksiyonu çıktısı sifira ulaşana kadar kapalı döngü sisteminde işlem tekrarlanır. PI kontrolörün, sistemi maksimum düzeyde kararlı hale getirebilmesi için belirlenmesi gereken en önemli nokta,

$K_p$  ve  $K_i$  değerlerinin en ideal değerde seçilmesidir.  $K_p$  değeri sinyalin yükselme zamanını (rise time) iyileştirirken  $K_i$  değeri ise sinyalin kararlı seviye olan 1 birim değere oturmasını (settling time) sağlamaktadır.  $K_p$  ve  $K_i$  parametrelerinin belirlenmesi manuel ya da otomatik olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilir. Otomatik belirlemede Matlab/Simulink uygulamasında PID tuner araç kutusu seçilerek sinyale ait transfer fonksiyonu import edilir ve PI seçeneği belirlendikten sonra  $K_p$  ve  $K_i$  kazanç katsayıları belirlenir.



Şekil 4. Şebeke bağlantılı FV güç sistemine bağlı PI kontrolörlü STATCOM

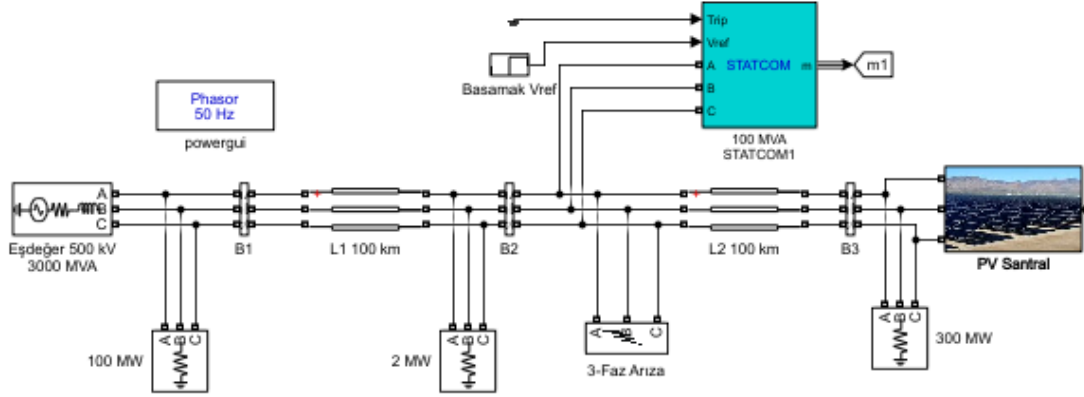
$K_p=11$  ve  $K_i=24$  iken yükselme süresi (0.51 sn.) ve oturma süresi (2.24 sn) uygulamadan gözlemlenebilmektedir. Ancak sinyali daha kararlı hale getirmek için bu değerlerde düzeltme yapmak gerekir.  $K_p=60$  ve  $K_i=78$  iken yükselme süresi (0.166 sn.) ve oturma süresinde (1.79 sn.) iyileştirme gerçekleşir. Ancak osilasyonda artış meydana gelmektedir.

Tablo 2. PI kontrolörüm  $K_p$  ve  $K_i$  kazanç değerlerine göre yükselme ve oturma süresi değerleri

| $K_p$ | $K_i$ | Yükselme süresi (sn) | Oturma Süresi(sn) |
|-------|-------|----------------------|-------------------|
| 11    | 24    | 0,51                 | 2,24              |
| 60    | 78    | 0,166                | 1,79              |

### 2.3. Modifiye Edilmiş PI Denetleyicili STATCOM'la Geliştirilen Simulink Modeli

Bu çalışmada 500 kV değerine sahip bir iletim hattının orta noktasından bağlantılı STATCOM ile şebeke bağlantılı bir FV sistemin gerilim regülasyonu amaçlanmıştır. Oluşan arızaların sisteme olumsuz etkisini sınırlandırmak için STATCOM kullanılmıştır. STATCOM'un her bir arıza durumundaki etkisini gözlemlemek amacıyla Matlab Simulink'te Şekil 5'teki gibi bir devre modeli oluşturulmuştur.



Şekil 5. Güvenilir bir STATCOM işlemi sağlamak için değiştirilmiş bir PI kontrolörlü geliştirilen model

Tablo 3, Şekil 5'te kullanılan STATCOM'a ait güç ve kontrolör parametrelerinin değerlerini göstermektedir. Modelde hem AC, hem de DC regülatör kazançları değiştirilerek STATCOM kontrol edilmektedir.

**Tablo 3.** STATCOM parametreleri

| Güç                                  | Kontrolör |  |              |
|--------------------------------------|-----------|--|--------------|
| Nominal gerilim ( $V_{rms}$ L-L)     | 500kV     | Referans geriliminin maksimum değişim oranı (pu/s) | 10           |
| Nominal frekans $f_n$ (Hz)           | 50 Hz     | Düşüş (pu)   | 0.03         |
| Konvertör değerlendirme (VA)         | 100MVA    | Vac regülatör kazançları                           | 5 1000       |
| Konvertör Empedansı R(pu)            | 0.22/30   | Vdc regülatör kazançları                           | 0.1e-3 20e-3 |
| Konvertör Empedansı L(pu)            | 0.22      | Akım regülatör kazançları                          | 0.3 10 0.22  |
| DC Hat Nominal Gerilimi(V)           | 40000     |  |              |
| DC Hat toplam eşdeğer kapasitansı(F) | 750e-6/2  |  |              |

### 3. Sonuçlar

Bu çalışmada, Matlab Simulink ortamında geliştirilen FV sistem ve STATCOM içeren model, farklı şebeke koşulları altında incelenerek PI kontrolörlü sistemden alınan sonuçlar değerlendirilmiştir. Farklı şebeke koşullarında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

#### 3.1. Durum-1:

**2 Faz-Toprak Arızası:** Güç sistemlerinde, fazlardan ikisinin aşınma, kopma gibi nedenlerle toprakla teması sonucu oluşan kısa devre durumudur. Böyle bir durumda kısa devre olan hatlardan yüklere enerji akışı sağlanmaz. İncelenen ilk durumda, modellenen sistemdeki 20 km ve 200 km iletim hatlarında 2 faz-toprak arızasının meydana geldiği durum ele alınmıştır. B1 barası ölçüm noktasında arızalı fazdaki gerilim 0,3 pu düşerken diğer fazlarda gerilim düşümü veya salınım meydana geldiği gözlemlenmiştir.  $T=0,8$  s sonra arıza giderildiğinde, yaklaşık 0,4 s boyunca gerilim ve akımda, dolayısıyla aktif ve reaktif güçlerde dalgalanmalar olmaktadır. Şekil 6 ve Şekil 7'de verilen simülasyon sonuçlarına göre STATCOM'suz B1 ve B2 baralarında dalgalanmalar olurken, STATCOM bağlantısının sağladığı reaktif güç sistemin aktif gücünde salınımlara neden olmuştur. Arıza giderildikten sonra nominal güç değerine ulaşmada karşılaşılan temel sorun,

yaklaşık 0,04 saniye süren aşırı gerilimdir. Kesiciler arızalandığında meydana gelen bu aşma, sistemin güvenilirliğini sağlamak açısından sorun yaratmaktadır.

Tablo 4 ve Tablo 5, sırasıyla 20 km ve 200 km iletim hatlarında oluşan 2 faz-toprak arıza durumunda PI kontrolörlü STATCOM'un,  $K_p$  ve  $K_i$  kazanç katsayılarına göre arıza geçiş durumuna etkisini göstermektedir.

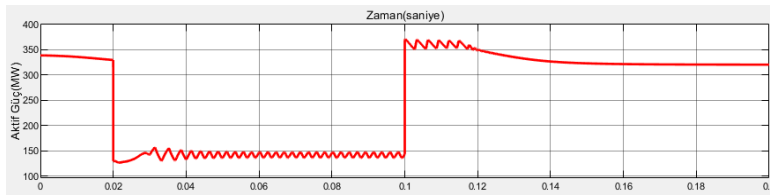
**Tablo 4.** 2 Faz-Toprak arızası altında 20 km iletim hattında arıza sonrası farklı PI kontrolör katsayı değerlerine göre aktif gücün salınım süreleri

| Şekil | Vac Regülatör kazançları [ $K_p$ , $K_i$ ]: | Vdc Regülatör kazançları [ $K_p$ , $K_i$ ]: | Akım Regülatör kazançları [ $K_p$ , $K_i$ , $K_f$ ]; | Osilasyon süresi |
|-------|---|---|--|------------------|
| 5.a   | [5 1000]                                    | [0.1e-1 0.1e-1]                             | [0.3 10 0.22]  | 56,891ms         |
| 5.b   | [5 1000]                                    | [0.1e-3 0.1e-3]                             | [0.3 10 0.22]  | 52,199ms         |
| 5.c   | [1 10]                                      | [0.1e-5 0.1e-5]                             | [0.4 100 0.0]  | 26.002ms         |

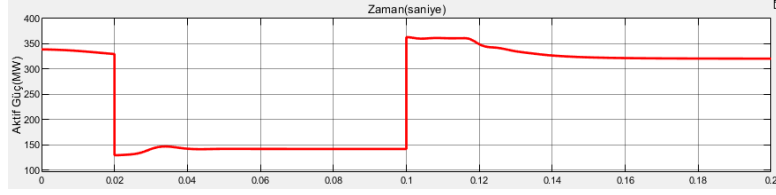
**Tablo 5.** 2 Faz-Toprak arızası altında 200 km iletim hattında arıza sonrası farklı PI kontrolör katsayı değerlerine göre aktif gücün salınım süreleri

| Şekil | Vac Regülatör kazançları [ $K_p$ , $K_i$ ]: | Vdc Regülatör kazançları [ $K_p$ , $K_i$ ]: | Akım Regülatör kazançları [ $K_p$ , $K_i$ , $K_f$ ]; | Osilasyon süresi |
|-------|---|---|--|------------------|
| 6.a   | [5 1000]                                    | [0.1e-1 0.1e-1]                             | [0.3 10 0.22]  | 59,824ms         |
| 6.b   | [5 1000]                                    | [0.1e-3 0.1e-3]                             | [0.3 10 0.22]  | 33,822ms         |
| 6.c   | [1 10]                                      | [0.1e-5 0.1e-5]                             | [0.4 100 0.0]  | 13,490ms         |

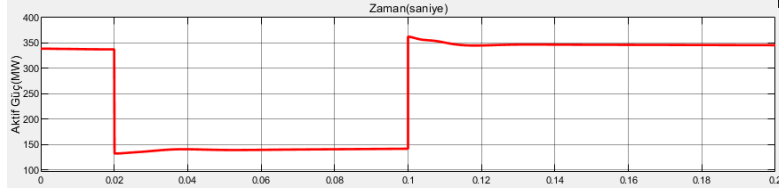
Tablo 4 ve Tablo 5'teki veriler dikkate alındığında, sistemdeki arıza sonrası oluşan salınım, iletim hattının uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. 2 faz-toprak arızalarının giderilmesinden sonra oluşan salınım, PI kontrolör katsayıları değiştirilerek çok daha kısa sürelerle indirilmiştir. Her iki koşulda gerilim regülatörlerine ait kazanç katsayıları düşürülmüş, akım regülatörüne ait kazanç katsayıları artırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, AC Gerilim, DC Gerilim ve Akım regülatör bloklarındaki PI kontrolörlerin kazanç katsayılarının aynı oranda değiştirilmesine rağmen 200km'lik iletim hattında sistem kararlılığına daha fazla katkı sağladığını göstermiştir.



(a)

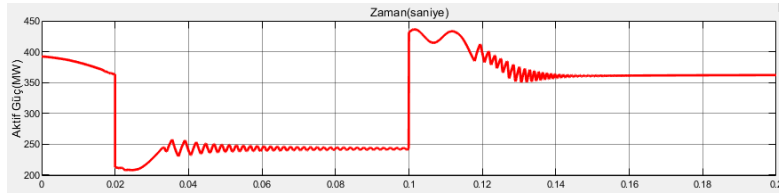


(b)

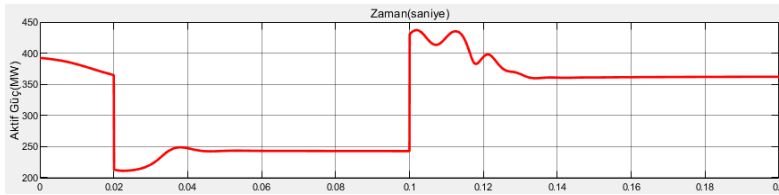


(c)

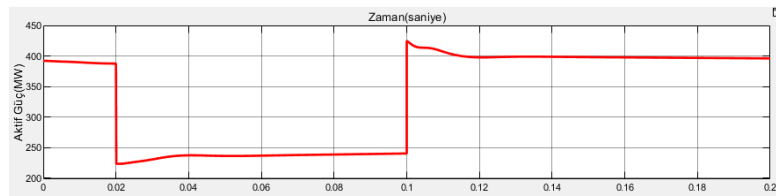
Şekil 6. 2 Faz-Toprak arızası altında 20 km iletim hattında farklı PI kontrolör parametrelerine göre aktif gücün çıkış sinyali



(a)



(b)



(c)

Şekil 7. 2 Faz-Toprak arızası altında 200 km iletim hattında farklı PI kontrolör parametrelerine göre aktif gücün çıkış sinyali

### 3.3. Durum-2:

**3 Faz-Toprak Arızası:** Güç sisteminde bulunan üç fazın toprak ile teması sonucu gerilim ve akımda oluşan istenmeyen durumlara üç faz-toprak arızası denir. Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilen simülasyon sonuçları 3 faz-toprak arıza durumları içindir. B1 barasında arıza sırasında



STATCOM'lu ve STATCOM'suz bağlantı sonucunda aktif ve reaktif güçlerde değişim gözlenmiştir. B2 barasında bir arıza meydana geldiğinde aktif ve reaktif güç çıkışları, B1 barasında ölçülen sonuçlarla aynı çıkmıştır. Her iki baradan alınan simülasyon sonuçlarına göre arıza giderildikten sonra yaklaşık  $t=0.04$  sn sonra salınım sona ermiştir. Bu işlemde nominal gerilim seviyesinin aşıldığı ve daha sonra nominal gerilim seviyesine ulaştığı gözlemlenmiştir.

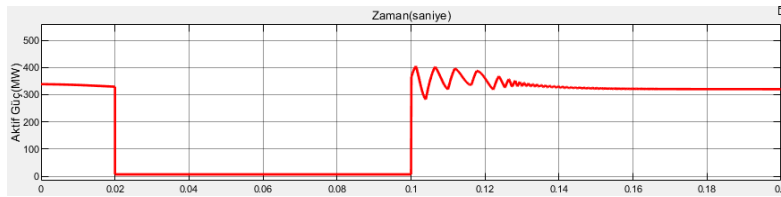
**Tablo 5.** 3 Faz-Toprak arızası altında 20 km iletim hattında arıza sonrası farklı PI kontrolör katsayı değerlerine göre aktif gücün salınım süreleri

| Şekil | Vac Regülatör kazançları [Kp, Ki]: | Vdc Regülatör kazançları [Kp, Ki]: | Akım Regülatör kazançları [Kp, Ki, Kf]; | Osilasyon süresi |
|-------|------------------------------------|------------------------------------|---|------------------|
| 7.a   | [5 1000]                           | [0.1e-1 0.1e-1]                    | [0.3 10 0.22]                           | 59,938ms         |
| 7.b   | [5 1000]                           | [0.1e-3 0.1e-3]                    | [0.3 10 0.22]                           | 48,094ms         |
| 7.c   | [1 10]                             | [0.1e-5 0.1e-5]                    | [0.4 100 0.0]                           | 24.236ms         |

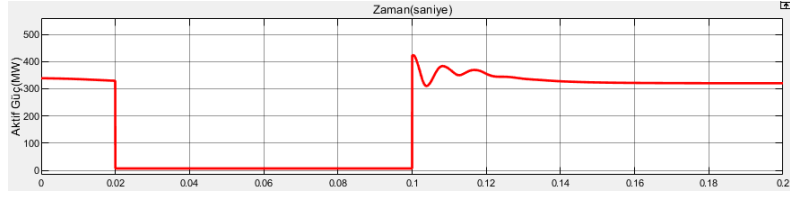
**Tablo 6.** 3 Faz-Toprak arızası altında 200 km iletim hattında arıza sonrası farklı PI kontrolör katsayı değerlerine göre aktif gücün salınım süreleri

| Şekil | Vac Regülatör kazançları [Kp, Ki]: | Vdc Regülatör kazançları [Kp, Ki]: | Akım Regülatör kazançları [Kp, Ki, Kf]; | Osilasyon süresi |
|-------|------------------------------------|------------------------------------|---|------------------|
| 8.a   | [5 1000]                           | [0.1e-1 0.1e-1]                    | [0.3 10 0.22]                           | 56,305ms         |
| 8.b   | [5 1000]                           | [0.1e-3 0.1e-3]                    | [0.3 10 0.22]                           | 38,514ms         |
| 8.c   | [1 10]                             | [0.1e-5 0.1e-5]                    | [0.4 100 0.0]                           | 42,647ms         |

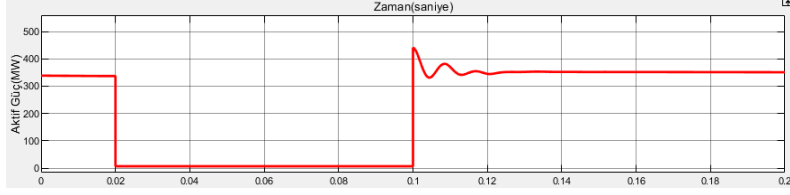
Tablo 5 ve Tablo 6'daki veriler dikkate alındığında, sistemdeki arıza sonrası oluşan salınım, iletim hattının uzunluğundan ziyade kontrolörün katsayı parametrelerine göre değişmektedir. 3 faz-toprak arızaları STATCOM tarafından reaktif güç enjekte edilerek giderildikten sonra oluşan salınım, PI kontrolör katsayılarını değiştirerek ve buna göre iletim hattı uzunluğunu azaltarak çok daha kısa sürelerle inebilir. Elde edilen sonuçlar, PI denetleyicinin katsayı parametreleri değiştirilse bile iletim hattı uzunluğu arttıkça salınım süresindeki iyileşmenin azaldığını da göstermektedir.



(a)

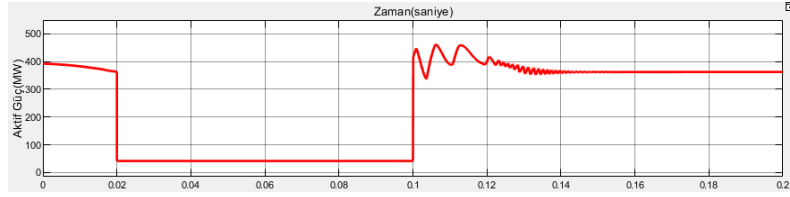


(b)



(c)

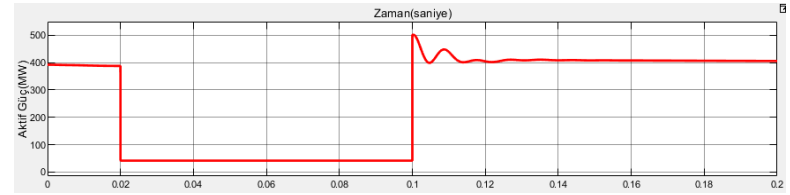
Şekil 8. 3 Faz-Toprak arızası altında 20 km iletim hattında farklı PI kontrolör katsayı değerlerine göre aktif gücün çıkış sinyali



(a)



(b)



(c)

Şekil 9. 3 Faz-Toprak arızası altında 200 km iletim hattında farklı PI kontrolör katsayı değerlerine göre aktif gücün çıkış sinyali

#### 4. Tartışma

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre şebeke bağlantılı FV sisteme entegre edilen STATCOM'un arıza sürecinde sisteme reaktif güç sağladığı gözlemlenmiştir. STATCOM'un bu desteği sonucunda akım ve gerilimde salınımların meydana geldiği, dolayısıyla arıza giderildikten sonra aktif güçte de osilasyon gözlemlenmiştir. Bu salınım, 0,04 s için nominal gerilimin üzerinde bir aşma olarak meydana gelmiştir. Bu çalışmada STATCOM desteği salınımlara neden olsa da, 0,04 sn sonra

nominal seviyeye ulaşılmış ve sistem daha kararlı bir şekilde çalışmaya devam etmiştir. Tablo 7'deki sonuçlar değerlendirildiğinde, PI denetleyicinin katsayı değerleri ile iletim hattının kısıllığı ve salınım süresi kriterleri dikkate alındığında, en iyi sonucun 200 km hat üzerinde B2 barasına yakın noktada 2 faz-toprak arızası sırasında alındığı sonucuna varılmıştır. Mevcut PI denetleyici aktifken 59.824 ms olan salınım süresi, denetleyici modifiye edildikten sonra 13.490 ms'ye düşerek sistem kararlılığını ilk duruma göre %77,45 oranında artırmıştır.

**Tablo 7.** PI kontrolörün modifikasyonu ile arıza sonrası aktif güçteki salınım süreleri.

| Şekil    | Vac Regülatör kazançları [Kp, Ki]: | Vdc Regülatör kazançları [Kp, Ki]: | Akım Regülatör kazançları [Kp, Ki, Kf]; | İletim hattı | Arıza |
|----------|------------------------------------|------------------------------------|---|--------------|-------|
| [1 10]   | [0.1e-5 0.1e-5]                    | [0.4 100 0.0]                      | 26.002ms                                | 20 km        | 2P-G  |
| [1 10]   | [0.1e-5 0.1e-5]                    | [0.4 100 0.0]                      | 13,490ms                                | 200 km       | 2P-G  |
| [1 10]   | [0.1e-5 0.1e-5]                    | [0.4 100 0.0]                      | 24.236ms                                | 20 km        | 3P-G  |
| [5 1000] | [0.1e-3 0.1e-3]                    | [0.3 10 0.22]                      | 38,514ms                                | 200 km       | 3P-G  |

## Referanslar:

- [1] <https://www.enerjiportali.com/turkiye-elektrik-enerjisi-uretim-istatistikleri-agustos-2021/>, 28/08/2022, Güneş Enerjisi Yatırımcıları Derneği (GÜYAD)
- [2] Yılmaz, A., Küçükler, A., Bayrak, G., Ertekin, D., Shafie-Khah, M., & Guerrero, J. M. (2022). An improved automated PQD classification method for distributed generators with hybrid SVM-based approach using undecimated wavelet transform. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 136, 107763.
- [3] Aboelsaud, R., Ibrahim, A., Aleksandrov, I. V., & Ali, Z. M. (2022). Model predictive control algorithm for fault ride-through of stand-alone microgrid inverter. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 135, 107485.
- [4] Tian, X., Cheng, P., Wei, L., Li, G., Jiao, H., & Liu, H. (2022). Transient stability and FRT technologies of different synchronous wind turbine. *Energy Reports*, 8, 363-373.
- [5] Zeb, K., Islam, S. U., Khan, I., Uddin, W., Ishfaq, M., Busarello, T. D. C., ... & Kim, H. J. (2022). Faults and Fault Ride Through strategies for grid-connected photovoltaic system: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112125.
- [6] Bayrak, G., Ghaderi, D., & Sanjeevikumar, P. (2021). Fault ride-through (FRT) capability and current FRT methods in photovoltaic-based distributed generators. In *Power Quality in Modern Power Systems* (pp. 133-149). Academic Press.
- [7] Kohan, V., Kolcun, M., Conka, Z., Havran, P., Karabinos, M., Taylor, R. J., & Stefko, R. (2022, June). Improving the Operation of Power System Control During Disturbances Using FACTS Controllers. In *2022 22nd International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)* (pp. 1-5). IEEE.
- [8] ALNASSEIR, J., ALCHAREA, R., & ALMAGHOUT, F. (2021, April). Improving the Stability of Smart Grids by Using Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS). In *2021 12th International Renewable Energy Conference (IREC)* (pp. 1-3). IEEE.
- [9] Angala Parameswari, G., & Habeebullah Sait, H. (2020). A comprehensive review of fault ride-through capability of wind turbines with grid-connected doubly fed induction generator. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30(8), e12395.
- [10] Metwally Mahmoud, M., Salama, H. S., Aly, M. M., & Abdel-Rahim, A. M. M. (2021). Design and implementation of FLC system for fault ride-through capability enhancement in PMSG-wind systems. *Wind Engineering*, 45(5), 1361-1373.
- [11] Mosaad, M. I., Abu-Siada, A., Ismaiel, M. M., Albalawi, H., & Fahmy, A. (2021). Enhancing the fault ride-through capability of a DFIG-WECS using a high-temperature superconducting coil. *Energies*, 14(19), 6319.