



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 16.08.2022
Kabul Tarihi : 20.11.2022

Received Date : 16.08.2022
Accepted Date : 20.11.2022

FOTOVOLTAİK İNVERTERLER İLE REAKTİF GÜÇ OPTİMİZASYONU

REACTIVE POWER OPTIMIZATION WITH PHOTOVOLTAIC INVERTERS

Sabri Murat KISAKÜREK^{1*} (ORCID: 0000-0002-8114-0341)

Mustafa ŞEKKELİ² (ORCID: 0000-0002-1641-3243)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

² Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Sabri Murat KISAKÜREK, mkisakurek@gmail.com

ÖZET

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimine artan yönelim sebebiyle elektrik dağıtım şebekelerinde özellikle fotovoltaik (PV) tabanlı kaynaklar olmak üzere dağıtık üretim santraller oldukça yaygınlaşmış ve bu santrallerin payı gün geçtikçe artmaktadır. Bu durumun şebeke üzerindeki etkileri üzerine çalışmalar günümüzde artan bir önem kazanmıştır. PV inverterlerin tasarımlarının doğası gereği belirli limitler kapsamında gerek kapasitif gerekse endüktif reaktif güç desteği verebilmektedirler ve bu inverterlerin reaktif güç kompensatörü olarak kullanılması, yatırım ihtiyacını azaltabilmektedir. Bu çalışmada, dağıtım şebekesindeki PV santrallerin reaktif güç limitleri göz önüne alınarak, şebekenin gerilim profilini iyileştirmek için alınması gereken reaktif güç desteğinin optimum miktarı hesaplanmasına yönelik Python tabanlı, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması geliştirilmiştir. Şebeke modelleme, analiz ve simülasyon için DİGSILENT PowerFactory şebeke analiz programı kullanılmış ve geliştirilen optimizasyon algoritması ile modellenen şebekeye, Python aracılığıyla bağlantılı gerekli analizler yapılmıştır. Çalışmada, PV santrallerden alınan reaktif güç desteğinin şebeke gerilim profiline olumlu etki ettiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, parçacık sürü optimizasyonu, reaktif güç

ABSTRACT

Due to the increasing trend towards electricity generation from renewable energy sources in recent years, distributed generation plants, especially photovoltaic (PV) based sources, have become quite common in electricity distribution networks and the share of these plants is increasing day by day. Studies on the effects of distributed generation on the operation of the network have gained increasing importance today. Due to the nature of their design, PV inverters can provide both capacitive and inductive reactive power support within certain limits, and the use of these inverters as reactive power compensators can reduce the investment need. In this study, a Python-based Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm has been developed to calculate the optimum amount of reactive power support that should be taken to improve the voltage profile of the network, considering the reactive power limits of the PV plants in the distribution network. DİGSILENT PowerFactory network analysis program has been used for network modelling, analysis and simulation, and the connection between the network modeled and the optimization algorithm was provided via Python. It was observed that the reactive power support from PV plants has positive effects on the voltage profile of the network.

Keywords: Particle swarm optimization, photovoltaic, reactive power

GİRİŞ

Fotovoltaik başta olmak üzere son yıllarda dağıtık üretim santrallerine olan ilginin artışı ile, bu santrallerin elektrik iletim ve dağıtım şebekeleri üzerinde etkilerine yönelik çalışmalar önem kazanmıştır. Genel bir kanı olarak “tüketimin olduğu yerde üretim” konsepti daha düşük teknik kayıp ve ideale yaklaştırılmış gerilim profili gibi şebekeyi daha iyi koşullarda çalışmasına yardımcı olabileceği gibi; iyi planlanmamış, şebekenin ihtiyacının çok altında veya çok üstünde dağıtım üretimin yapılması durumunda şebeke, olduğundan daha kötü koşullarda çalışabilmektedir. Bu durumlarda, şebekenin sürdürülebilir çalışma koşullarında çalışabilmesi için dağıtım sistemi operatörlerinin (DSO) yapması gereken yatırımı artırmaktadır. Bu yatırımlar arasında pratikte en fazla uygulananlar, mevcut hatların akım taşıma kapasitesi yüksek hatlar ile değiştirilmesi, şebekeye yeni hatlar/bağlantılar eklenmesi ve kapasitörler aracılığıyla reaktif güç kompanzasyonudur. Fotovoltaik inverterlerin reaktif güç üretme veya çekme kabiliyetlerinin olması, ihtiyaç duyulan kompanzasyon çalışmalarının bu inverterler aracılığıyla yapılmasına ve işletme maliyetinin azaltılmasını sağlayabilmektedir.

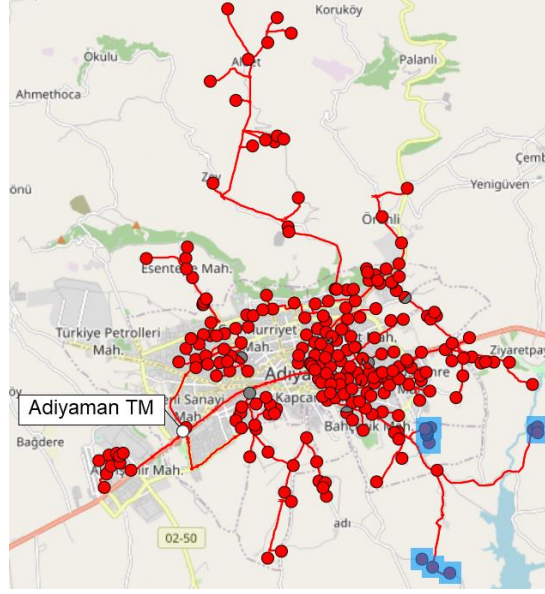
Türkiye’deki mevcut mevzuata göre (Dağıtım Yönetmeliği Madde 13-(1); Şebeke Yönetmeliği Madde 20-(2)), 30 MW kapasitenin altında olan ve dağıtım sistemine OG seviyeden bağlı lisanslı ve lisanssız PV santrallerin reaktif güç destek zorunluluğu bulunmamaktadır. Dağıtım sistemine bağlı üretim santrallerinin reaktif güç destek zorunluluğu olmaması nedeniyle, PV santraller genellikle güç faktörü 1 değerinde çalışmakta ve inverterlerin tüm kapasitesini aktif güç üretmek için kullanmaktadır. Ancak bu santrallerden alınabilecek reaktif güç desteği lokal olarak reaktif güç sorununun çözülmesine ve şebekenin daha ideal durumlarda çalışmasına katkı sağlayacaktır.

Türkiye gibi henüz birçok ülkede dağıtım sistemine bağlı lisanssız üretim tesislerinin reaktif güç desteği yönetmelikler ile belirlenmemiş olmasına rağmen dağıtık üretim santrallerine olan ilginin artışı, bu santrallerden sağlanacak reaktif güç desteği ile şebeke kaybının azaltılmasına veya gerilimin düzenlenmesine yönelik yapılan teorik çalışmalara hız kazandırmıştır (Almeida, Pasupuleti & Ekanayake, 2021; Kabiri vd., 2015; Weckx, Gonzalez & Driesen, 2014; Cagnano vd., 2011). Ancak, gerilim iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar tek bir PV santral üzerinden PV santralin PCC noktası üzerindeki gerilimin takibi ile yapılmış ve şebekenin genel gerilim profili göz ardı edilmiştir.

Bu çalışmada, dağıtım sistemine bağlı PV santrallerin her birinin inverterlerinden optimum düzeyde alınabilecek reaktif güç desteği ile şebekenin genel gerilim profilinin iyileştirilmesini hedefleyen Python tabanlı oluşturulmuş Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması ve bu algoritmanın şebeke modelleme ve analiz için kullanılan DIgSILENT PowerFactory uygulaması ile entegrasyonu açıklanmıştır. Oluşturulan algoritmada santralin mevcut aktif güç üretiminde bir kısıtlama yapılmamış ve inverterlerden sağlanabilecek reaktif güç limitleri göz önüne alınmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, ülkemizin Kahramanmaraş ve Adıyaman illerinin dağıtım sistemi operatörü olan AKEDAŞ’ın Şekil 1’de tek hat şeması verisi verilen Adıyaman TM-Şehir 1 fideri üzerinde analizler yapılmıştır. Şebekede toplam 11.792 GW kurulu gücünde 12 adet PV santral bulunmaktadır ve PV’lerin konumları şekil üzerinde işaretlenmiştir. PV’lerden alınması gereken optimum düzeydeki reaktif güç desteğinin hesaplanmasında Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) yöntemine dayalı Python tabanlı bir algoritma geliştirilmiş ve geliştirilen algoritma, şebeke modelleme ve analiz için kullanılan DIgSILENT PowerFactory uygulaması ile entegre edilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde PSO algoritması ve algoritmanın Python kodu aracılığı ile projenin PowerFactory modeli üzerinde entegrasyonu açıklanmıştır.



Şekil 1. Adiyaman TM Şehir 1 Fideri Tek Hat Şeması

Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık sürü optimizasyonu (PSO), belirli bir kalite ölçüsüne göre aday bir çözümü yinelemeli olarak iyileştirmeye çalışarak bir sorunu optimize eden bir hesaplama yöntemidir (Kennedy & Eberhart, 1995). Bir problemi, parçacıklar olarak adlandırılan bir aday çözümler popülasyonuna sahip olarak ve bu parçacıkları arama uzayında basit matematiksel formüle göre parçacığın konumu ve hızı üzerinde hareket ettirerek çözer. Her parçacığın hareketi, yerel olarak en iyi bilinen konumundan etkilenir, ancak aynı zamanda, diğer parçacıklar tarafından daha iyi konumlar buldukça güncellenen, arama uzayındaki en iyi bilinen konumlara doğru yönlendirilir. Böylelikle sürüyü en iyi çözümlere doğru hareket ettirmektedir.

Parçacık sürü optimizasyonunun temel elemanları aşağıda listelenmiştir:

- **Parçacık:** Hız ve konum bileşenlerine sahip olan ve iteratif olarak bu bileşenleri kendisinin ve diğer parçacıkların konumuna göre güncelleyen elemandır. Parçacık sayısı ile optimum sonuca ulaşma arasında doğru, sonuca ulaşma hızı arasında ters orantı vardır.
- **Uygunluk fonksiyonu:** Optimum çözümü bulmak için kullanılan hedef fonksiyondur.
- **Yerel en iyi:** Parçacığın ziyaret edilen tüm konumları arasında en iyi konumdur. Bu değer iteratif süreç boyunca değişmektedir.
- **Küresel en iyi:** Mevcut iterasyona kadar tüm parçacıklar tarafından ziyaret edilen konumlar arasında en iyi uygunluğun elde edildiği konumdur. Bu değer iteratif süreç boyunca değişmektedir.
- **Hız güncellemesi:** Hız, parçacığın hızını ve yönünü belirleyen bir vektördür. Hız güncelleme denklemi PSO'nun farklı varyasyonlarına göre değişiklik gösterebilmektedir (Del Valle vd., 2008). Orijinal PSO'nun hız güncelleme denklemi Denklem (1)'deki gibidir.
- **Konum güncellemesi:** Tüm parçacıklar, optimum uygunluk için en iyi konuma doğru hareket etmeye çalışır. PSO'daki her parçacık, küresel optimumu bulmak için konumlarını günceller. Konum güncelleme denklemi de PSO'nun türüne göre değişebilmektedir. Orijinal PSO'nun konum güncellemesi Denklem (2)'de verilmiştir.

$$V_i(t + 1) = V_i(t) + C_1 * r_1 * (Y_{best} - X_i(t)) + C_2 * r_2 * (K_{best} - X_i(t)) \quad (1)$$

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + V_i(t + 1) \quad (2)$$

Denklemlerde, V_i i. parçacığın hızını, X_i i. parçacığın konumunu, t mevcut iterasyon sayısını, Y_{best} parçacığın yerel en iyi konumunu, K_{best} sürünün mevcut iterasyona kadarki küresel en iyi konumunu, r_1 ve r_2 $[0,1]$ arasında her iterasyonda yeniden oluşturulan random değerleri ve C_1 ve C_2 öğrenme faktörlerini temsil etmektedir. Orijinal PSO'da C_1 ve C_2 iterasyon öncesinde sabit bir değer olarak oluşturulup iterasyon süresince değiştirilmezken PSO'nun bazı çeşitlerinde bu değer iterasyon boyunca güncellenmektedir. Yapılan çalışmalarda öğrenme faktörleri $C_1 = C_2 = 2$ 'nin hızlı bir çözüm için ideal olduğu bulunmuştur (Zhan & Zhang, 2009).

Parçacık sürü optimizasyonunun genel akış şeması kodu şöyledir:

```
Sürünün, rastgele konum ve hız değerleri ile başlatılması
İterasyon sayısınca döngü {
    Parçacık sayısınca döngü {
        Uygunluğun hesaplanması
        Uygunluk değeri, mevcut en iyi uygunluk değerinden ( $Y_{best}$ ) daha iyi ise
        {
             $Y_{best}$ 'in yeni  $Y_{best}$  ile güncellenmesi
        }
    }
    Tüm parçacıklardan en iyi uygunluk değerine sahip parçacığın  $K_{best}$  olarak seçilmesi
    Parçacık sayısınca döngü {
        Parçacık hızının Denklem (1)'e göre güncellenmesi
        Parçacık konumunun Denklem (2)'ye göre güncellenmesi
    }
}
```

DIgSILENT Entegrasyonu

DIgSILENT PowerFactory, Python tabanlı kod ile uzaktan şebeke modeline erişim ve model üzerinde değişiklik veya analizler yapıp her bir ekipmanın parametrelerini, analiz sonuçlarını alma kabiliyeti olan bir şebeke modelleme ve analiz programıdır. Bu bölümde PowerFactory programında oluşturulmuş şebeke modeline Python aracılığıyla erişim ve optimizasyon algoritmasının şebeke üzerindeki PV'lere uygulanması kod parçacıkları yardımıyla açıklanacaktır.

Öncelikle Şekil 2'de olduğu gibi kullanılan PowerFactory sürüm ve versiyonunu işletim sistemi yoluna eklenmeli ve powerfactory modülü içe aktarılmalıdır. Ardından uygulama ve kullanıcı objeleri alınıp proje aktive edilmelidir.

```
python_release = str(sys.version_info[0]) + "." + str(sys.version_info[1])
pf_path = "C:\Program Files\DIgSILENT\PowerFactory 2021 SP2"
os.environ["PATH"] = pf_path + ";" + os.environ["PATH"]
py_pf_path = pf_path + "\\Python\\" + python_release
sys.path.append(str(py_pf_path))
import powerfactory as pf
app = pf.GetApplication()
user = app.GetCurrentUser()
cont_prj = app.ActivateProject("PROJECT NAME")
```

Şekil 2. PowerFactory Projesinin Python Aracılığıyla Aktivasyonu

Proje aktive edildikten sonra projenin içinden gerekli olan obje ve ekipmanlar Şekil 3'teki gibi okunup kodun ilerleyen bölümlerinde değişiklik yapmak için tutulur. Bu çalışma doğrultusunda analizin yapılacağı saati ayarlamak için gerekli olan çalışma saati ayarlama objesi, yük akışı gerçekleştirmek için yük akışı objesi, PV'lerin reaktif güç üretim değerlerini değiştirmek için şebekedeki PV ekipmanlar ve yük akışı analizleri sonrası şebekedeki gerilim profilini elde etmek için şebekedeki baraları okumak yeterlidir.

```
study_time = app.GetStudyTimeObject() # Çalışma saati objesi
oLoadflow = app.GetFromStudyCase('ComLdf') # Yük akışı objesi
PVs = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmPvsys') # Şebekedeki PV'leri okuma
terms = app.GetCalcRelevantObjects('*.ElmTerm') # Şebekedeki baraları okuma
```

Şekil 3. Projeden Gerekli Objeleri / Ekipmanları Alma

Gerekli obje ve ekipmanları tutuktan sonra PV'lerden optimum reaktif güç desteğinin bulunması için çalıştırılacak olan PSO algoritmasının uygunluk fonksiyonu ve parçacıkların random olarak başlatılması kod parçasığı Şekil 4'te verilmiştir. Burada önemli olan nokta parçacıkların rastgele olarak oluşturulurken PV'lerin reaktif güç destek limitleri belirlenmelidir (Albarracín & Alonso, 2013) ve bu parçacıkları oluştururken bu limitler göz önüne alınmalıdır. Uygunluk fonksiyonu ise şebekedeki bara gerilimlerinin ideale (tüm bara gerilimlerinin 1 p.u. olması) yakın olmasıdır. Dolayısıyla uygunluk fonksiyonunda yük akışı sonrası terminallerin gerilimi okunarak 1 p.u.'e olan uzaklıkları toplanarak Denklem 3'teki gibi gerilim sapma endeksi hesaplanmıştır.

```
def fitness(position):
    # Şebekedeki PV'lerin reaktif güç üretimi değerlere hesaplanan konum değerlerinin atanması
    j = 0
    for PV in PVs:
        PV.qgini = position[j] * PV.sgn # p.u. değerlerden gerçek değerlere dönüşüm (sgn=PV'nin kurulu gücü)
        j += 1
    oLoadflow.Execute() # Yük akışı analizi
    # Gerilim sapma endeksinin (Voltage violation index) hesaplanması
    VVI = 0
    for terminal in terminals:
        VVI += abs(getattr(terminal, 'm:u') - 1) # m:u baranın gerilim değerini p.u. olarak okumaktadır
    return VVI
class Particle:
    def __init__(self, fitness, dim, minQ, maxQ):
        # Parçacığın konumunun random olarak başlatılması
        self.position = [random.uniform(minQ[i], maxQ[i]) for i in range(dim)]

        # Parçacığın hızının random olarak başlatılması
        self.velocity = [random.uniform(minQ[i]/10, maxQ[i]/10) for i in range(dim)]

        # Parçacığın uygunluk değerinin hesaplanması
        self.fitness = fitness(self.position)
```

Şekil 4. PSO Algoritması Uygunluk Fonksiyonu ve Parçacıkların Oluşturulması

$$VVI = \sum |V_{bara} - 1| \quad (3)$$

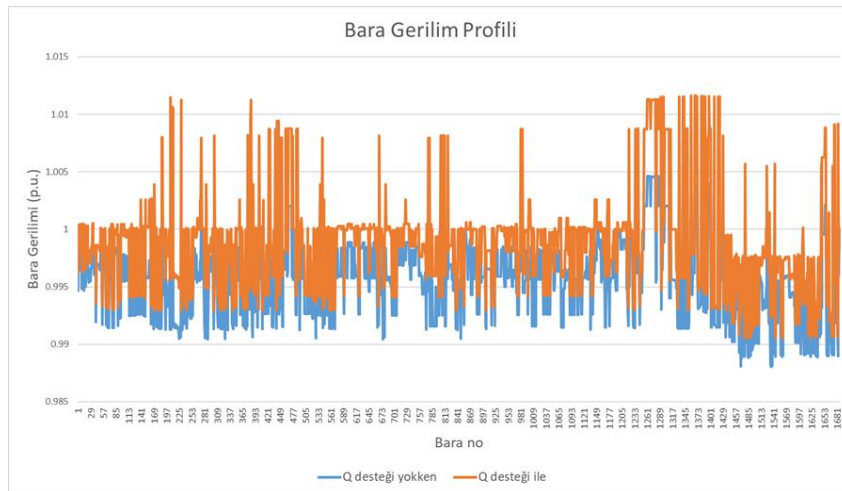
Uygunluk fonksiyonu belirlendikten sonra, şebeke gerilim profilini iyileştirmek için şebekedeki her bir PV'den alınması gereken reaktif güç desteğinin belirlenmesi için bir önceki bölümde genel akış şeması ve Şekil 5'te kodu paylaşılan PSO algoritması çalıştırılır.

```
def pso(fitness, max_iter, n, dim, minx, maxx):
    swarm = [Particle(fitness, dim, minx, maxx) for i in range(n)] # n parçacıklı sürünün random olarak oluşturulması
    # Sürüdeki en iyi parçacığın ve uygunluk değerinin bulunması
    for i in range(n):
        if swarm[i].fitness < best_swarm_fitnessVal:
            best_swarm_fitnessVal = swarm[i].fitness
            best_swarm_pos = copy.copy(swarm[i].position)
    Iter = 0
    while Iter < max_iter: # PSO algoritmasının ana döngüsü
        for i in range(n): # Her bir parçacık için hız ve konum değerlerinin güncellenmesi
            for k in range(dim): # dim: parçacığın boyutu (bu problem için PV sayısı)
                r1 = rnd.random()
                r2 = rnd.random()
                swarm[i].velocity[k] = swarm[i].velocity[k] +
                    (c1 * r1 * (swarm[i].best_part_pos[k] - swarm[i].position[k])) +
                    (c2 * r2 * (best_swarm_pos[k] - swarm[i].position[k]))
            for k in range(dim):
                swarm[i].position[k] += swarm[i].velocity[k]
            swarm[i].fitness = fitness(swarm[i].position)
            # Yerel en iyinin belirlenmesi
            if swarm[i].fitness < swarm[i].best_part_fitnessVal:
                swarm[i].best_part_fitnessVal = swarm[i].fitness
                swarm[i].best_part_pos = copy.copy(swarm[i].position)
            # Küresel en iyinin belirlenmesi
            if swarm[i].fitness < best_swarm_fitnessVal:
                best_swarm_fitnessVal = swarm[i].fitness
                best_swarm_pos = copy.copy(swarm[i].position)
        Iter += 1 # bir sonraki iterasyon
    return best_swarm_pos, best_swarm_fitnessVal
```

Şekil 5. PSO Algoritması

BULGULAR

PSO tabanlı şebeke gerilim profilini iyileştirmek için PV'lerden alınması gereken optimum reaktif güç algoritması, test edilen fiderin trafo merkezinden reaktif güç çektiği ve uzun hatlar üzerinde akan bu reaktif gücün fider uç noktalarında şebeke gerilim profilini azaltıcı etki yaptığı bir saatte test edilmiştir. Seçilen çalışma durumunda, şebekedeki PV'lerden reaktif güç desteği yokken ve her bir PV'den alınması gereken optimum reaktif güç desteği ile yük akışı analizleri gerçekleştirilmiş ve her iki durumda ortaya çıkan gerilim profili Şekil 6'daki gibidir. Şekilden de görüldüğü gibi fiderin ihtiyaç duyduğu reaktif gücün trafo merkezi yerine PV inverterlerden alınması her ne kadar PV santral PCC noktası ve yakınındaki merkezlerin gerilimlerinin 1 p.u.'dan biraz uzaklaşmasına yol açsa da şebekenin genel gerilim profilini 1 p.u.'ya yaklaştırmakta ve fider uç noktalarındaki gerilim düşümü sorununu çözmektedir.



Şekil 6. Optimizasyon Öncesi ve Sonrası Şebeke Gerilim Profili

TARTIŞMA VE SONUÇ

Türkiye’de henüz şebekeye orta gerilim seviyesinden bağlı küçük ölçekli dağıtık üretim santrallerinin reaktif güç zorunlulukları olmamasına rağmen bu durum yönetmeliklerle düzenlenir ise dağıtım sistemi operatörleri şebekenin gerilim profili istenilen seviyeden uzak olduğunda PV inverterlerden reaktif güç desteği olarak şebeke gerilim profilini iyileştirebilirler. İhtiyaç duyulan kompanzasyonun inverterler aracılığıyla yapılması, kompanzasyon yatırımlarının azalmasına yardımcı olacaktır. Ayrıca fiderin ihtiyaç duyduğu reaktif gücün en yakın PV santral tarafından çözülmesi fiderin trafo merkezinden çektiği/ trafo merkezine verdiği reaktif gücü azaltarak trafo merkezinin iletim sisteminden aldığı reaktif gücü azaltacaktır. Dolayısıyla, dağıtık üretim santrallerinden alınacak reaktif güç desteği, trafo merkezinin belirlenen reaktif güç sınırlarını aştığı zaman TEİAŞ’ın dağıtım sistemi operatörüne uyguladığı reaktif güç cezasından kurtulmasına yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Albarracin, R., & Alonso, M. (2013, May). Photovoltaic reactive power limits. In 2013 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering (pp. 13-18). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2013.6549630>
- Almeida, D., Pasupuleti, J., & Ekanayake, J. (2021). Comparison of Reactive Power Control Techniques for Solar PV Inverters to Mitigate Voltage Rise in Low-Voltage Grids. *Electronics*, 10(13), 1569. <https://doi.org/10.3390/electronics10131569>
- Cagnano, A., De Tuglie, E., Liserre, M., & Mastromauro, R. A. (2011). Online optimal reactive power control strategy of PV inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(10), 4549-4558. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2116757>
- Del Valle, Y., Venayagamoorthy, G. K., Mohagheghi, S., Hernandez, J. C., & Harley, R. G. (2008). Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 12(2), 171-195. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2007.896686>
- Kabiri, R., Holmes, D. G., McGrath, B. P., & Meegahapola, L. G. (2015). LV grid voltage regulation using transformer electronic tap changing, with PV inverter reactive power injection. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3(4), 1182-1192. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2015.2443839>
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995, November). Particle swarm optimization. In Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Türkiye Dağıtım Yönetmeliği Madde 13- (1)
- Türkiye Şebeke Yönetmeliği Madde 20-(2)
- Weckx, S., Gonzalez, C., & Driesen, J. (2014). Combined central and local active and reactive power control of PV inverters. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(3), 776-784. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2300934>
- Zhan, Z. H., Zhang, J., Li, Y., & Chung, H. S. H. (2009). Adaptive particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 39(6), 1362-1381. [10.1109/TSMCB.2009.2015956](https://doi.org/10.1109/TSMCB.2009.2015956).