

Dağıtım Şebekelerinde Dağıtılmış Üretimin Harmonik Etki Analizi

Harmonic Effect Analysis of Distributed Generation in Distribution Networks

Mehmet Kaya¹, Ayşen Basa Arsoy²

¹Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
mehmet.kaya@kocaeli.edu.tr

²Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
aba@kocaeli.edu.tr

Özet

Elektrik yüklerinin gelişmesi dağıtım şebekelerinde ek önlemler ve planlamalar gerektirmiştir. Modern güç sistemlerinde limitlerin üstünde herhangi bir güç kalitesi problemi ile karşılaşmak, yükler ve tüketiciler için risklidir. Çalışmada radyal yapıda ve dengesiz yüklü fiderin harmoniklerin olumsuz etkilerine karşın dağıtılmış üretim (DÜ) ve yük dengelemesiyle planlanmasına yönelik bir yaklaşım sunulmuştur. MATLAB Simulink ortamında mevcut test fideri ile yük dağılımı ve iletim hattı konfigürasyonu dengeli olarak revize edilmiş fider dağıtılmış üretim kaynağı (DÜK) katkısı ile simüle edilmiştir. Fiderin dengeli yüklenmesi ve farklı baralardan DÜK katkısının sağlanmasıyla harmonik distorsiyon (HD) yönünden iyileşme görülmüştür.

Anahtar kelimeler: dağıtılmış üretim, dağıtım şebekesi, harmonik analiz

Abstract

Development of electrical loads required additional precautions and plans in distribution networks. Experiencing any power quality problem above the limits is risky for loads and consumers in modern power systems. In the study, an approach is presented for the radial and unbalanced loaded feeder to be planned with distributed generation (DG) and load balancing against the negative effects of harmonics. Existing test feeder and the feeder that load distribution and transmission line configuration were revised in a balanced way was simulated with contribution of the distributed generation source (DGS) in MATLAB Simulink environment. An improvement in harmonic distortion (HD) was observed with the balanced loading of the feeder and the contribution of DGS from different busbars.

Keywords: distributed generation, distribution network, harmonic analysis

1. Giriş

Dağıtılmış üretim (DÜ) güç sistemlerine olumlu etkilemek için tasarlanırsa da şebeke entegrasyonu sonucu harmonik ve diğer güç kalitesi problemleri ile karşılaşmak olasıdır. Bu sebeple merkezi şebeke tepkileri dikkate alınarak DÜ planlanmalıdır. DÜ'nün büyüklüğü ve yerleşimi ile ilgili bir hata yüksek güç kaybı, gerilim profillerinde bozulma ve harmonik yayılmalara yol açacağından DÜ birimlerinden en uygunu seçilmelidir [1]. Bu amaçla baz sistem ile dağıtılmış üretim kaynağı (DÜK) içeren sistemin çeşitli indisler yönünden karşılaştırıldığı [2], farklı ölçütlerle DÜ entegrasyonu ve etkilerinin gözlemlendiği [3], koruma koordinasyon yaklaşımlarının incelendiği [4] ve farklı arıza durumları için sistem değerlendirmelerinin yapıldığı [5] çalışmalar mevcuttur.

Önerilen çalışmada dengesiz yüklü bir dağıtım fideri baz alınarak, entegre edilen DÜK'ün harmonik etkisi belirlendikten sonra sonuçların karşılaştırılması için fiderdeki yükler dengeli olarak da modellenmiştir. Her iki durum için harmonik içeren yük ve DÜK dikkate alınarak toplam harmonik distorsiyon (THD) değerleri analiz edilmiştir. Gelecekte ihtiyaç duyulacak şebeke entegrasyon tasarımları için harmonikler yönünden rehber olabilecek bir değerlendirme oluşturmak hedeflenmektedir. Çalışma, MATLAB Simulink ortamında Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) 13 Dügümlü Test Fideri üzerinde uygulanmıştır. IEEE Güç ve Enerji Topluluğu'na bağlı dağıtım şebekelerinin analizi üzerine çalışan Test Fider Çalışma Grubu araştırmacıların ortak bir platformda mevcut veriler ile çalışmasını sağlamak için yük modeli, havai ve yer altı hattı, iletken tipi gibi ortak parametreleri bulunan farklı test fiderleri tasarlamıştır [6].

İkinci bölümde DÜ tanımı, çalışma modları ve uygulanabilirliği; üçüncü bölümde güç sistemlerinde oluşan harmoniğin sebebi ve tespiti; dördüncü bölümde simülasyon, modellenen DÜK ve yük; beşinci bölümde sonuçlar üzerine durulmuştur.

2. Dağıtılmış Üretim (DÜ)

Elektrik enerji talebindeki artış, merkezi şebekeden uzak yükler için alternatif kaynak ihtiyacı doğurmuştur. DÜ merkezi şebeke dışında bir kaynaktan elektrik enerjisi sağlamaktır. Bu kaynak rüzgar, güneş gibi yenilenebilir enerji tabanlı veya fosil yakıtlı olabilir. DÜ'nün amacı aktif elektriksel güç kaynağı sağlamaktır ve bu yönden DÜ'nün reaktif güç sağlaması gerekmez [7]. Güç aralığı, elektrik güç sistemleri ile entegrasyon, konum ve sevk edilme durumlarına göre farklı kuruluş ve kişilere ait DÜ tanımlamaları mevcuttur [8].

Elektrik enerjisinin son kullanıcıya tedarikinde dağıtım, üretim ve iletim ile birlikte önemli bir aşamadır. DÜ, elektrik dağıtımına yeni bir boyut kazandırmıştır. Geleneksel güç sisteminin aksine kaynağın üretim aşamasından entegre olma zorunluluğunu kaldırır ve mikro şebekeler oluşmasına olanak tanır. DÜK bağlı bulunduğu dağıtım sistemi ile ada modunda veya şebekeye senkron halde çalışabilir [9]. Ada modunda şebekenin bir bölümü bağımsız olarak çalışır. Bu durum beklenmedik bir arıza sonucu oluşmuşsa istemsiz ada modudur. Ancak, bağımsız olarak çalışan şebeke bölümünde güç kalitesi limitlerinin aşılması koşuluyla önceden planlanmışsa istemli ada modu denir. Bu modda yükün enerjisiz kalması önlenerek, şebeke güvenilirliği konusunda avantaj sağlanır [10].

Dağıtım şebekelerinde güç kalitesi, yük tipinin çeşitlenmesiyle daha kritik bir rol almıştır. DÜ entegrasyonu için güç akış analizi, kısa devre analizi, harmonik ve fliker analizi, topraklama analizleri, dinamik analizler ve yalıtım koordinasyonu analizlerinin verileri değerlendirilmelidir [11]. Analizlerin bir kısmı entegrasyon öncesi, DÜ büyüklüğü ve yerleşimini belirlemek için gerektiği gibi entegrasyon sonrası performans tespiti için de gerekir. DÜ iletim şebekesinin az yüklenmesi, iletim ve dağıtım sistemi kayıplarının azalması, güvenilirlik ve güç kalitesinin artması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yönünden avantajlar sağlayabilir [5]. Ancak DÜ planlamasında entegrasyon öncesi analizlerin dikkate alınmaması beklenenin aksi sonuçlar doğurabilir.

3. Güç Sistemlerinde Harmonikler

Harmonik önemli güç kalitesi problemlerinden biridir ve sinüzoidal dalga formunun temel bileşen frekansının katı olan farklı frekanslardaki sinyaller ile bozulmasıdır. Güç sistemlerinde harmonikler akım veya gerilim harmoniği olarak sınıflandırılır. Harmoniğin sebebi kaynak, yük veya her ikisi olabilir ve harmonik bileşenlerin durumunu da belirler [12].

- Kaynak sinüzoidal dalga formundayken, yük doğrusal ise gerilim ve akımda harmonik bileşen bulunmaz.
- Kaynak sinüzoidal dalga formundayken, yük doğrusal değilse yük nedeniyle akımda harmonik bileşen bulunur.
- Kaynak sinüzoidal dalga formunda değilken, yük doğrusal ise hem gerilim hem akımda aynı harmonik bileşen bulunur.

- Kaynak sinüzoidal dalga formunda değilken, yük doğrusal değilse hem gerilim hem akımda aynı veya farklı harmonik bileşen bulunabilir.

Fourier analizi, periyodik bir sinyali farklı genlik ve frekanstaki bileşenlerine ayırmak için kullanılan matematiksel modellemedir. Periyodik olmayan sinyallerin de harmonik analizinin yapılabilmesi amacıyla Ayrık Fourier Dönüşüm (AFD) yöntemi geliştirilmiştir. Daha sonraları, AFD'nin faz faktörünün simetri ve periyodiklik özelliğini kullanarak analiz süresini önemli ölçüde kısaltan Hızlı Fourier Dönüşüm (HFD) yöntemi öne sürülmüştür [13]. Fourier analizi periyodik olan sinyalin fonksiyonunu kullanırken, AFD ve HFD yöntemleri periyodik olan veya olmayan sinyalin örneklenmiş verilerini kullanmaktadır. Harmonik analiz cihazları ile yapılan analizlerde sinyalin örneklenmiş verileri kullanılarak HFD yöntemi ile harmonik bileşenler hesaplanmaktadır. Farklı harmonik kestirim yöntemleri de mevcuttur ancak HFT yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır ve güç kalitesi problemlerinde genel olarak başarılıdır [14].

Harmonikler güç sistemi elemanlarının verimli çalışmaması, ekipman arızaları, kayıpların artması gibi ciddi sorunlara yol açar. IEEE 519-2014 ve Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) 61000 standartlarında şebekelerde oluşmasına izin verilemeyecek limitler, ölçüm yöntemleri, elektriksel ekipmanların kullanım sınırları belirlenmiştir [15]. Güç sistemlerinde harmonikleri azaltmak ve güç faktörünü iyileştirmek için filtreler kullanılır. Kapasitör, indüktör ve direnç gibi reaktif bileşenler içeren filtreler pasif harmonik filtre, harmonik bileşenlerin zıttı sinyali güç sistemine enjekte etme prensibine dayalı filtreler aktif harmonik filtre denir. Aktif ve pasif harmonik filtreler gerektiğinde bir arada da kullanılabilir. Bu tip filtreler hibrit harmonik filtreler olarak adlandırılır [16]. Hibrit harmonik filtreler, aktif ve pasif filtrenin avantajlı yönlerinin öne çıkarılmasını mümkün kılar.

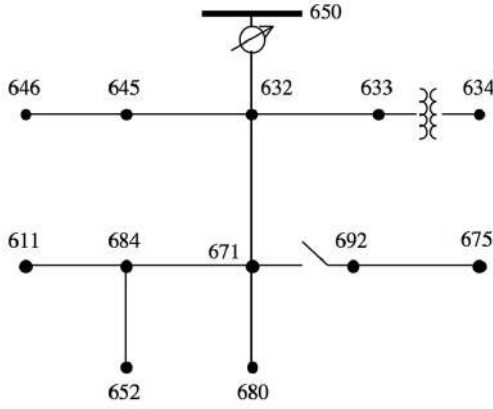
Harmonik içeren bir sinyalin tanımlanması için harmonik distorsiyon (HD), THD, toplam talep distorsiyonu (TTD) gibi kavramlar geliştirilmiştir [17]. Gerilim toplam harmonik distorsiyon yüzdesi ($THD_V(\%)$), akım toplam harmonik distorsiyon yüzdesi ($THD_I(\%)$), 1.derece (temel bileşen) harmoniğin etkin gerilim değeri (V_1), 1.derece harmoniğin etkin akım değeri (I_1), n'inci derece harmoniğin etkin gerilim değeri (V_n), n'inci derece harmoniğin etkin akım değeri (I_n) olmak üzere bu tanımlar sırasıyla (3.1) ve (3.2) numaralı denklemlerdeki gibidir.

$$THD_V(\%) = 100 \times \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (3.1)$$

$$THD_I(\%) = 100 \times \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (3.2)$$

4. Simülasyon

IEEE 13 Düğümlü Test Fideri dengesiz yüklü ve radyal yapıdadır, akım ve gerilim HD'leri ihmal edilebilir düzeydedir. Şekil 1'de bulunan test fideri 4.16 kV gerilim sağlayan 650 numaralı bara üzerinden beslenir ve 1 adet kesici, 1 adet transformatör, 1 adet gerilim regülatörü içerir. Fider nispeten kısa olma, 60 Hz frekansta çalışma, dağınık halde tek faz ve üç fazlı yükler bulundurma gibi özelliklere sahiptir [6]. MATLAB Simulink ortamında 632 numaralı bara salınım barası olarak dizayn edilmiştir [18] ve elde edilen bara gerilimleri ile gerilim açıları IEEE raporuyla doğrulanmaktadır [19]. Test fiderini dengeli bir sistem olarak revize etmek için iletim hatlarının tamamı üç fazlı olarak yeniden düzenlenmiş ve yük toplam güçleri fazlara eşit oranda bölünmüştür. Ardından her bir elemanın pozitif simetrik dizilimine uygun faz açıları belirlenmiş ve simülasyon sonuçları her faz için elemanın pozitif simetrik dizilimde elde edilmiştir.



Şekil 1. IEEE 13 Düğümlü Test Fideri [6].

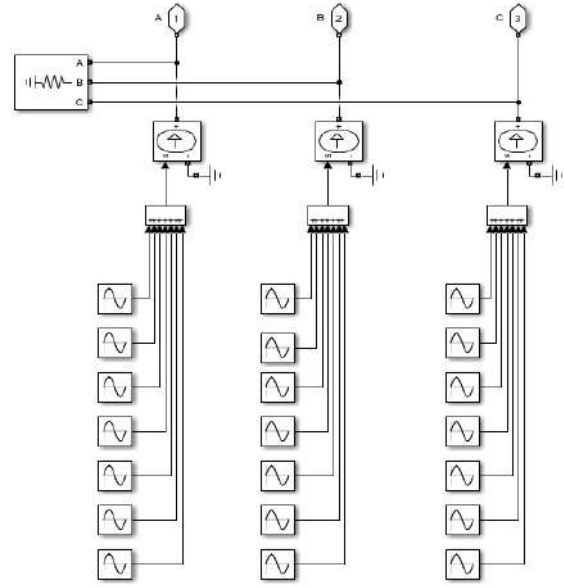
4.1. Dağıtılmış Üretim Kaynağı (DÜK)

DÜK olarak dengeli, üç fazlı kaynaklar kullanılmıştır ve şebekeye doğrudan saf sinüzoidal dalga formunda enerji sağlamaktadır. DÜK'ün de harici bir güç kalitesi problemi yaratmaması için ideal kaynaklar tercih edilmiştir ve DÜK'ün güç elektroniği arayüzü içermemesi dikkate alınmıştır. Yük noktası olarak seçilen 680 numaralı bara revize edilmemiş (dengesiz) test fiderinde akım çekmemektedir ve DÜK olmadığı durumda yük modelinin etkisi doğrudan gözlemlenebilmektedir. 1 MW (megawatt) gücündeki DÜK ilk aşamada tek başına sırasıyla 633, 671, 692 ve 675 numaralı baralara; ikinci aşamada DÜK gücü 500 kW (kilowatt)+500 kW olarak aynı baraların ikili kombinasyonlarına, son olarak ise dört baraya da 250 kW gücünde kaynak entegre edilmiştir. Fider etk eden toplam DÜK gücü değişirse de DÜK'leri aşamalı olarak yaymanın akım harmoniğine etkisi irdelenmiştir. Gerilim toplam harmonik distorsiyon değerleri büyük çoğunlukla IEEE 519-2014 standardının altında olduğu için çalışmada yer verilmemiştir [20].

4.2. Yük Modeli

Test fiderinde 611, 645, 646, 652 ve 684 numaralı baraların tek fazlı; diğer baraların üç fazlı yükü vardır. Fider üzerinde DÜK'lerin harmonik etkisini analiz etmek için bir yük modellenmiştir. Temel bileşeni 64 Amper (A) olan üç fazlı yük harmonik akım enjeksiyonu metodu ile oluşturulmuştur ve 300 kW gücündedir. Şekil 2'de bulunan yük modelinin yapısı DÜ'nün şebekedeki harmonik etki analizi ile birlikte güç akışı ve gerilim profili değişimini de gözlemleyebilmeye olanak sağlar.

Kontrollü akım kaynağı aracılığı ile oluşturulan harmonikli yük, oluşturulan tüm senaryolarda 680 numaralı barada sabittir.



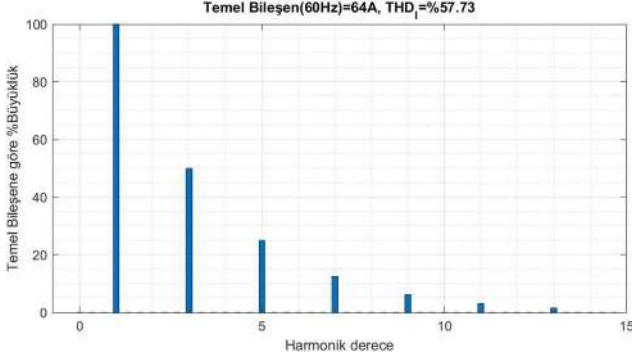
Şekil 2. 680 numaralı barada sabit yük modeli.

Harmonik akım enjeksiyonu metodu ile oluşturulan yükün 13.dereceye kadar bileşeni vardır ve 3, 5, 7, 9, 11 ve 13. derece bileşenlerinin akım değerleri Tablo 1'de verildiği gibi giderek (%50 oranında) azalmaktadır.

Tablo 1. Yükün çektiği akım değerleri.

Harmonik derecesi	Frekans (Hertz)	Akım değeri (Amper)
Temel bileşen	60 Hz	64 A
3.derece	180 Hz	32 A
5.derece	300 Hz	16 A
7.derece	420 Hz	8 A
9.derece	540 Hz	4 A
11.derece	660 Hz	2 A
13.derece	780 Hz	1 A

Yük sebebiyle oluşan ve henüz herhangi bir iyileştirme yapılmamış THD_i(%) değeri (3.1) numaralı denklemden %57,73 bulunur ve aynı değer Şekil 3'te bulunan simülasyon sonucu ile doğrulanır. 680 numaralı baranın A, B ve C fazlarında yük sebebiyle oluşan THD_i(%) seviyeleri eşittir.



Şekil 3. 680 numaralı bara, A fazı harmonik dereceleri.

4.3. Dengesiz ve Dengeli Yüklü Fiderin Harmonik Analizi

Dengesiz ve dengeli yük durumlarındaki tüm senaryolar için $THD_I(\%)$ seviyeleri tespit edilmiştir. Dengesiz sistemde baraların fazlarında görülen $THD_I(\%)$ değerleri farklı olduğundan baraların iletimdeki faz sayısına göre aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır.

DÜK toplam gücü sabit kalmak koşulu ile sadece yükün bulunduğu baz senaryo ile dört baraya (633, 671, 692 ve 675) da 250 kW gücünde DÜK entegre edilmesi halinde sonuçlar Tablo 2 ve Tablo 3'te doğrudan karşılaştırılmıştır.

Tablo 2. Dengesiz yüklü fiderin DÜK yok ve 4 DÜK senaryolarının $THD_I(\%)$ seviyeleri.

Bara No	DÜK yok $THD_I(\%)$			4*250 kW DÜK $THD_I(\%)$		
	A fazı	B fazı	C fazı	A fazı	B fazı	C fazı
611	-	-	10.77	-	-	0
632	4.53	7.25	5.35	0	0	0
633	0	0	0	0	0	0
634	0	0	0	0	0	0
645	-	0	0	-	0	0
646	-	0	0	-	0	0
652	0.46	-	-	0	-	-
671	5.25	13.24	7.12	0	0	0
675	5.63	30.13	11.18	0.64	1.46	1.03
680	30.11	29.37	30.25	30.05	30.09	30.06
684	0.45	-	10.77	0	-	0
692	5.63	30.13	11.19	3.11	4.19	2.09
Ortalama	5.78	12.24	7.88	3.76	3.97	3.02

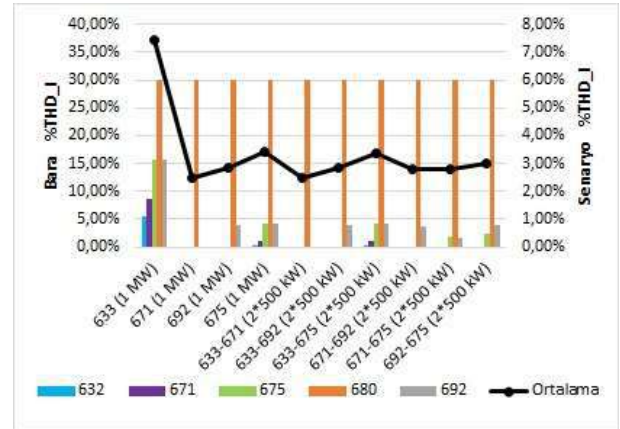
Dengesiz yüklü fiderde DÜK bulunmayan senaryo için A, B ve C fazlarının ortalama $THD_I(\%)$ değeri sırasıyla %5.78, %12.24 ve %7.88; dört baraya da 250 kW gücünde DÜK entegre edildiğinde fazların ortalama $THD_I(\%)$ değeri sırasıyla %3.76, %3.97 ve %3.02'dir.

Tablo 3. Dengeli yüklü fiderin DÜK yok ve 4*250 kW durumlarının $THD_I(\%)$ sonuçları.

Bara No	DÜK yok $THD_I(\%)$	4*250 kW DÜK $THD_I(\%)$
	A-B-C fazı	A-B-C fazı
611	11.42	0
632	6.55	0
633	0	0
634	0	0
645	0	0
646	0	0
652	1	0
671	8.06	0
675	14.42	1.04
680	30.44	30.06
684	6.07	0
692	14.42	3.98

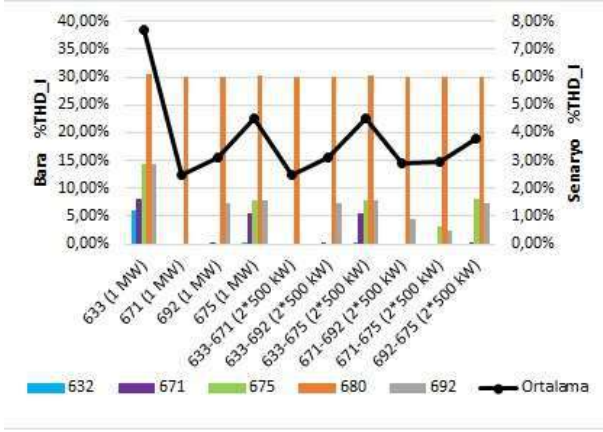
Dengeli yüklü fiderde DÜK bulunmayan senaryo için ortalama $THD_I(\%)$ seviyesi %7.7, dört baraya da 250 kW gücünde DÜK entegre edildiğinde ortalama $THD_I(\%)$ seviyesi %2.92'dir.

633, 671, 692 ve 675 numaralı baralara tek DÜK; baraların ikili kombinasyonlarına 500 kW+500 kW gücünde 2 DÜK entegre edilme senaryolarına ait $THD_I(\%)$ seviyeleri ise Şekil 4 ve Şekil 5'teki gibidir. Şekillerde her bir senaryo için belirtilen baralarda görülen $THD_I(\%)$ sonuçları birincil ekseninde (Bara % THD_I), senaryo performansını temsil eden $THD_I(\%)$ seviyelerinin ortalaması ikincil ekseninde (Senaryo % THD_I) temsil edilmektedir.



Şekil 4. Dengesiz yüklü fiderin tek DÜK ve 2 DÜK senaryolarının performansı.

Dengesiz yüklü fiderde tek DÜK senaryolarının performansı %2.51 ile %7.42, 2 DÜK senaryolarının performansı %2.51 ile %3.7 arasındadır.



Şekil 5. Dengeli yüklü fiderin tek DÜK ve 2 DÜK senaryolarının performansı.

Dengeli yüklü fiderde tek DÜK senaryolarının performansı %2.51 ile %7.7, 2 DÜK senaryolarının performansı %2.51 ile %4.5 arasındadır.

IEEE 13 Dügümlü Test Fideri ve fiderin revize dengeli yüklenmiş hali üzerinde uygulanan senaryolar sonucu oluşan THD₁(%) seviyelerinin değerlendirilmesiyle elde edilenler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- DÜK entegrasyonu öncesi sadece harmoniğe sebep olan yük varken dengeli yüklü ve dengesiz yüklü fiderde THD₁(%) seviyesi maksimumdur.
- 4 DÜK senaryosunda harmonik iyileşme gözlemlenmiştir ancak minimum THD₁(%) seviyesi için 671 numaralı baranın gücü artırılmalıdır.
- Dengeli yük durumunda 633 numaralı baraya 1 MW gücünde DÜK entegre edilince THD₁(%) seviyesinde değişim gözlenmez, dengesiz yük durumunda ise sadece 632 numaralı barada iyileşme görülür. Diğer tüm senaryolarda da 633 numaralı baranın harmonik iyileştirme yönünden etkisi görülmez veya sadece 632 numaralı barayı etkiler.
- Minimum THD₁(%) seviyesi 671 numaralı barada 1 MW gücünde DÜK, 633 ve 671 numaralı baralarda 500 kW+500 kW gücünde DÜK'ler bulunurken tespit edilmiştir. Bu senaryolardan 671 numaralı baranın %50 kapasite ile çalışsa dahi optimum harmonik iyileştirme yönünden yeterli olduğu çıkarımı yapılabilir.
- Tüm senaryolarda 633, 634, 645 ve 646 numaralı baralara ait fazlarda HD görülmemiştir.

5. Sonuçlar

Dağıtım şebekelerinin yük dağılımı ile birlikte DÜ büyüklüğü ve yerleşimi; güç akışını, gerilim profilini ve HD'yi doğrudan etkilediğinden güç kalitesi problemi yaşamamak için kritiktir. DÜ, dağıtım şebekesinde harmonik iyileştirme yapabilir ancak optimum sonuç

için şebeke yük dağılımı, DÜK gücü ve DÜK entegre edilecek bara seçimi göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışmada farklı baralardan DÜK katkısı ve yük dengelemek harmonik iyileştirme sağlasa da optimum sonuç, DÜK'ün salınım barasına uzak, yük barasına yakın seçilmesiyle saptanmıştır. Gelecekte farklı bir bara yük noktası olarak seçilerek veya farklı bir dağıtım şebekesi üzerinde benzer uygulamalar yapılabilir.

6. Kaynaklar

- [1] Kadir, A.F.A, Mohamed, A., Shareef H. ve Wanık M.Z.C, "Optimal placement and sizing of distributed generations in distribution systems for minimizing losses and THD_v using evolutionary programming", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 21, 2269–2282, 2013.
- [2] Ekinçi, B. ve Basa Arsoy, A., "Power Quality Evaluation of Distributed Generation Systems", *Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 1, 12-18, 2021.
- [3] Gökçek, T. ve Ateş, Y., "Dağıtık Güç Üretimini Şebekeye Entegrasyonu ve Olası Etkilerinin İncelenmesi", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 15, 216-228, 2019.
- [4] İlik, S.C ve Basa Arsoy, A., "Effects of Distributed Generation on Overcurrent Relay Coordination and an Adaptive Protection Scheme", *International Conference on Sustainable Energy Engineering*, 2017, 1-10.
- [5] Sezgin, M.S ve Basa Arsoy, A., "Dengesiz Güç Sistemlerinde Dağıtılmış Üretim", *Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 2012, 60-64.
- [6] Kersting, W.H, "Radial distribution test feeders", *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Conference Proceedings*, 2001, 908-912.
- [7] Ackermann, T., Andersson, G. ve Söder L., "Distributed generation: a definition", *Electric Power Systems Research*, 57, 195-204, 2001.
- [8] Gonzalez-Longatt, F. ve Fortoul, C., "Review of the distributed generation concept: Attempt of unification", *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1, 281-284, 2005.
- [9] Karaarslan, K., "Dağıtılmış üretim kaynaklarının elektrik dağıtım sistemlerine etkileri", Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [10] Cansever, M. ve Basa Arsoy, A., "Dağıtılmış Üretim ile İstemli Ada Çalışması", *Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 2014, 29-33.
- [11] Çetinkaya, H.B ve Dumlu F., "Dağıtık Üretim Tesislerinin Şebeke Entegrasyonunda Yaşanabilecek Olası Problemler ve Entegrasyon Analizleri", *Akıllı Şebekeler ve Türkiye Elektrik Şebekesinin Geleceği Sempozyumu*, 2013.
- [12] Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A. ve Arıkan, O. *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2003.
- [13] Şenyurt, Ö., Elektrik Tesislerinde Hızlı Fourier Dönüşümü ile Harmonik Analizinin Yapılması, Gazi

- Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [14] Kulu, M. ve Vatansever, F. “Güç Kalitesi Bozulmalarında Harmonik Kestirim Yöntemlerinin Performans Analizi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 25, 849–860, 2020.
- [15] Eroğlu, H., Cuce E., Cuce, P.M., Gul F. ve Iskenderoğlu A., “Harmonic problems in renewable and sustainable energy systems: A comprehensive review,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 48, 1-20, 2021.
- [16] Krarti, M., *Utility Rate Structures and Grid Integration*, 2018.
- [17] Sucu, M., *Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2003.
- [18] Sybille, G., "IEEE 13 Node Test Feeder", <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/ieee-13-node-test-feeder.html>. [Erişim: 27 Ağustos 2022].
- [19] Jangra, J. ve Vadhera, S., "Load Flow Analysis for Three Phase Unbalanced Distribution Feeders Using Matlab", *International Conference for Convergence of Technology*, 2017, 862-866.
- [20] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", 2014.