

Bir Fazlı Tam Dalga Kontrollü Doğrultucu Giriş Akımı Harmonik Analizi

Süleyman Adak^{1*+}

¹Elektrik ve Enerji Bölümü/Meslek Yüksekokulu, Mardin Artuklu Üniversitesi, Mardin, Türkiye

*Corresponding Author:suleymanadak@yahoo.com

+Speaker:suleymanadak@yahoo.com

Presentation/Paper Type: Oral / Full Paper

Özet-Güç sisteminde akım ve gerilimin dalga formunun sinüsoidal formda olması gerekir. Fakat bu her zaman mümkün olmaz. Non-sinüsoidal gerilim veya elemanlar güç sisteminde harmoniklerin oluşmasına sebep olur. Harmonikler güç sisteminde, ek ısı kayıplara, rezonans olaylarına, ölçme hatalarına vb. problemlere sebep olurlar. Aynı zamanda enerji kalitesini olumsuz yönde etkilerler. Toplam harmonik distorsiyonu (THD) bize güç sistemindeki harmonik kirlilik hakkında bilgi verir. THD değerinin standartlarca verilen limit değerleri aşmaması gerekir. Bu makalede bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı harmonik analizi yapılmıştır. Devrede dört adet tiristör, bir adet diyot ,R-L yükü ve iki adet darbe generetörü kullanılmıştır. Giriş akımına ait THD simulink devreden % 33.24 olarak ölçülmüştür. Güç devresi Matlab/Simulink yazılım programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analitik sonuç ile simulink sonucunun benzer olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- Tek faz tam dalga kontrollü doğrultucu, toplam harmonik distorsiyonu, güç faktörü, güç sisteminin simülasyonu, harmonik analizi

Harmonic Analysis Of Input Current of Single- Phase Full Wave Controlled Rectifier

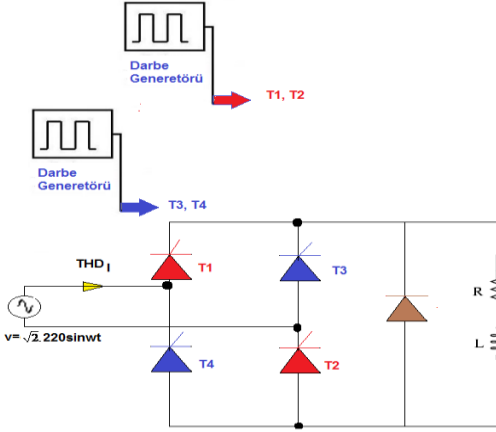
Abstract-The waveform of the current and voltage in the power system must be in sinusoidal form. But this is not always possible. Non-sinusoidal voltage or elements cause harmonics in the power system. Harmonics cause such as additional heat losses, resonant events, measurement errors, etc. In power system. At the same time, they negatively affect the quality of energy. Total harmonic distortion (THD) gives us information about harmonics pollution in the power system. The THD value should not exceed the limit values given by the standards. In this paper, input current of single phase fullwave controlled rectifier harmonic analysis is performed. Four thyristors, one diode, inductive R-L load and two pulse generators were used in the circuit. The THD of the input current was measured as 33.24 % from the simulink circuit. Power circuit were performed using the Matlab/Simulink software program. Simulink result was observed similar with analytical results

Keywords –Single phase full wave controlled rectifier, total harmonic distortion, power factor, simulation of power system, harmonic analysis

I. GİRİŞ

Doğrusal olmayan yükler artışı gün begün hızlı bir şekilde armaktadır. Lineer olmayan bu güç elektroniği tabanlı cihazlar ufak güçlü olsalar bile elektrik tesislerinde sinüsoidal olan akım ve gerilimin dalga formunu bozarlar. Toplam harmonik distorsiyonu (THD) akım ve gerilim dalgasının sinüsoidaldan uzaklaşması konusunda bize bir fikir verir. AC/DC doğrultucular DC/AC inverter ile DC ve AC kısıyıcılar güç sisteminde birer harmonik kaynağıdır. Güç sistemlerine bağlanan çok sayıda non-lineer konverter göz önüne alındığında THD yükselmesi kaçınılmazdır. THD yükselmesinin güç sistemlerinde negatif bir etkisi vardır. Doğrusal olmayan yükler elektrik şebekelerinde ve bu şebekelere bağlı güç sistemlerinde harmonik kirliliğe sebep olmakta ve enerji kalitesini düşürmektedir. Güç sistemindeki harmonik bileşenlerin seviyesinin hesaplanması ve harmonik

bileşenleri süzecek filter devrelerin tesis edilmesi gerekir. Yüksek değerlerdeki THD elektrik şebekesi ve bu şebekelere bağlı güç sistemlerini etkilemektedir [1], [2]. Doğrultucularda diyot kullanılsa kontrolsüz doğrultucu, tiristör kullanıldığında kontrollü doğrultucu elde edilir [3].



Şekil 1 Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu

Şekil 1’de kontrollü doğrultucuda, $t=0$ anında kaynak gerilimi pozitif iken, birinci tristör grubunda T1 ileri yönde kutuplanırken T4 tıkama yönünde kutuplanır. T2 iletim yönünde kutuplanırken T3 tıkama yönünde kutuplanır. T1 iletim yönünde kutuplanır ançak tetikleme acısı α anına kadar iletime geçmez. $\omega t = \alpha$ olunca, yük akımı T1-T2 Tristör grubu üzerinden devresini tamamlar. Kaynak geriliminin negatif yarım periyodunda ise tristörlerin kutuplama durumu pozitif durumun aksi yöndedir. Kaynak geriliminin negatif olmasıyla T1- T2 tıkama yönünde kutuplanırken T3- T4 iletim yönünde kutuplanır. Ançak tetikleme acısı $\alpha = \pi + \alpha$ değerini alıncaya kadar T1-T2 tristörleri hala iletimde, T3- T4 tristörleri kesim halindedirler. Bu nedenle yük üzerinden negatif bir akım akar. Konvertörlerde harmonik bileşenler aşağıdaki formülde bulunur.

$$h = kp \pm 1 \quad (1)$$

Burada k, tam sayıyı p, doğrultucudaki darbe sayısını h, harmonik mertebesini göstermektedir. Buna göre 5., 7., 11., 13.mertebeli harmonikler etkin olur. Görüldüğü gibi üç fazlı konverterlerde çift sayılı harmonikler ile 3 ve 3 çün katı harmonikler söz konusu değildir. Yalnız bir fazlı konverterlerde 3ve üçün katı harmonikler bulunur. Dönüştürücülerde darbe sayısı ne kadar büyük olursa, harmonik mertebeleri de o kadar küçülür. THD değeri azaltılmış olur. Bu bağlamda darbe sayısının 6’ dan 12’ye veya 12’den 36 ‘ya çıkartılması ile harmonik bileşenleri belirli oranlarda elimine ederiz. Harmonik bileşenlerin akım ve gerilim bileşenlerinin genlikleri mertebesi ile ters orantılıdır, mertebe büyüdükçe harmonik genliği azalır.

II. MALZEMELER VE YÖNTEM

Statik konvertörler (AC/DC, DC/AC ,AC ve DC ile AC kırıyıcılar) gibi güç elektroniği tabanlı cihazlar birer harmonik kaynağıdır. Bu konverterlerin anahtarlamasında kullanılan İzole Kapılı Bipolar Transistör (IGBT), Tiristör (SCR), Bipolar Jonksiyon Transistör (BJT), Metal Oksit Alan Etkili Transistör (MOSFET) gibi güç elektroniği devre elemanları non-lineer karakteristiktir. Bu anahtarlama elemanları güç sisteminde akım ve gerilimin sinus olan dalga formunu bozarlar. Bunun sonucunda güç sisteminde non-lineer büyüklükler oluşur. Sistemin THD değeri yükselir [4]-[6]. Daha kaliteli bir enerji için standartlarca verilen THD limit değerlerinin aşılması gerekir.

Non-lineer yüklerin enerji sisteminde harmonikli akımlar dolaştırmaları sonucunda ek kayıp oluşur. Harmonikleri belirlemede önemli büyüklükler olarak kabul edilen Toplam harmonik distorsiyonu (THD) parametresi enerji kalitesi hakkında bizlere fikir vermektedirler.

Elektrik şebekelerinde harmonik bileşenlerin negatif etkileri gün be gün artmaktadır. Harmonik bileşenlerin güç sistemine yaptığı etkilerin incelenmesi, yorumlanması ve bu etkilerin giderilmesi için harmonik büyüklüklerin tanımlanması ve seviyelerinin belirlenmesi gerekir [5]. Non-lineer dalga formuna ait harmonik bileşenler Fourier serisi yardımı ile bulunur. Non-lineer bir dalgada akım ve gerilimin ani değerleri,

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \cdot \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (2)$$

gerilim için,

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_{mn} \sin(n\omega t + \delta_n) \quad (3)$$

formülü ile bulunur. Burada I_0 ile V_0 akım ve gerilime ilişkin doğru akım ve gerilim bileşenleri, n değeri harmonik mertebesini göstermektedir. Akım ve gerilimin etkin değerleri sırayla,

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (4)$$

gerilim için,

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (5)$$

Formülleri ile bulunur. Güç sistemlerinde harmonikler konusunda bize bir ölçüt veren toplam harmonik distorsiyonun azaltılması gerekmektedir. Bu büyüklükler non-lineer bir dalganın sinüsten uzaklaşmasının bir ölçüsüdür [7], [8].

Non-linear dalga formunun sinus dalgasından uzaklaşmasının en önemli ölçütü THD parametresidir. Bozulmanın miktarını belirtir. Akım için toplam harmonikdistorsiyonu,

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada I_1 temel bileşeni, I_n harmonikli bileşenleri göstermektedir. Bir fonksiyon, $f(t)$, ancak $f(t) = f(t+T)$ koşulu sağlamıyorsa “periyodiktir” denir. Böyle bir periyodik fonksiyon da, bir trigonometrik dizinin elemanları ile ifade edilebilir [9]-[11]. Non-lineer dalga formuna ait Fourier serisi,

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin nt + B_n \cos nt) \quad (7)$$

İfadesi ile bulunur. (7) denklemini sadeleştirirsek,

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(nt + \phi_n) \quad (8)$$

Formula bulunur. bulunur. Fourier serisinde ortalama değer bileşeni,

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^T f(t) dt \quad (9)$$

Formula ile bulunur. Fourier serisinin A_n katsayısı,

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin nt \cdot dt \quad (10)$$

fadesi ile hesaplanır. Diğer B_n Fourier katsayısı,

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos nt \cdot dt \quad (11)$$

formülü ile bulunur. Fourier serisinin efektif değeri,

$$C_n = \frac{(A_n + B_n)^{1/2}}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

olarak ifade edilir. Giriş akımı faz acısı,

$$\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{A_n}{B_n} \right) \quad (13)$$

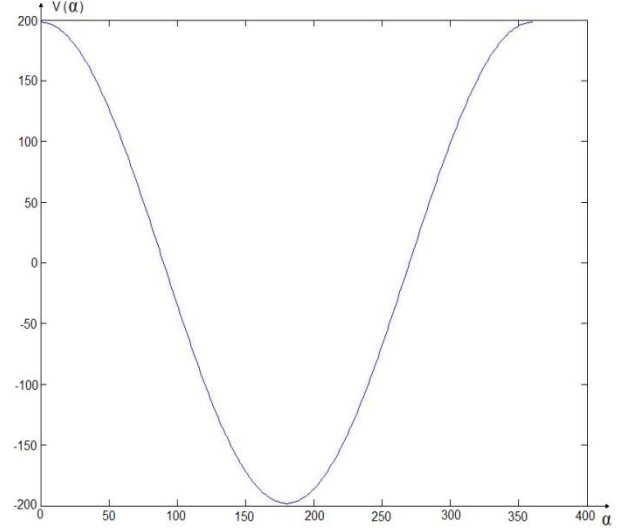
formülü ile hesaplanır. Güç sistemini kaynak empedansı, bağlı yük empedanslarının %5'i kadardır. Bundan dolayı harmonik bileşen akımlarının % 95'e kadarı kaynağa doğru akar [10]-[12].

III. SONUÇLAR

Harmonikler bileşenler sinüzoidal dalganın güç elektroniği devre elemanlarının (tristör, tiryak, IGBT, MOSFET, BJT ve GOTO) anahtarlanması kısılanması sonucunda oluşurlar. Güç elektroniği cihazlarının ürettiği harmonik bileşenleri azaltmak için kullanılan dönüştürücülerde darbe sayısını 12, 36 gibi büyük değerlere çıkarmalıyız. Non-linear dalga formu sinus eğrisine benzediği oranda THD değeri azalır [13],[14]. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucuda (9) denkleminde çıkış geriliminin ortalama değeri,

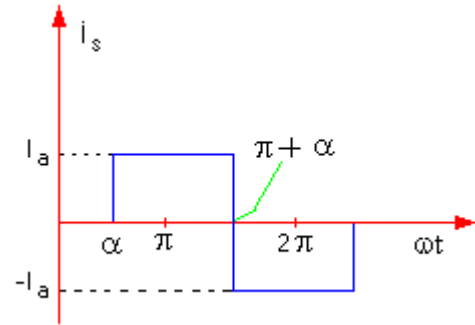
$$V_0 = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha \quad (14)$$

olarak bulunur. Burada V_m kaynak geriliminin tepe değerini, α tetikleme acısını göstermektedir. Çıkış geriliminin tetikleme acısına bağlı değişimi Şekil 5'te verildiği gibidir.



Şekil 5 Farklı tetikleme acılarında çıkış geriliminin ortalama değeri

Güç elektroniği tabanlı cihazların ürettiği harmonik bileşenler güç sisteminde ek ısı kayıplarına neden olmaktadır. Bu ek ısı kaybı enerji maliyetini artırmaktadır. Ayrıca sistem üzerindeki temel harmonikten başka diğer harmonik bileşenler ek gerilim düşümleri oluşturmaktadır [15]-[17]. Kontrollü doğrultucu giriş akımı dalga formu Şekil 4'te verildiği gibidir.



Şekil 4 Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı dalga formu

(10) nolu denkleminde Fourier bileşeni,

$$A_n = -\frac{4 \cdot I_a}{n \cdot \pi} \sin n\alpha \quad (15)$$

olarak bulunur. (11) nolu denkleminde diğer Fourier bileşeni,

$$B_n = \frac{4 \cdot I_a}{n \cdot \pi} \cos n\alpha \quad (16)$$

olarak bulunur. (12) nolu denkleminde giriş akımı efektif değeri,

$$I_{sn} = \frac{(A_n + B_n)^{1/2}}{\sqrt{2}} = \frac{4 \cdot I_a}{\sqrt{2} \cdot n \cdot \pi} = \frac{2\sqrt{2} \cdot I_a}{n \cdot \pi} \quad (17)$$

(13) denkleminde doğrultucu giriş akımı faz açısı,

$$\phi_n = \tan^{-1} \left(\frac{A_n}{B_n} \right) = -n\alpha \quad (18)$$

olarak bulunur. (8) denkleminde bir fazlı kontrollü doğrultucu giriş akımı Fourier serisi,

$$i_s(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4.I_a}{n\pi} \sin n(\omega t - \alpha) \quad (19)$$

şeklinde bulunur. Şekil 4'teki kontrollü doğrultucu giriş akımı efektif değeri (4) denkleminde,

$$I_s = I_a \quad (20)$$

olarak bulunur. Kontrollü doğrultucu giriş akımının temel bileşeni (19) denkleminde n=1 konarak bulunur,

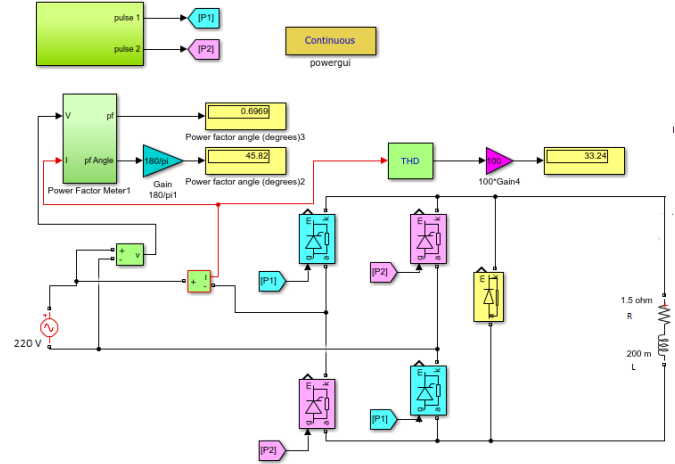
$$I_{s1} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_a}{\pi} \quad (21)$$

(6) denkleminde bir fazlı tam dalga giriş akımı THD_I değeri,

$$THD_I = \left[\left(\frac{I_s}{I_{s1}} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} = \%33,32 \quad (22)$$

olarak bulunur. Analitik olarak kontrollü doğrultucu giriş akımı THD_I değeri ile Şekil 8'de Simulink program ile bulunan THD_I değerinin örtüştüğü gözlenmiştir [16]- [18].

Harmonik bileşenler sinüs dalgasının sıfırdan geçişine göre tetikleme yapan tristör, tiryak ve goto gibi güç elektroniği devre elemanlarında tetikleme acılarında kaymalar yanlış sinyaller vermesine sebep olurlar. Gene bu bağlamda güç sistemlerinde rezonans olaylarına, sistem elemanlarında ek gerilim düşümü ile ısınmalara sebep olurlar. Güç sistemindeki devre elemanlarının normal ömürlerinin kısalmasına neden olmaktadır. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı THD değeri Şekil 8'deki Simulink benzetimi ile bulundu.



Şekil 8 Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu simulink devresi

Şekil 8' de THDI değeri simulik sonucu %33.24 olarak bulundu. Bu değer analitik (22) denkleminde bulunana %33.32 hemen hemen aynıdır. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun THD değerini azaltmak ve güç faktörünü arttırmak gerekir. Lineer olmayan akım ve gerilimlerin devre elemanları üzerindeki etkilerinin analizi, güç elektroniği elemanlarının yaygın kullanımı ile yoğunlaşmıştır.

Yükün endüktas değeri çok büyük olduğu durumlarda kontrollü doğrultucu çıkışını bir akım kaynağı olarak mpdelleme mümkündür. Bu koşulda şebekeden çekilen akımda doğru akım bileşeni bulunmaz, yalnız tetikleme açısından dolayı harmoniz bileşenler bulunur.

Şebeke geriliminde yüksek harmoniklerin bulunması, güç sistemleri üzerinde olumsuz bir şekilde tesir eder. Yüksek harmoniklerin bulunduğu şebekede toprak kısa devresi akımları da daha büyük efektif değerlere yükselirler. Yüksek harmoniklerin en şiddetli etkilediği devre elemanlarından kondansatörler üzerinde gözükür [19].

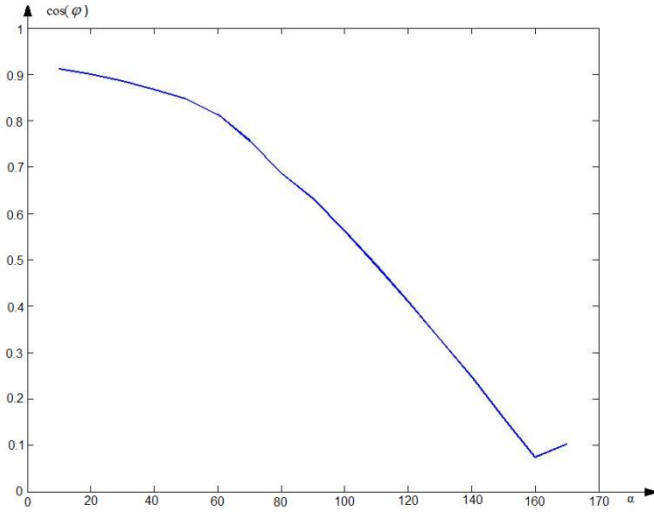
Elektrik şebekelerindeki harmonik kirlilik şu an için ölümcül problemler oluşturmamaktadır. Non-linear yük ve devre elemanlarını günbegün artması ile yakın bir gelecekte karasız ve düşük kaliteli şebekelerin oluşmasına sebep olacaktır.

Tablo 1 Tetikleme acısına bağlı güç katsayısının değişimi

Tetikleme acısı α (derece)	Güç katsayısı $\cos(\varphi)$
10	0.9114
20	0.9003
30	0.8852
40	0.8673
50	0.8466
60	0.8133
70	0.7566
80	0.6969
90	0.6316
100	0.5615
110	0.4872
120	0.4096
130	0.3290

140	0.2464
150	0.1585
160	0.0746
170	0.1035

Enerji sistemlerindeki harmonik bileşenlerin yapılmalıdır. Harmonik bileşenler ya analitik yöntemle ya da güç kalite analizörleri kullanılarak tespit edilmelidir. Harmonik filtreler kullanılarak harmonik bileşenler elimine edilmelidir [17]-[19]. Tablo 1'den yararlanarak tetikleme açısı ile güç katsayısı arasındaki değişim Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9 Güç katsayısının tetikleme açısına bağlı değişimi

(22) denkleminde bulunan giriş akımı toplam harmonik distorsiyonu değeri, Şekil 8'deki Matlab /Simulink ile elde edilen sonuçla aynıdır. Harmonik bileşenler özellikle güç elektroniği uygulamalarında kullanılan tristörler tarafından sinusoidal dalganın kıyılması sonucu üretilmektedir. Güç elektroniği sistemlerinin ürettiği harmonikleri azaltmak için doğrultma gibi uygulamalarda devrenin darbe sayısını büyük değerlere çıkarmak gerekir. Güç sisteminde kararlı çalışma için THD değerinin standartlarca ifade edilen limitlere düşürülmesi gerekir.

Güç sisteminde THD değerinin yükselmesi durumunda güç sistemine bağlı tüm devre elemanlarının hatalı çalışmasına veya zarar görerek devre dışı kalmasına neden olur. Güç sisteminde harmonik bileşenleri süzecek filtre devrelerine mutlak surette ihtiyaç vardır.

IV TARTIŞMA

Elektrik tesisinde bu dönüştürücülerin kullanımı günbe gün artmaktadır. Mobil telefonların şarjında, AC makinesinin kontrolünde, elektroliz işlemlerinde ve akü şarjında bu dönüştürücüler büyük bir yoğunlukla kullanılmaktadırlar. Tek fazlı tam dalga kontrollü doğrultucuda çıkış R-L yükünde L'nin değeri çok büyük seçildiğinde çıkış bir akım kaynağı olarak değerlendirilebilir. Harmonikli akım kaynağına akuple olduğu empedans değeri sistem kaynak empedansı ile paralel bağlı diğer yüklerin empedansların eşdeğeridir. Güç sisteminin kaynak empedansı diğer paralel bağlı yük empedanslarının gerinin %5'i kadardır. Bundan dolayı harmonik akımlarının % 95'şi kadarı güç kaynağına

doğru akarlar. Simulink eşdeğer ile bulunan harmonik bileşenlerin genlik ve faz açısı değerleri Tablo 2'de verildiği gibidir.

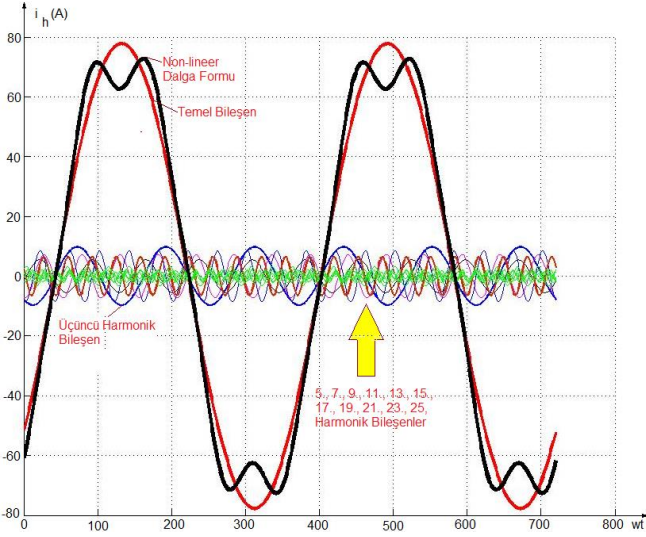
Tablo 2 Doğrultucu giriş akımına ilişkin Fourier bileşenleri

Harmonik Bileşenler	Harmonik Bileşen Genlikleri (A)	Harmonik Bileşen Faz Açıları (Derece)
1	77.75	-42.36
3	9.739	-126.9
5	5.487	-17.32
7	7.22	-102.7
9	8.486	-110.8
11	6.434	152.6
13	3.226	40.97
15	1.77	-115.6
17	2.075	102.7
19	2.125	-21.74
21	2.018	-137.5
23	1.37	110.6
25	0.7443	-33.18

Güç sistemindeki harmonik bileşenler sistemde ek kayıplar ile ısınmalara sebep olurlar. Harmonik bileşenlerin güç sistemi ile rezonans oluşturması durumunda sistemden aşırı akımların akmasına ve sistemin zarar görmesine sebep olurlar. Kontrollü doğrultucu giriş akımı non-lineer denklemi,

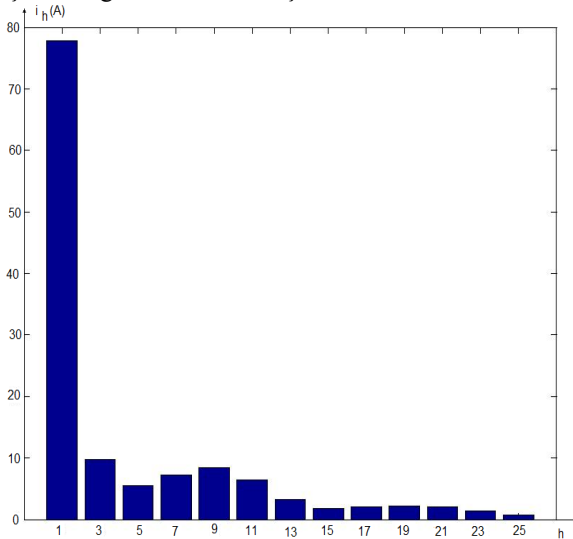
$$i(\omega t) = 77.75 \sin(\omega t - 42.36) + 9.739 \sin(3\omega t - 126.9) + 5.487 \sin(5\omega t - 17.32) + 7.22 \sin(7\omega t - 102.7) + 8.486 \sin(9\omega t - 110.8) + 6.434 \sin(11\omega t + 152.6) + 3.226 \sin(13\omega t + 40.97) + 1.77 \sin(15\omega t - 115.6) + 2.075 \sin(17\omega t + 102.7) + 2.125 \sin(19\omega t - 21.74) + 2.018 \sin(21\omega t - 137.5) + 1.37 \sin(23\omega t + 110.6) + 0.7443 \sin(25\omega t - 33.18) \quad (23)$$

şeklinde. Şekil 9'da bu non-lineer dalga formuna ile harmonik bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 9 Doğrultucu giriş akımı Harmonik bileşenleri

Elektrikli cihazlarda THD değerinin standartlarca verilen limitlerin altında olması gerekir. Elektrik şebekesinde harmonik bileşen üreten yüklerin ayrı bir önemi vardır. Tüketicilerin yaydığı harmonik bileşenleri mutlak sürette filter edilmeleri gerekir. Bir tüketicinin ürettiği harmoniklerden bir başka tüketici etkilenmemelidir. Şekil 10'da tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı harmonik birleşenlerin genlikleri verilmiştir.



Şekil 10 Kontrollü doğrultucu giriş akımı harmonik bileşenleri

Son yıllarda elektrik şebekelerindeki non-linear yüklerdeki artış dikkate alındığında, harmonik bileşenlerin yakın gelecekte enerji sistemimizi negatif olarak büyük oranda etkileyecekleri gözükmemektedir. Ülkemizdeki sanayi kuruluşları ile tüketicilerin harmonik bileşenler ile oluşturdukları olumsuzlukları hakkında kapsamlı bilgileri yoktur. Bu nedenle harmonik bileşenler ile bunların olumsuz etkileri konusunda üniversitelere tüketicilerin bilgilendirilmeleri lazımdır [20], [21].

IV SONUÇLAR

Bu çalışmada bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun giriş akımı harmonik distorsiyonun analizi yapılmıştır. Tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı için THDI değeri Şekil 8' verilen simulin eşdeğerden % 33.24 olarak bulundu. Analitik hesaplama (22) denkleminde THDI değeri %33.32 olarak hesaplandı. Analitik sonuç ile Simulink eşdeğer ile bulunan sonuçların örtüştüğü gözlenmiştir.

Kontrollü doğrultucuda bulunan THDI değeri standartlarca verilen limit değerleri (IEEE519-2014) fazlası ile aşmaktadır. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun THDI değeri filtrelerle mutlak sürette azaltılması gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] M. McCarty, T. Taufik, A. Pratama, M. Anvari, Harmonic Analysis of Input Current of Single-Phase Controlled Bridge Rectifier, IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA 2009), Kuala Lumpur, Malaysia, 520-524, 2009.
- [2] F. Vatanserver, N.A. Yalcin, Calculation of Triggering Angle of Thyristor Rectifiers based on Genetic Algorithm, International Scientific Symposium Electrical Power Engineering EPE2014, Varna, 93-95, 2014.
- [3] S. Adak, "Güç Kalitesi ve Harmonikler", 3e *ELECTROTECH*, sayı: 327, Kasım, p:132-143, 2013.
- [4] H.M. Rashid, *Power Electronics, Circuits, Devices, and Applications*, Perason Press, 2014.
- [5] C. Kocatepe, M. Uzunoglu, R. Yumurtacı, ve O. Arkan, *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2003.
- [6] C.N. Bhende, A. Kalam, S.G. Malla, "Mitigation of Power Quality Problems in Grid-Interactive Distributed Generation System", DE Gruyter: *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, Vol. 17, pp. 165-172, 2016.
- [7] A. Ozdemir, A. Ferikoglu, "Low cost mixed-signal microcontroller based power measurement technique" *IEE Proceedings-Science Measurement And Technology*, 151,1350-2344. doi : 10.1049/ip-smt:20040242, 2004.
- [8] H. Saadat, *Power System Analysis*; Second Edition, McGraw Hill International Edition, pp.38,2004.
- [9] A.S. Yilmaz, A. Alkan, and H.M. Asyali, "Applications of parametric spectral estimation methods on detection of power system harmonics" *Electric Power Systems Research*, 78, Issue 4, , pp 683-693, April, 2008.
- [10] S. Rüstemli, E. Okuducu ve SB. Efe, Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Pasif Filtre Kullanılarak Azaltılması ve Simülasyonu, EVK2015: 6. 2015, *Enerji Verimliliği Kalitesi Sempozyumu*, pp120-124, 4-6 Haziran, Sakarya.
- [11] H. Bodur, *Güç Elektroniği, Temel Analiz ve Sayısal Uygulamalar*, Birsen yayınevi, İstanbul, 2010.
- [12] A.P. Memon, A. Zafar, M.U. Keerio, W.A. Adil, A.A. Ali, "Experimental Study and Analysis of Harmonics Generation in Uncontrolled and Controlled Rectifier Converters," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(1), 1343-1350, 2014.
- [13] N.Mohan, T.M. Undeland, W.P. Robbins, *Power Electronics: Converters Application and Design*, 3rd Ed. New York: John Wiley&Sons, 2003.
- [14] S. Adak, ve H. Cangi, Harmonik Bileşen İçeren Elektrik Tesislerinde Kondansatör Kayıpları, 3e *ELECTROTECH*, sayı: 325,2014, Kasım, p:181-192, 2014.
- [15] P. Pejovic, ve Z. Janda, "An improved current injection network for three-phase high-power-factor rectifiers that apply the third harmonic current injection", *IEEE Trans. Ind Electron*, vol. 47, pp. 497-499, 2000.
- [16] H. Acikgoz, O.F. Kececioğlu, A. Gani, C. Yildiz, M. Sekkeli, "Improved control configuration of PWM rectifiers based on neuro fuzzy controller," *Springer Plus*, 2016;5(1).

- [17] K. Srivastava, S. Shakil, ve A. V. Pandey, "Harmonics & Its Mitigation Technique by Passive Shunt Filter", *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)* ISSN, pp. 2231-2307, 2013.
- [18] O. Stihl, O.T. Boon, "A single-phase controlled-current PWM rectifier," *IEEE Transactions on Power Electronics* Vol: 3 , Issue: 4 , Oct. 1988.
- [19] P.R. Robinson, G.B. Rathod, M. Baraja, P. Maru, "Performance Comparison of Single & 3-Ø Controlled and Uncontrolled Rectifier Using Matlab-Simulink," *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, Vol. 5 (2) , 2014, 2107-2111.