

Çeşitli konut tipi yüklerin bozulmuş gerilimler altında akım harmonik bozulmasının istatistiksel analizi

Damla AĞAÇA¹, Oktay KARAKAYA², Şevket CANTÜRK^{3,*},
Murat Erhan BALCI¹

¹Balıkesir Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye.

²Balıkesir Üniversitesi, Bigadiç Meslek Yüksekokulu, Balıkesir, Türkiye.

³Balıkesir Üniversitesi, Sındırgı Meslek Yüksekokulu, Balıkesir, Türkiye.

Geliş Tarihi (Received Date): 29.10.2024

Kabul Tarihi (Accepted Date): 22.12.2024

Öz

Bu çalışmada, çeşitli konut tipi yüklerin sinüzoidal ve çok sayıda rastgele bozulmaya sahip besleme gerilimleri altında çektikleri akımların harmonik bileşenleri, toplam harmonik bozulma ve akım tepe faktörü ile güç faktörü indislerinin istatistiksel analizi amaçlanmıştır. Çalışmada, rezistif yük besleyen tam köprü doğrultucu (Yük 1), rezistif yük besleyen yarım dalga doğrultucu (Yük 2), rezistif yük besleyen dimmer devresi (Yük 3), batarya şarj eden tam köprü doğrultucu (Yük 4), daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motor (Yük 5) ve ısıtıcı (Yük 6) olmak üzere altı farklı yük tipi Matlab/SIMULINK ortamında modellenmiştir. İstatistiksel analizde, sinüzoidal anma gerilimi ile farklı harmonik bileşenlere sahip ve toplam harmonik bozulma değeri %3.99 ile %7.36 arasında değişen 1000 adet bozulmuş gerilim senaryosu dikkate alınmıştır. Analiz sonuçları modellenen yüklerin güç kalitesi indislerinin şebeke gerilimi harmonik bozulmasından ihmal edilemeyecek derecede etkilendiğini, ancak bu etkinin özellikle ilk iki yükte diğerlerine nazaran daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Harmonik karakterizasyonlar, bozulmuş gerilimler, doğrusal olmayan konut tipi yükler, güç kalitesi

Damla AĞAÇA, dagacaa@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-1185-0696>

Oktay KARAKAYA, karakaya@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-3871-1724>

*Şevket CANTÜRK, scanturk@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5439-5405>

Murat Erhan BALCI, mbalci@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-8418-8917>

Statistical analysis of current harmonic distortion of various residential loads under distorted voltages

Abstract

In this study, the statistical analysis of the harmonic components, total harmonic distortion and crest factor of the currents drawn by various residential-type loads and power factor indices is aimed under sinusoidal and numerous randomly distorted supply voltages. Six different load types, including a full-bridge rectifier supplying a resistive load (Load 1), a half-wave rectifier supplying a resistive load (Load 2), a dimmer circuit supplying a resistive load (Load 3), a full-bridge rectifier charging a battery (Load 4), a single-phase asynchronous motor with a permanent capacitor (Load 5), and a heater (Load 6), are modelled in the Matlab/SIMULINK environment. For statistical analysis, a rated sinusoidal voltage and 1000 distorted voltage scenarios with different harmonic components and total harmonic distortion values varying between 3.99% and 7.36% are considered. The analysis results indicate that the power quality indices of the modelled loads are considerably affected by the harmonic distortion of the grid voltage. Besides, it should be mentioned that the first two kind of loads are much more affected by the voltage distortion compared to the others.

Keywords: *Harmonic characterizations, distorted voltages, nonlinear residential type loads, power quality*

1. Giriş

Günümüz modern konut tipi yüklerde güç elektroniği devreleri yaygın olarak bulunmaktadır [1]-[3]. Bu yükler, doğrusal olmayan gerilim-akım karakteristikleri sebebiyle, bozulmuş dalga formuna sahip diğer bir deyişle harmonik kirlilik içeren akımlar çekerler [3].

Harmonik bozulmanın güç sistem elemanları üzerinde çeşitli olumsuz etkileri vardır. Bu olumsuz etkiler, güç sistem elemanlarının aşırı ısınması, hassas cihazların hatalı çalışması, koruma sistemlerinin işlevini yitirmesi ve iletişim sistemlerinde kesintilerdir [4].

Doğrusal olmayan karakterde yüklerin güç sistemlerinde gerilim ve akım harmonik bozulma seviyesine etkileri zaman ve frekans tanım bölgesinde modeller kullanılarak analiz edilmektedir. Ancak, bu çalışmalarda frekans tanım bölgesi modeller zaman verimli olmaları sebebiyle daha fazla tercih edilmiştir [2, 5, 6]. Diğer taraftan, doğrusal olmayan yüklerin gerilim bozulma şartlarında akım harmoniklerinin ve diğer güç kalitesi indislerinin analizi, bozulmuş gerilimler altında hem bu yüklerin davranışının karakterize edilmesi [7-10] hem de kullanılan modellerin aynı şartlar için yükleri temsil yeteneğinin değerlendirilmesi [8, 11] bakımından önem arz eder.

Bu çalışmada, doğrusal ve doğrusal olmayan karakterli çeşitli evsel yüklerin harmonik davranışının ve güç kalitesi indislerinin bozulmuş gerilimler altında analizi amaçlanmıştır. Bu amaçla, yüklerin zaman tanım bölgesi modeli Matlab/SIMULINK

[12] yazılım ortamında oluşturulmuştur. Devamında, sinüzoidal ve çok sayıda bozulmuş kaynak gerilimi altında elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

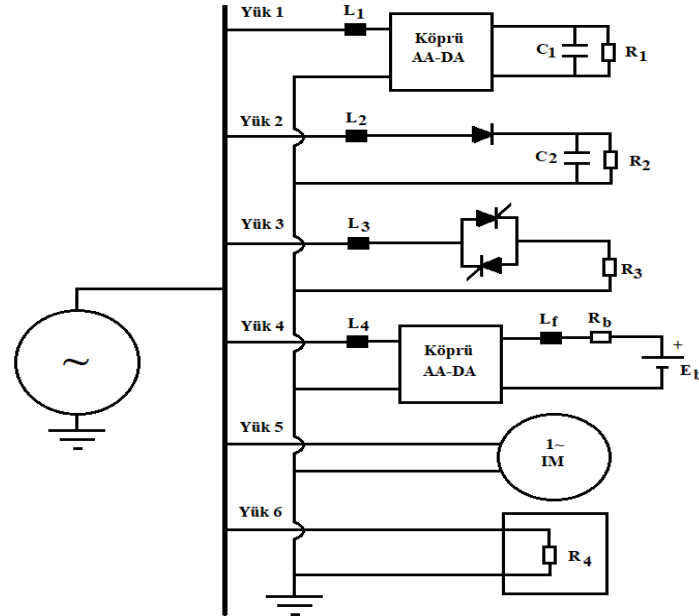
2. Test sisteminin modeli

Bu çalışma kapsamında yapılan analizler, Şekil 1’de sunulan sistem için gerçekleştirilmiştir. Analiz sistemi Matlab/SIMULINK ortamında modellenmiş olup SIMULINK dosyasının görünümü Şekil 2’de verilmiştir.

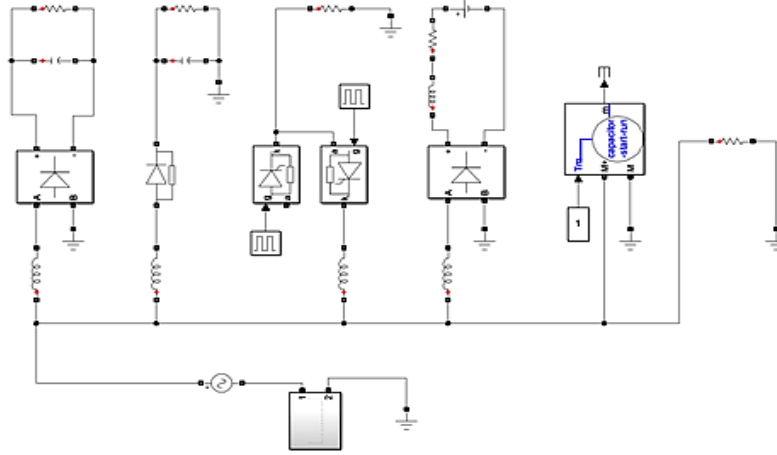
Her iki şekilden de görüldüğü üzere analiz sisteminde 6 farklı yük bulunmaktadır. Bu yükler sırasıyla, rezistif yük besleyen tam köprü doğrultucu (Yük 1), rezistif yük besleyen yarım dalga doğrultucu (Yük 2), rezistif yük besleyen AA kıyıcı veya dimmer devresi (Yük 3), batarya şarj eden tam köprü doğrultucu (Yük 4), daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motor (Yük 5) ve ısıtıcı (saf rezistif) yüküdür (Yük 6). İlk 4 yük ile kaynak arasında yüksek frekanslı akım harmonikleri süzmek için bobinler mevcuttur (L_1, L_2, L_3, L_4).

Sistemde ve asenkron motor dışındaki yüklerde yer alan L_1, L_2, L_3 ve L_4 indüktansları 0.5 mH, C_1 ve C_2 kapasiteleri 5000 μ F, R_1, R_2, R_3, R_4 ve R_b dirençleri sırasıyla 20, 24.5, 20, 20 ve 0.15 Ω , L_f indüktansı 0.4 H ve E_b DA gerilim kaynağı 160 V’tur. Bu parametrelerden E_b ve R_b , şarj edilen bataryanın sırasıyla boşta gerilimi ve iç direncidir.

Tek fazlı asenkron motor yük modeline ait özellikler ve parametreler ise ekler kısmında verilmiştir. Bu parametrelerden, analizde dikkate alınan asenkron motorun daimi kondansatörlü, 187W, 110 V ve 60 Hz anma değerlerine sahip tek fazlı bir motor olduğu ifade edilebilir.



Şekil 1. Analiz sisteminin şematiği.



Şekil 2. Analiz sisteminin SIMULINK ortamında modeli.

3. Analizlerde dikkate alınan indisler

Analizlerde dikkate alınan indislerden harmonik bozulmanın miktarının ölçümüyle ilgili olanlar gerilim ve akıma ait toplam harmonik bozulma indisleridir. Bunların kısaltmaları sırasıyla THDV ve THDI olup ifadeleri Denklem (1) ve (2)'de yazılmıştır [13]:

$$\text{THDV} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h \geq 2} V_h^2}}{V_1} \quad (1)$$

$$\text{THDI} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h \geq 2} I_h^2}}{I_1} \quad (2)$$

Bu ifadelerde, h harmonik numarasını, V_h ve V_1 h . harmonik ve temel harmonik gerilimlerinin etkin değerlerini, I_h ve I_1 h . harmonik ve temel harmonik akımlarının etkin değerlerini ifade eder.

Analizlerde ayrıca gerilim ve akımın toplam etkin değerleri (V ve I) dikkate alınmıştır. Toplam etkin değerler, literatürde iyi bilinen aşağıda verilmiş olan zaman tanım bölgesi ifadelerden hesaplanmıştır:

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} \quad (3)$$

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

Denklem (3) ve (4)'teki t zamanı, T ise periyodu ifade etmektedir.

Analizlerde dikkate alınan gerilim ve akıma ait son indis ise; tepe faktörü (crest factor) olup bu indis gerilim ve akımın bir periyot boyunca ölçülen en yüksek anlık değerinin (tepe değerinin) toplam etkin değere oranıdır [13]:

$$\text{CFV} = \frac{V_M}{V} \quad (5)$$

$$CFI = \frac{I_M}{I} \quad (6)$$

Bu denklemlerde V_M ve V gerilimin tepe değeri ile etkin değeri, I_M ve I akımın tepe değeri ile etkin değeridir.

Buraya kadar sunulan indislere ilaveten, güç faktörü (PF) indisi analizlerde değerlendirilmiştir. PF, aktif gücün (P) görünür güce (S) oranı olarak aşağıdaki ifadeyle hesaplanmıştır [14]:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt}{VI} \quad (7)$$

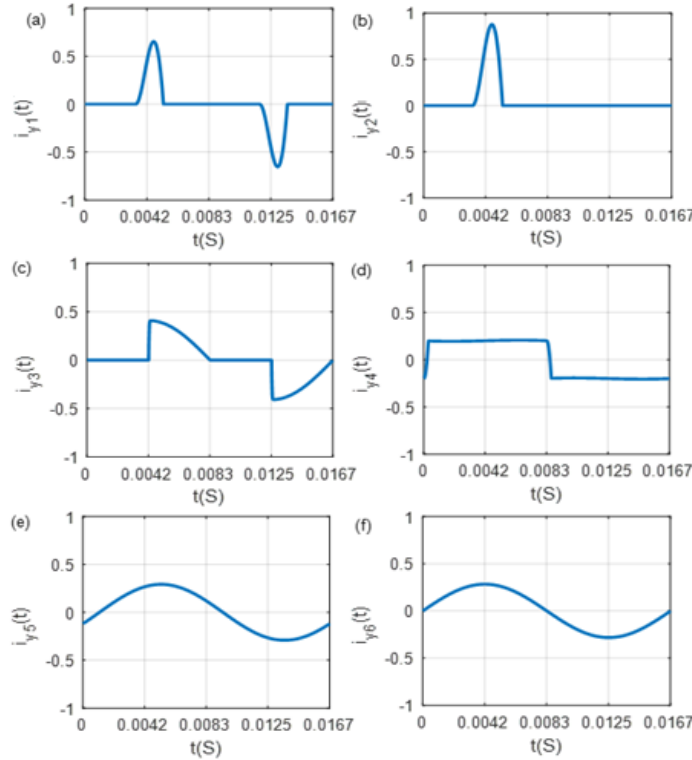
4. İstatistiksel analiz sonuçları

Bu bölümde, SIMULINK ortamında oluşturulan model kullanılarak, dikkate alınan 6 farklı yükün çektikleri akımlara ait harmonik spektrumları ve diğer güç kalitesi indisleri,

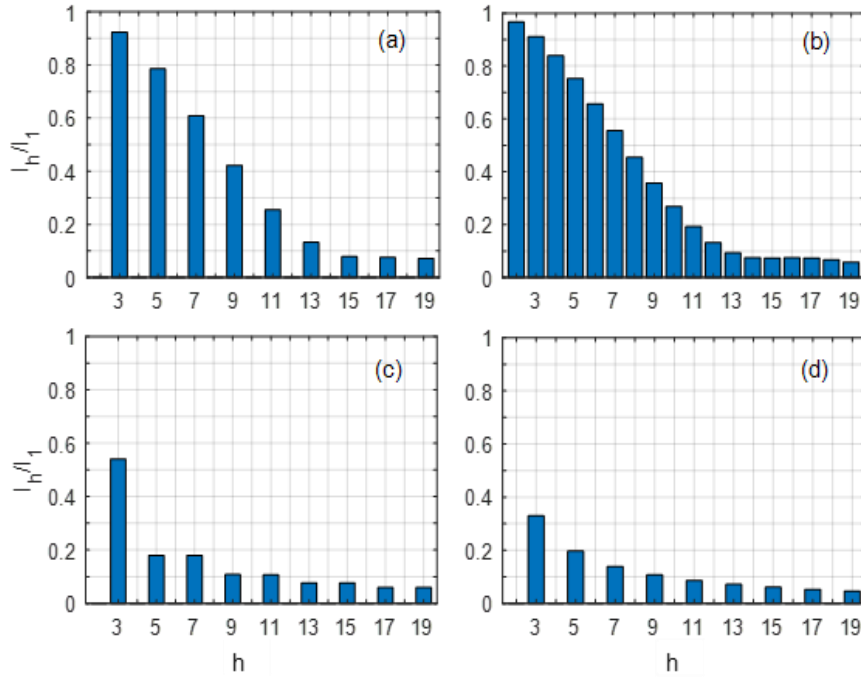
- Öncelikle sinüzoidal anma gerilimi altında,
- Devamında, rassal olarak türetilen farklı harmonik spektrumlara ve toplam harmonik bozulma değerlerine sahip 1000 adet bozulmuş gerilim altında, değerlendirilecektir.

4.1. Sinüzoidal gerilim için analiz sonuçları

Analiz sisteminde yer alan yüklerin 110 V ve 60 Hz anma değerlerindeki sinüzoidal gerilim dalga formu altında çektikleri akımların normalize edilmiş dalga formları Şekil 3'de çizdirilmiştir. Ayrıca, bu yüklerin harmonik spektrumları Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 3. (a) yük 1, (b) yük 2, (c) yük 3, (d) yük 4, (e) yük 5 ve (f) yük 6 için sinüzoidal besleme gerilimi altında akım dalga formları.



Şekil 4. (a) yük 1, (b) yük 2, (c) yük 3 ve (d) yük 4 için sinüzoidal besleme gerilimi altında akım harmonik spektrumları.

Her iki şekilden, ilk dört yüke ait sinüzoidal besleme altındaki akım dalga şekillerinin önemli derecede bozulmaya sahip olduğu, son iki yükün ise aynı besleme şartlarında sinüzoidal dalga formunda akımlar çektikleri görülmektedir. Bununla birlikte, yük 2 haricindeki doğrusal olmayan yük akımlarında tek numaralı harmoniklerin bulunduğu, yük 2'nin akımının hem tek hem de çift numaralı harmonikler içerdiği ifade edilebilir.

Sinüzoidal anma gerilim şartları altında, sistemdeki yüklerin doğru akım bileşeninin temel frekans akım bileşenine oranı (I_{DA}/I_1), CFI, THDI ve PF indis değerleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Sistemdeki yüklere ait çeşitli güç kalitesi indislerinin değerleri.

	CFI	I_{DA}/I_1	THDI(%)	PF
Yük 1	3.22	0	146	0.561
Yük 2	4.37	0.72	207	0.413
Yük 3	2.03	0	63	0.710
Yük 4	1.05	0	45	0.908
Yük 5	1.41	0	0.01	0.913
Yük 6	1.41	0	0	1.000

Bu tablodan, ilk dört yüke ait THDI değerlerinin sırasıyla %146, %207, %63 ve %45 olduğu, diğerlerinin ise ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmektedir. Ayrıca, CFI değerleri sırasıyla 3.22, 4.37, 2.03, 1.05, 1.41 ve 1.41, PF değerleri ise 0.561, 0.413, 0.710, 0.908, 0.913 ve 1.000'dır. Diğer taraftan, sadece Yük 2'nin akımının I_{DA}/I_1 değerinin sıfırdan farklı olduğu ifade edilebilir.

4.2. Bozulmuş gerilimler için analiz sonuçları

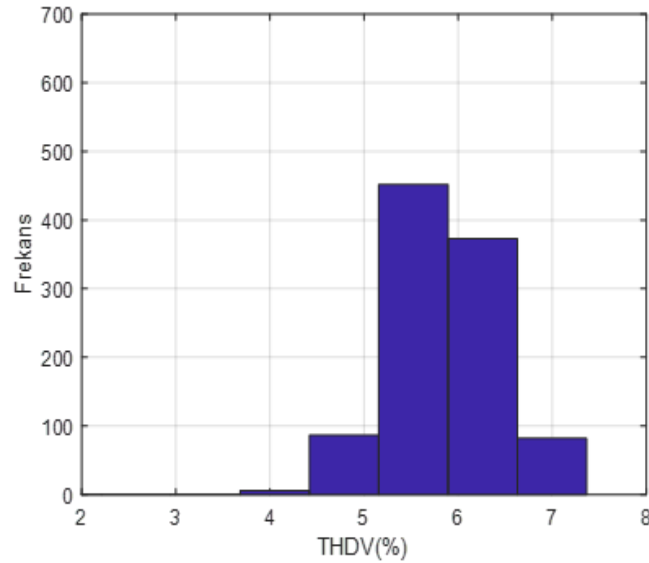
Bu kısımda, sistemdeki yüklerin rastgele türetilmiş bozulmuş gerilimler altında güç kalitesi indislerinin istatistiksel analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, 2. ile 20. harmonikler arasında tek ve çift numaralı harmonik bileşenlerin hem genlikleri hem de faz açıları rastgele seçilerek farklı harmonik spektruma ve THDV değerlerine sahip 1000 adet kaynak gerilimi türetilmiştir.

Rastgele gerilim harmonik bileşenleri türetilirken tek harmoniklerin etkin değerleri için temel harmoniğin etkin değerinin %2'si ve çift harmoniklerin etkin değerleri için temel harmonik etkin değerinin %0.5'i üst sınır kabul edilmiştir. Bunun sebebi tek numaralı harmoniklerin çift numaralı harmoniklere göre şebekede daha yüksek seviyelerde olduğu kabulüdür [15]. Tüm gerilim harmoniklerinin açıları ise 0 ile 180 derece aralığı dikkate alınarak türetilmiştir. Rastgelelik sağlanırken normal dağılım dikkate alınmıştır. Tüm gerilimlerde, temel frekans bileşen anma değerinde ve 0 derece faz açısında sabit tutulmuştur.

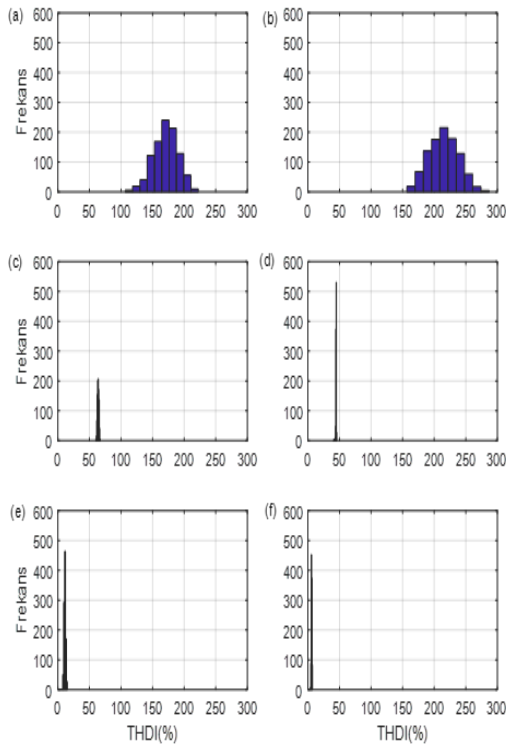
Böylece, Şekil 5'de verilen THDV histogramına sahip bozulmuş gerilimler elde edilmiş ve analiz sistemindeki yüklere uygulanmıştır. Bu bozulmuş gerilimlerde ulaşılan THDV'lerin en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri sırasıyla %7.36, %3.99 ve %5.85'dir. Üretilen gerilimlerin THDV değerlerinin standart sapması ise 0.530'dir.

1000 adet bozulmuş dalga formunda ve 1 adet sinüzoidal gerilim altında yük akımlarının THDI değerleri, düşük numaralı harmonik bileşenlerin (2. ile 5. harmonikler arası bileşenlerin) temel frekans bileşene göre bağıl değerleri ile CFI değerlerine ait histogramlar Şekil 6-Şekil 11'de verilmiştir. Ayrıca, yüklerin bozulmuş gerilimler altındaki PF histogramları Şekil 12'de çizdirilmiştir.

Bu histogramlara ait en yüksek (X_{\max}), en düşük (X_{\min}) ve ortalama değerler (X_{ort}) ile standart sapma değerleri (σ) ise sırasıyla Tablo 2-Tablo 8'de sunulmuştur.



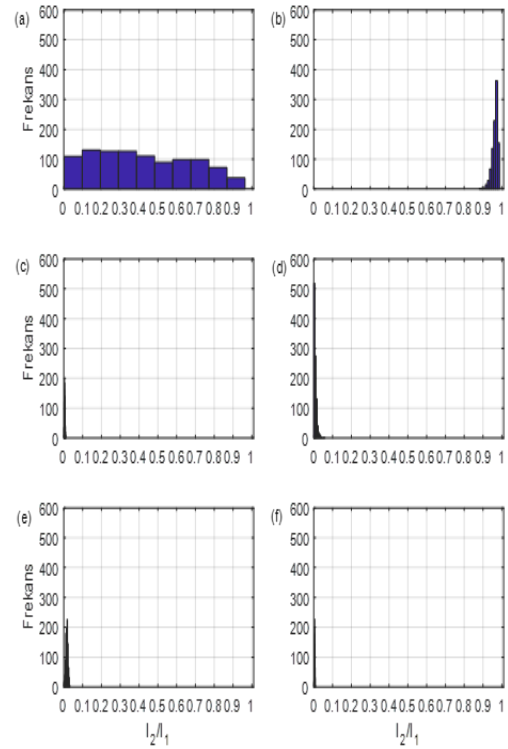
Şekil 5: Analiz sisteminde uygulanan 1000 adet bozulmuş kaynak geriliminin THDV histogramı.



Şekil 6. (a) yük 1, (b) yük 2, (c) yük 3, (d) yük 4, (e) yük 5 ve (f) yük 6'ya ait akımların THDI histogramları.

Tablo 2: Yük akımlarının THDI histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.

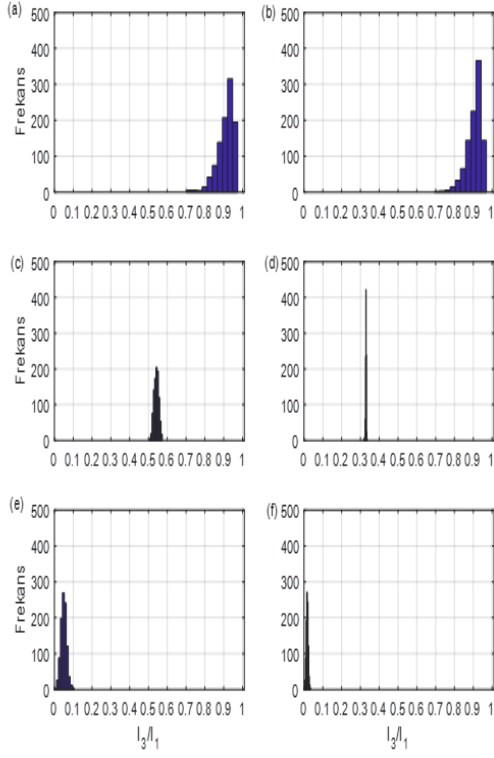
	X_{\max}	X_{\min}	X_{ort}	σ
Yük 1	222.36	106.78	170.80	19.30
Yük 2	287.03	156.72	215.11	23.07
Yük 3	67.00	59.96	63.69	1.17
Yük 4	45.71	40.19	44.59	0.42
Yük 5	15.13	0.01	11.10	1.26
Yük 6	7.36	0	5.84	0.56



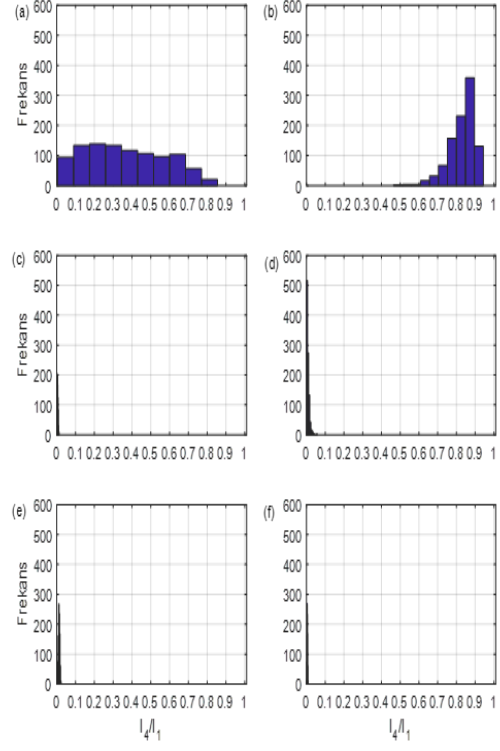
Şekil 7. (a) yük 1, (b) yük 2, (c) yük 3, (d) yük 4, (e) yük 5 ve (f) yük 6 akımlarının I_2/I_1 histogramları.

Tablo 3: Yük akımlarının I_2/I_1 histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.

	X_{\max}	X_{\min}	X_{ort}	σ
Yük 1	0.964	0.002	0.420	0.253
Yük 2	0.988	0.879	0.963	0.015
Yük 3	0.010	$5.570 \cdot 10^{-5}$	0.004	0.002
Yük 4	0.059	$4.371 \cdot 10^{-5}$	0.007	0.007
Yük 5	0.033	$1.541 \cdot 10^{-5}$	0.016	0.005
Yük 6	0.009	0	0.004	0.002



Şekil 8: (a) yük 1, (b) yük 2, (c) yük 3, (d) yük 4, (e) yük 5 ve (f) yük 6 akımlarının I_3/I_1 histogramları.



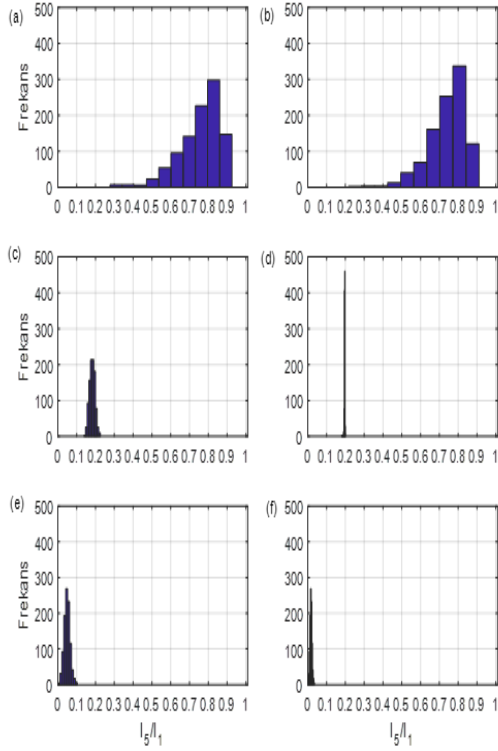
Şekil 9: (a) yük 1, (b) yük 2, (c) yük 3, (d) yük 4, (e) yük 5 ve (f) yük 6 akımlarının I_4/I_1 histogramları.

Tablo 4: Yük akımlarının I_3/I_1 histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.

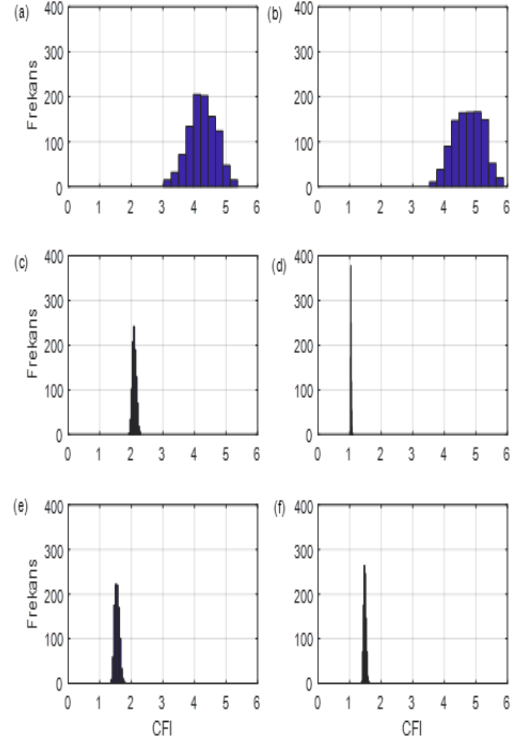
	X_{\max}	X_{\min}	X_{ort}	σ
Yük 1	0.974	0.703	0.910	0.043
Yük 2	0.969	0.694	0.905	0.039
Yük 3	0.574	0.504	0.542	0.012
Yük 4	0.336	0.316	0.329	0.002
Yük 5	0.105	$1.135 \cdot 10^{-4}$	0.049	0.015
Yük 6	0.036	0	0.017	0.005

Tablo 5: Yük akımlarının I_4/I_1 histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.

	X_{\max}	X_{\min}	X_{ort}	σ
Yük 1	0.855	0.005	0.366	0.210
Yük 2	0.943	0.464	0.830	0.068
Yük 3	0.013	$2.696 \cdot 10^{-4}$	0.005	0.002
Yük 4	0.059	$8.670 \cdot 10^{-5}$	0.008	0.007
Yük 5	0.025	$6.092 \cdot 10^{-6}$	0.013	0.004
Yük 6	0.009	$1.665 \cdot 10^{-6}$	0.005	0.001



Şekil 10: (a) yük 1, (b) yük 2, (c) yük 3, (d) yük 4, (e) yük 5 ve (f) yük 6 akımlarının I_5/I_1 histogramları.



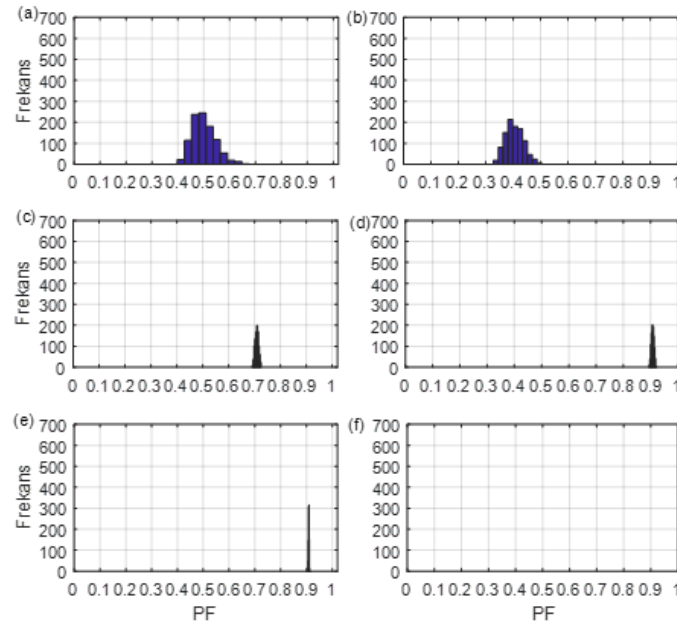
Şekil 11: (a) yük 1, (b) yük 2, (c) yük 3, (d) yük 4, (e) yük 5 ve (f) yük 6 akımlarının CFI histogramları.

Tablo 6: Yük akımlarının I_5/I_1 histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.

	X_{\max}	X_{\min}	X_{ort}	σ
Yük 1	0.926	0.277	0.757	0.108
Yük 2	0.911	0.216	0.742	0.098
Yük 3	0.226	0.138	0.182	0.015
Yük 4	0.200	0.180	0.196	0.002
Yük 5	0.104	$1.546 \cdot 10^{-5}$	0.049	0.016
Yük 6	0.036	0	0.017	0.006

Tablo 7: Yük akımlarının CFI histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.

	X_{\max}	X_{\min}	X_{ort}	σ
Yük 1	5.367	3.027	4.247	0.434
Yük 2	5.874	3.524	4.763	0.463
Yük 3	2.298	1.912	2.095	0.062
Yük 4	1.106	1.030	1.046	0.009
Yük 5	1.814	1.347	1.546	0.074
Yük 6	1.642	1.375	1.482	0.039



Şekil 12: (a) yük 1, (b) yük 2, (c) yük 3, (d) yük 4, (e) yük 5 ve (f) yük 6 akımlarının PF histogramları.

Tablo 8: Yüklerin PF histogramlarına ait istatistiksel göstergeler.

	X_{\max}	X_{\min}	X_{ort}	σ
Yük 1	0.675	0.397	0.500	0.044
Yük 2	0.505	0.327	0.404	0.032
Yük 3	0.725	0.690	0.708	0.007
Yük 4	0.921	0.894	0.907	0.005
Yük 5	0.913	0.906	0.909	$8.967 \cdot 10^{-4}$
Yük 6	1.000	1.000	1.000	0.000

Şekil 6 ve Tablo 2'den THDI değerlerinin, Yük 1 için %106.78 ile %222.36 arasında, Yük 2 için %156.72 ile %287.03, Yük 3 için %59.96 ile %67.00, Yük 4 için %40.19 ile %45.71, Yük 5 için %0.01 ile %15.13 ve Yük 6 için %0 ile %7.36 arasında değiştiği görülmektedir. Yüklerle ait THDI'ların ortalama ve standart sapma değerleri; Yük 1 için %170.80 ile 19.30, Yük 2 için %215.11 ile 23.07, Yük 3 için %63.69 ile 1.17, Yük 4 için %44.59 ile 0.42, Yük 5 için %11.10 ile 1.26 ve Yük 6 için %5.84 ile 0.56'dır. Burada, kaynağın THDV değerindeki değişimin özellikle Yük 1 ve Yük 2 de diyotların iletme/kesime girme anlarını önemli derecede etkilediği, bu sebeple analizlerde her iki yükün akım THDI değerlerinin geniş aralıklarda değişim gösterdiğinin altı çizilmelidir. Diğer taraftan, yapısında triyak bulunduran Yük 3 ve d.a. tarafında sabit gerilim kaynağı barındıran Yük 4'de ise yarı iletken anahtarların iletme/kesime girme anlarının ve dolayısıyla THDI indislerinin kaynağın THDV değişiminden etkilenmediği değerlendirilmiştir. Bunlara ilaveten, Yük 5'in doğrusal olmayan karakteristiğinin yarı

iletken anahtar kaynaklı olmaması ve Yük 6'nın ise saf rezistans olması sebebiyle bu yüklerin THDI indislerinin değişiminin gerilimin THDV seviyesiyle benzer değişim gösterdiği belirtilebilir.

Şekil 7 ve Tablo 3'den I_2/I_1 değerlerinin, Yük 1 için 0.964 ile 0.002, Yük 2 için 0.988 ile 0.879, Yük 3 için 0.010 ile $5.570 \cdot 10^{-5}$, Yük 4 için 0.059 ile $4.371 \cdot 10^{-5}$, Yük 5 için 0.033 ile $1.541 \cdot 10^{-5}$ ve Yük 6 için 0.009 ile 0 arasında değiştiği görülmektedir. Yüklere ait I_2/I_1 oranının ortalama ve standart sapma değerleri; Yük 1 için 0.420 ile 0.253, Yük 2 için 0.963 ile 0.015, Yük 3 için 0.004 ile 0.002, Yük 4 için 0.007 ile 0.007, Yük 5 için 0.016 ile 0.005 ve Yük 6 için 0.004 ile 0.002'dir.

Şekil 8 ve Tablo 4'den I_3/I_1 değerlerinin, Yük 1 için 0.974 ile 0.703, Yük 2 için 0.969 ile 0.694, Yük 3 için 0.574 ile 0.504, Yük 4 için 0.336 ile 0.316, Yük 5 için 0.105 ile $1.135 \cdot 10^{-4}$ ve Yük 6 için 0.036 ile 0 arasında değiştiği görülmektedir. Yüklere ait I_3/I_1 oranının ortalama ve standart sapma değerleri; Yük 1 için 0.910 ile 0.043, Yük 2 için 0.905 ile 0.039, Yük 3 için 0.542 ile 0.012, Yük 4 için 0.329 ile 0.002, Yük 5 için 0.049 ile 0.015 ve Yük 6 için 0.017 ile 0.005'dir.

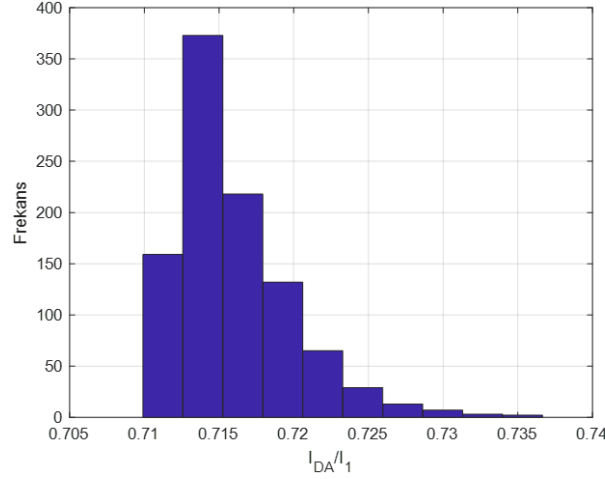
Şekil 9 ve Tablo 5'den I_4/I_1 değerlerinin, Yük 1 için 0.855 ile 0.005, Yük 2 için 0.943 ile 0.464, Yük 3 için 0.013 ile $2.696 \cdot 10^{-4}$, Yük 4 için 0.059 ile $8.670 \cdot 10^{-5}$, Yük 5 için 0.025 ile $6.092 \cdot 10^{-6}$ ve Yük 6 için 0.009 ile $1.665 \cdot 10^{-6}$ arasında değiştiği görülmektedir. Yüklere ait I_4/I_1 oranının ortalama ve standart sapma değerleri; Yük 1 için 0.366 ile 0.210, Yük 2 için 0.830 ile 0.068, Yük 3 için 0.005 ile 0.002, Yük 4 için 0.008 ile 0.007, Yük 5 için 0.013 ile 0.004 ve Yük 6 için 0.005 ile 0.001'dir.

Şekil 10 ve Tablo 6'dan I_5/I_1 değerlerinin, Yük 1 için 0.926 ile 0.277, Yük 2 için 0.911 ile 0.216, Yük 3 için 0.226 ile 0.138, Yük 4 için 0.200 ile 0.180, Yük 5 için 0.104 ile $1.546 \cdot 10^{-5}$ ve Yük 6 için 0.036 ile 0 arasında değiştiği görülmektedir. Yüklere ait I_5/I_1 oranının ortalama ve standart sapma değerleri ise sırasıyla Yük 1 için 0.757 ile 0.108, Yük 2 için 0.742 ile 0.098, Yük 3 için 0.182 ile 0.015, Yük 4 için 0.196 ile 0.002, Yük 5 için 0.049 ile 0.016 ve Yük 6 için 0.017 ile 0.006'dir.

Şekil 11 ve Tablo 7'den CFI değerlerinin, Yük 1 için 5.367 ile 3.027, Yük 2 için 5.874 ile 3.524, Yük 3 için 2.298 ile 1.912, Yük 4 için 1.106 ile 1.030, Yük 5 için 1.814 ile 1.347 ve Yük 6 için 1.642 ile 1.375 arasında değiştiği görülmektedir. Yüklere ait CFI oranının ortalama ve standart sapma değerleri ise sırasıyla Yük 1 için 4.247 ile 0.434, Yük 2 için 4.763 ile 0.463, Yük 3 için 2.095 ile 0.062, Yük 4 için 1.046 ile 0.009, Yük 5 için 1.546 ile 0.074 ve Yük 6 için 1.482 ile 0.039'dur.

Şekil 12 ve Tablo 8'den PF değerlerinin, Yük 1 için 0.675 ile 0.397, Yük 2 için 0.505 ile 0.327, Yük 3 için 0.725 ile 0.690, Yük 4 için 0.921 ile 0.894 ve Yük 5 için 0.913 ile 0.906 arasında değiştiği, Yük 6 için 1.000 değerinde sabit olduğu görülmektedir. Yüklere ait PF oranının ortalama ve standart sapma değerleri; Yük 1 için 0.500 ile 0.044, Yük 2 için 0.404 ile 0.032, Yük 3 için 0.708 ile 0.007, Yük 4 için 0.907 ile 0.005, Yük 5 için 0.909 ile $8.967 \cdot 10^{-4}$ ve Yük 6 için 1.000 ve 0'dır.

Buraya kadar sunulan istatistiksel analizlere ilaveten sadece Yük 2 için gözlemlenen DA bileşeninin kaynak geriliminin bozulmasından etkilenme durumunu gösteren histogram Şekil 13' de verilmiştir. Bu histograma göre, I_{DA}/I_1 'in en yüksek, en düşük, ortalama ve standart sapma değerleri 0.736, 0.709, 0.716 ve 0.003'dür.



Şekil 13: Yük 2'ye ait I_{DA}/I_1 histogramı.

5. Sonuç

Bu çalışmada, doğrusal olmayan altı farklı konut tipi yük çeşidini içeren bir sistem MATLAB/SIMULINK ortamında modellenmiş ve yüklerin harmonik özellikleri analiz edilmiştir. Modelde yer alan yükler sırasıyla, rezistif yük besleyen tam köprü doğrultucu (Yük 1), rezistif yük besleyen yarım dalga doğrultucu (Yük 2), rezistif yük besleyen AA kıyıcı veya dimmer devresi (Yük 3), batarya şarj eden tam köprü doğrultucu (Yük 4), daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motor (Yük 5) ve ısıtıcı (saf rezistif) yüküdür (Yük 6).

Devamında tanıtılan model yardımıyla sistemde var olan yüklerin sinüzoidal gerilimler altında akımlarına ait harmonik spektrumları, toplam harmonik bozulma ve tepe faktörü değerleri ile güç faktörü indisleri değerlendirilmiştir.

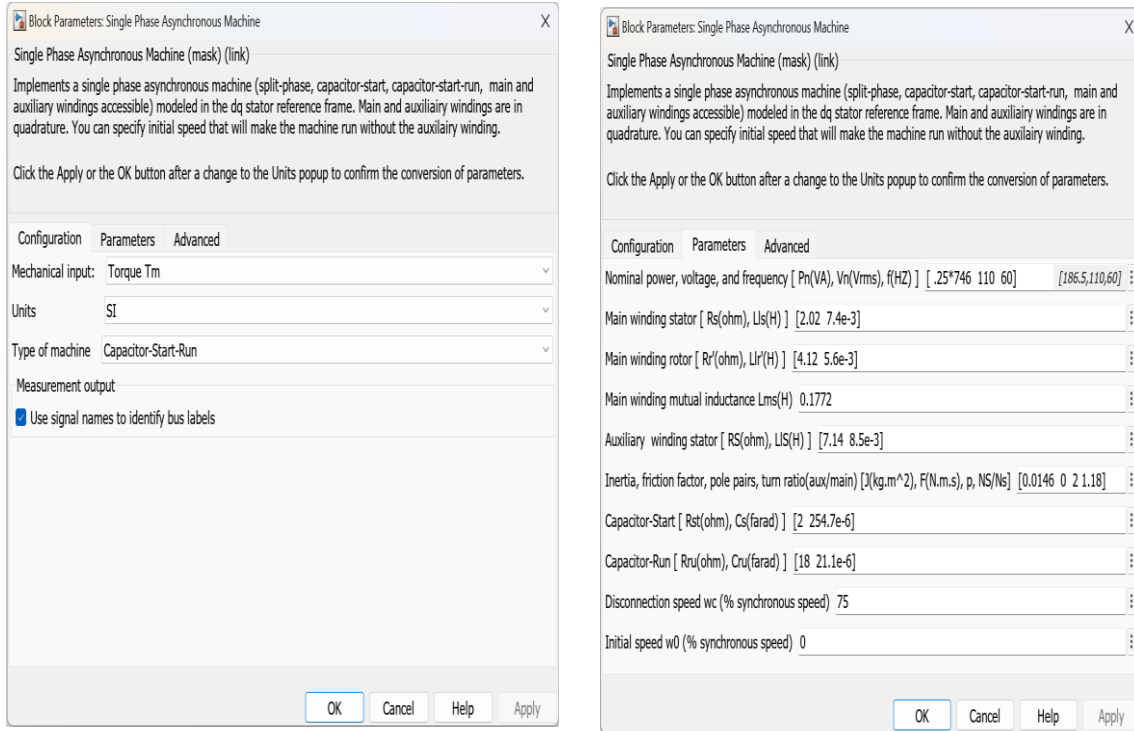
Son olarak, rassal olarak türetilen farklı spektrumlarda ve toplam harmonik bozulma değerleri %3.99 ile %7.36 arasında değişen 1000 adet bozulmuş gerilim altında, yüklerle ait bu indisler istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

Bu analizlerden elde edilen çıktılar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- İlk dört yük önemli derecede akım harmonik bozulmasına sahip olup bunların sinüzoidal gerilim altında toplam akım harmonik bozulma (THDI) değerleri sırasıyla %145, %206, %63 ve %44'dür.
- Yük 1, 3 ve 4'ün sinüzoidal gerilim altındaki karakteristik akım harmonikleri tek numaralı olup Yük 2'nin çektiği akım hem tek hem de çift numaralı harmoniklere sahiptir.
- Yük 2 diğer yüklerden farklı olarak yüksek değerde DA akım bileşenine ($I_{DA}/I_1=0.72$) sahiptir.
- Yük 5'in sinüzoidal gerilim altında çektiği akım ihmal edilebilir harmonik bozulmaya sahipken, Yük 6 saf rezistif bir yük olması sebebiyle sinüzoidal gerilim altında akımı sinüzoidal dalga formuna sahiptir.
- Modellenen yüklerin sinüzoidal gerilim altında çektikleri akımların sırasıyla CFI değerleri 3.22, 4.37, 2.03, 1.05, 1.41 ve 1.41, PF değerleri ise 0.561, 0.413, 0.710, 0.908, 0.913 ve 1.000'dür.

- Diğer taraftan, gerilimin harmonik bozulmasından tüm yüklerin THDI, akım harmonik bileşenleri ve CFI değerlerinin etkilendiği, fakat özellikle Yük 1 ve 2 için bozulmuş gerilimler altında bu indislerin çok geniş aralıklarda değiştiği ifade edilebilir.
- Bozulmuş gerilimler ayrıca Yük 1, 3 ve 4'ün karakteristik olmayan harmonik akımlar (çift numaralı harmonikler) çekmesine yol açmıştır.
- Sinüzoidal anma gerilimi altında ihmal edilebilir düzeyde akım harmonik bozulmasına sahip olan daimi kondansatörlü tek fazlı asenkron motorun, bozulmuş gerilim altında THDI değeri %15'e ulaşmıştır. Bu durum, ele alınan motor tipinin bozulmuş gerilim koşullarında önemli ölçüde harmonik üreten bir yük karakteristiği sergilediğini göstermektedir.
- Son olarak bozulmuş gerilimlerin ilk iki yükün PF değerine dikkate değer derecede etki ettiği ifade edilebilir.

6. Ekler



Ek 1. Tek fazlı asenkron motora ait model parametreleri.

Kaynaklar

- [1] G. N. Popa, A. Iagăr, and C. M. Diniş, "Considerations on Current and Voltage Unbalance of Nonlinear Loads in Residential and Educational Sectors," **Energies**, vol. 14, no. 1, p. 102, Dec. 2020.
- [2] P. Rodríguez-Pajarón, A. Hernández, H. Mendonça and J. V. Milanović, "Residential Harmonic Injection Models Based on Field Measurements," **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 38, no. 1, pp. 575-587, Aug. 2023.

- [3] D. Salles, C. Jiang, W. Xu, W. Freitas and H. E. Mazin, "Assessing the Collective Harmonic Impact of Modern Residential Loads—Part I: Methodology," **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 27, no. 4, pp. 1937-1946, Aug. 2012.
- [4] G. Ye, M. Nijhuis, V. Cuk and J. F. G. Cobben, "Appliance-based residential harmonic load modelling," **2017 IEEE Manchester PowerTech**, Manchester, UK, Jun. 2017, pp. 1-6.
- [5] A. Karadeniz, M. E. Balci, and M. Hakan Hocaoglu, "Improvement of PV unit hosting capacity and voltage profile in distorted radial distribution systems via optimal sizing and placement of passive filters," **Electrical engineering**, vol. 105, no. 4, pp. 2185–2198, Mar. 2023.
- [6] M. E. Balci, D. Ozturk, O. Karacasu and M. H. Hocaoglu, "Experimental verification of harmonic load models," **43rd International Universities Power Engineering Conference**, Padua, Italy, Dec. 2008, pp. 1-4.
- [7] A. Mansoor, W. M. Grady, R. S. Thallam, M. T. Doyle, S. D. Krein and M. J. Samotyj, "Effect of supply voltage harmonics on the input current of single-phase diode bridge rectifier loads," **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 10, no. 3, pp. 1416-1422, Aug. 1995.
- [8] A. Karadeniz, O. Ozturk, A. Koksoy, M. Bekir Atsever, M. E. Balci, and M. Hakan Hocaoglu, "Accuracy assessment of frequency-domain models for harmonic analysis of residential type photovoltaic-distributed generation units," **Solar Energy**, vol. 233, pp. 182–195, Feb. 2022.
- [9] R. O. Abdelqader, D. A. Robinson and P. Ciufu, "Analysis of Harmonic Levels from PWM Rectifiers due to Background Voltage Distortion," **19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)**, Dubai, United Arab Emirates, Aug. 2020, pp. 1-7.
- [10] M. E. Balci and M. H. Hocaoglu, "Effects of Source Voltage Harmonic Distortion on Power Factor Compensation in Triac Controlled AC Chopper Circuits," **International Conference on Power Electronics and Drives Systems**, Kuala Lumpur, Malaysia, Apr. 2005, pp. 1199-1204.
- [11] A. María, Sergey Yanchenko, J. Meyer, and P. Schegner, "Impact of Supply Voltage Distortion on the Harmonic Emission of Electronic Household Equipment," **Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica - SICEL**, vol. 7, pp.1-8, 2024.
- [12] A. Kalair, N. Abas, A. R. Kalair, Z. Saleem, and N. Khan, "Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques," **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 78, pp. 1152–1187, Oct. 2017.
- [13] E. Almaita, "Investigation of power quality indices in jordanian distribution grid," **IOSRJ of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)**, vol. 12, no. 2, pp. 2320-3331, Apr. 2017.
- [14] R. Sasdelli, A. Menchetti, and G. Carlo Montanari, "Power definitions for power-factor correction under nonsinusoidal conditions," **Measurement**, vol. 13, no. 4, pp. 289–296, Jul. 1994.
- [15] Le, T.-T.-H., Kang, H. ve Kim, H., Household Appliance Classification Using Lower Odd-Numbered Harmonics and the Bagging Decision Tree, **IEEE Access**, vol. 8, pp. 55937-55952, Mar. 2020.