

Harmonik Üreten Yükler için Yeni Bir Model

A New Model for Harmonic Producing Loads

M. E. Balci, Ö.Karacasu, D. Öztürk, M. H. Hocaoğlu

Elektronik Mühendisliği Bölümü
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü

m.balci@gyte.edu.tr, karacasu@gyte.edu.tr, dincer.ozturk@gyte.edu.tr, hocaoglu@gyte.edu.tr

Özet

Günümüz güç sistemleri, sisteme harmonik enjekte eden, gerilim ve akım bozulmasını arttıran lineer olmayan yüklerle istisnasız sahiptir. Bu sebeple, güç sistemlerinde harmonikler servis sağlayıcı şirketler ve tüketicilerin en çok ilgi gösterdiği güç kalitesi olaylarından biri olmuştur. Bununla beraber, lineer olmayan yükler ile sistemin geri kalan kısmı arasındaki harmonik etkileşimin incelenmesi amacıyla çeşitli harmonik analizi metotları literatürde önerilmiştir. Diğer taraftan, bu analiz metotlarının doğrulukları harmonik üreten yüklerin hassas biçimde modellenmesine bağlıdır. Bu çalışma harmonik üreten yükler için yeni bir model sunmuştur.

Abstract

Present day power systems invariably have nonlinear loads, which inject harmonics into the system and give rise to the distortion of voltages and currents. Therefore, harmonic interaction in power systems has become one of the most concerned power quality events by utility companies and customers. Furthermore, in the literature, several harmonic analysis methods are proposed to examine the interaction between nonlinear loads and rest of the system. On the other hand, accuracy of the analysis depends on the sensitivities of harmonic producing load models. This paper presents a new model for harmonic producing loads.

1. Giriş

Sinüzoidal olmayan akım ve gerilimlerin; motor, transformatör, kompanzasyon kapasitesi ve bu gibi güç sistemleri elemanlarının çalışma verimlerini ve ömürlerini azalttığı literatürde var olan çalışmalarda belirtilmiştir [1]. Bu sebeple, güç sistemlerinde harmonik analizinin yapılması ve elde edilen sonuçlara göre standartlarda belirtilen önlemlerin alınması harmoniklere bağlı ek finansal kayıpların azaltılması bakımından gerekli bir çalışma haline gelmiştir [2], [3].

Literatürde, çeşitli harmonik analiz metotları bulunmakta olup bu metotlar Frekans Tarama, Harmonik İterasyon ve Zaman domeyninde analiz olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilir [2].

Bu metotlardan, Frekans Tarama (FT) diğer iki metoda göre daha az veri gerektirmesi sebebiyle daha çok tercih edilen

analiz metodudur [2]. Frekans Tarama metodunda yükler genellikle Sabit Akım Kaynağı (SAK) biçiminde modellenir [2]. Fakat bu model gerilimin ihmal edilebilecek kadar küçük bozulmaya sahip olduğu durumlar için oluşturulur ve tipik harmonik bileşenler içerir. Bu sebeple, büyük değerlerde gerilim bozulmasının bulunduğu sistemlerde veyahut sistem geriliminin tipik olmayan harmonik içeriğe sebep olduğu durumlarda hatalı sonuçlar verebilir. Ayrıca, temel harmonik geriliminin büyük değişim gösterdiği durumlarda da hata miktarı yüksek olabilir. SAK modelinin hatalı sonuçlar verebileceği şartların bulunduğu sistemlerde daha gelişmiş modeller ve metotlar harmonik analizi için kullanılmalıdır.

Harmonik üreten yüklerin akım harmonik bileşenlerinin gerilim karakteristiğine dikkate değer ölçüde bağımlı olduğu durumlarda, analiz sonuçlarının doğru olması için bu yüklerin gerilim bağımlılığı dikkate alınmalıdır. Bu ihtiyaç Harmonik İterasyon (HI) yönteminin ana motivasyonu olmuştur [4]-[7]. Bu yöntemde harmonik üreten yükler gerilim bağımlı akım kaynağı (GBAK) biçiminde modellenirler. Harmonik iterasyonda ağırlıklı olarak kullanılan GBAK modeli ise; yükün özelliğine göre belirlenen kontrol değişkenlerine dayalı denklemlerin Newton algoritması ile çözümüyle çalışan modeldir [4]-[7]. Bu modelde kontrol değişkenleri genel olarak tetikleme açısı ve çıkış gücüdür.

Bu modelin dışında harmonik iterasyon analizlerinde a.a.-a.a. veya a.a.-d.a dönüştürücü yükleri için kullanılan ve Fourier açılımı bilinen anahtarlama fonksiyonları sayesinde dönüştürücünün iki tarafındaki gerilim ve akımlar arasında fonksiyon biçiminde tanımlanan Transfer Fonksiyonu modelleri yer almıştır [8], [9].

Ayrıca, GBAK modellerinin bazıları Norton eşdeğer devre yaklaşımıyla yükü her bir frekansta paralel bağlı empedans ve akım kaynağı olarak ifade eden modellerdir [6], [8]. Bu modeller oluşturulan analitik ifadelerin nümerik metotlarla çözümüyle harmonik analizlerine adapte edilmişlerdir; fakat literatürde ölçüm verileri kullanarak Norton eşdeğer devre teoremine göre model öneren başka çalışmalarda vardır [11]. Norton eşdeğer devre temelli modeller SAK'da bulunmayan, gerilimin geniş aralıklarında çalışabilme özelliğine sahiptirler.

Norton Eşdeğer Devre temelli modeller (N) süperpozisyon teoremini kabul eder; bir başka ifadeyle farklı harmonik

numaralarına sahip gerilim ve akımlar arasındaki etkileşimi ihmal eder. Bu eksikliğin giderilmesi amacıyla [12] çalışması tarafından Çapraz Frekans Admittans Matris modeli (ÇFAM) sunulmuştur [12], [13].

Zaman domenyinde analiz araçları ise; EMTTP ve PSCAD/EMTDC gibi geçici durum analiz programları ile sistem dinamiklerine göre ifade edilen diferansiyel durum denklemlerinin çözümü temelli analiz yöntemleridir [2], [14], [15]. Zaman domenyi analizler frekans domenyi analizlere göre daha hassas sonuçlar vermelerine rağmen daha fazla hesap süresi gerektirirler. Bu sebeple, zaman domenyinde analize imkan veren ve diferansiyel denklem takımlarının analitik olarak çözülmesiyle elde edilen modeller de literatürde sunulmuştur [16]-[18].

Buraya kadar yapılan literatür özeti de anlaşılacağı üzere frekans ve zaman domenyinde yapılan modelleme ve harmonik analiz metodları istisnasız avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu durum, modelleme ve harmonik analizi çalışmalarının halen önemini korumasını sağlamıştır [19]-[21].

Ayrıca, son yıllarda, harmonik analizlerinde ağırlıklı olarak kaynak-yük harmonik sorumluluk paylaşımı dikkate alınmaya başlanmıştır [22]-[25]. Bu çalışmalardan [24] ve [25]'de kaynak-yük harmonik sorumluluk paylaşılması için önerilen yöntemler yükün modellenmesi üzerine kurulmuştur. Diğer taraftan, literatürde efektif kompanzasyon ve/veya yük admittansındaki frekansa bağlı lineer olmayan değişimi dikkate alan güç ifadelerinden birçoğu yükün eşdeğer parametreler ile ifade edilmesine dayanmaktadır [26], [27].

Bu çalışmada, basit kondansatör ile azami kompanzasyon ve yük admittansındaki frekansa bağlı lineer olmayan değişimi dikkate alan [27]'de sunulmuş güç ifadesinde tanımlanmış eşdeğer yük parametrelerinin harmonik analizlerinde yük modeli olarak kullanılabilirliği analiz edilmiştir. Önerilen model, literatürde yaygın olarak bilinen frekans domenyi modeller olan SAK, N [11] ve ÇFAM ile hassasiyet bakımından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sırasında referans değer olarak bir test sisteminden elde edilen gerçek ölçüm verileri kullanılmış ve doğruluk analizi sonuçları birçok durum dikkate alınarak istatistiksel olarak verilmiştir.

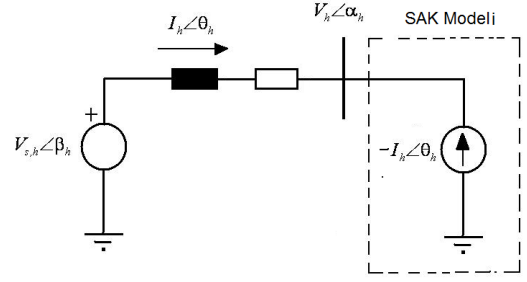
2. SAK, N ve ÇFAM Modellerine Ait Genel Prensipler

SAK, N ve ÇFAM modellerine ait genel prensipler aşağıda kısaca özetlenmiştir:

2.1. Sabit Akım Kaynağı Modeli

Gerilimdeki bozulmanın ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu veya gerilim efektif değerinin küçük aralıklarda değiştiği sistem şartlarında yapılan analizlerde yük Sabit Akım Kaynağı biçiminde modellenebilir. Bu sebepten ötürü SAK modeli genellikle sistemin frekans cevabının incelendiği bir başka ifadeyle rezonans durumunun incelendiği analiz çalışmalarında yer almıştır. İsminden de anlaşılacağı üzere SAK modelinde yük her bir harmonik numarası için sabit akım kaynağı olarak ifade edilir.

Dolayısıyla modelin sistemle birlikte gösterimi Şekil 1'de verilen biçimdedir.

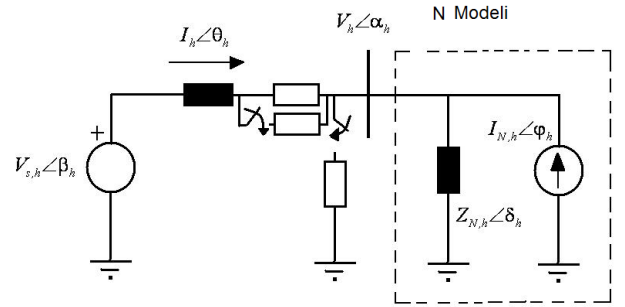


Şekil 1: SAK modelinin sistem içinde gösterimi.

Bu modelin avantajı, literatürde birçok çalışmada çeşitli yüklerin akım harmonik bileşenleri karakterize edilmiştir ve bundan dolayı SAK modeli ek bir çalışma gerektirmeden harmonik analizlerinde kullanılabilir. Fakat yük-sistem harmonik etkileşiminin analiz edilmesine kafi gelmemesi dezavantajdır.

2.2. Norton Modeli

Yük-sistem harmonik etkileşimini dikkate alan ve sistem geriliminin ideal olmayan durumlarında da doğru sonuçlar veren bir model oluşturma motivasyonu sonucunda Norton model (N) literatürde tanımlanmıştır. N modelin oluşturulma prensiplerini ve modelin sistemle birlikte gösterimini açıklayan şema Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2: N modelin oluşturulma prensiplerini ve modelin sistemle birlikte gösterimini açıklayan şema.

N modelinde baraya bağlı yükler her bir harmonikte sabit akım kaynağı ve buna paralel empedans biçiminde kabul edilir. Modeldeki Norton Akım kaynağı ve Norton Eşdeğer Empedansının değerleri, sistemde bulunan paralel ya da seri elemanlardan birinin devrede olduğu ve olmadığı iki farklı durumda ölçülmüş yük akım ve yük gerilimlerine bağlı olarak

$$Z_{N,h} \angle \delta_h = \frac{{}^1V_h \angle^1\alpha_h - {}^2V_h \angle^2\alpha_h}{{}^2I_h \angle^2\theta_h - {}^1I_h \angle^1\theta_h} \quad (1)$$

$$I_{N,h} \angle \theta_h = {}^1I_h \angle^1\theta_h + \frac{{}^1V_h \angle^1\alpha_h}{Z_{N,h} \angle \delta_h} = {}^2I_h \angle^2\theta_h + \frac{{}^2V_h \angle^2\alpha_h}{Z_{N,h} \angle \delta_h} \quad (2)$$

ifadeleriyle hesaplanır. Denklem (1) ve (2)'deki ${}^1V_h \angle^1\alpha_h$ ve ${}^1I_h \angle^1\theta_h$ birinci durumda ölçülen h. harmonik gerilim ve akım fazör değerleri, ${}^2V_h \angle^2\alpha_h$ ve ${}^2I_h \angle^2\theta_h$ ise ikinci durumda ölçülen h. harmonik gerilim ve akım fazör değerleridir.

Ölçümler farklı devre durumlarında yapıldığı için akım ve gerilimlerin faz açılarının aynı referansa göre ölçülmesi gerekir. Bu referans iki farklı durumda da faz açısı değişmeyen bara gerilimi olabilir. Fakat gerçekte bu durum her şart altında mümkün olmayacağından kaynak tarafının Thevenin eşdeğer devre geriliminin temel harmonik bileşeni referans bara gerilimi olarak alınır. Prensip şemasında referans bara gerilimi $V_{s,1} < \beta_1$ dir.

Denklem (1) ve (2)'den N modelin Süperpozisyon teoreminin kabul edilmesiyle oluşturulduğu bir başka ifadeyle farklı harmonikler arası etkileşimi dikkate almadığı görülmektedir. Bu noksan ÇFAM modelinde ele alınmıştır.

2.3. Çapraz Frekans Admittans Matris Modeli

Çapraz Frekans Admittans Matris modelinde yük aynı harmonik numarasına sahip gerilim ve akım harmonikleri arasındaki ilişkinin yanında farklı harmonik numaralarına sahip gerilim ve akımlar arasındaki ilişkiyi de veren admittans matrisi biçiminde ifade edilmiştir. ÇFAM modelinin matris formunda yazılışı ve bu modele göre gerilim harmonikleri ile yük akımı harmonikleri arasındaki ilişki,

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \vdots \\ \bar{I}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{1,1} & \bar{Y}_{1,2} & \cdots & \bar{Y}_{1,h} \\ \bar{Y}_{2,1} & \bar{Y}_{2,2} & \cdots & \bar{Y}_{2,h} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \bar{Y}_{M,1} & \bar{Y}_{M,2} & \cdots & \bar{Y}_{M,M} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_M \end{bmatrix} \quad (3)$$

Yük Akımı Yük Modeli Bara Gerilimi

olarak yazılır.

ÇFAM modeli gerçek test ölçümleri kullanılarak aşağıda verilen iki adımda elde edilir:

- İlk adımda yük sinüzoidal gerilimle beslenirken ölçülen akım harmoniklerinin ve temel harmonik geriliminin fazör değerleri kullanılarak matrisin ilk sütununa ait elemanlar (4)'den hesaplanır:

$$\bar{Y}_{k1} = \frac{\bar{I}_k}{\bar{V}_1} \quad (k=1 \dots M) \quad (4)$$

- İkinci adımda her bir durumda sadece temel harmonik ve temel olmayan bir harmonik içeren Mx(M-1) adet besleme gerilimi yüke uygulanır. Böylece matrisin birinci adımdan sonra geriye kalan elemanları (5)'den hesaplanır:

$$\bar{Y}_{kj} = \frac{\bar{I}_k - \bar{Y}_{k1}\bar{V}_1}{\bar{V}_j} \quad j = 2 \dots M \quad (5)$$

Hesaplamalar sırasında gerilim ve akımların faz açılarının aynı referansa göre düzenlenmesi ÇFAM'nin doğru bir şekilde elde edilmesi bakımından önemlidir.

3. Yeni Model

Bu çalışmada önerilen yük modeli, [27]'de sunulmuş olan tek fazlı sistemler için tanımlanmış görünür güç ifadesinde hesaplanan yük parametrelerine dayanmaktadır. Gerilim ve akımın zaman domeyninde,

$$v(t) = V_0 + \sum_{h \in N^+} \sqrt{2} V_h \sin(\omega_h t + \theta_h) \quad (6)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{h \in N^+} \sqrt{2} I_h \sin(\omega_h t + \delta_h) \quad (7)$$

biçiminde ifade edildiği durumda,

$$P_0 = V_0 I_0 \quad (8)$$

$$P_h = V_h I_h \cos(\theta_h - \delta_h) \quad (9)$$

$$P = V_0 I_0 + \sum_{h \in N^+} P_h \quad (10)$$

$$Q_h = V_h I_h \sin(\theta_h - \delta_h) \quad (11)$$

ifadelerinden hesaplanan d.a. aktif, h.harmonik aktif, toplam aktif ve h.harmonik reaktif güçleri kullanılarak; sözü edilen yük parametreleri:

$$G_e = \frac{P}{V^2} \quad (12)$$

$$B_{e_h} = \frac{h \sum_{h \in N^+} h Q_h}{\sum_{h \in N^+} h^2 V_h^2} \quad (13)$$

$$Y_h = G_h - j B_h = \frac{P_h}{V_h^2} - j \frac{Q_h}{V_h^2} \quad (14)$$

biçiminde tanımlanmıştır.

Bu parametrelerle ilişkili akım bileşenleri: aktif,

$$i_a(t) = G_e v(t) = G_e V_0 + \sum_{h \in N^+} \sqrt{2} G_e V_h \sin(\omega_h t + \theta_h) \quad (15)$$

reaktif,

$$i_r(t) = \sum_{h \in N^+} \sqrt{2} B_{e_h} V_h \sin\left(\omega_h t + \theta_h - \frac{\pi}{2}\right) \quad (16)$$

kaydırılmış iletkenlik,

$$i_{sc}(t) = (G_0 - G_e) V_0 + \sum_{h \in N^+} \sqrt{2} (G_h - G_e) V_h \sin(\omega_h t + \theta_h) \quad (17)$$

ve kaydırılmış suseptans,

$$i_{ss}(t) = \sum_{h \in N^+} \sqrt{2} (B_e - B_{e_h}) V_e \sin\left(\omega_h t + \theta_h - \frac{\pi}{2}\right) \quad (18)$$

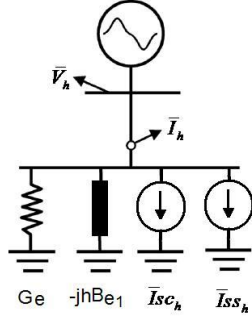
akımlarıdır. Bu akımların toplamı yük akımını verir:

$$i(t) = i_a(t) + i_r(t) + i_{sc}(t) + i_{ss}(t) \quad (19)$$

[27] çalışması bu akım bileşenlerine göre klasik görünür gücün ($S=VI$) ifadesinin;

$$S^2 = (VI_a)^2 + (VI_r)^2 + (VI_{sc})^2 + (VI_{ss})^2 \\ = P^2 + Q_r^2 + D_{sc}^2 + D_{ss}^2 \quad (20)$$

olarak yazılabileceğini göstermiştir. Bu ifade tanımlanan güç bileşenleri aktif (P), reaktif (Q_r), kaydırılmış iletkenlik (D_{sc}) ve kaydırılmış suseptans (D_{ss}) güçleridir. Q_r basit kondansatör ile kompanze edilebilen azami aktif olmayan güçtür. Diğer iki aktif olmayan güç D_{sc} ve D_{ss} basit kondansatörle kompanze edilebilir parçalar içermez. P ve Q_r güçleri frekansla lineer bir ilişkiye sahip iletkenlik ve suseptans dolayısıyla çekilen güçlerdir. Bu sebeple, D_{sc} ve D_{ss} güçleri yük admittansının frekansla lineer değişmeyen kısımlarından dolayı çekilen güç parçalarını içeren bileşenlerdir. Böylece yük, fiziksel manaları yukarıda açıklanan G_e ve B_{e_h} parametreleri ile \bar{I}_{sc_h} ve \bar{I}_{ss_h} akımlarının Şekil 3'de verilen biçimde her bir harmonik numarası için paralel bağlantısı olarak modellenebilir.

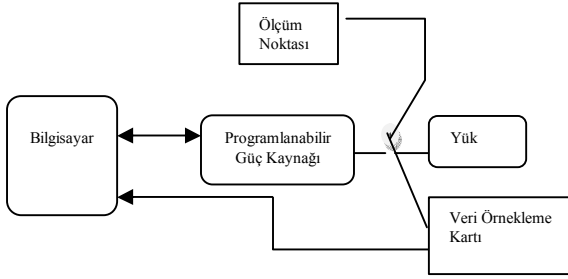


Şekil 3: Yeni modelin gösterimi.

Şekil 3’de verilen yük modeli, en iyi kompanzasyon kondansatörünün kompanze ettiği admittans parçası ve yük admittansının frekansla lineer olmayan değişiminden kaynaklanan akım parçalarını içermesi bakımından önemlidir.

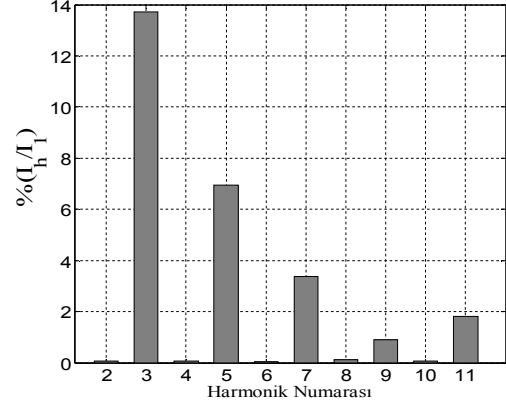
4. Test Sistemi

Modellerin oluşturulması ve test edilmesi sırasında kullanılan sistem Şekil 4’de verilmiştir.



Şekil 4: Test sistemi (Ok yönleri bilgi akış yönünü göstermektedir).

Şekil 4’de verilen test sistemini oluşturan parçalar; çeşitli gerilim dalga şekillerinde yükü besleyebilen programlanabilir güç kaynağı, gerilim ve akım verisini yüksek örnekleme sayısında toplayabilen veri toplama kartı, programlanabilir güç kaynağını kontrol etmekle beraber toplanan veriyi işleyen bilgisayar ve modellenen yük grubudur. Test sistemindeki yük grubu lineer empedans, faz kontrol devresiyle beslenen lineer empedans (triak tetikleme açıları: 90°-270°), kompakt floresan lamba grubu ve bilgisayar grubundan oluşmaktadır. Sinüzoidal besleme geriliminde yük grubunun çektiği akımın harmonik bileşenlerinin büyüklükleri Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5: Sinüzoidal besleme geriliminde yük grubunun çektiği akımın harmonik bileşenlerinin büyüklükleri.

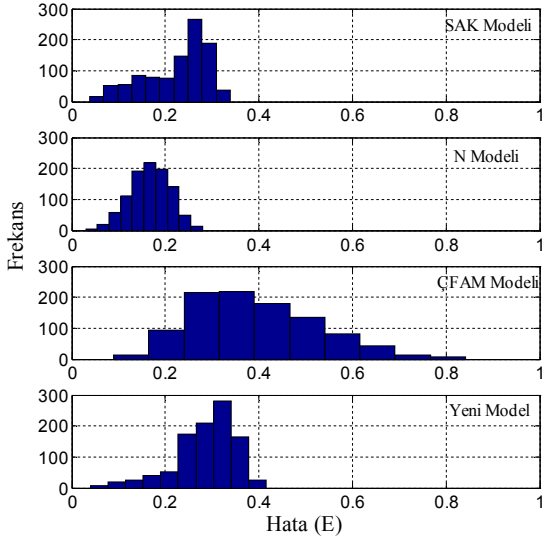
Şekil 5’den yük grubu akımının 3., 5., 9. ve 11. harmoniklerde harmonik akımları çektiği görülmektedir. Bununla birlikte, yük akımının sinüzoidal besleme gerilimi altında THD’si 16%’dir.

Analiz: THD değerleri 5% olan çeşitli harmonik içeriğe sahip 1000 farklı gerilim dalga şekli altında modellerin yük akımının hesabında yapmış olduğu hataların analizidir. Bu analizden elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak yorumlanacaktır.

Bütün gerilim dalga şekli durumları için sistemde ölçülen ($i_m(t)$) ve modellerle hesap edilen ($i_c(t)$) zaman domenyinde akım verileri, (21)’deki ifadede yerlerine konarak modellerin yapmış olduğu hatalar hesap edilir:

$$E = \frac{\int_t^{t+T} (i_m(t) - i_c(t))^2 dt}{\int_t^{t+T} i_m(t)^2 dt} \quad (21)$$

Analizden elde edilen modellerin hata histogramları Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6: Modellerin hata histogramları.

Şekil 6’da hata histogramları verilen modellerin yaptığı en küçük ve en büyük hata değerleri; SAK modeli için 0.038 ile 0.33, N modeli için 0.029 ile 0.27, ÇFAM modeli için 0.08 ile 0.84 ve yeni model için 0.038 ile 0.41’dir.

Yukarıda verilen hata histogramlarına göre modellerin ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Modellerin ortalama, ortanca ve standart sapma değerleri.

	Ortalama	Ortanca	Standart Sapma
SAK	0.223	0.247	0.067
N	0.167	0.168	0.042
ÇFAM	0.394	0.376	0.132
Yeni	0.285	0.299	0.065

Tablo 1’den test edilen yük grubu için modellerin doğrulukları bakımında büyükten küçüğe doğru sırasıyla; N, Yeni, SAK ve ÇFAM olduğu görülmektedir.

5. Sonuç

Bu çalışmada önerilen yeni model, azami reaktif güç kompanzasyonu için kullanılması gereken kondansatör gücü hakkında bilgi veren ayrıca günümüz harmonik analizlerinde önemli bir konu olan harmonik kaynaklarının belirlenmesi için araç teşkil etmek amacıyla oluşturulan bir modeldir.

Çalışmada yapılan doğruluk analizinde SAK, N ve ÇFAM modelleri için elde edilen sonuçlar dikkate alındığında yeni modelin doğruluk yönünden kullanılmasına bir engel olmadığı sonucuna varılmıştır.

Gelecek çalışmalarda, modelin harmonik güç akışı analizlerine uyumlu hale getirilmesi ve harmonik kaynaklarının belirlenmesine ilişkin analizlerde kullanılabilirliğinin test edilmesi planlanmaktadır.

6. Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 106E132’olu araştırma projesi çerçevesinde yapılan çalışmaların bir ürünüdür.

7. Kaynaklar

- [1] V. E.Wanger, “Effects of Harmonics on Equipment,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 8, No. 2, pp. 672–680, Apr. 1993.
- [2] Task Force Harmonic Modeling and Simulation, “Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.11, No.1, pp. 452-465, January, 1996.
- [3] IEEE Std. 519-1992, “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems”, 1993.
- [4] Xia D, and Heydt GT, “Harmonic power flow studies. Part I and II”, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, pp. 1257–1270, 1982.
- [5] Valcárcel M, and Mayordomo JG, “Harmonic power flow for unbalanced systems”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 8, pp. 2052–2059, 1993.
- [6] W. Xu, J. R. Marti, and H. W. Dommel, “A multiphase harmonic load flow solution technique”, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 6, pp. 174–182, Feb. 1991.
- [7] J. Arrillaga, N. R. Watson and G. N. Bathurst, “A Multifrequency Power Flow of General Applicability”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 19, No.1, pp. 342–349, Jan. 2004.
- [8] SMITH, B.C., ARRILLAGA, J., WOOD, A.R., and WATSON, N.R.: “A review of iterative harmonic analysis for AC-DC power systems”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 13, No 1, pp. 180-185, 1998
- [9] Mollerstedt E., Bernhardsson B.; “A Harmonic Transfer Function Model for a Diode Converter Train”, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2000*, Vol. 2, pp. 957 – 962, 23-27 Jan. 2000.
- [10] C. M. Osaukas, A.R. “Wood, A Frequency Domain Model of a Thyristor Controlled Reactor”, *ICHQP’98, Athens, Greece*, Vol.2, pp.923-929,October 14-16, 1998.
- [11] Thunberg, E. and Söder, L., “A Norton Approach to Distribution Network Modelling”, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 14, No. 1, pp. 272-277, January, 1999.
- [12] M.Fauri, “Harmonic Modeling of Non-Linear Load by Means of Crossed Frequency Admittance Matrix”, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, No. 4, pp.1632-1638, November 1997.
- [13] J.A. Fuentes, A. Gabaldon, F.J. Canovas and A. Molina, “Harmonic Model of Electronically Loads”, *Power Engineering Society Summer Meeting 2000*, Vol.13, pp.1805-1810, 16-20 July 2000.
- [14] Task Force Harmonic Modeling and Simulation, “Real-Time Digital Time-Varying Harmonic Modeling and

- Simulation Techniques”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.22, No.2, pp. 1218-1227, Apr. 2007.
- [15] H. W. Dommel, “Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks”, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-88, pp. 388-399, April 1969.
- [16] M.E. Balci and M.H. Hocaoglu, “Effects of Source Voltage Harmonics on Power Factor Compensation in AC Chopper Circuits”, *Electrical Power Quality and Utilisation Journal*, Vol.14, No.1, p.p.53-60, Sep. 2008.
- [17] A. Mansoor, W.M. Grady, R.S.Thallam, M.T. Doyle, S.D. Krein, M.J. Samotyj, “Effect of supply voltage harmonics on the input current of single-phase diode bridge rectifier loads”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 3, pp. 1416 – 1422, July 1995.
- [18] G. Carpinelli, F. Iacovone, A. Russo, P. Varilone, P. Verde, “Analytical modelling for harmonic analysis of line current of VSI-Fed drives”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 3, pp. 1212 – 1224, July 2004.
- [19] G. Chang, C. Hatziaodoniou, W. Xu, P. Ribeiro, R. Burch, W. M. Grady, M. Halpin, Y. Liu, S. Ranade, D. Ruthman, N. Watson, T. Ortmeyer, J.Wikston, A. Medina, A. Testa, R. Gardinier, V. Dinavahi, F. Acram, and P. Lehn, “Modeling devices with nonlinear voltage-current characteristics for harmonic studies,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 19, No. 4, pp. 1802–1811, Oct. 2004.
- [20] Lian, K.L. Perkins, B.K. Lehn, P.W. ; “Harmonic Analysis of a Three-Phase Diode Bridge Rectifier Based on Sampled-Data Model”, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 23, No. 2, pp. 1802–1811, Apr. 2008.
- [21] Luis Sainz, Juan Jose Mesas and Albert Ferrer; “Characterization of Non-linear Load Behavior”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, No. 10, p.p. 1773-1783, Oct. 2008.
- [22] L. Cristaldi and A. Ferrero, “Harmonic Power Flow Analysis for the Measurement of the Electric Power Quality”, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*. Vol. 44, No. 3, pp. 683–685, 1995.
- [23] C. Chaoying, L. Xiuling, D. Koval, Wilsun Xu and T. Tayjasantant, “Critical impedance method - a new detecting harmonic sources method in distribution systems”, *IEEE Trans. on Power Delivery*. Vol. 19, No. 1 pp. 288- 297, 2004.
- [24] A. Dellapos Aquila, M. Marinelli, V. G. Monopoli and P. Zanchetta, “New Power-Quality Assessment Criteria for Supply Systems under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions”, *IEEE Trans. on Power Delivery*. Vol. 19, No. 3, pp.1284-1290, 2004.
- [25] Sergio Ferreira de Paula Silva, and Jose Carlos de Oliveira, “The Sharing of Responsibility between the Supplier and the Consumer for Harmonic Voltage Distortion: A Case Study”, *EPSR*. (2 June 2008)
- [26] Balci, M.E. and Hocaoglu, M.H., “Quantitative Comparison of Power Decompositions”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, No. 3, pp. 318 – 329, 2008
- [27] Balci M.E. and Hocaoglu M.H., “New Power Decomposition for Sinusoidal and Nonsinusoidal Conditions”, *12th ICHQP, Cascais, Portugal*, September 2006.