

EVİRİMSEL ALGORİTMALARLA TRİSTÖRLÜ DOĞRULTUCU DEVRELERİNDEKİ TETİKLEME AÇILARININ HESAPLANMASI

*Fahri VATANSEVER **
*Nedim Aktan YALÇIN **
*Yiğit Çağatay KUYU **

Özet: Elektrik enerji sistemlerinde doğrultucu devreleri önemli yer tutmaktadır. Özellikle çok farklı seviyelerde çıkış gerilimleri oluşturabilme yeteneklerine sahip tristörlü doğrultucu devrelerinde en uygun tetikleme açılarının belirlenmesi/hesaplanması ve bu açılarda tetikleme işaretlerinin uygulanması temel işlemlerdir. Gerçekleştirilen çalışmada; istenilen seviyedeki çıkış geriliminin ortalama veya etkin değerine göre tetikleme açıları hem klasik denklem çözümüyle hem de genetik algoritma ve diferansiyel gelişim algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Bu doğrultuda; doğrultucu devrelerinin eğitiminde de kullanılabilir ve en uygun tetikleme açıları hem klasik hem de evrimsel algoritmalarla hesaplanabilen, sonuçları ve devreye ait birçok özellik/parametreleri hem sayısal hem de grafiksel olarak sunabilen bir yazılım geliştirilmiştir. Yazılımla gerçekleştirilen analizler/benzetimler, bu alanda da evrimsel algoritmaların hızlı, etkin ve verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Tristör, doğrultucu, genetik algoritma, diferansiyel gelişim algoritması.

Calculation of Triggering Angle of Thyristor Rectifiers with Evolutionary Algorithms

Abstract: Rectifier circuits have important role in electrical energy systems. Especially in thyristor rectifiers which have capability of generating multiple voltage level, determining/calculating the optimal trigger angle and applying trigger signal at this angles are among the main process. In this study, desired level of average or effective output voltage according to trigger angles is obtained both classically (mathematically) solving of equations and using evolutionary algorithms which are genetic algorithms and differential evolutions. In this way, a software can be used in educational purposes which can calculate optimal trigger angles using both mathematically and heuristically, show results and many properties/parameters of circuit graphically and numerically is developed. Analysis/simulations performed with the designed software indicates that evolutionary algorithms can be used in this field effectively and efficiently.

Keywords: Thyristor, rectifier, genetic algorithm, differential evolution algorithm.

1. GİRİŞ

Alternatif gerilimi/akımı, doğru gerilime/akıma dönüştüren "doğrultucu" devreleri; sistemlere enerji sağlayan temel besleme devreleri olduklarından, elektrik-elektronik alanında çok sık kullanılmaktadırlar. Genellikle diyot ya da tristör (silikon kontrollü doğrultucu - SCR) kullanılarak gerçekleştirilen bu tür devrelerin verimlerinin yüksek olması, farklı seviyelerde

* Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Görükle, 16059 Bursa.

İletişim yazarı: F. Vatansever (fahriv@uludag.edu.tr)

çıkışlar sağlayabilmesi, çıkıştaki dalgalanmaların daha az olması, daha kaliteli enerji sunması, güvenilirliklerinin yüksek olması gibi özellikleri aranmaktadır. Bu nedenle ilgili devrelerin analiz ve sentezleri önemli yer tutmaktadır.

Literatürde tristörlü doğrultucu devrelerinin analizi (Memon ve ark., 2014; Paul ve ark., 2014; McCarty ve ark., 2009; Shaban, 2009; Vatansever ve Yalçın, 2014), sentezi (Stevanovic, 2009; Silva, 1996), eğitimi (Solanki, 2014; Mehar, 2013; Pires ve Silva, 2002; Agrawal ve ark., 2013) ve uygulamaları hakkında çok sayıda çalışmalar yapılmıştır.

Gelişen teknolojiye paralel olarak mühendislik alanındaki bilgisayar destekli uygulamaların sayısı da hızlı bir şekilde artmaktadır. Bunlardan birisi de evrimsel algoritmalarla optimizasyon uygulamalarıdır. Evrimsel yöntemlerden genetik algoritma (GA) (Liserre ve ark., 2003; Liserre ve ark., 2004; Maswood ve Wei, 2005; Vatansever ve Yalçın, 2014) ve diferansiyel gelişim (DE) algoritması (Chang ve Wu, 2005; Napravnik ve ark., 2013) güç elektroniği alanında farklı uygulamalarda kullanılmışlardır.

Gerçekleştirilen çalışmada tek ve üç fazlı tristörlü doğrultucu devrelerindeki tetikleme açılarının - istenilen çıkış geriliminin ortalama ve etkin değerine göre - belirlenmesi/hesaplanması hem klasik yollarla hem de evrimsel yöntemlerden olan genetik algoritmalar ve diferansiyel gelişim algoritmalarıyla yapılmıştır. Bu doğrultuda, eğitim amaçlı da kullanılabilir ve karşılaştırmalı sonuçları hem sayısal hem de grafiksel olarak sunabilen yazılım geliştirilmiştir. Yazılımla yapılan analizlerle/benzetimlerle (simülasyonlarla) evrimsel algoritmaların hızlı, doğru ve etkin bir şekilde bu alanda da kullanılabileceği gösterilmiştir.

2. TRİSTÖRLÜ DOĞRULTUCU DEVRELERİ

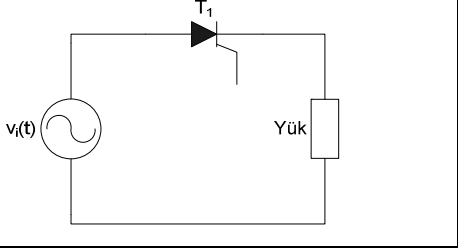
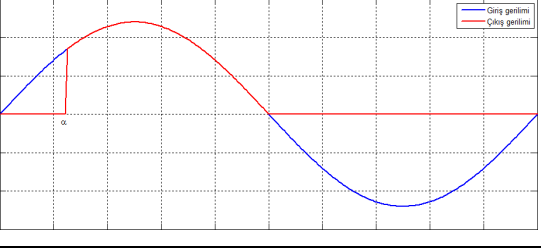
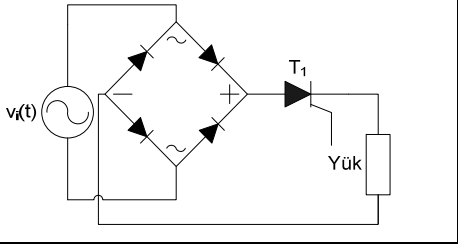
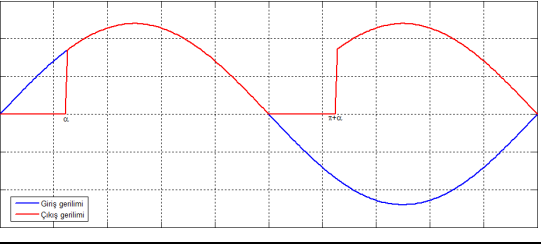
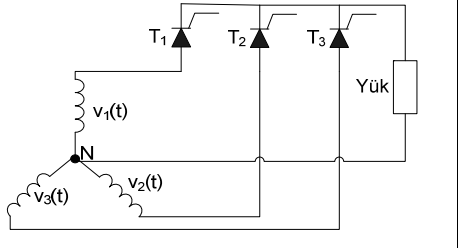
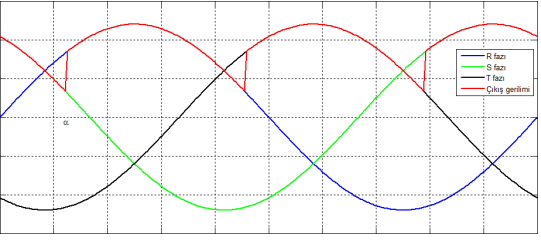
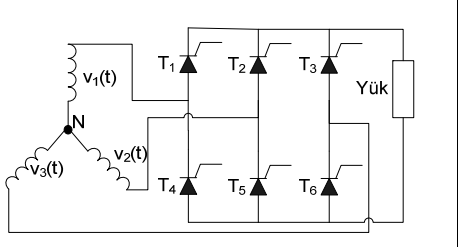
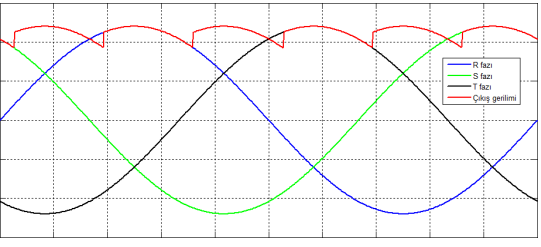
DA akımla/gerilimle çalışan sistemleri beslemek için AA gerilimi DA gerilime dönüştüren doğrultucu devrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Genellikle diyot veya tristör gibi yarıiletken elemanları kullanılarak tasarlanan bu tür devrelerde düşük dalgalanma gerilimi, yüksek dönüştürme verimi vb. birincil unsurlardır. Diyot elemanı; uçlarındaki gerilimin polaritesine göre iletim veya kesimde olduğundan, diyotlu doğrultucu devrelerinin çıkışındaki gerilimin ortalama veya etkin değeri, bağlantı/devre türüne (yarım veya tam dalga) göre sadece belirli değerlerde olabilmektedir. Ancak tristörün iletimi; tetikleme işaretleriyle kontrol edilebildiğinden, tristörlü doğrultucu devrelerinin çıkışındaki gerilimin ortalama veya etkin değeri farklı değerlere ayarlanabilmektedir. Böylece çok farklı seviyelerde DA gerilimler elde edilebilmektedir.

Genel olarak doğrultucu devreleri şebeke fazlarına göre bir faz ve üç faz, dalga/bağlantı şekline göre de yarım dalga (HW) ve tam dalga (FW) şeklinde ikiye ayrılmaktadırlar (Şekil 1). Tablo 1'de omik yüklü bir ve üç fazlı tristörlü (tam kontrollü) doğrultucu devreleri, giriş-çıkış dalga şekilleri ile ortalama (DA) ve etkin (RMS) değer eşitlikleri özetlenmektedir (Rashid, 2011; Shaffer, 2006; pantechsolutions.net, 2015).



Şekil 1:
Doğrultucuların gruplandırılması

Tablo 1. Tristörlü doğrultucu devreleri, giriş-çıkış gerilim dalga şekilleri ve yaklaşık ortalama ve etkin değer eşitlikleri

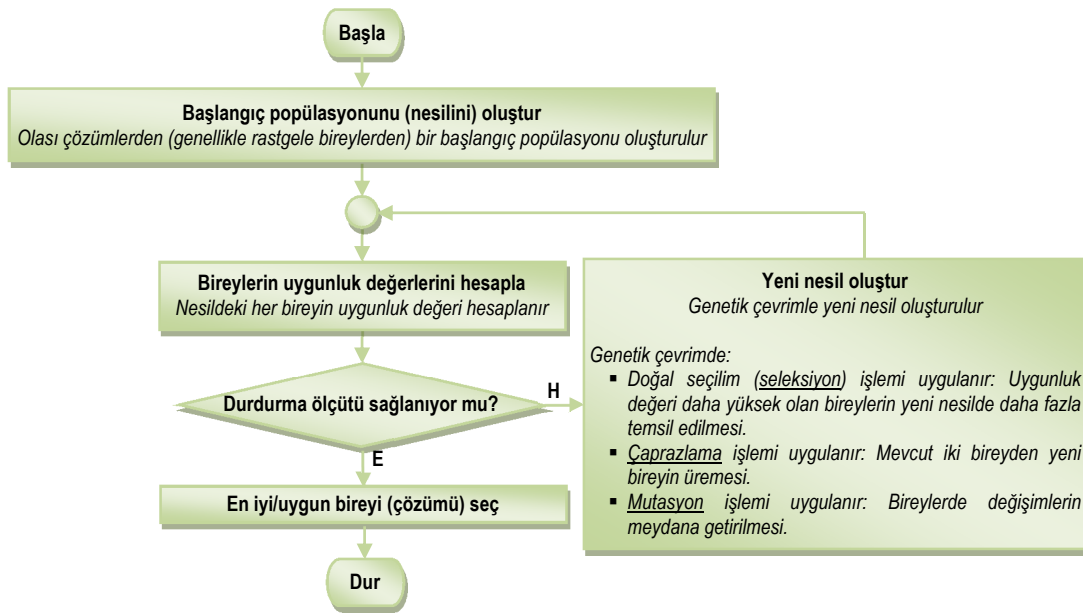
Bir fazlı	Yarım dalga		
	<p>Ortalama değer: $V_o \cong \frac{V_m}{2\pi} \{1 + \cos(\alpha)\}$, Etkin değer: $V_{rms} = \frac{V_m}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin(2\alpha)}$</p>		
Bir fazlı	Tam dalga		
	<p>Ortalama değer: $V_o \cong \frac{V_m}{\pi} \{1 + \cos(\alpha)\}$, Etkin değer: $V_{rms} = V_m \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{1}{4\pi} \sin(2\alpha)}$</p>		
Üç fazlı	Yarım dalga		
	<p>Ortalama değer: $V_o \cong \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \cos(\alpha)$, Etkin değer: $V_{rms} = \sqrt{3}V_m \sqrt{\frac{1}{6} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \cos(2\alpha)}$</p>		
Üç fazlı	Tam dalga		
	<p>Ortalama değer: $V_o \cong \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\alpha)$, Etkin değer: $V_{rms} = \sqrt{3}V_m \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \cos(2\alpha)}$</p>		

3. EVRİMSSEL YÖNTEMLER

Doğadaki biyolojik evrimden esinlenilerek ortaya atılan evrimsel algoritmalar; mühendislik, fen, teknoloji, tıp gibi birçok alanda başarılı şekilde kullanılmaktadır. Evrimsel algoritmaların genetik algoritmalar, karınca koloni optimizasyon algoritması, parçacık sürü optimizasyon algoritması, diferansiyel gelişim (evrim, değerlendirme) algoritması gibi birçok türleri mevcuttur.

3.1. Genetik Algoritmalar

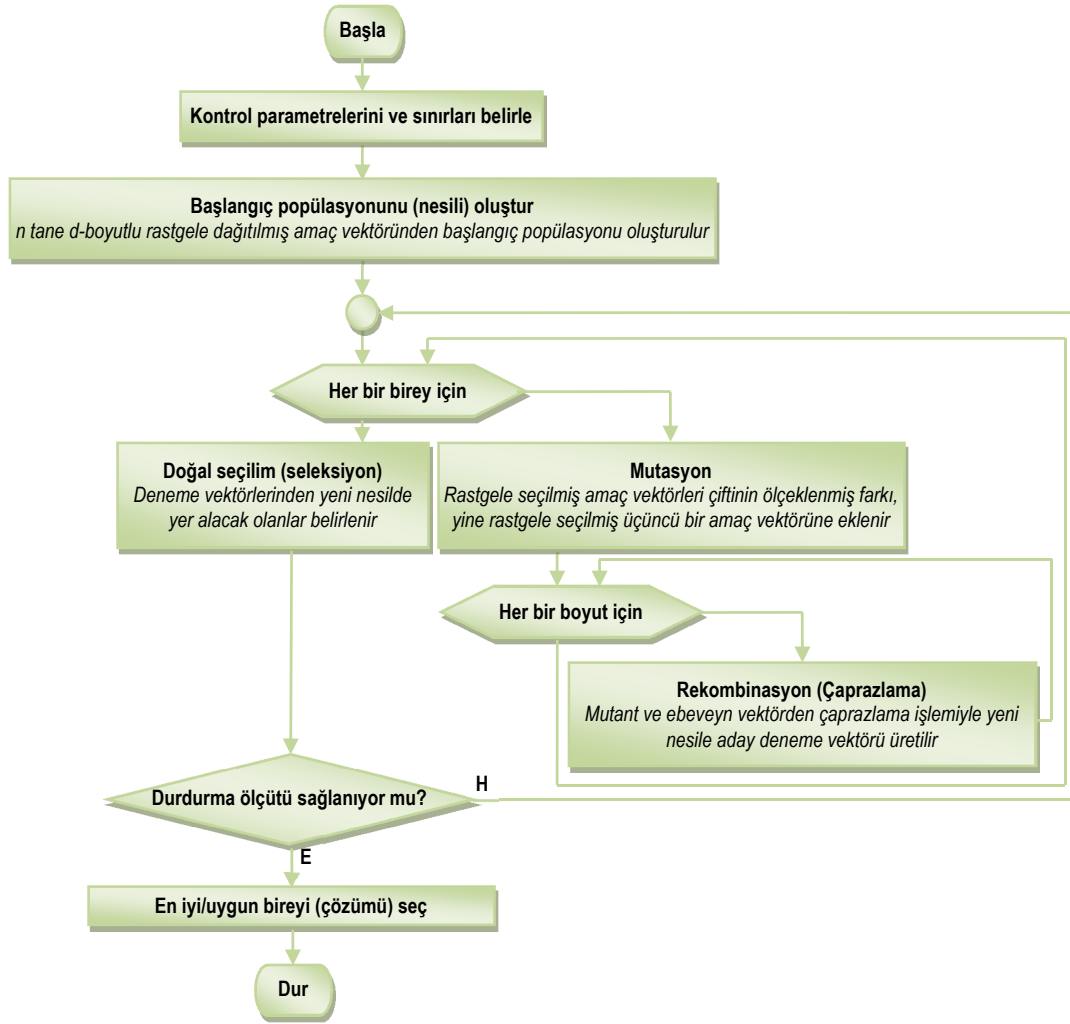
Genetik algoritmalar, ilk defa 1975 yıllarında John Holland, arkadaşları ve öğrencileri tarafından geliştirilerek kullanılmıştır. Doğada biyolojik sürece (evrime) dayanan bu algoritma, yönlendirilmiş rastgele araştırma/arama algoritmalarındandır. Araştırma/arama uzayındaki çözümlerin bazılarının yer aldığı başlangıç popülasyonu, her jenerasyonda (nesilde) doğal seçim (seleksiyon) ve tekrar üreme/türetme ile geliştirilmekte ve en kaliteli/iyi birey, en uygun (optimum) çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Genetik algoritmalar; deneysel ve pratik uygulamalarda, sınıflandırma problemlerinde, birçok alandaki optimizasyon problemlerinin çözümünde, makine öğrenmesinde, bilgi sistemlerinde vb. kullanılmaktadır. Genel olarak genetik algoritmadaki işlem adımları, Şekil 2'deki gibi özetlenebilir (Holland, 1975; Goldberg, 1989; Man ve ark., 1996; Karaboğa, 2011; Vatansever ve Şen, 2013; Simon, 2013).



Şekil 2:
Genetik algoritmaların genel işleyişi

3.2. Diferansiyel Gelişim Algoritması

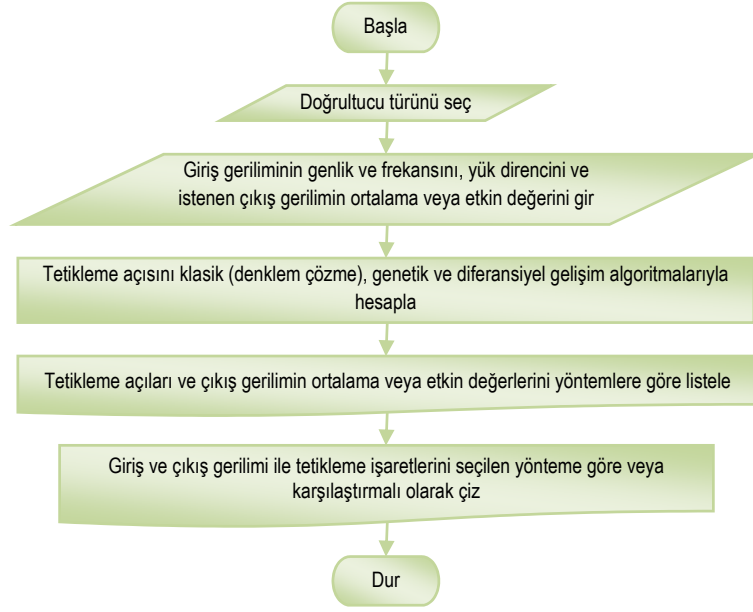
Diferansiyel gelişim algoritması, Storn ve Price tarafından 1995 yıllarında geliştirilmiştir (Storn ve Price, 1995). Diğer evrimsel algoritmalar gibi diferansiyel gelişim algoritması da popülasyon tabanlı bir algoritma olup d -boyutlu sürekli domendeki fonksiyonları küresel olarak optimize etmek için kullanılan doğrudan araştırma tekniğidir. DE algoritması; popülasyonda yeni (mutant) birey oluşturmak için mevcut iki birey arasındaki farkın ölçeklenmiş (ağırlıklandırılmış) versiyonunun üçüncü bireye eklenmesi temel fikrine dayanır. Uygulanması çok daha kolay ve basit olan DE'de; problemin olası çözümünü temsil eden popülasyondaki her birey, d -boyutlu vektördür. Şekil 3'te klasik DE algoritmasındaki genel işleyiş özetlenmektedir (Storn ve Price, 1995; Price ve ark., 2005; Karaboğa, 2011; Simon, 2013).



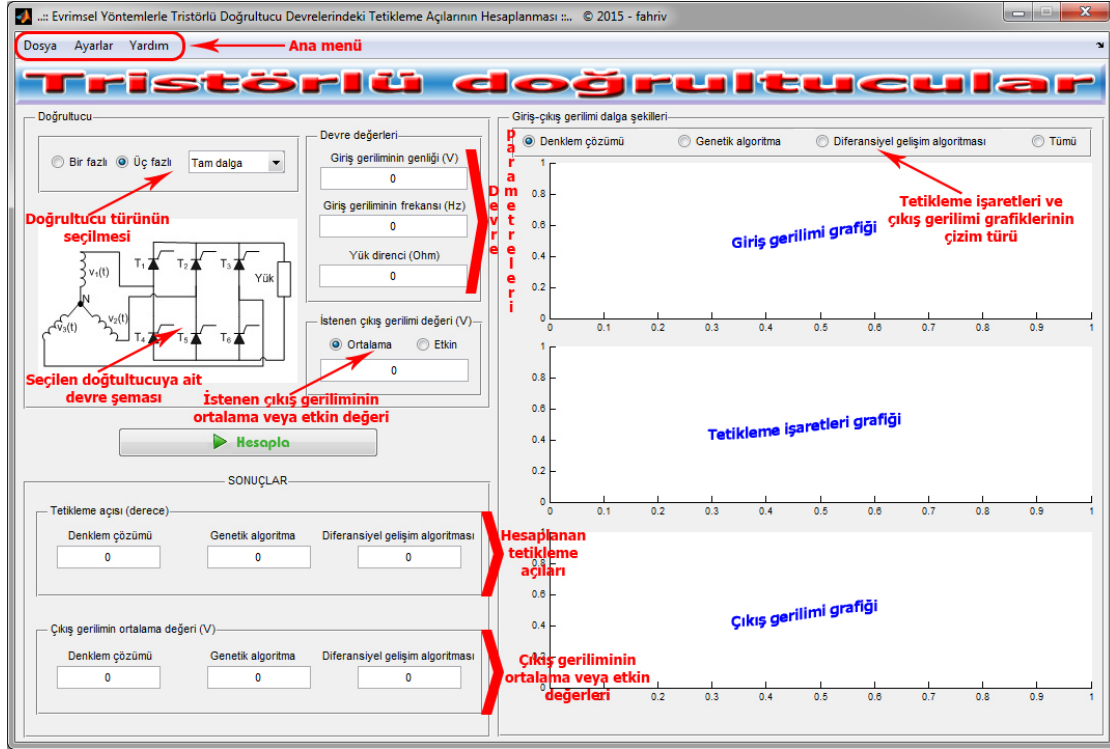
Şekil 3:
Diferansiyel gelişim algoritmalarının genel işleyişi

4. GELİŞTİRİLEN YAZILIM VE UYGULAMALARI

Gerçekleştirilen çalışmada; kullanıcının belirlediği tristörlü doğrultucu devrelerinden istenen çıkış geriliminin elde edilebilmesi için tristör veya tristörlerin tetikleme açılarını hem klasik hem de evrimsel yöntemlerle hesaplayan, kullanıcı dostu grafiksel bir arayüz programı tasarlanmıştır. İlgili açılar, klasik yöntem olarak Tablo 1'deki yaklaşık eşitlikler çözülerek elde edilmiştir. Çıkış geriliminin ortalama değerini veren ifadeler, ters trigonometrik işlemlerle çözülebilir. Ancak bir fazlı doğrultucuların çıkış gerilimlerinin etkin değerlerini veren ifadelerin çözümü bu kadar kolay değildir. Bu aşamada da sayısal kök bulma yöntemlerinden faydalanılmıştır (Vatansever, 2006). Aynı zamanda Tablo 1'deki ortalama ve etkin değer ifadeleri evrimsel yöntemlerden genetik ve diferansiyel gelişim algoritmaları kullanılarak çözülmüş/optimize edilmiştir. Optimizasyon işlemlerinde uygunluk/değerlendirme fonksiyonu olarak ilgili ifadeyle hesaplanan sonuç ile istenen sonucun farkının mutlak değeri ($|f_{hesaplanan} - f_{isteneni}|$) alınmıştır. Bunun yanında diğer hata fonksiyonları da kullanılabilir. MATLAB'da (Mathworks, 2007) geliştirilen yazılımın akış diyagramı Şekil 4'te, ana ekranı Şekil 5'te verilmektedir. Ana ekranda yer alan menü seçenekleriyle Tablo 2'deki işlemler gerçekleştirilebilmektedir.




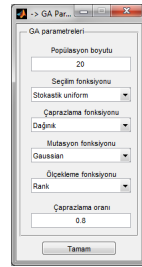
Şekil 4:
Geliştirilen yazılımın akış diyagramı



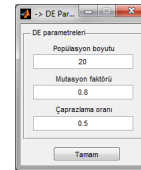
Şekil 5:
Geliştirilen yazılımın ana ekranı

Tablo 2. Ana menü seçenekleri

Menü	Seçenek	Görevi
Yeni Ctrl+N Kaydet Ctrl+S Yazdır Ctrl+P Göster Çıkış Ctrl+9		Yeni analiz/benzetim için ekranı temizler
	Kaydet	Sonuçları, seçime göre veri ve/veya resim formatında kaydeder
	Yazdır	Sonuçları yazıcıya gönderir
	Göster	Hesaplama süreleri veya iterasyonlarını gösterir
	Çıkış	Programı kapatır
Genetik algoritma Ctrl+G Diferansiyel gelişim algoritması Ctrl+D	Genetik algoritma	GA parametrelerini ayarlama penceresini açar (Şekil 6a)
	Diferansiyel gelişim algoritması	DE parametrelerini ayarlama penceresini açar (Şekil 6b)
İçerik Hakkında	İçerik	Program içeriği, kullanımı ve konularıyla ilgili pencereleri açar
	Hakkında	Programın sürüm bilgileri penceresini açar



(a)



(b)

Şekil 6:

GA ve DE parametrelerini ayarlama ekranları

Geliştirilen yazılımla istenen ortalama değerlere göre gerçekleştirilen örnek analiz/benzetim ekran görüntüleri Tablo 3 ve ayrıntılı karşılaştırmalı sonuçlar Tablo 4'te; istenen etkin değerlere göre gerçekleştirilen örnek analiz/benzetim ekran görüntüleri Tablo 5 ve ayrıntılı karşılaştırmalı sonuçlar Tablo 6'da verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan GA ve DE parametreleri (varsayılan değerleri), Şekil 6'da yer almaktadır.

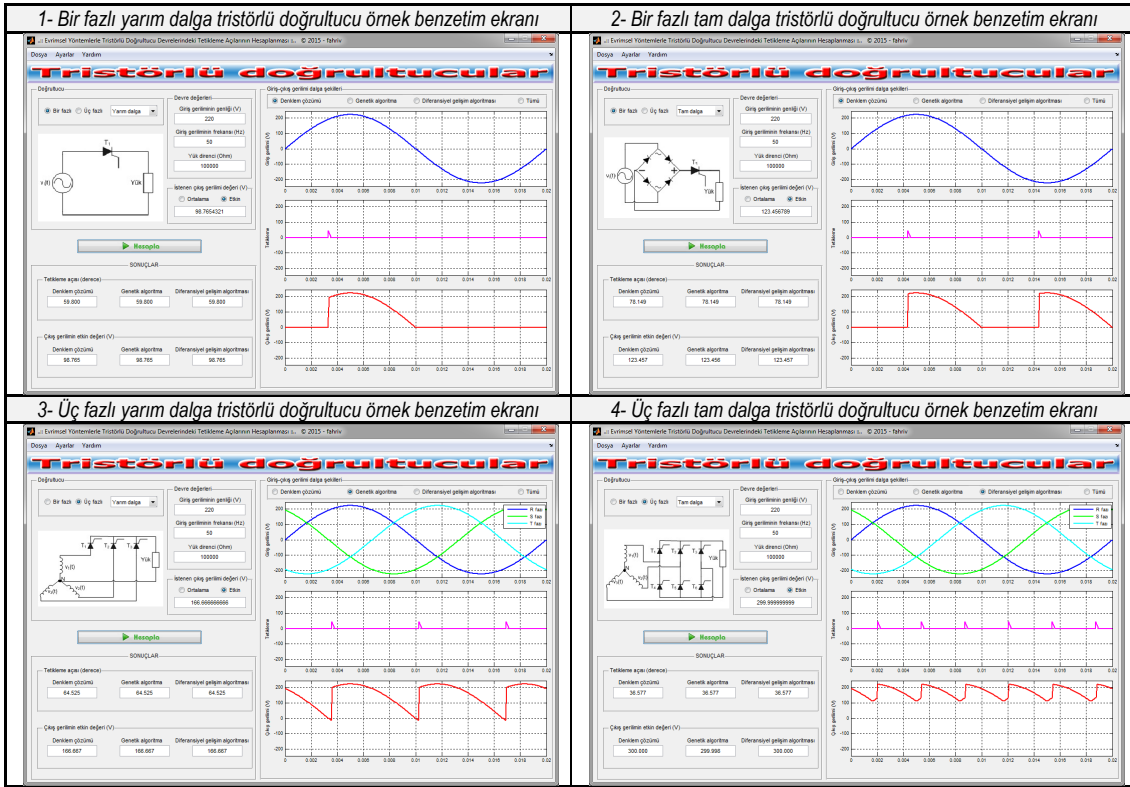
Tablo 3. Ortalama değerlere göre örnek benzetimlere ilişkin karşılaştırmalı sonuçlar

1- Bir fazlı yarım dalga tristörlü doğrultucu örnek benzetim ekranı	2- Bir fazlı tam dalga tristörlü doğrultucu örnek benzetim ekranı
3- Üç fazlı yarım dalga tristörlü doğrultucu örnek benzetim ekranı	4- Üç fazlı tam dalga tristörlü doğrultucu örnek benzetim ekranı

Tablo 4. Ortalama değerlere göre örnek benzetimlere ilişkin karşılaştırmalı sonuçlar

	Benzetim	Denklem çözümü	Genetik algoritma (GA)	Diferansiyel gelişim (DE)
1	Tetikleme açısı (derece)	87.2947745144114	87.2947978035697	87.2947747999674
	Çıkış gerilimi (V)	2.00000000000000	1.99999922455985	1.99999999049207
2	Tetikleme açısı (derece)	35.3817572733656	35.3823776374832	35.3817573145662
	Çıkış gerilimi (V)	127.123000000000	127.122560969261	127.122999970843
3	Tetikleme açısı (derece)	43.3706418805038	43.3712975049363	43.3706412474332
	Çıkış gerilimi (V)	177.007000000000	177.006518553194	177.007000464874
4	Tetikleme açısı (derece)	49.8616866254133	49.8617466226639	49.8616865572901
	Çıkış gerilimi (V)	234.567890000000	234.567598703212	234.567890330749

Tablo 5. Etkin değerlere göre örnek benzetimlere ilişkin karşılaştırmalı sonuçlar



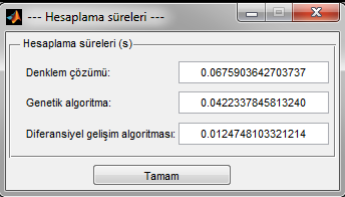
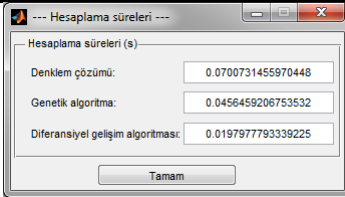
Tablo 6. Etkin değerlere göre örnek benzetimlere ilişkin karşılaştırmalı sonuçlar

	Benzetim	Denklem çözümü	Genetik algoritma (GA)	Diferansiyel gelişim (DE)
1	Tetikleme açısı (derece)	59.7995217066661	59.7997149601133	59.7995221261016
	Çıkış gerilimi (V)	98.7654321000000	98.7653338492899	98.7654318867581
2	Tetikleme açısı (derece)	78.1488729297993	78.1492140590556	78.1488706395502
	Çıkış gerilimi (V)	123.456789000000	123.456433177458	123.456791388889
3	Tetikleme açısı (derece)	34.5253682752622	34.5251636461386	34.5253683193687
	Çıkış gerilimi (V)	166.666666666000	166.666866920258	166.66666622836
4	Tetikleme açısı (derece)	36.5767643179801	36.5773118261165	36.5767643082006
	Çıkış gerilimi (V)	299.999999999000	299.998169631462	300.00000031693

Tablo 3-6'daki örnek sonuçlardan da görüldüğü gibi GA ve DE ile elde edilen tetikleme açıları, yüksek hassasiyet ve doğrulukla gerçek değerlerle (klasik çözüm yöntemi çözümleriyle) uyusmaktadır. Böylece sadece temel işlemlerle, az sayıda iterasyonlarla, kısa hesaplama süreleriyle evrimsel algoritmaların; güç elektroniğinin bu alanında da etkili ve verimli bir şekilde kullanılabilceği görülmektedir. Ayrıca yüksek hız gerektiren uygulamalarda, ters trigonometrik fonksiyonları hesaplamak veya doğrusal olmayan denklemleri çözmek için de evrimsel

yöntemlerden yararlanılabileceğini ortaya koymaktadır. Bu yöntemlerin mikroişlemcili sistemlere uyarlanmasıyla da daha verimli bellek kullanımı, daha yüksek hız ve performans sağlanabilir. Belirtilen hız avantajı; AMD Fx(tm)-8350 Eight-Core Processor 4.00 Ghz işlemci, 16 GB RAM, 64 bit masaüstü bilgisayarla gerçekleştirilen örnek hesaplama sürelerinin yer aldığı Tablo 7'de görülmektedir. Ayrıca program ile kolaylıkla elde edilen tetikleme açıları, ilgili alanlardaki mühendislik tasarımları ve araştırmalarında da kullanılabilir.

Tablo 7. Örnek hesaplama süreleri

Tablo 6'daki 1. benzetim	Tablo 6'daki 2. benzetim
	

Ayrıca geliştirilen program, ilgili doğrultucu devreleri hakkında teorik bilgileri de kullanıcıya sunarak çalışma prensiplerini açıklamakta, parametre değişimlerinin etkilerini etkileşimli olarak gösterebilmekte ve karşılaştırmalı analizlere olanak tanımaktadır. Böylece ilgili konuları öğrenmek isteyenlere, etkileşimli bir eğitim ortamı sağlamaktadır.

5. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen çalışmada; bir ve üç fazlı tristörlü doğrultucu devrelerinde, istenen çıkış gerilimin elde edilebilmesi için en uygun (optimum) açının/açıların hesaplanması için – eğitim amaçlı da kullanılabilecek – bir yazılım geliştirilmiştir. Kullanıcının seçtiği devre türü ve istediği çıkış gerilimine göre tetikleme açısı/açıları hem klasik yöntem olarak denklemler çözümleriyle hem de evrimsel algoritmalarından genetik ve diferansiyel gelişim algoritması kullanılarak hesaplanmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre giriş-çıkış gerilim grafikleri, tetikleme işaret/ışaretleri tekil veya karşılaştırmalı olarak listelenip çizdirilebilmekte; sonuçlar/grafikler hem veri hem de resim biçimlerinde kaydedilebilmekte/yazdırılabilmektedir. Ayrıca ilgili devreler hakkında teorik bilgiler de sunabilmektedir. Geliştirilen yazılım ile yapılan benzetimlerde; genetik algoritmalar ve diferansiyel gelişim algoritmalarının tristörlü doğrultucu devrelerindeki tetikleme açısı optimizasyonlarında da hızlı, verimli ve etkin bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Agrawal, R., Bharadwaj, S.K., Kothari, D.P. (2013). An Educational and Professional Simulation Tools in Power Systems and FACTS controllers- An Overview, *International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering*, 2(2), 91-96.
2. Chang, Y-P., Wu, C-J. (2005). Optimal Multiobjective Planning of Large-Scale Passive Harmonic Filters Using Hybrid Differential Evolution Method Considering Parameter and Loading Uncertainty, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(1), 408-416.
3. Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company Inc., USA.
4. Holland, J.H. (1975). *Adaption in Natural and Artificial Systems*, Cambridge, MA: MIT Press.

5. <https://www.pantechsolutions.net/power-electronics/introduction-of-three-phase-half-full-wave-converter>, Erişim tarihi: 24.04.2015, Konu: *Introduction of Three Phase Half/Full Wave Converter*.
6. Karaboğa, D. (2011). *Yapay Zekâ Optimizasyon Algoritmaları*, Nobel Yayınevi, Ankara.
7. Liserre, M., Dell'Aquila, A., Blaabjerg, F. (2003). An overview of three-phase voltage source active rectifiers interfacing the utility, *IEEE Bologna PowerTech Conference*, Bologna, Italy.
8. Liserre, M., Dell'Aquila, A., Blaabjerg, F. (2004). Genetic Algorithm-Based Design of the Active Damping for an LCL-Filter Three-Phase Active Rectifier, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(1), 76-86.
9. Man, K.F., Tang, K.S. and Kwong, S. (1996). Genetic Algorithms: Concepts and Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 43(5), 519-534.
10. Maswood, A.I., Wei, S. (2005). Genetic-algorithm-based solution in PWM converter switching, *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, 152(3), 473-478.
11. MATLAB, The MathWorks, Inc., (2007).
12. McCarty, M., Taufik, T., Pratama, A., Anwari, M. (2009). 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.
13. Mehar, H. (2013). The Case Study of Simulation of Power Converter Circuits Using Psim Software in Teaching, *American Journal of Educational Research*, 1(4), 137-142.
14. Memon, A.P., Zafar, A., Keerio, M.U., Adil, W.A., Ali, A.A. (2014). Experimental Study and Analysis of Harmonics Generation in Uncontrolled and Controlled Rectifier Converters, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(1), 1343-1350.
15. Napravnik, T., Ziska, P., Jakovenko, J. (2013). Novel Model Calibration Method Based on Differential Evolution Used for SCR Model Fitting, *2013 IEEE 16th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits & Systems (DDECS)*, Karlovy Vary, 297-298.
16. Paul, R.P., Rathod, G.B., Bareja, M., Maru, P. (2014). Performance Comparison of Single & 3-Ø Controlled and Uncontrolled Rectifier Using Matlab-Simulink, *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 5(2), 2107-2111.
17. Pires, V.F., Silva, J.F.A. (2002). Teaching Nonlinear Modeling, Simulation, and Control of Electronic Power Converters Using MATLAB/SIMULINK, *IEEE Transactions on Education*, 45(3), 253-261.
18. Price, K.V., Storn, R.M., Lampinen, J.A. (2005). *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*, Springer, Berlin.
19. Rashid, M.H. (2011). *Power Electronics Handbook*, Third Ed., Butterworth-Heinemann, USA.
20. Shaban, A.A.M. (2009). A Matlab / Simulink Based Tool for Power Electronic Circuits, *Proceedings of World Academy Of Science, Engineering and Technology*, vol. 37, 274-279.
21. Shaffer, R. (2006). *Fundamentals of Power Electronics with MATLAB*, Charles River Media, Boston, Massachusetts.
22. Silva, J. (1996). Matlab/Simulink Model for Thyristor Rectifiers, *Proc. EPE-IEEE PEMC'96*, vol. 3, 414-418.
23. Simon, D. (2013). *Evolutionary Optimization Algorithms*, John Wiley & Sons, New Jersey.

24. Solanki, A. (2014). Simulation & Performance Parameters Analysis of Single- Phase Full Wave Controlled Converter using PSIM, *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2(3), 410-414.
25. Stevanović, R. (2009). A Thyristor Full-Wave Rectifier With Full Control of the Conducting Angle, *Electronics*, 13(1), 77-81.
26. Storn, R., Price, K.V. (1995). *Differential Evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces*, Technical Report TR-95-012, ICSI.
27. Vatansever, F. (2006). *İleri Programlama Uygulamaları*, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
28. Vatansever, F., Şen, D. (2013). Genetik Algoritma Tabanlı PID Kontrolör Simülatörü Tasarımı, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(2), 7-18.
29. Vatansever, F., Yalcin, N.A. (2014). Calculation of Triggering Angle of Thyristor Rectifiers based on Genetic Algorithm, *International Scientific Symposium Electrical Power Engineering EPE2014*, Varna, 93-95.

Alınma Tarihi (Received) : 06.11.2014
Düzeltilme Tarihi (Revised) : 30.04.2015
Kabul Tarihi (Accepted) : 19.05.2015