3 Fazlı Tam Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu Devrelerinde Modların Belirlenmesi ve Performans Parametrelerinin Analizi

İbrahim Atlı[1], Mehmet Akbaba[1]

[1] Karabük Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Karabük

ibrahimatli@karabuk.edu.tr, m.akbaba@karabuk.edu.tr

Özet: Doğrultucu devreler güç elektroniği devreleri arasında önemli yer tutmaktadır. Bu devrelerin performans parametrelerini hesaplayan çok sayıda paket program bulunmaktadır. Ancak bu paketlerin çoğu eğitim amaçlı olmaktan çok profesyonel amaçlıdır ve genellikle performans parametreleri nümerik olarak hesaplanır, sonuç bir programın çıktısında birer sayı olarak elde edilir. Bu yaklaşım güç elektroniği eğitimi alan öğrencilere yararlı olmakla birlikte, doğrultucu devrelerin çözümleri ile devrenin fiziksel davranışından kaynaklanan çalışma modları arasında açık bir ilişki kurmazlar. Bu çalışmada tüm doğrultucu devrelerin çalışma modlarını analitik olarak analiz edip performans parametreleri ile çalışma modları arasında açık ilişkiler kurmak amacıyla geliştirilen yeni bir yazılımdan bir örnek olarak, 3 fazlı tam kontrollü doğrultucu devre ele alınmıştır. Söz konusu devrenin davranışı çalışma modlarına göre analiz edilmiş ve performans parametreleri bu yaklaşıma göre dökümlenmiştir. Modları birbirinden ayıran kritik ateşleme açısı analitik bir ifade ile belirtilmiştir.

Anahtar Sözcükler: 3 Fazlı Tam Kontrollü Doğrultucular, Çalışma Modları, Performans Parametreleri, Kritik Ateşleme Açısı Hesaplama.

Performance Parameter Analysis and Determining Modes of 3-Phase Fully Controlled Rectifiers

Abstract: Rectifiers are important among power electronics circuits. There are a lot of computer software's that calculate performance parameters. However most of them are not for educational purposes, they are generally for professional purposes. Thus, these kinds of packages give results as a numerical number. They are beneficial to the students who take power electronic courses but these packages do not provide a relation between physical behavior of circuits and operating modes. In this study, a computer package has been developed and three phase fully controlled full wave rectifier circuit are chosen to show a relation between operating modes and performance parameters. The software also differentiates operating mods from each other and gives an analytical expression of critical firing angle which causes to change mods.

Keywords: Three Phase Fully Controlled Rectifiers, Operating Modes, Performance Parameters, Calculation of Critical Firing Angle.

1. Giriş

Doğrultucu devreler evlerden işyerlerine, işyerlerinden sanayiye kadar birçok alanda uygulamaları olan bir mühendislik konusudur. Güç elektroniği uygulamalarında yer alan bu konu, teori ve uygulama aşamaları gerektiren ve günümüzde sürekli artan bir eğilimi olan çalışma alanıdır. Üniversitelerin ilgili anabilim dallarındaki derslerde öğrencilere güç elektroniği ilkelerini kavratmak adına doğrultucu devreler gösterilmektedir[1]. Bu çalışmada bilgisayar ortamında 3-Fazlı Tam Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu devresinin performans parametreleri geliştirilen yazılım tarafından bulunmuş ve modların incelenmesi sağlanmıştır. Bugüne kadar birçok firma güç elektroniği devrelerinin benzetimini (simülasyonunu) bilgisayar ortamında yapmıştır. Pantech Solutions, Matlab-Simulink, PSpice, PSim, Power Device Simulator(Panasonic), EMTP(Electro Magnetic Transient Program) gibi bazı firmaların yaptıkları yazılımlarda devrenin istenilen yerinden geçen akım ve voltaj gösterilebilmektedir fakat performansa etki eden parametreler ve devrenin modlara ayrılmasına ilişkin bilgiler verilmemektedir. Sonuçlar birer nümerik değer olarak alınmaktadır [2, 3].
Tristörlerin tetikleme açıları($\propto$) değiştirilerek, 3-fazlı doğrultucunun ortalama çıkış gerilimi değiştirilebilir yani kontrol edilebilmektedir [4]. Eğer tristörlerin tetikleme açıları kritik ateşleme açı($\propto_c$) değerinden büyükse devre sürekli moddan, süreksiz moda geçer ve ortalama çıkış değeri değişir. Ortalama çıkış değerini etkileyen performans parametreleri ve modlar 2. bölümde detaylı olarak açıklanmıştır.

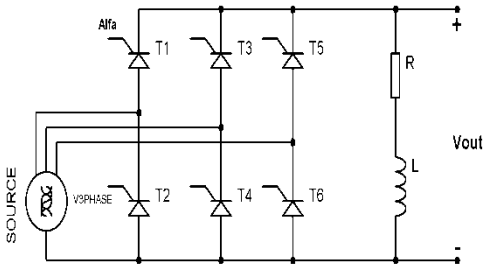
Bu çalışmadaki yazılım Microsoft Visual Studio ortamında geliştirilmiş olup C# programlama dili kullanılarak yazılmıştır.

Microsoft Visual Studio, Microsoft tarafından geliştirilen bir IDE(Integrated Development Entertainment) ortamıdır. Windows Form uygulamaları, web siteleri, web uygulamaları ve web servisleri ile birlikte konsol ve grafiksel kullanıcı arayüzü uygulamaları geliştirmek için kullanılır [5].

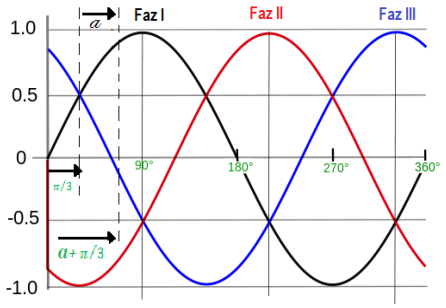
C#, görsel uygulamalar geliştirmek için C++, Visual Basic, Java gibi programlama dillerine alternatif olarak Microsoft Visual Studio ortamında yazılım yapma imkânı sunan bir uygulama geliştirme dilidir [6].

2. Üç Fazlı Tam Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu Devresinin Çalışma Prensibi

Doğrultucu devrelerinin beslediği yükler çoğunlukla seri bağlı direnç(R) ve indüktanstan(L) oluşmaktadır. Bu nedenle çalışmada yük olarak seri bağlı R-L devresi alınacak ve analiz buna göre yapılacaktır. 3-Fazlı Tam Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu Devresinin 6 güç tristörü, 3-faz kaynak, yük(direnç ve indüktor) ile kullanımı Şekil-1'deki gibidir.



Şekil 1: Üç Fazlı Tam Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu



Şekil 2: Doğal Komutasyon Noktası

Şekil1'deki numaralandırılmış tristörlerin iletime geçiş açıları Tablo-1'de gösterilmiştir. Bu tablodan da anlaşıldığı gibi yük sürekli olarak faz arası gerilim ile çalışacaktır ve yüke uygulanan gerilim V(t) = V_m * sin($wt+\propto+\pi/3$) olarak alınacaktır. Burada çıkış gerilimi referans noktası doğal komutasyon noktası alındığından, sinüs ifadesi içinde $\pi/3$ faz farkı görülmektedir. Doğal komutasyon noktası $\propto=0$ iken akım akışının bir sonraki faz arası gerilimine geçtiği noktadır (Bakınız Şekil2). Devrenin çıktı cevabı yukarıdaki Tablo-1'den yararlanılarak kolaylıkla bulunabilir fakat devreden geçen akımın hesabı Eşitlik1'deki denklemin diferansiyel hesabı yapılarak bulunur.

$V_m*\sin(wt+\propto+\pi/3)=i*R+L*di/dt$ (1)

$i(wt)=(V_m/Z)*\sin(wt+\propto-\emptyset+\pi/3)+A*e^{-\omega t/tan\emptyset}$ (2)

Devrenin periyodunun $\pi/3$ olduğu göz önüne alınırsa, devreden geçem akım $\pi/3$ aralıklarla tekrarlayacaktır. O halde akım denklemindeki A sabit değeri bulunmak istenirse: i(0) = i($\pi/3$) eşitliğini kullanılır. Buradan A değeri 3 numaralı denklemdeki gibi bulunur.

$A=-(V_m/Z)*\sin(\propto-\emptyset)/(1-e^{(-\pi/(3*tan\emptyset))})$ (3)

Açı Değeri(°)	Tristör Eşlerinin İletimi
30°-90°	T1-T4
90°-150°	T1-T6
150°-210°	T3-T6
210°-270°	T3-T2
270°-330°	T5-T2
330°-360° ve 0°-30°	T5-T4

Tablo 1:Tristör Eşlerinin İletime Geçiş Açıları

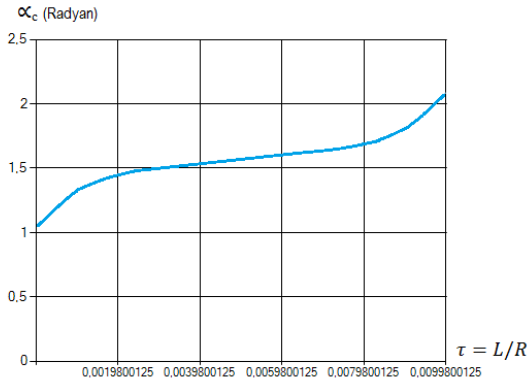
2.1. Devrenin Kritik Açısının Hesabı

Sürekli akım bölgesinin başında veya sınırında, ateşleme açısı kritik ateşleme açısına eşit olduğunda akım değeri 0(sıfır) olur. 2 numaralı akım denkleminde $wt=\propto_c$ için akım sıfıra eşitlenerek kritik ateşleme açısı bulunur (4 Numaralı Denklem).

$\sin(\propto_c+\pi/3-\emptyset)+A=0$ (4)

4 numaralı denklemde $\propto_c$ değişkeni yalnız bırakılırsa, kritik ateşleme açısının yalnızca yükün empedans açısı $\emptyset$'ye bağlı olduğu görülür (Bakınız 4 Numaralı Denklem).Yani devrenin kritik ateşleme açısı değeri bağlanan direnç ve indüktans değerleriyle değişmektedir. Aşağıda kritik ateşleme açısının sabit bir direnç (R) değeri ile değişken L(0.0001H ile 0.2H Arasında) değeri için, yükün zaman sabiti(τ) ile değişimi Şekil-3'teki grafiğe dökülmüştür.

$\propto_c=\emptyset+\tan^{-1}(\sqrt{3}(1-e^{(-\frac{\pi}{3*\tan\emptyset})})/(1+e^{(-\frac{\pi}{3*\tan\emptyset})})$ (5)



Şekil 3:$\propto_c$ Değerinin R=20, L=0.0001 - 0.2 Arasındaki Değişimi

2.2. Devrenin Modlarının İncelenmesi

Şekil-1'deki 3-Fazlı Tam Kontrollü Tam Doğrultucu Devresinin 2 modu vardır:

1. Sürekli Hali (Continuous)
2. Süreksiz veya Kesikli Hali (Discontinuous)

2.1'de bahsedilen açı değeri mod değişiminin olduğu kritik ateşleme açısı değeridir. Eğer tristörlerin ateşleme açısı kritik açıdan büyük olursa akım süreksiz olur ve devre Mod-2'de çalışır. Eğer ateşleme açısı kritik açıdan

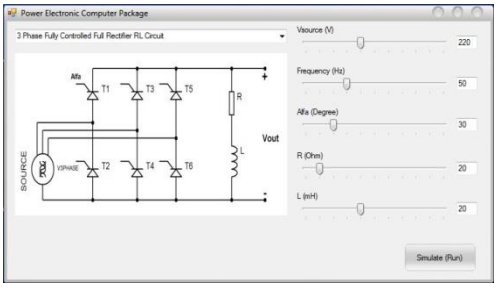
küçük veya eşit olursa devre Mod-1'de çalışır ve akım sürekli olur. Bu söylenenler matematiksel olarak aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir:

$\alpha \leq \propto_c$ → Mod1:Sürekli Hal
$\alpha > \propto_c$ → Mod2:Süreksiz Hal

Devre sürekli halde çalıştığında(Mod-1) ortalama çıkış gerilimi $3 * (Vm/\pi) * \cos(\propto)$ olmaktadır. Görüldüğü üzere çıkış gerilimi tristörlerin ateşleme açısı ile bağlantılıdır. Devre süreksiz halde çalıştığında(Mod-2) ise ortalama çıkış gerilimi $3 * (Vm/\pi) * (\cos(\propto + \pi / 3) - \cos(\propto + \pi / 3 + \theta_c))$ olmaktadır [7]. θ_c akımın sıfıra eşit olduğu açı değeridir ve nümerik yöntemler ile hesaplanmaktır ($i(\theta_c) = 0$ denklemi nümerik yöntemle çözülür.).

3. Yazılım

Geliştirilen yazılım C# programlama dili ile yazılmış olup, Microsoft Visual Studio ortamında masaüstü uygulaması şeklinde hazırlanmıştır. Yazılımda kullanılan 17 adet güç elektroniği devresi, üniversitedeki



Şekil 4 : Program Arayüzü

derslerde eğitim amaçlı tercih edilen ve en sık kullanılan devrelerdir. Öğrenci yazılımı kullanarak devrenin tüm analizini tek bir formda görecek, hangi parametrelerin sonucu nasıl etkilediği hakkında yorum yapabilecektir. Böylece dersi daha iyi anlamanın yanında yorum yapma yeteneği kazanabilecektir.

Geliştirilen yazılımın kolay kullanılabilir ve anlaşılabilir olması amaçlanmıştır ve arayüzü Şekil-4'deki gibi hazırlanmıştır. Görüldüğü üzere öğrenci 3 Fazlı Tam Kontrollü Tam Doğrultucu Devresinin çalışmasını değiştirebilecek tüm parametreleri görebilmektedir. İstenilen değerlerin ayarlanması ile devrenin tüm analizi yapılarak öğrenciye rapor formu verilecektir. Raporda devreden geçen akımın denklemi, ortalama rms değerleri, kritik açı değerleri ve çıkış gerilimi açık olarak sunulmuştur. Örnek bir çıktı 4. bölümde açıklanmıştır.

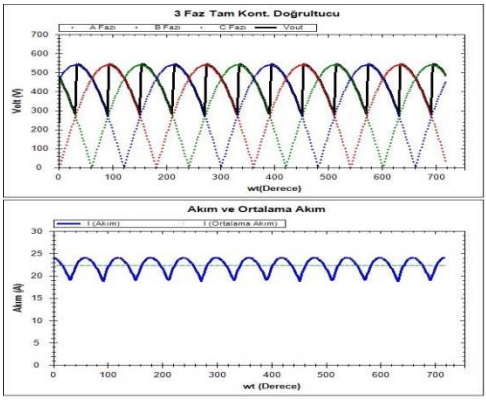
Eğitim amaçlı geliştirilen bu yazılım ile öğrenciler daha iyi analiz yapacak ve bu sonuçlara yorum getirebileceklerdir.

4. Sonuçlar

Matlab-Simulink, PSpice, EMTP, PSim gibi firmaların bilgisayar paketleri daha çok profesyonel amaçlı olup, sonuçlar sayısal değer olarak verilir. Eğitimsel amaçlı düşünüldüğünde sadece sonuçların verilmesi yeterli kalmamaktadır. Örneğin 3 Fazlı Tam Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu devresi için akımının sürekli halde (Mod-1) ve süreksiz halde (Mod-2) çıkışa verdiği gerilim farklı parametrelere bağlıdır. Aynı şekilde güç faktörü, dalgalanma faktörü(ripple factor), RMS(Root Mean Square) değerleri devrenin çalışma moduna göre farklı parametrelerle hesaplanmaktadır. Burada devreyi modlara ayırıp, daha detaylı bilgi verme amaçlı bir yazılım geliştirilmiştir. Örneğin V_f=220V, R=20Ω, $\propto$= 30°, L =0.02H değerlerinde devrenin çıkış geriliminin yanı sıra akım, ortalama değerler, kritik ateşleme açısı ve devrenin hangi modda çalıştığı bilgisi otomatik olarak sunulmaktadır. Ayrıca devrenin akım denklemi de gösterilmektedir. Dolayısıyla bu yazılımı kullanan öğrencinin devrenin çalışması ile ilgili herhangi bir problemi kalmamaktadır. Yukarıdaki değerler ile geliştirilen yazılımın ürettiği sonuç Şekil-5'de mevcuttur. Şekil 5'den

görüldüğü gibi akım sürekli halde (Mod-1) çalışmaktadır ve kritik ateşleme açısı 1.32 radyan (75,64°) olduğu bilgisi verilmektedir. Yani tristörlerin ateşleme açısı 75,64 dereceden büyük olursa devre Mod-2'de çalışacak ve güç faktörü, dalgalanma faktörü, ortalama değerler ve rms değerleri değişecektir. Aynı değerler ile $\propto = 90°$ girilerek devre yeniden çalıştırılmış ve devrenin Mod-2 de çalıştığı görülmüştür.
Ateşleme açısının, kritik ateşleme açısı üzerinde etki etmediği görülmüştür. Aynı şekilde Mod-2'de çalıştırılan devrede güç faktörünün ve ortalama gerilimin daha düşük olduğu görülerek devrenin performansı hakkında da açık bir yorum yapılabilmektedir. Şekil-5 ve Şekil-6'da Mod-1 ve Mod-2 için programın verdiği çıktı gösterilmiştir. Programın çıktısından da görüleceği gibi devrenin bütün parametreleri hesaplanmış ve sunulmuştur.

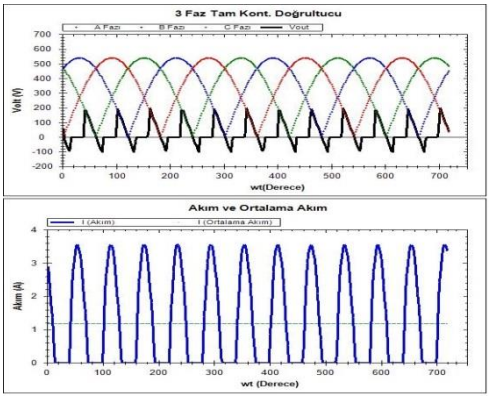
Bu bilgisayar paketi üniversitelerde eğitim amaçlı kullanılarak, öğrencilere doğrultucu devreleri daha iyi kavrama yetisi kazandıracaktır.



Şekil 5: Mod-1

Programın Çıktıları:

V_f=220V, f=50Hz, R=20Ω, $\propto = 30°$, L=0.02H iken;
Devre Mod-1(Sürekli Halde)de çalışmaktadır.
Devrenin Kritik ateşleme açısı=1,320 Radyan, 75.639 Derece.
Yük Geriliminin Ortalama Değeri (3*Vfaz*Cos(alfa)/PI) = 445,745V
Yük Akımının Ortalama Değeri = 22,287A
Vrms =453,034V (Yük)
Irms = 22,339A (Yük)
Güç Faktörü (Power Factor) = 0,986
Dalgalanma Faktörü (Ripple Factor) = 0,182
Akım Denklemi:
i(wt)=25,706* (sin(wt+1,266)-0,225* e^(-wt/ tan(0,304)))



Şekil 6:Mod-2

V_f=220V, f=50Hz, R=20Ω, $\propto = 90°$, L=0.02H iken;
Devre Mod-2(Süreksiz Halde)de çalışmaktadır.
Devrenin Kritik ateşleme açısı=1,320 Radyan, 75.639 Derece
Yük Geriliminin Ortalama Değeri=23,626V
Yük Akımının Ortalama Değeri=1,181A
Vrms =78,218V (Yük)
Irms = 1,938A (Yük)
Güç Faktörü(Power Factor)=0,496
Dalgalanma Faktörü (Ripple Factor) =3,156
Akım Denklemi:
i(wt) = 25,706* (sin(wt+2,314)-0,989* e^(-wt / tan(0,304)))

4. Semboller Listesi

f	Frekans
w	Açısal Frekans (Radyan)
$\emptyset = \tan^{-1}\left(\frac{wL}{R}\right)$	Direnç ve indüktansın birlikte oluşturdukları faz farkı
V_f	Faz Gerilimi Etkin Değeri
$V_m = V_f * \sqrt{6}$	Faz Arası Gerilimin Etkin Değeri
$Z = \sqrt{R^2 + (wL)^2}$	Devrenin Empedansı
$\propto$	Tristörlerin Ateşleme Açısı
$\propto_c$	Kritik Ateşleme Açısı

5. Kaynaklar

[1] Hakan IŞIK, Okan ÖZGÖNENEL, Cemil SUNGUR, "Güç Elektroniği Devrelerinin Benzeşiminde Kullanılan Bilgisayar Teknikleri", **Teknik Online Dergi**, Cilt 3, Sayı: 1-2004.

[2] S.Albert Alexander, T.Manigandan, M.Deepakkumar, R.Vishnu Vardhan, "A Comparison of Simulation Tools for Power Electronics", **Proceedings of International Simulation Conference**, ISCI, 2012

[3] Ravi Shankar Singh, Byaktiranjan Pattanayak, Shankar Kumar, "Power Electronics: Computer Simulation and Analysis", Graduate Thesis, Electrical Engineering, National Institute Of Technology Rourkela

[4] "Üç-Fazlı Tam Dalga Tam-Kontrollü Doğrultucu", **Deney Föyü 3-5**, Karadeniz Teknik Üniversitesi

[5] Microsoft Visual Studio, http://tr.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Visual_Studio, 06.11.2013

[6] Mustafa Murat İnceoğlu, "Bir Eğitim Kurumu için Etkileşimli Sesli Yanıt Sistemi", Ege Üniversitesi, **The Turkish Online Journal of Educational Technology (TOJET)** , ISSN: 1303-6521 Volume 3 Issue 2 Article 17

[7] Daniel W. Hart, "Power Electronics", 1st Edition, 2010.