

PAPER DETAILS

TITLE: Bipolar ve Unipolar SPWM Tekniklerinin Düşük Maliyetli Sistemlerde Deneysel İncelenmesi

AUTHORS: Serdar Yılmaz,Hüseyin Yıldız

PAGES: 915-931

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2988203>



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Bipolar ve Unipolar SPWM Tekniklerinin Düşük Maliyetli Sistemlerde Deneysel İncelenmesi

 Serdar YILMAZ ^a,  Hüseyin YILDIZ ^{b, *}

^a İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

^b İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: huseyin.yildiz@iuc.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1259818

Öz

Doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) dönüştüren invertör tasarımları, kullanım alanına bağlı olarak maliyet, gürültü ve uyarlabilirlik bakımından farklı özelliklerde sistemlere ihtiyaç duymaktadır. Tasarım ihtiyaçlarına bağlı olarak, yüksek performans veya düşük maliyetli invertör sistemleri ve algoritma tasarımları yapılmaktadır. Çalışmada düşük maliyetli sistemler için, ATmega2560 mikrodenetleyici ve BTS7960S motor kontrol kartı kullanılarak bipolar ve unipolar Sinüzoidal Darbe Genişliği Modülasyonu (SPWM) teknikleri incelenmiş, düşük güçlü indüksiyon motoru kullanılarak farklı modülasyonların hız kontrol kabiliyetine etkisi deneysel olarak çalışılmıştır. 24V ve 20A güç ünitesi ile beslenen sistemde gerilim trafo kullanılarak 220 volta yükseltilmiştir. Motor çalışması ve çıkış akımı sinyalleri 10Hz ile 100Hz sinyal frekansı aralığında raporlanarak, belirtilen frekans aralığında çıkış sinyallerinin analizleri yapılmıştır. Bipolar ve unipolar SPWM algoritmaları için farklı frekans değerlerine ait toplam harmonik bozulma (THD) ve ortalama kare hatası (RMSE) büyüklükleri hesaplanarak yorumlanmıştır. Çalışmada düşük maliyetli devre elemanları kullanılarak bipolar ve unipolar SPWM algoritmalarının her ikisinin de hız kontrolü uygulamalarında kullanılabileceği, unipolar SPWM algoritmasının bipolar SPWM algoritmasına göre daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Unipolar SPWM, Bipolar SPWM, Invertör, İndüksiyon motor kontrolü

Experimental Investigation of Bipolar and Unipolar SPWM Techniques in Low Cost Systems

ABSTRACT

Inverter designs that convert direct current (DC) to alternating current (AC) require systems with different features in terms of cost, noise and adaptability depending on the usage area. Depending on the design requirements, high performance or low cost inverter systems and algorithm designs are realized. In the study, bipolar and unipolar Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) techniques were investigated for low-cost systems using ATmega2560 microcontroller and BTS7960S motor control card, and the effect of different modulations on speed control capability was experimentally studied by using a low-power induction motor. In the system fed with 24V and 20A power units, the voltage was increased to 220 volts by using a transformer. Motor operation and output current signals were reported in the signal frequency range of 10 Hz to 100 Hz, and output signals were analyzed in this frequency range. Total harmonic distortion (THD) and mean square error (RMSE) sizes of different frequency values for bipolar and unipolar SPWM algorithms were calculated and interpreted. In the study, it has been shown that both bipolar and unipolar SPWM algorithms can be used in speed control applications by using low-cost circuit elements, and unipolar SPWM algorithm gives better results than bipolar SPWM algorithm.

Keywords: Unipolar SPWM, Bipolar SPWM, Inverter, Induction motor control

I. GİRİŞ

İnvertörler, doğru akımı (DC) alternatif akıma (AC) dönüştüren devre ve sistem tasarımlarıdır. Literatürde her biri kendi avantaj ve dezavantajlarına sahip farklı invertör tasarımları mevcuttur. En yaygın türleri, kare dalga invertörler, sinüs dalga invertörler, çok seviyeli invertörler ve Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM) invertörleri olarak sıralanabilir. Kullanıcı ihtiyaçlarına uygun olacak şekilde yüksek performanslı veya düşük maliyetli olmak üzere çok çeşitli tasarımlar gerçekleştirmek mümkündür. Örneğin; PWM invertörleri, AC dalga formunu oluşturmak için PWM yöntemini kullanan invertörlerdir. Yüksek güçlü uygulamalarda kullanılabilir ve düşük harmonik bozulma ile yüksek kaliteli bir çıkış dalga formu üretebilirler [1, 2]. Çok seviyeli invertörler ise; bir çıkış voltajı dalga formu üretmek üzere tasarlanmıştır; örneğin, üç seviyeli bir invertör, üç farklı voltaj seviyesi üretir. Bu invertörler, rüzgâr ve güneş enerjisi sistemleri gibi yüksek güçlü uygulamalarda kullanılır ve düşük harmonik bozulma ile yüksek kaliteli bir çıkış dalga formu üretmek için tasarlanmaktadır. Bu kapsamda SPWM tekniği, rüzgâr ve güneş enerji paneli DC-AC dönüşüm devreleri, indüksiyon ısıtma devreleri, AC motor sürücü sistemleri, çok katlı invertör DC-AC güç dönüşüm devreleri ve DC batarya şarj devrelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1, 2].

2007 yılında Erkan Deniz ve ekibi tarafından gerçekleştirilen yayında, beş seviyeli izole DC kaynaklı kaskat inverterin SPWM tekniği ile kontrollü çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, çok seviyeli inverterler, taşıyıcı SPWM ve kaskat inverter hakkında simülasyon deneyler yapılarak veriler sonuçlar tartışılmıştır. 3 fazlı kaskat invertör devresi, IGBT transistörler ile köprü devresi oluşturulmuştur. Köprü devreleri ayrı 3 farklı RL yüke aktarımı çalışılmış ve SPWM kontrol tekniği kullanılmıştır. Kaskat kullanımın kazanımları, SPWM tekniğinin sağladığı avantajlar, toplam harmonik bozulmalar üzerinde elde edilen sonuçlar ile değerlendirilmiştir [3]. İlhami Colak ve ekibi 2012 yılında yayınlanan çalışmalarında, düzenli modülasyon şemalarında dikkat edilmeyen yan bant harmoniklerini ortadan kaldırarak toplam harmonik bozulmayı (THD) azaltan bir SPWM modülasyon uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Önerilen SPWM algoritması, sayısal sinyal işlemcisi (DSP) kart ve üç fazlı tam köprü invertöre uygulanmıştır. Önerilen SPWM yapısına, modülatördeki taşıyıcı ve referans sinyallere dijital filtreleme uygulanmaktadır. Gerçekleştirilen araştırmada simülasyon ve deneysel çalışmalar birlikte sunulmuştur. Önerilen yenilikçi SPWM algoritması, eZdsp F2812 dijital veri işleme kartı kullanılarak geliştirilmiş ve üç fazlı tam köprü invertöre uygulanmıştır. Simülasyon çalışmaları, geliştirilmiş SPWM modülatörünün doğruluğunu kanıtlamak için Matlab/Simulink kullanılarak gerçekleştirilir. DSP kontrollü tam köprü invertör, 380 V üç fazlı AC hat çıkışları üretmek için 200Vdc besleme kullanılarak da çalıştırılmıştır. Çalışma, taban ve yan bant frekanslarındaki harmonik giderme sorunları açısından başarılarını göstermektedir [4]. Jino Joy ve ekibi tarafından yapılan 2016 yılındaki çalışmada, SPWM ve Uzak Vektör SVPWM teknikleri, Sabit Mıknatıslı Fırçasız DC (PMBLDC) motor sürücü sisteminin değişen yüke sahip bir Kanonik Anahtarlama Hücresinin (CSC) hız kontrolü, tork dalgalanması azaltılması ve Güç Faktörü Düzeltmesi (PFC) tartışılmıştır. Sinüzoidal SPWM ve Uzak Vektör SVPWM beslemeli sensörsüz PMBLDC motor sürücüsüne sahip bir Kanonik Anahtarlama Hücresinin performansları Konvansiyonel ve bulanık mantık denetleyicileri altında karşılaştırılmıştır. Bu kontrolörlere sahip bir sensörsüz güç faktörü düzeltmesi (PMBLDC) motorun performans parametreleri önce MATLAB/Simulink yazılımı ile analiz edilmiştir. PMBLDC motor, yükselme süresi, yerleşme süresi ve aşma performans parametrelerine dayalı olarak SVPWM ve SPWM teknikleri karşılaştırılmıştır. SPWM tekniği ile performans karşılaştırmasında bulanık mantık kontrollü motor, PI kontrollü motora oranla daha hızlı nominal değerlerine ulaştığı ve düşük toplam harmonik bozulma (THD) değerlerine sahip olduğu raporlanmıştır [5]. K. Latha Shenoy ve ekibi 2017 yılında yayınlanan çalışmada fotovoltaik panelleri için maksimum güç noktası izleyen (MPPT) SPWM tabanlı sürücü devre tasarımı gerçekleştirmiştir. Çalışmada öncelikli olarak 3,5KW güce sahip fotovoltaik paneller için teorik sistem modellemesi hesaplanmıştır. Fotovoltaik panellerin farklı radyasyon ve ısıtım değerlerinde maksimum güç transferi için “perturb & observe” MPPT algoritması tercih edilmiştir. Çalışma Matlab/Simulink üzerinde gerçekleştirilmiştir. MOSFET anahtarlı bir tam köprü invertör devre ve 5kHz anahtarlama frekansı ile anahtarlama için iki kutuplu bir SPWM tekniği kullanılmıştır. İnvertör, 50Hz frekanslı bir sinüs dalgası ile 5kHz frekanslı üçgen dalga formu karşılaştırılarak üretilen darbeler

yardımıyla tetiklemektedir. Yük voltajının THD analiz edilerek, LC filtresi sayesinde çıkış gerilimi üzerindeki gürültüler giderilmektedir [6].

SPWM tekniği geniş kullanım fırsatları sunması nedeniyle Lisans/lisansüstü eğitim amacıyla E. A. Samiotis ve ekibi tarafından 2018 yılında bir çalışmada yayınlanmıştır. Çalışmada SPWM invertör darbe üretici devresi için bir eğitim kiti geliştirilmesi ve uygulanması amaçlanmıştır. MULTISIM programı için gerekli modelleri oluşturularak, sinyal üreticisinin program üzerinde deneyimlenmesi ve bir SPWM üreticinin nasıl çalıştığı anlatılmıştır. Tasarlanan simülasyon devresinde LM412 JFET girişli Op-Amp LM360 karşılaştırıcı Op-Amp devreleri bulunmaktadır. MULTISIM programı üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar sonrasında uygulama için devre PCB üzerinde kurulmuş ve devre testleri yapılmıştır. Sinüs sinyali 50Hz civarında tutulurken karşılaştırma için üçgen dalga değişimi 100Hz-2Khz arasında düzenlenmiştir. Çalışmada eğitim amacıyla ortaya konan çalışmanın sonuçları başarılı olarak değerlendirilmiştir [7]. J. Haema ve ekibi tarafından 2018 yılında gerçekleştirilen çalışmada, İndüksiyonlu Isıtma Uygulaması için Tam Köprü Rezonans Çevirici devre sunmayı amaçlamıştır. Endüksiyonlu ısıtma uygulaması için tam köprü rezonans inverteri tasarımı önerilmiştir. Çalışmadaki analizler için voltajı 220V ila 110V 50Hz arasında değiştiren düşürücü transformator, AC'den DC voltajlarına değişen tam köprü doğrultucu, kapı-sürücü devresine ayarlanmış devreyi oluşturan Darbe Genişliği Modülasyonu PWM sinyali, güç kullanan tam köprü inverter MOSFET'ler, elektrik topraklamasını ayıran ve ısıtma bobini ile bobinin voltajını dengeleyen yüksek frekanslı transformatorler kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, metal yüzey 10 saniye içinde ısınmaya başlamaktadır ve 20 saniye süre sonra 595°C ulaşmaktadır [8]. 2019 yılında Y. Birbir ve ekibi tarafından yayınlanan çalışmada PIC16F877 mikrodenetleyicisi kullanarak SPWM invertör tasarımı gerçekleştirilmiştir. SPWM sinyalinin taşıyıcı ve referans sinyalleri konusunda detaylara değinilmemiştir. Tam köprü invertör fonksiyonu için iki farklı kontrol algoritması uygulanmıştır. İlk kontrol yöntemi olarak iki kutuplu, tam köprü invertör çıkışına PWM anahtarlama uygulanmıştır. Bipolar PWM anahtarlamının çıkış dalga biçimi, pozitif ve negatif dönüşümlerle aynı anahtarlama frekansı değerinde oluşturulur. Sistemin anahtarlama frekansı, üçgen dalga taşıyıcı sinyal ile aynıdır. İkinci kontrol yöntemi olan invertör çıkışı, tek kutuplu bir gerilim anahtarlama PWM olarak çalıştırılmaktadır. Devre tasarımı, uygulaması ve deneyler sonunda her iki tekniğin de (unipolar-bipolar) birbirine göre artı ve eksi özelliklere sahip olduğu tartışılmaktadır. Deneylerde çıkış geriliminin toplam harmonik bozulma miktarı %0,7 ile %6,2 arasında değişmektedir. İnvertör prototipinin 100W güç oranı, yük olarak 50 Watt dirençli yük ve 50 Watt gölge kutuplu motor ile test edilmiştir. Toplam harmonik bozulma THD, değerlendirildiğinde, tek kutuplu gerilim anahtarlama düzenine sahip SPWM, Bipolar gerilim anahtarlama daha iyi bir harmonik profili ortaya koymaktadır [9]. Maher G. M. Abdolrasol ve ekibinin 2021 yılında yayınlanan çalışmasında DC-AC dönüşümler için MATLAB/Simulink programı üzerinde SPWM tekniğiyle invertör simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. 3KW'lık yerel bir yüke güç sağlayan, fotovoltaiik paneller ve depo bataryalarının, değişen yüke uygun olarak, SPWM darbesi için gereken en iyi modülasyon indeksi hesaplanması yapılmıştır. Anahtarlama için 6 adet izole kapılı bipolar transistör (IGBT), SPWM modülasyon indeksini denetlemek için PI kontrolör ve bu kontrol parametrelerini hesaplamak içinde sürü parçacık optimizasyon (PSO) algoritması kullanılmıştır. Çalışmada SPWM referans ve taşıyıcı sinyal frekanslarına atıfta bulunulmamış fakat yük üzerinde oluşturulan 50Hz 415Vrms gerilim ve 3kW aktif güçten bahsedilmiştir. Ayrıca çalışma uygun PI katsayılarıyla gerçekleştirilen kontrol ile toplam harmonik bozulmanın (THD) daha az olduğu bildirilmiştir [10]. Charles I. Odeh ve ekibi tarafından 2021 yılında yayınlanan bir çalışmada, SPWM tekniği, kademeli H-köprü (CHB) çok seviyeli invertörde (MLI) her bir faza, bir dizi çıkış gerilim seviyesini oluşturmak için kullanılmıştır. Çalışmada, çoklu veya kademeli olarak adlandırabileceğiniz, orta ve yüksek gerilim uygulamalarına uygun, inverter için klasik seviye veya faz kaydırmalı özelliklerde SPWM tekniği kullanılmaktadır. Çalışmada 3 Fazlı ve 7 kademeli olarak seri bağlı H-köprü devresi RL yüküyle MATLAB/SIMULINK programıyla simüle edilmiş ayrıca deneysel olarak da gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kontrol için alan programlamalı kapı dizilerine (FPGA) sahip dijital sinyal işleme kartı kullanılmıştır. Üç faz izoleli DC gerilim doğrultucu köprülere bağlanmıştır. Bu köprüler, 3 sargılı bir transformator aracılığıyla üç fazlı AC güç kaynağı tarafından sağlanmıştır. Her bir DC gerilim değeri 100V ve modülasyon indeksi 0,95'tir. DC gerilimler 200V'tan 100V'a ve tekrar 200V'a değiştirilebilmektedir. Çıkış akımlarında, sabit tepe değerini ve sinüzoidal dalga biçimini koruduğu görülmektedir. Simülasyon ve deneysel çalışmalarda, her bir faz için birbirinden izole 100V

DC gerilim, 50Hz temel frekans, 5kHz taşıyıcı frekans ve 3,9KW çıkış gücü olarak elde edilmektedir. Sonuç olarak, kademeli H köprülerin tamamındaki gerçek güç değişimleri çok dar bir bant içinde tutulabilmekte ve önerilen kontrol yaklaşımı, faz ve seviye kaydırma tabanlı taşıyıcı SPWM teknikleri arasında aracılık yapan hibrit bir modülasyon yapısı sunmaktadır [11]. Güneş panellerinden güç aktarımı için, literatürde yer alan bir çalışmada mikrodenetleyici tabanlı SPWM tekniği uygulaması gerçekleştirilmiştir. PIC 18F4431 mikrodenetleyicisi tek fazlı SPWM sinyal ve tam köprü doğrultucu devresi kurulmuştur. Sürücü devresinin çıkış gerilimi 10V-20V aralığında değişmektedir. Köprü devresi MOSFET ve IR2110 tüm devre sürücüsünden oluşmaktadır. Elde edilen tek fazlı PWM sinyalin daha az harmonik oluşturmuş, ölü zaman kontrol devresi, sistemi güvenilir, kompakt ve düşük maliyetli olmasını sağlamıştır [12]. S. Syed Abdul Haq ve ekibi tarafından 2021 yılında gerçekleştirilen çalışmada I tipi dört seviyeli invertörün kapasitör voltaj dengelemesi için SPWM tekniğiyle kullanılmıştır. Dört aşamalı FC tip I invertör, klasik ve gelişmiş dört kademeli invertöre göre daha az sayıda anahtara ve bileşene sahip olması yüksek performanslı-gerilim uygulamaları için etkili kılınmaktadır. Önerilen kontrol yöntemlerinin etkinliği ve yeterliliği, sabit ve geçici koşullar altında ve çeşitli modülasyon hızları ve yüklerinde deneysel olarak değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, kapasitör voltajını kontrol etmek için geliştirilen kontrol yönteminin etkinliğini göstermektedir. Çalışmada kullanılan SPWM tekniğine ait taşıyıcı ve referans sinyallerin detaylarından bahsedilmemektedir [13]. MATLAB/Simulink üzerinde simülasyon olarak gerçekleştirilen 2021 yılı araştırma çalışmasında M. S. Endiz ve ekibi, çok kademeli DC kaynakların invertör devresi üzerinden SPWM tekniği ile AC güç dönüşüm çalışması gerçekleştirilmiştir. SPWM tekniği, bipolar ve unipolar olarak iki farklı referans sinyal algoritması ile çalışılmıştır. Algoritmalar, tek fazlı tam köprü inverter devresi üzerinde uygulanarak çalışmalar yapılmış, çalışmanın sonucunda unipolar SPWM tekniğinin daha başarılı olduğu bildirilmiştir. Özellikle unipolar SPWM tekniğinin daha fazla kontrol noktası oluşturması, invertör üzerindeki kontrol kabiliyetlerini artırmakta ve sonucunda yük üzerindeki gücün toplam harmonik bozulmalarını (THD) azaltmaktadır [14]. Çok kademeli H-köprü ile tasarlanan invertör devresi 2022 yılında yapılan bir yayında A. Sedaghati ve ekibi tarafından araştırılmıştır. Araştırma sonucunda invertör devresindeki kademeli gücü dengeleyen ve güneş enerji panellerinin daha uzun ömürlü olmasına katkı sunan algoritma önerilmektedir. Çalışmada deneysel gerçek devre ve cihazlar yerine, OPAL-RT OP4510 gerçek zamanlı modül sistem kullanılmıştır. Sistemin modülasyon tekniklerini uygulamak için bir dSPACE MicroLabBox kompakt prototipleme ünitesi ve dSPACE ControlDesk yazılımı tüm sistemin takip edilmesi için sistemde yer almıştır. Bu çalışmada, aşamalar arasındaki güç sapmasını en aza indirmek için dengeli elektrikli merdiven modülasyonu (BPSCM) adı verilen yeni bir algoritma önerilmiştir. Bu algoritma, rasgele bir vektörün örnek uzayı olarak invertör hücrelerinin güç analizine dayalı olarak geliştirilmiştir ve basit hesaplamalar kullanılarak devreler üzerinde uygulanabilmektedir. Önerilen yöntem, yük açısına bağlı olmadığı ve yöntem, $\pm 90^\circ$ yük açısı için güç sapması sıfır olacak ve sapma değeri yalnızca $\phi = 0^\circ$ için maksimum olacak şekilde tasarlanmıştır, bu literatürde yer alan minimum güç sapmasından çok daha küçüktür. Çalışmada, BPSCM'nin avantajları; basit hesaplama, anahtarlama modeli, kademe sayısı ile önceden belirlenir ve yük üzerindeki açıdan bağımsız olduğu yayınlanmıştır [15]. A. K. Bilhan ve ekibi tarafından yapılan çalışmada üç fazlı DC/AC dönüştürücü inverter devreleri için farklı yaklaşımlara sahip SPWM teknikleri Matlab/Simulink benzetim çalışmaları yapılmış ve R-L yük üzerinde akım ve gerilim dalga şekilleri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Elde edilen sinyaller için çıkış frekansı 50Hz olarak kabul edildiğinden bahsedilmiştir [16]. M. Dursun ve ekibi tarafından benzer şekilde SPWM üç fazlı gerilim kaynaklı invertörler için tekrar edilmiş ve çalışmada 1 kW'lık bir omik yük üzerinde oluşan akım, gerilim grafikleri ile gerilimde meydana gelen THD değerleri değerlendirilmiştir [17]. Benzer bir çalışmada Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu (UVDGM) tekniği, 6 anahtarlı 3-seviyeli bir dönüştürücü Dev C++ programı ile simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Topolojisinde, her biri çift sarımlı bobinlere bağlı olan altı adet IGBT yarıiletken anahtar ve bobin gerilimleri kullanılarak 6 anahtarlı 3-seviyeli bir dönüştürücü tasarlanmıştır. Bu yarıiletken anahtarların çalışması için gerekli sinyaller, bir bulanık mantık denetleyici tarafından üretilmiştir. Bu sinyallerin üretilmesinde UVDGM tekniği kullanılmıştır. Kullanılan modülasyon tekniği, RLC yük için çıkış akımının THD bileşenlerini azaltmayı amaçlamıştır [18]. Bahador Fani ve ekibinin 2022 yılında yayınladıkları derleme çalışmasında, mikro şebekelere ait literatürdeki yaklaşık 190 çalışma incelenmiştir. Çalışmada özellikle mikro şebekelerin ağ kontrol uyumu sorunları dikkatle incelenmiştir. Çalışmada mevcut araştırmalardaki frekansların, şebeke frekansı olan 50Hz olduğu görülmektedir [19]. 2023 yılında H. Chen tarafından gerçekleştirilen araştırma, gelişen AC güç kumanda

sistemleri için DSP ve FPGA kartları dijital faz kilitli kapalı çevrim kontrol imkanlarını ortaya koymaktadır. Bu amaca uygun olarak deniz araçları kumanda sistemleri için kontrol ve hız güvenilirliği açısından FPGA donanımına sahip güç kontrol sistemleri avantajları simülasyon testleri ve çalışmanın sonuçları ile ortaya konmuştur [20]. 2023 yılında gerçekleştirilen A. Kumari ve ekibine ait çalışmada, fotovoltaiik panellerden güç elde edebilmek için 5 seviyeli invertör ile MLI tasarımı kullanılmıştır. Daha fazla güç elde etmek için MPPT algoritması bulanık mantık kontrolcüyle takip edilmiştir. Çalışmada THD değerinin %8,72 değerlere kadar düşürüldüğü ve çıkış frekansının 50Hz olduğu bilgisi verilmiştir. Ancak çalışmalar sadece MATLAB/Simulink üzerinde simülasyon olarak gerçekleştirilmiştir [21]. 2023 yılında, İ. Ekberi ve ekibinin gerçekleştirdikleri çalışmada, üç seviyeli MLI tasarım ve hibrit aktif güç kontrol algoritması ile PV sisteme MPPT çalışılmıştır. Çalışmalar MATLAB programında simülasyon olarak yapılmış ve 50Hz şebeke akımları için THD değerinin %3,5 orana kadar düşürüldüğü raporlanmıştır [22]. 2023 yılında T. Atar ve ekibinin yayınladıkları çalışmada üç faz ve beş seviyeli MLI tasarımlarının sinüzoidal yapıya yakın davranışları sayesinde düşük anahtarlama ve yüksek verimlilikte çıkış gerilimi elde edilebileceği gösterilmiştir. MATLAB/Simulink üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda, güç elektroniği araştırmaları için düşük THD değerlerine sahip invertör devre parametreleri ortaya konmuştur. THD değerinin %0,5'lere düştüğü ve anahtarlama frekansının 1-5PWM aralığında olduğu gösterilmiştir [23].

Literatürde düşük gerilim depolama cihazları ile indüksiyon motorlarının çalıştırılmasına ilişkin çalışmalar mevcuttur. Ancak incelenen çalışmaların çoğunlukla bilgisayar destekli simülasyon sonuçlarını [3, 5, 6, 10, 14, 16-23] içermekte olup, çalışmalarda deneysel katkılar sunulmuşsa da 50Hz sabit referans sinyaliyle elde edilen deneysel sonuçları içermektedir. Çalışmalarda referans sinyal frekans ve genliğine dair kısıtlı bilgi bulunmakta ve çoğunlukla ihtiyaç duyulan çıkış gücüne bağlı olarak inverter devresindeki anahtarlama frekans değişikliği verilmektedir [23].

Bu kapsamda, düşük gerilim kaynakları ile indüksiyon motorlarının kontrolünde bipolar ve unipolar SPWM algoritmalarının deneysel incelenmesi ele alınmıştır. Birinci bölümde SPWM teknikleri ve kullanım alanlarına ilişkin tanımlamalar yapılarak literatür incelemesi yapıldı. İkinci bölümde, bipolar ve unipolar SPWM tekniklerinin temel yapısı anlatıldı. Literatürde yer alan yarım köprü ve tam köprü invertör devreleri ve özellikleri ele alındı. Üçüncü bölümde, deney düzeneği ve deneyde kullanılan cihazlar tanıtılarak deney sonuçları raporlandı. Farklı frekansa sahip referans sinyalleri kullanılarak sürücü çıkışı gerilim değerleri, motor akımları ve motor çalışma hızı bilgileri elde edilerek sonuçlar grafiksel olarak sunuldu. Son bölümde ise, deneylerde elde edilen sonuçlar değerlendirilerek bulgular tartışıldı. Motor çıkış akımları dikkate alındığında unipolar SPWM tekniğinin referans sinyali açıkça daha iyi temsil ettiği gösterildi. Literatürde Unipolar ve Bipolar SPWM tekniklerinin çok çeşitli bilgisayar benzetimi uygulamalarına ulaşmak mümkündür. Deneysel olarak yapılan çalışmalarda ise 50 Hz sabit frekansta devre tasarımı ve uygulamasına ilişkin çalışmalara ulaşılabilmektedir. Çalışmada literatürden farklı olarak SPWM tekniğinin farklı genliklerde çıkış sinyal kalitesine etkisi ve indüksiyon motoru hız performansına etkisi deneysel olarak çalışılarak raporlanmıştır. Özellikle deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçlarının kıyaslanarak verilmesi ve doğrulanması açısından literatüre katkı sağlamaktadır.

II. YÖNTEM

Darbe genişliği modülasyonu (PWM) veya darbe süresi modülasyonu (PDM), bir elektrik sinyali tarafından iletilen ortalama gücü etkin bir şekilde, zaman ekseninde kare dalgalara bölünmesidir. Yüke beslenen akım veya gerilimin ortalama değeri, besleme ve yük arasındaki anahtar hızlı bir şekilde açıp kapatarak kontrol edilmesidir. Kapalı sürelerle kıyasla anahtar ne kadar uzun süre açık kalırsa, yüke sağlanan toplam güç o kadar yüksek olur. PWM uygulamalarında, sinyalin periyot döngüsü içinde, V_p veya 0 değerinde kalma oranı görev döngüsü, İngilizcesi olan ve sıklıkla kullanılan Duty Cyle terimi ile ifade edilmektedir. PWM sinyalinin bir periyodu içinde yarı süresinde V_p değerinde olması ve diğer yarı süresinde 0 olması, yarısında açıkken diğer yarısında kapalı olduğu, yani Duty Cycle'in %50 olduğu anlamına gelir. V_p 'nin periyodun %75'ini alan sürede açık olduğu durumda ise Duty Cycle %75 ile ifade edilir [1, 2].

PWM tekniği köprü devrelerinde kullanılarak invertör tasarımları gerçekleştirilir. Bir invertördeki PWM tekniği iki sinyalden oluşur. Biri referans sinyal iken diğeri taşıyıcı sinyaldir. İnvertörün modunu değiştirmek için gereken darbe, bu iki sinyal arasındaki karşılaştırma ile üretilebilir. Bu PWM tekniğinin gelişmiş uygulamalarıyla SPWM ve türevi olan teknikler ortaya çıkmaktadır. Sinüzoidal PWM tekniğinde kare dalga yerine sinüs dalga referans olarak kullanılır ve taşıyıcı üçgen dalga seçilmektedir. Bu sinyale ait gerilimin RMS değeri modülasyon indeksi tarafından kontrol edilir ve sinüs dalgası formunda yüke aktarılır [26].

A. SPWM TEKNİĞİ

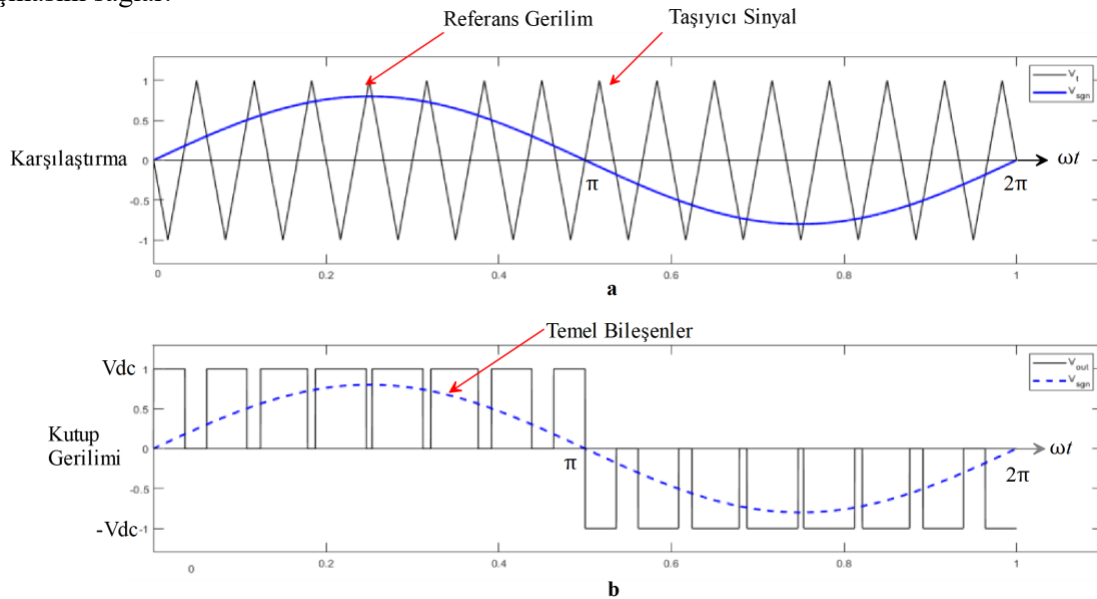
SPWM teknikleri içinde kullanımı en yaygın olarak bilinen teknik bipolar SPWM tekniğidir. Bipolar SPWM Tekniği, Mikrodenetleyici tarafında oluşturduğu yük ve uygulama açısından kolaylıklar sunmaktadır. Diğer taraftan bu avantajlara karşın yük üzerinde istenen AC sinyalin toplam gürültü harmonikleri (THD) açısından dezavantajlara sahiptir. Tasarımda yük üzerinde oluşacak olan gürültüler dikkate alınarak SPWM tekniği tercih edilmelidir [5, 14].

Bipolar SPWM tekniği detaylarını ortaya koymak adına; referans sinyali, taşıyıcı (üçgen) sinyal ve yük üzerinde oluşan PWM sinyal aynı zaman ekseninde 2 farklı grafikte Şekil 1(a,b)'de verilmiştir. İnvertörün her bir kutup anahtarlama durumlarını belirlemek amacıyla Şekil 1a'da olduğu gibi sinüzoidal AC referans gerilim, gerçek zamanlı olarak yüksek frekanslı üçgen taşıyıcı sinyal ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırmadan sonra, artı ve eksi yönlü her bir kutup için anahtarlama durumları belirlenmekte ve Şekil 1b'de verilen sinyal grafikleri elde edilmektedir [9].

Eğer $V_{ref} > V_c$ ve $V_{ref} > 0$ (referans gerilim taşıyıcı sinyalden büyük) Q1-Q4 ikili MOSFET ilettime geçer ve böylece yük gerilimi $V_y = V_{dc}$ olur.

Eğer $V_{ref} < V_c$ ve $V_{ref} < 0$ (referans gerilim taşıyıcı sinyalden küçük) Q3-Q2 ikili MOSFET ilettime geçer ve böylece yük gerilimi $V_y = -V_{dc}$ olur.

Elde edilen bu SPWM anahtarlama sinyalleri MOSFET yarım veya tam köprü devresini sürmek için kullanılır. Bir mikrodenetleyici tarafından oluşturulan SPWM sinyali invertör köprü devresiyle RL tepkisi gösteren motor veya transformatör devre elemanları üzerine uygulanır. Referans sinyalin yarım periyodu başına bir veya daha fazla kare voltaj darbesi üretmek bir sinüs dalgasının etkisini yeniden oluşturmak için anahtarlama devrelerinin yardımıyla DC gerilim kaynağı yük üzerinde AC sinyal oluşmasını sağlar.

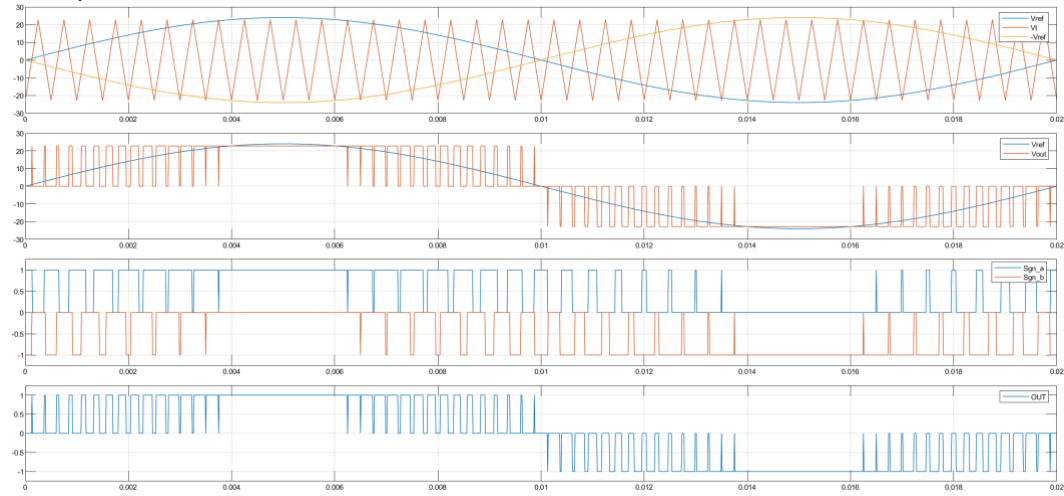


Şekil 1. (a) Referans Sinyal ve Taşıyıcı Dalga (b) SPWM Anahtarlama Sinyali

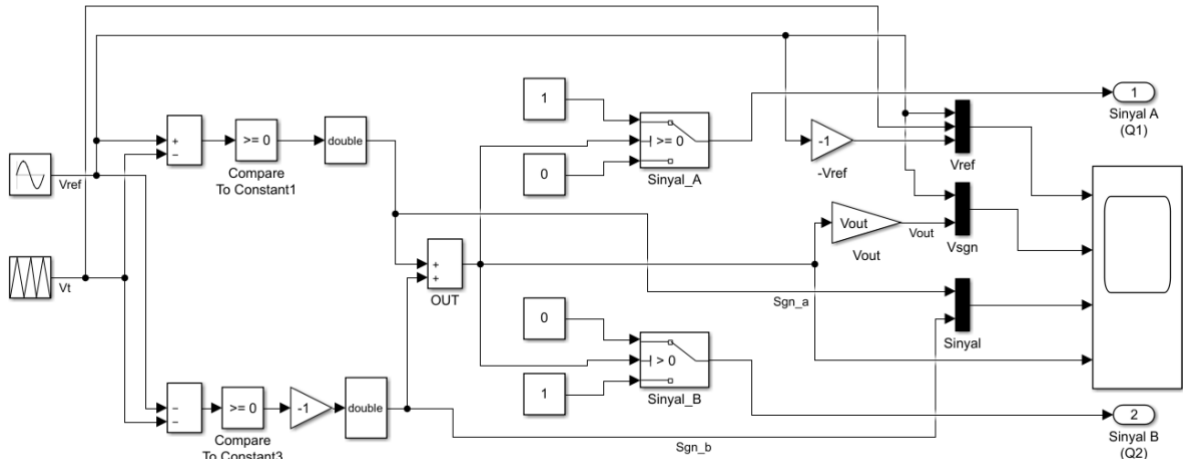
Unipolar SPWM tekniğinde ise 2 farklı referans sinyal kullanılarak taşıyıcı sinyal ile karşılaştırması yapılır. Referans sinyaller arasında 180° derece faz farkı vardır. Her bir referans sinyal ile taşıyıcı sinyal karşılaştırılır ve referans sinyallere ait birer dizi oluşturulur. Eğer referans sinyal taşıyıcı sinyalden

büyük ise diziye 1 değeri, diğer durumda ise 0 değeri gönderilir. Böylece her bir referans sinyaline ait birer dizi oluşur. Elde edilen bu dizi değerleri birbirinden çıkarılarak sonuç dizisi bulunur. Sonuç dizisi ile köprü devresi anahtarlama işlemi gerçekleştirilir [9, 12].

Şekil 2’de Unipolar SPWM tekniği ile üretilmiş MATLAB simülasyon çalışması örnek olarak verilmiştir. Burada sinyal genliği (DC gerilim kaynağı) 24V, sinyal frekansı $f=50$ Hz, taşıyıcı sinyal frekansı $f_t=2$ kHz’dir. Şekil 2a referans sinyal, 180° kaymış sinyal ve taşıyıcı sinyali göstermektedir. Genellikle taşıyıcı sinyal genliği V_t referans sinyali V_{ref} ’dan küçük olarak seçilir ($V_t=0.98 V_{ref}$ alınmıştır). Şekil 2b’de referans sinyali (V_{ref}) ile ve sürücü çıkış sinyali (V_{out}) birlikte verilmiştir. Referansın tepe değerine yaklaştıkça çıkış sinyallerinin sıklaştığını, sıfıra yaklaştıkça ise ayrıklaştığı açıkça görülür. Unipolar SPWM tekniğinde iki farklı referans sinyali kullanılır, ilk referans sinyali çıkışı P_a , ikinci referans sinyali ise P_b çıkışları ile ifade edilir. P_a ve P_b sinyallerinin farkı kontaktör çıkışlarının işaretini belirlemektedir. Şekil 2c’ P_a ve $-P_b$ sinyallerini ve Şekil 2d ise P_a ve P_b sinyallerinin farkını göstermektedir. SPWM sinyallerini oluşturmak için kullanılan MATLAB Simulink blok yapısı Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 2. Unipolar SPWM Sinyaller (a) Referans ve Taşıyıcı sinyaller (b) Referans ve sürücü çıkış sinyalleri (c) P_a ve P_b çıkışları (d) Q_1 ve Q_2 mosfet çıkışları.



Şekil 3. Unipolar SPWM sniyali için MATLAB Simulink blok yapısı.

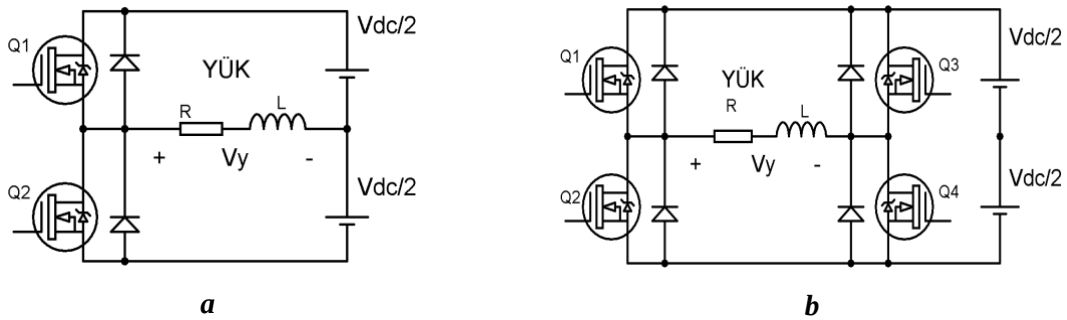
A. İNVERTÖR DEVRE YAPISI

İnvertör tasarımlarında DC gerilimi AC gerilime dönüştürmek için köprü devre tasarımlarına ihtiyaç vardır. Bu devreler H harfine benzediği için H-Köprü devre tasarımları olarak adlandırılmaktadır. Köprü devresi transistör sayısı veya devre yük çıkışına bağlı olarak yarım köprü veya tam köprü devresi olarak adlandırılırlar. Bipolar bağlantı transistörleri (BJT'ler), metal-oksit-yarı iletken alan etkili transistörler (MOSFET'ler) ve yalıtımlı kapılı bipolar transistörler (IGBT'ler) dahil olmak üzere çeşitli farklı elektronik devre elemanları kullanılarak uygulanır. BJT'ler en eski transistör tiplerinden biridir ve düşük maliyetleri ve basit sürücü gereksinimleri nedeniyle H-köprü devre tasarımlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, BJT'lerin daha düşük anahtarlama hızları ve ayrı bir akım sınırlayıcı direnç ihtiyacı gibi bazı sınırlamaları vardır. MOSFET'ler, ise H köprüsü devre tasarımlarında kullanılabilen başka bir transistör türüdür [8]. Yüksek frekanslarda anahtarlama kabiliyeti ve yüksek giriş empedansı avantajlarına sahip olmaları onları yüksek frekanslı uygulamalar için ideal kılar. Bununla birlikte, güç kaybına yol açabilecek nispeten yüksek bir dirençleri vardır. IGBT'ler, BJT'lerin ve MOSFET'lerin en iyi özelliklerini birleştiren daha yeni bir transistör türüdür. MOSFET'ler gibi hızlı anahtarlama hızlarına sahiptirler ve BJT'ler gibi yüksek akım ve gerilimi işleyebilirler. Endüstriyel motor kontrolü, rüzgâr ve güneş enerjisi sistemleri, indüksiyon ısıtıcı devreleri gibi yüksek güçlü uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Her bir transistör yapısının; akım ve gerilim işleme yetenekleri, anahtarlama hızları ve açık direnç gibi kendine özgü özellikleri olması nedeniyle, invertör köprü devre tasarımı için cihaz seçimi, özel uygulamaya ve gereksinimlere bağlıdır [1, 2].

BJT, MOSFET IGBT ler için referans eklense güzel olur. Yüke uygulanan voltajı kontrol etmek için kaç anahtarın kullanıldığına bağlı olarak bir H-köprü devresi "yarım köprü" veya "tam köprü" olarak tasarlanır ve adlandırılırlar. Yarım köprü iki anahtar MOSFET kullanır ve tam köprü ise dört anahtar MOSFET kullanır. H-köprü devresi olarak da bilinen tam köprü devresi, yarım köprü devresine göre avantajlara sahiptir. Özellikle; çift yönlü bir çıkış sinyali üretmek daha fazla çıkış gücü oluşturma, çıkış sinyalinde daha düşük gürültü oluşturmaya sayılabilir [8].

Bir yarım köprü devresi, yüke uygulanan voltajı kontrol etmek için biri yüksek taraf, diğeri alçak taraf olmak üzere iki MOSFET anahtar kullanır. H-köprü devresine kıyasla yarı sayıda anahtar kullandığı için "Yarım Köprü devresi" olarak da adlandırılır.

H-köprü devresi olarak da bilinen tam köprü devresi, yüke uygulanan voltajı kontrol etmek için dört MOSFET anahtar olarak devre elemanı kullanır. Uygulanan voltajın polaritesini değiştirerek yükün pozitif veya negatif voltaj kaynağına bağlanmasını sağlar. H-köprü devresi, yarım köprü devresinden daha karmaşıktır ve daha fazla anahtarlama seçeneğine sahiptir. Dönüş yönünün ve hızının kontrol edilmesi gereken DC motor kontrolü gibi uygulamalarda kullanışlıdır [8].



Şekil 4. (a) Yarım Köprü (b) Tam Köprü MOSFET Devre.

V_y çıkış üzerinde oluşan gerilim değerini göstermektedir. Yarım Köprü RMS yük gerilim değeri (1) ile hesaplanabilir ve Tam Köprü RMS yük gerilim değeri (2) denklemlerinde verilmektedir.

$$V_y = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} \frac{V_{dc}^2}{4} dt \right)^{1/2} = \frac{V_{dc}}{2} \quad (1)$$

$$V_y = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} V_{dc}^2 dt \right)^{1/2} = V_{dc} \quad (2)$$

PWM ve SPWM tekniğinde ile invertör devre tasarımlarında DC-AC dönüşümlerinde toplam harmonik bozulma (Total Harmonic Distortion - THD) kavramı ortaya çıkmaktadır. THD en genel anlamıyla çıkış sinyalindeki harmoniklerin güç frekansına oranıdır. THD, PWM sinyalini AC analog bir sinyale dönüştürmek için kullanıldığında, filtrelerin performans değerini göstermektedir. Yüksek THD değerleri, yük üzerine aktarılan sinyalin filtrelerinin düzgün bir şekilde çalışmadığını ve sinyalde bozulmaların olduğunu gösterir. THD değerinin düşük olması, PWM sinyalinin kalitelisi ve düzgün bir şekilde AC analog bir sinyale dönüştürülerek yüke aktarıldığını ifade eder [25, 26].

THD değeri (3) denklemi ile hesaplanır. V_n , n'inci rms değerinin harmoniğini ifade etmektedir.

$$THD = \frac{1}{V_y} \sqrt{\left(\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_n^2 \right)} \quad (3)$$

Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE), nicel verileri tahmin etmede bir modelin hatasını ölçmenin standart bir yoludur. (4) ile deneysel olarak ölçülen y_i ile olması gereken $\hat{y}_i$ sinyal arasındaki hata hesaplanabilir. Böylece elde edilen alternatif akım sinyalinin ne kadar başarılı bir şekilde ölçüldüğü hesaplanabilir.

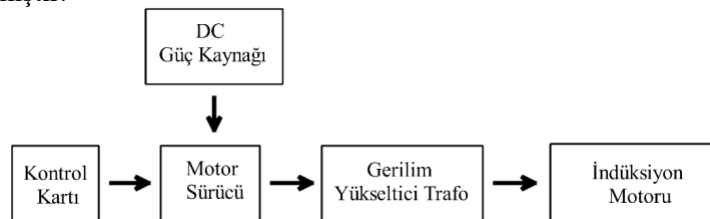
$$RMSE = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n} \right)} \quad (4)$$

Köprü devreleri ile invertör tasarımında Op-Amp aktif devre elemanlarıyla SPWM tekniğinin uygulanması mümkündür. Fakat Op-Amp devre elemanları ile gerçekleştirilecek olan tasarımlarda hassas ve doğru sonuçlar için kapasitörlerin tam değerlerde seçilmesi, sabit frekanslar için düzenlenmesi ve farklı frekans çıkış sinyalleri için devre elemanlarının tekrardan hesaplanarak, analog devrenin tekrardan kurulması gerekmektedir [7].

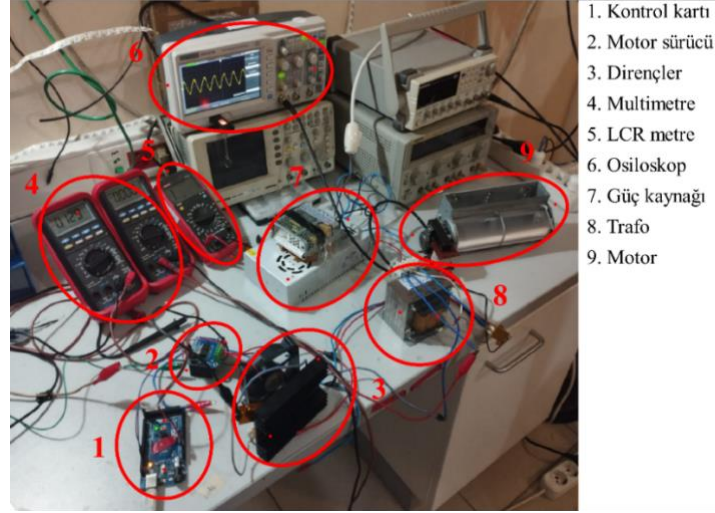
III. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

A. DENEY DÜZENEGİ

SPWM tekniğine yönelik örnek sinyal formları Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 5'te deney düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 6 ile deney düzeneğinde kullanılan tüm elemanlar gösterilmiş, Şekil 7 ile devre şeması verilmiştir. Deneylerde kullanılan ölçüm cihazlarının listesi Tablo 1'de verilmiştir. Deney düzeneği şematik diyagramda gösterildiği üzere DC güç kaynağı, Kontrol kartı, Motor Sürücü, Gerilim Yükseltici Trafo ve İndüksiyon motoru olmak üzere 5 ana bölümden oluşmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan DC güç kaynağı 20A akım ve 24V gerilim üretebilmektedir. ATmega2560 mikroişlemcisine sahip bir mikrodenetleyici olan Arduino Mega kontrol kartı olarak kullanılmıştır.

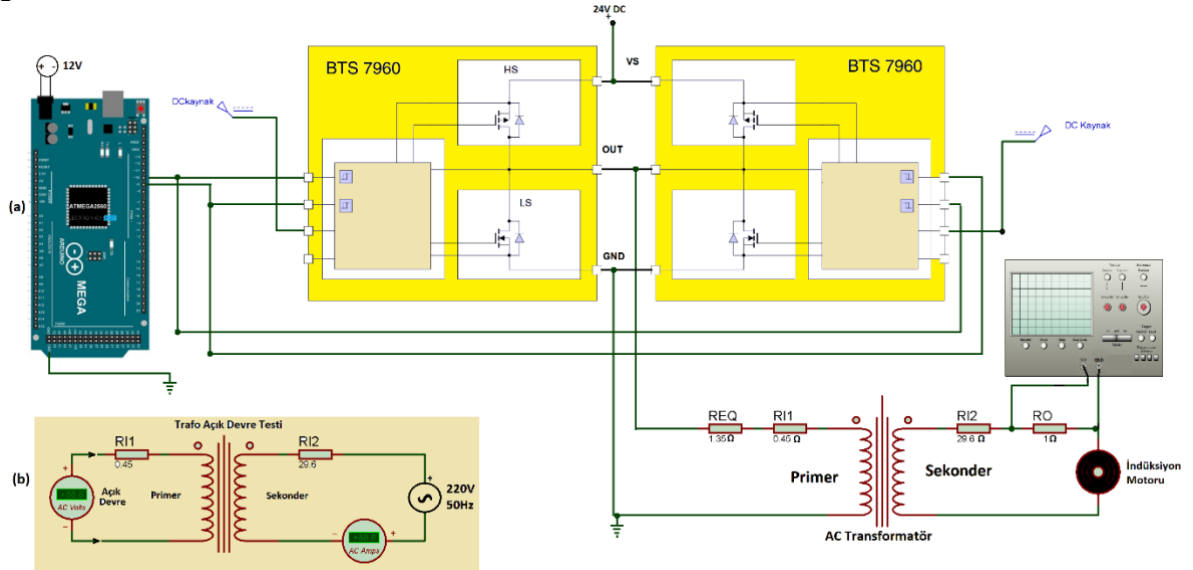


Şekil 5. Deney düzeneği şematik gösterimi.



Şekil 6. Deney düzeneği.

Mikrodenetleyici kartı 16Mhz çalışma frekansına sahiptir. Devre kontrol kartının, D9 ve D10 pinleri Timer 2 zamanlayıcısına bağlıdır, 8 bit çözünürlükte 30kHz sinyal üretebilmektedir ve bu sinyaller köprü devresi anahtarlama sinyali için kullanılmıştır. Kontrol kartında üretilen SPWM anahtarlama sinyalleri (D9 ve D10 pinleri), BTS7960B çift yönlü motor sürücüyü uygulanmıştır. Motor sürücü çıkış sinyalleri trafonun girişine bağlanarak yükseltilmiş ve indüksiyon motoru sürülmüştür (Şekil 6). Motora aktarılan sinyal, 1Ω direnç üzerinden akım sinyali olarak okunup kaydedilmiştir. Motor ve trafo arasına bulunan 1Ω direnç devreye seri bağlı olması nedeniyle üzerinde oluşan akım sinyaline karşılık gelmektedir.



Şekil 7 (a) Deney düzeneği devre şeması (b) Trafo açık devre Test devresi.

Motor sürücü kartı 28V gerilim ve 20A akım sinyaline kadar çalışabilmektedir. Üretici tarafından 20kHz frekansına kadar çalışabileceği belirtilmiş olsa da deneylerde 10 kHz'in üzerinde çift yönlü tetiklendiğinde çıkış sinyallerinde bozulmalar gözlenmiştir. Bu nedenle SPWM taşıyıcı sinyal genliği (f_i) 10kHz olarak seçilmiştir. Trafo giriş özellikleri primer sargıda $R_1 = 0.45\Omega$ ve $L_1 = 0.0036H$, sekonder tarafında ise $R_2 = 29.6\Omega$ ve $L_2 = 1.30H$ olarak ölçülmüştür. İdeal trafo sistemlerinde karşılıklı endüktans katsayısı Denklem (5) ile hesaplanır [24]. Burada k trafonun efektif değeridir ve karşılıklı endüktans katsayısının idealden sapmasını göstermektedir. Trafoya ait karşılıklı endüktans katsayısını ölçmek için açık devre testi yapılmıştır. Açık devre testinde devrenin çıkış katı sekonder sargısından $f = 50$ Hz, $V_{rms} = 220$ V olacak şekilde gerilim uygulanmıştır. Sekonder akımı (I_2) ve açık devre gerilimi (V_1) ölçülerek kaydedilmiştir. Denklem (6-7) kullanılarak karşılıklı endüktans katsayısı hesaplanmıştır. Ölçülen $I_2 = 0.533A$ ve $V_1 = 9.96V$ değerleri için $M = 0.059H$ ve $k = 0.8625$ olarak bulunmuştur [24].

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (5)$$

$$V_1 = I_2 \omega M \quad (6)$$

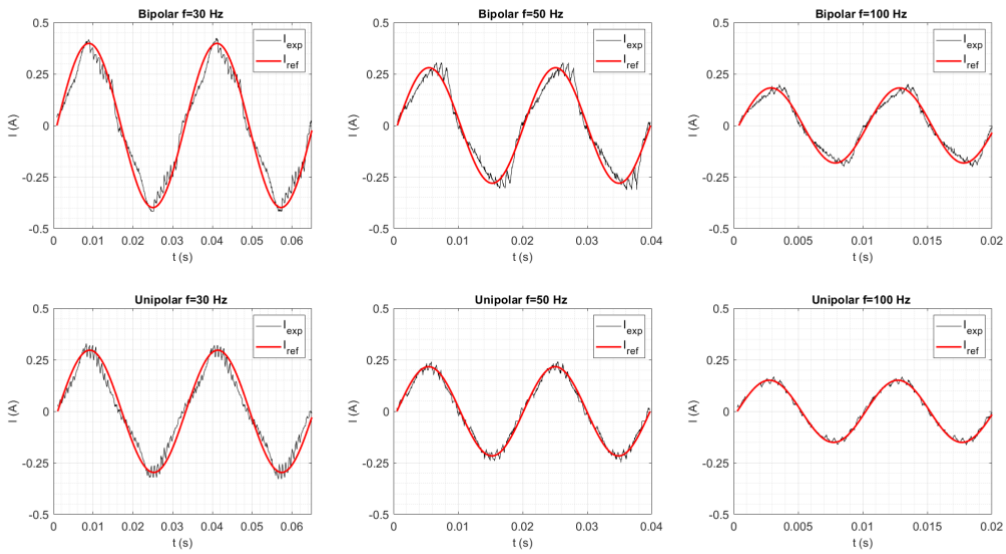
$$M = \frac{V_1}{I_2 2\pi f} \quad (7)$$

Tablo 1. Deneyde kullanılan cihazların listesi

Cihaz Türü	Marka/Model
Osiloskop	AA TECH / ADS-3072B Dijital Storage Oscilloscope
	Gw INSTEK / GDS-1022 DSO
Inductance Meter	UNI-T / UT600
Multimetre	BRYMEN BM510
	FLUKE 106

B. DENEY SONUÇLARI

Çalışmamızda iki farklı SPWM tekniği incelenmiştir. Bölüm 2’de bahsedildiği üzere tek fazlı invertör tasarımında bipolar ve unipolar olmak üzere iki farklı sinyal üretme algoritması mevcuttur [25]. Akım verileri motor ile seri bağlı 1Ω direnç üzerinden osiloskop vasıtası ile zamana bağlı olarak kayıt altına alınmış, Matlab™ programı kullanılarak akım sinyalleri kritikleri yapılmıştır. Şekil 8’da sırası ile 30Hz, 50Hz ve 100Hz frekansları için bipolar ve unipolar SPWM algoritmaları ile elde edilmiş motor giriş akımları ve tam sinüs referans sinyali ile kıyaslaması verilmiştir. Frekans düştükçe indüktif etki azaldığından devre üzerinde direnç etkileri baskın hale gelmektedir. Bu nedenle akım genlikleri her iki yöntem için de frekans düştükçe artmaktadır. Grafiklerden anlaşıldığı üzere unipolar SPWM algoritmasının akım formu her frekans için bipolar algoritması ile üretilen akım sinyalinden daha iyidir. Tablo 2’de farklı referans frekansı için bipolar ve unipolar SPWM akım sinyalleri ve sinyal özellikleri verilmektedir. Her iki yöntemde de elde edilen çıkış sinyali frekansları eşittir.



Şekil 8. Farklı frekanslarda Bipolar ve Unipolar SPWM sinyalleri.

Tablo 2. Farklı frekanslarda Bipolar ve Unipolar SPWM ölçüm sonuçları.

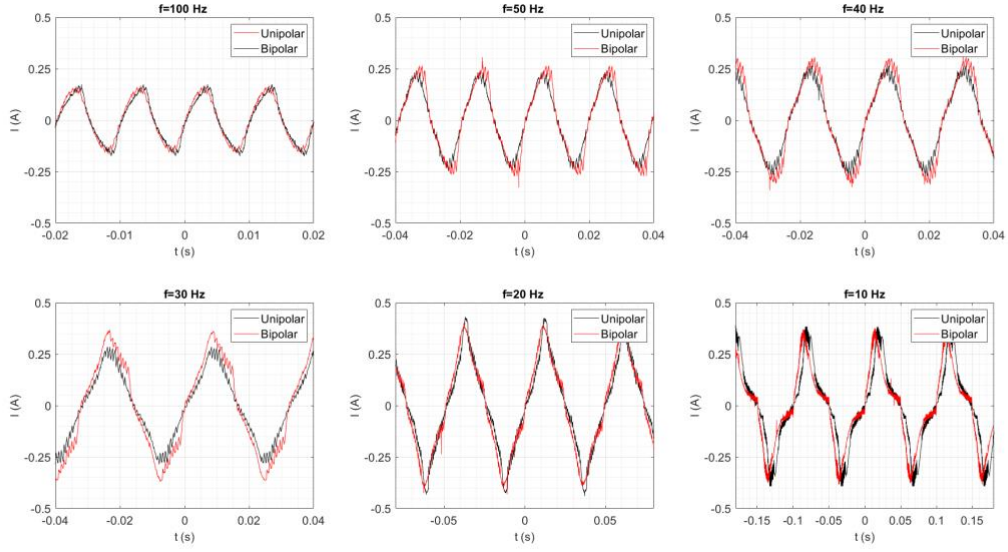
	$f_{ref}(Hz)$	$f_{exp}(Hz)$	$I_{max}(A)$	$I_{rms}(A)$	THD	RMSE
Bipolar SPWM	10	10.055	0.391	0.276	-8.3261	7.04
	20	20.397	0.433	0.306	-15.854	2.68
	30	31.039	0.398	0.282	-18.728	1.546
	40	41.994	0.327	0.231	-16.171	1.978
	50	50.996	0.28	0.198	-15.493	1.537
	100	100.5	0.182	0.129	-15.923	0.989
Unipolar SPWM	10	10.056	0.345	0.244	-9.133	4.311
	20	20.398	0.406	0.287	-12.831	3.972
	30	31.041	0.297	0.21	-17.155	1.381
	40	42.001	0.297	0.21	-17.155	1.381
	50	50.996	0.216	0.153	-22.579	0.613
	100	100.56	0.151	0.107	-26.014	0.369

1. bölümde, literatürde yer alan makalelere ait değerlendirmeler detaylı bir şekilde sunulmuştur. Deneysel çalışmaların içerisinde değişken frekanslı referans (çıkış) sinyali kullanılan çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Bu tür çalışmalar genellikle simülasyonlar şeklinde sunulmuş ve elde edilen sonuçlara göre, THD (Toplam Harmonik Distorsiyon) oranları %10 ile %40 arasında değişmektedir [21, 22, 25]. Benzer şekilde, çok katmanlı invertör tasarımı gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda ANN (Yapay Sinir Ağı) algoritmasının kullanılmasıyla THD oranları %0,5 ile %20 arasında indirildiği görülmüştür [23]. Deneysel çalışma sonucunda Bipolar ve Unipolar SPWM algoritmalarında elde edilen THD ve RMSE değerleri Tablo 2 ile verilmiştir. THD oranları literatüre uygun olarak % 15-25 arasında değişirken RMSE değerleri ise 0.3 ile 7 arasında değişmektedir.

Elde edilen akımların genliği I_{max} Bipolar SPWM algoritmasında daha yüksek ve THD değerleri unipolar SPWM tekniğine göre daha iyidir. Bu durum bipolar SPWM tekniğinde daha az yüksek frekanslı gürültü olduğunu göstermektedir. Ancak RMSE değerleri ve referans sinyal ile uyumu dikkate alındığında açıkça unipolar SPWM tekniğinin, bipolar SPWM tekniğine göre daha iyi olduğu görülmektedir (Şekil 8).

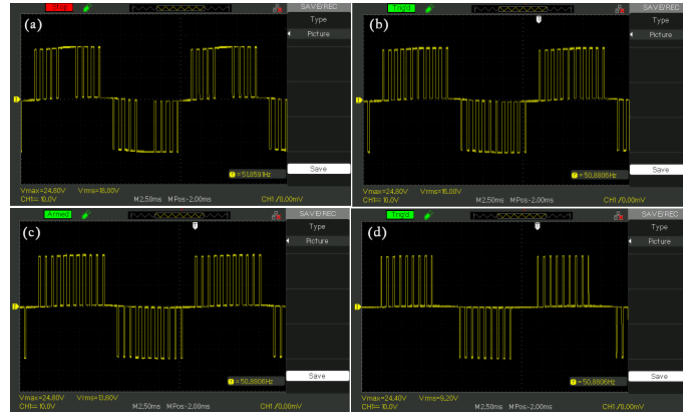
Şekil 9 ile bipolar ve unipolar SPWM algoritması ile üretilen sinyalin motor çıkışı gerilim değerleri görülmektedir. Şekil 10'de ise motor akımının farklı frekans değerlerinde zamanla değişimi verilmiştir. Düşük frekanslarda eğriyi temsil eden tetikleme sinyallerinin arttığı, sistemde oluşan kalıcı sapmanın ise azaldığı görülmektedir (Şekil 9). Trafo tasarım frekansı 50Hz'den uzaklaştıkça (yükseldikçe veya düştükçe) akım formunun bozulduğu açıktır (Şekil 10). Frekans düştükçe akım genlikleri yükselmekte, sinyal üzerinde gürültü artma, referans sinyal ile uyum azalmaktadır. 10Hz ve 20Hz gibi düşük frekanslarda indüktif etki azaldığından, sinyal genliği artmasına rağmen akım formunda büyük sapmalar meydana gelmektedir (Şekil 10).

**Şekil 9.** Farklı frekanslarda SPWM sinyal çıkışı (V).

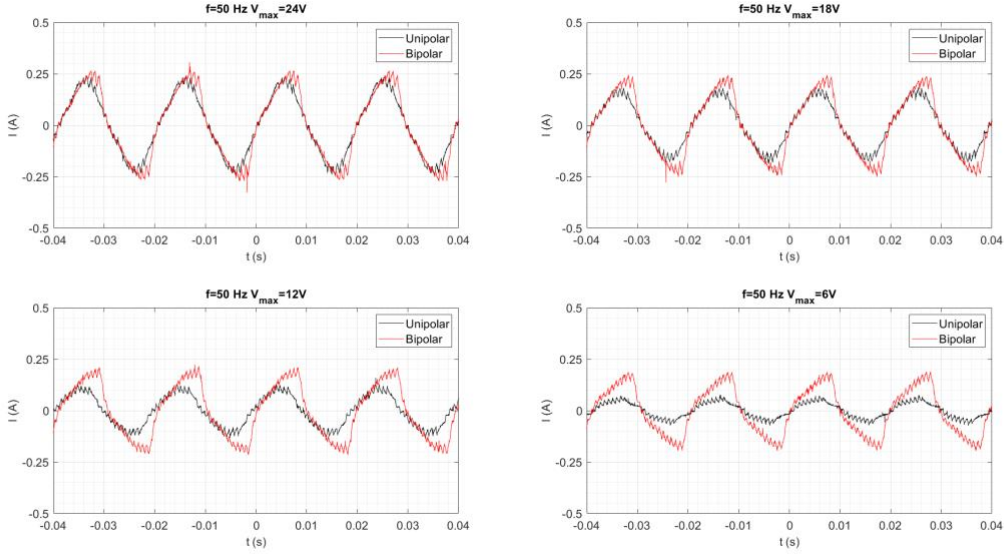


Şekil 10. Bipolar ve Unipolar Farklı frekanslarda motor akım profili.

İnvertör yapıları farklı frekansta sinyaller üretmek için kullanıldığı gibi, sabit frekansta farklı genliklerde sinyal üretmek için de kullanılabilir. Şekil 11 ve Şekil 12 ile 50 Hz frekansında sırası ile 24 V, 18V, 12V ve 6V genliklerinde sinüzoidal sinyal üretilerek sürücü çıkışları ve motor akımları incelenmiştir. Taşıyıcı sinyal formunun genliğin artması ile birlikte sıklaştığı, akım genliğinin referans sinyal genliği ile düştüğü ve aynı zamanda sinyal formunun bozulduğu açıktır. Bu durum referans sinyal gerilimi ile kaynak çıkış gerilimi arasındaki farkın açılmasından kaynaklanmaktadır [23].

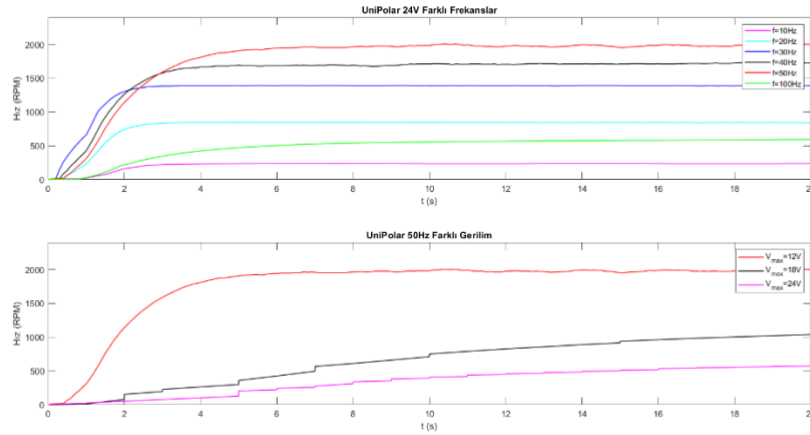


Şekil 11. Farklı genliklerde SPWM sinyal çıkışı ($V_{max}=24$ V(a). $V_{max}=18$ V(b). $V_{max}=12$ V(c). $V_{max}=6$ V(d)).



Şekil 12. Farklı genliklerde 50Hz unipolar SPWM motor akım profilleri.

Şekil 13'te unipolar SPWM tekniği ile üretilen sinyallerin motor dönüş hızının zamanla değişimi verilmiştir. Hız verileri, rotor bölümüne IR kontrast sensörü yerleştirilerek farklı bir mikrokontrolcü yardımı ile alınmıştır. Birinci grafiklerde 24V gerilim sabit tutularak sırası ile 10Hz, 20Hz, 30Hz, 40Hz, 50Hz ve 100Hz frekanslarında motor hız verileri (RPM) görülmektedir. İkinci grafikte ise referans sinyal frekansı 50Hz sabit olmak üzere, sırası ile genliği 6V, 12V, 18V ve 24V referans sinyallerinde elde edilen hız verileri görülmektedir. Hız profilleri incelendiğinde, referans sinyal frekansının artması ile nominal hız artmakta, düşük frekanslarda motor kalkış ivmesi artarak kalkış süresi düşmektedir. 10Hz ve altında sinyal frekansında akım formu iyice bozulduğundan kalkış esnasında motor dengesiz hareket etmekte veya hiç hareket edememektedir. 100Hz frekansında indüktif etkinin artması ile akım genliği düştüğünden motor kalkış esnasında çok zorlanmaktadır (Bakınız, Şekil 10). Sabit kaynak geriliminde farklı genliklerde 50Hz sinyal ile motor çalışmaları görülmektedir. Beklendiği gibi genliğin düşmesi ile nominal motor hızları düşmekte ve motor hızlanma süreleri artmaktadır. $V_{max}=6V$ için akım profiline bozulması nedeni ile motor hareket etmemiştir.



Şekil 13. Unipolar 24V Farklı Frekans ve 50Hz Farklı Gerilim Hız Profilleri.

IV. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

İncelenen çalışmalar çoğunlukla; güneş enerji sistemleri, DC kaynaklar veya çok katmanlı DC kaynaklardan AC güç elde edilmesi için kullanılan tasarım ve algoritma yöntemleri yenilikçi olarak sunulmakta ve detaylı olarak Giriş bölümünde verilmektedir. Ayrıca motor sürücü [5], ısıtma [8] ve deniz taşıt güç sistemleri [20] için SPWM uygulamaları literatürdeki araştırmalarda görülmüştür.

Literatürde incelenmiş olarak çalışmalar çoğunlukla sabit frekanslı referans (çıkış) sinyali ile gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, literatürde yer alan Bipolar ve Unipolar SPWM algoritmaları, yenilikçi ve özgün olarak düşük maliyetli invertör sistemlerinde, değişken referans sinyaliyle kullanılmak üzere deneysel olarak incelenmiştir. Mikrokontrolcü ile farklı frekans ve genliklerde üretilen SPWM sinyalleri trafo vasıtası ile yükseltilerek tek fazlı bir indüktif motor sürülmüştür. Motor akımı, motor hareket hızı ve SPWM sinyal çıkışlarının detaylı analizi yapılmıştır. Bipolar ve unipolar SPWM algoritmalarının akım profilleri karşılaştırıldığında, her iki algoritmada elde edilen sinyallerin frekansları aynıdır [14]. 50Hz referans sinyal için 50.996Hz akım sinyalleri olduğu görülmektedir. Bipolar SPWM için I_{rms} değeri 0.198A, THD değeri -15.493 ve RMSE değeri 1.537dB iken, unipolar SPWM için I_{rms} değeri 0.153A, THD değeri -22.579 ve RMSE değeri 0.613dB'dir (Tablo 2) [22, 23]. Grafiklerden de anlaşılabileceği üzere bipolar SPWM algoritmasının akım genliği daha yüksek görünse de, unipolar SPWM sinyallerinin referans sinyale olan uyumu ve hata değeri (RMSE) açıkça daha iyidir. Bunun yanında bipolar SPWM algoritmasının trafo tasarım frekansından uzaklaştıkça unipolar SPWM algoritmasına göre büyük bozulmalara uğradığı açıktır (Şekil 8-10). Akım sinyallerinde oluşan şekil bozuklukları motor hareketinde titreşime neden olduğu görülmüştür. İnvertör yapıları farklı frekansta sinyaller üretmek için kullanıldığı gibi, sabit frekansta farklı genliklerde sinyal üretmek için de kullanılabilir. Genel olarak uygulamalarda genlik değişimine ihtiyaç duyulmasa da çok serbestlik dereceli asenkron motorların kontrolünde sabit frekansta genlik değişimi ile motor dönüş yönü ayarlanabilmektedir. Şekil 11-12 incelendiğinde kaynak geriliminin %50-%100'ü içerisinde üretilen referans sinyallerinin motor hızı kontrolü için uygun olduğu görülmektedir. Frekans düştüğünde sinyal formu bozulmasına karşın nominal hızların düşmesi ve hareket ivmesinin artması nedeni ile motor titreşimleri azalmakta, motor hareketleri düzenli hale gelmektedir (Şekil 13). 10 Hz'in altında motor harekete geçmemiş olup, 100Hz'in üzerinde sinyal üretildiğinde akım genlikleri çok düştüğünden motor harekete geçememiştir. Sonuç olarak, bipolar SPWM ve unipolar SPWM algoritmalarının her ikisi ile üretilen sinyallerin de motor kontrol sistemlerinde kullanılabilir olduğu görülmüş olup, düşük maliyetli devre elemanları ile oluşturulan sistemlerin motor sürücü yapılarda kullanılabileceği gösterilmiştir.

V. KAYNAKLAR

- [1] M. Barnes, *Practical variable speed drives and power electronics*. Practical professional books from Elsevier. Oxford ; Burlington, MA: Newnes, 2003.
- [2] F. L. Luo and H. Ye, *Advanced DC/AC Inverters*. CRC Press. ISBN 13: 978-1-4665-1138-5, 2013.
- [3] E. Deniz ve H. Altun, "Beş Seviyeli İzole DC Kaynaklı Kaskat İnvertörlerin SPWM Tekniği İle Kontrolü", *SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi*, c. II, sy 1, ss. 1-9, 2007.
- [4] I. Colak ve E. Kabalci, "Developing a novel sinusoidal pulse width modulation (SPWM) technique to eliminate side band harmonics", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 44, sy 1, ss. 861-871, Oca. 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.08.024.
- [5] Jino Joy ve S. Ushakumari, "Performance comparison of a Canonical Switching Cell with SPWM and SVPWM fed sensorless PMBLDC motor drive under conventional and fuzzy logic controllers", *Journal of the Franklin Institute*, c. 354, sy 14, ss. 5996-6032, Eyl. 2017, doi: 10.1016/j.franklin.2017.07.043.
- [6] K. Latha Shenoy, C. G. Nayak, ve R. P. Mandi, "MPPT Enabled SPWM based bipolar VSI design in photovoltaic applications", *Materials Today: Proceedings*, c. 5, sy 1, ss. 1372-1378, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.223.

- [7] E. A. Samiotis, D. T. Trigonidis, G. A. Vokas, P. Papageorgas, ve A. G. Anastasiadis, "Simulation and Implementation of a SPWM Inverter Pulse Generator Circuit for Educational Purposes", *Energy Procedia*, c. 157, ss. 594-601, Oca. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.224.
- [8] J. Haema ve R. Phudungthin, "Full Bridge Resonant Inverter for Blade Induction Heating Application", *Energy Procedia*, c. 156, ss. 391-395, Oca. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.106.
- [9] Y. Birbir, K. Yurtbasi, ve V. Kanburoglu, "Design of a single-phase SPWM inverter application with PIC micro controller", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, c. 22, sy 2, ss. 592-599, Nis. 2019, doi: 10.1016/j.jestch.2018.11.014.
- [10] M. G. M. Abdolrasol, M. A. Hannan, S. M. S. Hussain, ve T. S. Ustun, "Optimal PI controller based PSO optimization for PV inverter using SPWM techniques", *Energy Reports*, c. 8, ss. 1003-1011, Nis. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2021.11.180.
- [11] C. I. Odeh, A. Lewicki, ve M. Morawiec, "A Single-Carrier-Based Pulse-Width Modulation Template for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters", *IEEE Access*, c. 9, ss. 42182-42191, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3065743.
- [12] S. M. M. Islam ve G. M. Sharif, "Microcontroller based sinusoidal PWM inverter for photovoltaic application", *1st International Conference on the Developements in Renewable Energy Technology (ICDRET)*, Dhaka: IEEE, ss. 1-4, Ara. 2009, doi: 10.1109/ICDRET.2009.5454227.
- [13] S. Syed Abdul Haq, R. JeyaRohini, P. Meenalochini, K. Jeyakanth, C. Immanuvel, ve T. HarishBabu, "A sinusoidal pulse width modulation (SPWM) technique for capacitor voltage balancing of nested I-type four-level inverter", *Materials Today: Proceedings*, c. 45, ss. 2435-2439, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.014.
- [14] M. S. Endiz ve R. Akkaya, "Matlab/Simulink ile Bipolar ve Unipolar PWM Kontrol Tekniklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi", *European Journal of Science and Technology*, Nis. 2021, doi: 10.31590/ejosat.900868.
- [15] A. Sedaghati, P. Horrillo-Quintero, H. Sánchez-Sáinz, ve L. M. Fernández-Ramírez, "Staircase modulation improvement to balance output power of stages of cascade H-bridge multilevel inverter", *Computers and Electrical Engineering*, c. 103, s. 108331, Eki. 2022, doi: 10.1016/j.compeleceng.2022.108331.
- [16] A. Kocalmış Bilhan ve S. Sünter, "3 Fazlı Evirici Devresi için SDGM, SHEDGM, HIDGM ve UVDGM Tekniklerinin Karşılaştırılması", *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, ss. 100-110, Haz. 2018, doi: [10.17100/nevbitelk.402693](https://doi.org/10.17100/nevbitelk.402693).
- [17] M. Dursun ve M. Kenan Döşoğlu, "Üç Fazlı Gerilim Kaynaklı Evirici için SDGM, ÜHDGM ve HDGM Tekniklerinin MATLAB/SİMULİNK ile Karşılaştırmalı Analizi", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 6, sy 4, ss. 983-999, Ağu. 2018, doi: 10.29130/dubited.437845.
- [18] A. Saygin ve A. Kerem, "6-Anahtarlı 3-Seviyeli Eviricide Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon Tekniğinin Uygulaması", *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, ss. 565-587, Haziran 2017.
- [19] B. Fani, "Inverter-based islanded microgrid: A review on technologies and control", *Advances in Electrical Engineering*, 2022.
- [20] H. Chen, "Simulation research on ship electric propulsion speed regulation system based on variable structure control and FPGA", *Optik*, c. 272, s. 170265, Şub. 2023, doi: 10.1016/j.ijleo.2022.170265.

- [21] A. Kumari, Y. Gopal, D. K. Dhaked, K. P. Panda, ve Y. N. V. Kumar, "A single source five-level switched-capacitor based multilevel inverter with reduced device count", *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, c. 5, s. 100235, Eyl. 2023, doi: 10.1016/j.prime.2023.100235.
- [22] E. Akbari ve A. Zare Ghaleh Seyyedi, "Power quality enhancement of distribution grid using a photovoltaic based hybrid active power filter with three level converter", *Energy Reports*, c. 9, ss. 5432-5448, Ara. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.04.368.
- [23] T. Atar, S. Balci, ve A. Kayabasi, "Determination of output current THD of multilevel inverter by ANN", *Measurement*, c. 210, s. 112525, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2023.112525.
- [24] H. Yıldız, "Analytical Solution of a Multi-Winding Coil Problem With an Air Core in Spherical Coordinates," *Journal of Polytechnic-Politeknik Dergisi* , 2022.
- [25] B. H. Yuditya, R. N. Hasanah, L. Ardhenta, ve T. Taufik, "Performance Comparison of Single-Phase Multilevel Inverter with SPWM Unipolar and Bipolar Switching Techniques", *FORTEI-International Conference on Electrical Engineering (FORTEI-ICEE)*, Bandung, Indonesia: IEEE, ss. 102-107, Eyl. 2020, doi: 10.1109/FORTEI-ICEE50915.2020.9249911.
- [26] N. Vazquez and J.V. Lopez, *Inverters- In Power Electronics Handbook*, pp. 289-338, *OReilly Online Book, King Juan Carlos University, Madrid, Spain*.