

Yarı Empedans Kaynaklı İnverterlerde Farklı Kontrol Tekniklerinin Performans Etkisinin İncelenmesi

Mustafa Sacid ENDİZ¹  Ramazan AKKAYA² 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, 42090, Konya, Türkiye (*Sorumlu Yazar/Corresponding Author*)

² Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya, Türkiye

Makale Bilgileri

Makale Geçmişi
Geliş: 21.02.2020
Kabul: 31.03.2020
Yayın: 30.06.2020

Anahtar Kelimeler:
Yarı Empedans Kaynaklı İnverter, Gerilim Kazancı, Modülasyon İndeksi, Harmonik Bozulma.

ÖZET

Empedans kaynaklı inverterler, geleneksel inverterlerin sahip olduğu kavramsal ve teorik sınırlamaları ortadan kaldırarak gelişmiş bir güç dönüşüm konsepti sağlar. Empedans kaynaklı inverter devresi, anahtarlama elemanlarının bulunduğu güç katını girişte bulunan besleme katına bağlayan bir çift kondansatör ve bobinden meydana gelen özel bir empedans ağına sahiptir. Son yıllarda empedans kaynaklı inverterlere kıyasla daha yüksek verime sahip yarı empedans kaynaklı inverter topolojisi ortaya konmuştur. Bu çalışmada, yarı empedans kaynaklı inverterde farklı darbe genişlik modülasyon (DGM) kontrol tekniklerinin gerilim kazancına ve çıkış akım sinyalinin harmonik açıdan kalitesine etkisi incelenmiştir. Basit yükseltici kontrol, maksimum yükseltici kontrol, 3. harmonik ilaveli maksimum yükseltici kontrol, maksimum sabit yükseltici kontrol ile 3. harmonik ilaveli maksimum sabit yükseltici kontrol teknikleri için belirli bir yükseltme faktöründe modülasyon indeksi ve gerilim kazancı ilgili denklemler ile hesaplanmıştır. Her bir kontrol tekniğinin çalışma prensibi ve temel özellikleri açıklanmış ve Matlab/Simulink ortamında benzetim çalışmaları yardımıyla karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. Gerçekleştirilen benzetim sonuçları ile yapılan teorik analiz sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Analysis of Different Control Techniques on the Performance in Quasi-Z Source Inverters

Article Info

Article History
Received: 21.02.2020
Accepted: 31.03.2020
Published: 30.06.2020

Keywords:
Quasi-Z-Source inverter, Voltage Gain, Modulation index, Harmonic Distortion.

ABSTRACT

Z-Source inverters provide an advanced power conversion concept and eliminate the conceptual and theoretical limitations of traditional inverters. The Z-Source inverter circuit has a special impedance network consisting of a pair of capacitors and inductors connecting the inverter stage to the DC power stage. In recent years, quasi-Z-Source (qZSI) inverter topology has been introduced which has a higher efficiency and better performance than Z-Source inverter. In this study, the effect of different PWM control techniques on voltage gain and current harmonics in quasi-Z-Source inverter is presented. Modulation index and voltage gain were calculated at a determined boost factor with the help of the related equations for the simple boost control, maximum boost control, maximum boost control with 3rd harmonic injection, maximum constant boost control and maximum constant boost control with 3rd harmonic injection respectively. The working principle and basic features of each control technique are explained and comparative analysis is performed with the help of the simulations performed in Matlab/Simulink. The simulation results were found to be consistent with the theoretical analysis.

Atıf/Citation: Endiz, MS. & Akkaya, R. (2020). Yarı empedans kaynaklı inverterlerde farklı PWM kontrol tekniklerinin performans etkisinin incelenmesi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2(1), 12-26.



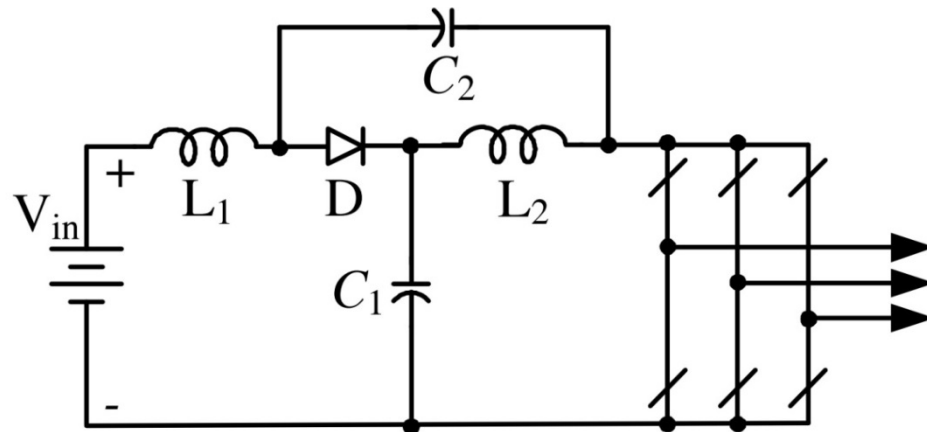
"This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). (CC BY-NC 4.0)"

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde güç inverterleri; rüzgâr ve güneş enerji sistemleri, AA motor kontrolü, kesintisiz güç kaynakları, endüksiyonla ısıtma ve elektrik dağıtım şebekeleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır [1]. Çalışma prensibine ve kullanılan güç kaynağının türüne göre inverterler, gerilim kaynaklı inverterler ve akım kaynaklı inverterler olarak ikiye ayrılır. Her iki inverter türü, iki aşamalı güç dönüşümü özelliği, elektromanyetik girişim (EMG) etkisi ile aynı faz kolundaki anahtarların kısa devre olabilmesi durumu, yarı iletken anahtarlama elemanları sürülürken ölü zaman süresi konulması ve bu sürenin neden olduğu çıkış sinyalindeki harmonik bozulma gibi dezavantajlara sahiptir [1,2].

Geleneksel inverterlerin yukarıda bahsedilen dezavantajlarını ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilen empedans kaynaklı inverter topolojisi ilk defa 2003 yılında ortaya konmuştur [3,4,5]. Empedans kaynaklı inverter devresi, anahtarlama elemanlarının bulunduğu güç katını girişte bulunan besleme katına bağlayan bir çift kondansatör ve bobinden meydana gelen özel bir empedans ağına sahiptir. Empedans kaynaklı inverter devresinde, aynı faz kolundaki anahtarlama elemanları kısa devre modunda çalıştırılarak yükseltme sağlandığından anahtarlar sürülürken ölü zaman süresi konulmasına gerek yoktur. Bunun sonucunda çıkış işaretinde geleneksel invertere kıyasla daha az bozulma meydana gelmektedir. Ayrıca empedans ağındaki pasif elemanların enerji depolama özelliği sayesinde bir transformatöre veya DA-DA dönüştürücü devresine ihtiyaç duyulmaz. Gerilim yükseltme işlemi aynı faz kolundaki anahtarların kısa devre modunda çalıştırılmasına bağlı olarak gerçekleştirildiğinden EMI etkisine karşı korunmuş olur [6,7].

Empedans kaynaklı inverterler DA gücü tek aşamada hem yükseltme hem de dönüştürme özelliğinden dolayı daha az karmaşık, düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir devre yapısı olarak ortaya çıkmıştır [8,9,10]. Son yıllarda, empedans kaynaklı invertere kıyasla temel devresi Şekil 1'de görülen daha etkin yarı empedans kaynaklı inverter topolojisi ortaya konulmuştur [11,12]. Yarı empedans kaynaklı inverter topolojisi, empedans kaynaklı inverterin tüm özelliklerine sahip olmakla beraber, empedans kaynaklı inverterin bazı dezavantajlarını da ortadan kaldıran gelişmiş bir topolojidir. Yarı empedans kaynaklı inverter, girişinde bulunan indüktör yardımıyla DA güç kaynağından sürekli sabit bir giriş akımına ve empedans katında ise daha düşük nominal değerli pasif bileşenlere sahiptir [13].



Şekil 1. Yarı empedans kaynaklı inverter temel devresi (Figure 1. Quasi-Z-Source inverter main circuit)

Makalenin ikinci bölümünde benzetim çalışmasında kullanılan araç ve yöntemlerden, üçüncü bölümde tüm kontrol teknikleri için belirli bir yükseltme faktöründe modülasyon indeksi ve gerilim kazancının ilgili denklemler yardımıyla hesabı ile gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından, son bölümde ise her bir kontrol tekniği için elde edilen bulguların yorumlanmasından bahsedilmiştir.

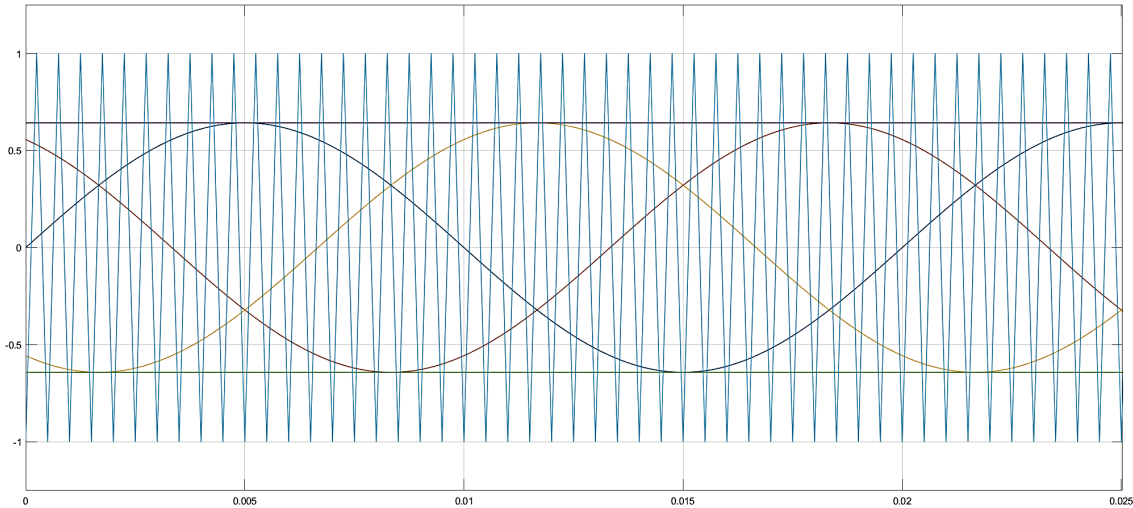
MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Materyal (Material)

Bu çalışmada, klasik empedans kaynaklı inverterler için ortaya konan DGM kontrol teknikleri, yarı empedans kaynaklı inverterler için uygulanmış ve gerilim kazancı ile çıkış akım sinyalinin harmonik açıdan kalitesine etkisi ilgili denklemler yardımıyla analiz edilip Matlab/Simulink programı kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Akademik çalışmalarda ve birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılan Matlab/Simulink programı, bu çalışmada etkisi incelenen beş farklı DGM kontrol tekniğinin benzetim çalışmaları için kullanılmıştır. Matlab/Simulink, araştırmacılara tasarım esnekliği ve birçok durumda değişen parametre değerlerini kolayca uygulamaya imkân vermektedir. Yarı empedans kaynaklı inverterlerde kullanılan klasik taşıyıcı tabanlı DGM kontrol teknikleri sırasıyla; basit yükseltici kontrol (BYK), maksimum yükseltici kontrol (MYK) ve maksimum sabit yükseltici kontrol (MSYK) teknikleridir [7].

Basit Yükseltici Kontrol Tekniği (Simple Boost Control Technique)

Basit yükseltici kontrol tekniği, empedans kaynaklı inverterler için geliştirilen ilk tekniktir [3]. Bu teknikte kullanılmakta olan kontrol sinyalleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



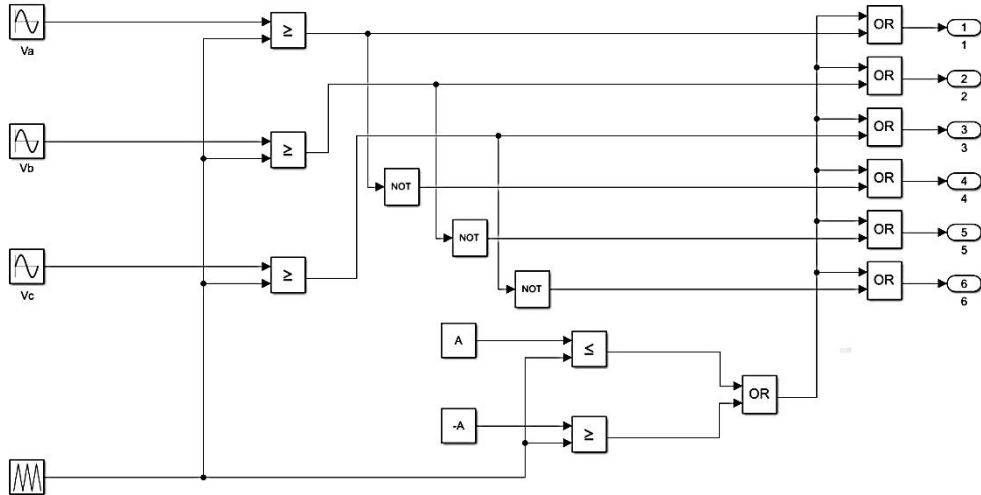
Şekil 2. Basit yükseltici kontrol sinyalleri (**Figure 2.** Simple boost control waveforms)

Şekil 3'te blok diagramı verilen basit yükseltici kontrol tekniğinde aralarında faz farkı bulunan üç referans sinyali (V_a, V_b, V_c), iki düz kısa devre zarf sinyali (V_p, V_n) ve bir üçgen taşıyıcı dalga sinyali kullanılmaktadır. Üçgen taşıyıcı dalga sinyalinin genliği, düz kısa devre zarf sinyallerinden büyük olduğu durumlarda inverter kısa devre modunda; bunun dışındaki durumlarda ise taşıyıcı tabanlı klasik DGM inverter gibi çalışacaktır. Yarı empedans kaynaklı bir inverterde basit yükseltici kontrol tekniği için yükseltme faktörü, modülasyon indeksi ve gerilim kazanç ifadesi aşağıda sırasıyla verilmiştir.

$$B = 1/(2M - 1) = 1/(1 - 2D) \quad (1)$$

$$M = (B + 1)/2B \quad (2)$$

$$G = MB = 2V_{AA}/V_{DA} = (B + 1)/2 \quad (3)$$

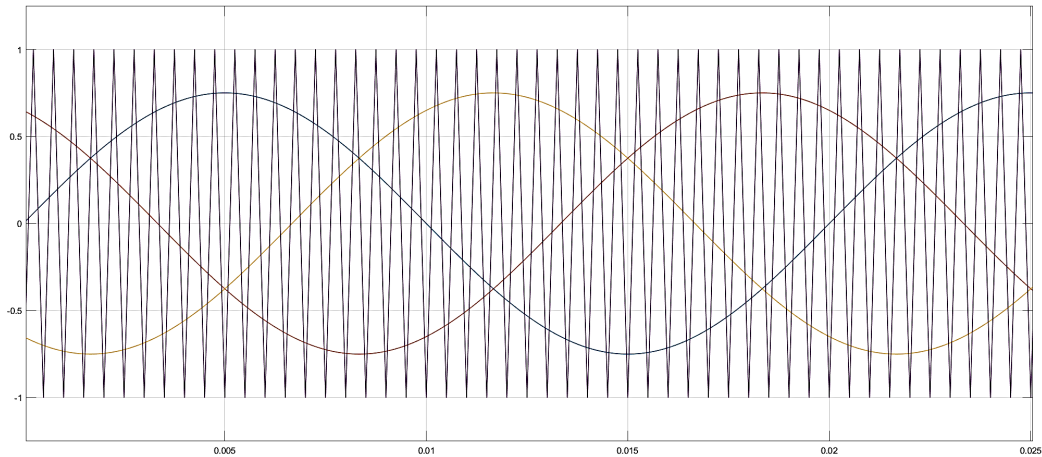


Şekil 3. Basit yükseltici kontrol diyagramı (Figure 3. Simple boost control diagram)

M modülasyon indeksini, B yükseltme faktörünü, V_{AA} çıkış faz geriliminin tepe değerini, V_{DA} girişteki DA güç kaynağını, T anahtarlama periyodunu, T_0 kısa devre anahtarlama süresini, T_1 kısa devre olmayan anahtarlama süresini, D kısa devre görev oranını ve G kazancı göstermektedir. Basit yükseltici kontrol tekniğinin dezavantajı, yarı iletken anahtarlama elemanlarına uygulanan gerilim stresi yüksek olduğu için büyük nominal değerlere sahip anahtarlama elemanları gerektirmesidir ki bu da maliyet üzerinde doğrudan etkilidir.

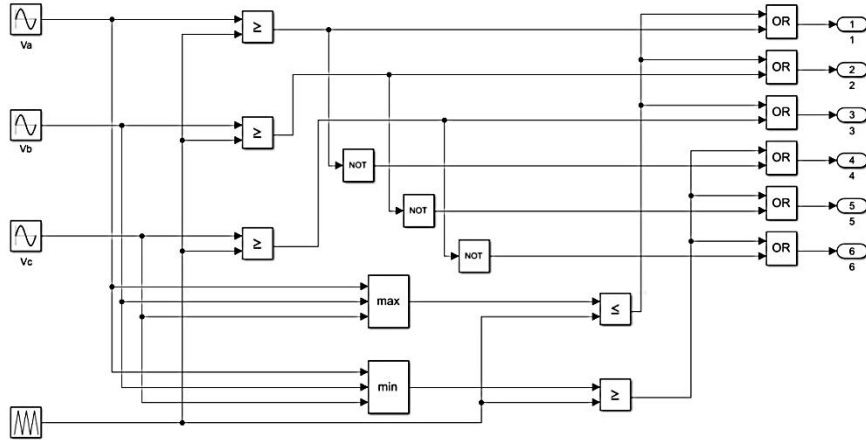
Maksimum Yükseltici Kontrol Tekniği (Maximum Boost Control Technique)

Maksimum yükseltici kontrol tekniğinin çalışma prensibi klasik taşıyıcı tabanlı DGM kontrol tekniğine oldukça benzemektedir [4]. Bu teknikte kullanılmakta olan kontrol sinyalleri Şekil 4'de gösterilmektedir.



Şekil 4. Maksimum yükseltici kontrol sinyalleri (Figure 4. Maximum boost control waveforms)

Şekil 5'te blok diagramı verilen maksimum yükseltici kontrol tekniğinde aralarında faz farkı bulunan üç referans sinyali (V_a, V_b, V_c) ve bir üçgen taşıyıcı dalga sinyali kullanılmaktadır. Üçgen taşıyıcı dalga sinyalinin genliği, referans sinyallerinden büyük olduğu durumlarda inverter kısa devre modunda, bunun dışındaki durumlarda ise taşıyıcı tabanlı klasik DGM inverter gibi çalışacaktır. Maksimum yükseltici kontrol tekniğinin basit yükseltici kontrol tekniğinden en büyük farkı, aktif anahtarlama durumları dışında kalan tüm sıfır durumlarını kısa devre durumuna dönüştürerek çıkış dalga sinyalini etkilemeden herhangi bir



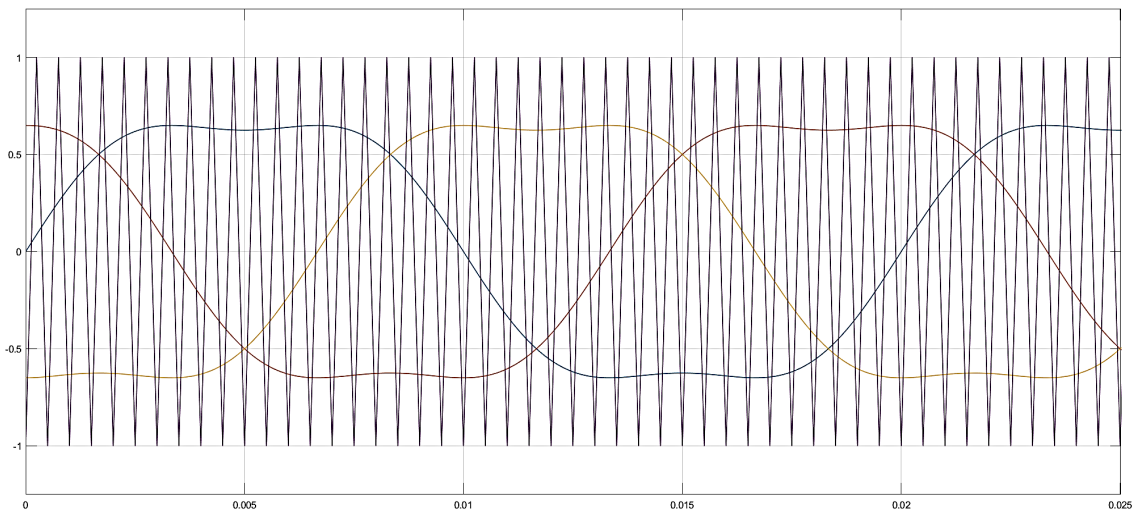
Şekil 5. Maksimum yükseltici kontrol blok diyagramı (**Figure 5.** Maximum boost control block diagram) modülasyon indeksinde maksimum yükseltme elde edilmesidir. Maksimum yükseltici kontrol tekniği ile ilgili denklemler aşağıda sırasıyla verilmiştir.

$$B = \pi / (3\sqrt{3}M - \pi) \quad (4)$$

$$M = \pi(B + 1) / 3\sqrt{3}B \quad (5)$$

$$G = MB = 2V_{AA} / V_{DA} = \pi(B + 1) / 3\sqrt{3} \quad (6)$$

Üç fazlı inverterlerde hem DA bara kullanım oranını hem de modülasyon indeks aralığını arttırmak amacıyla 3. harmonik eklenmesi tekniği sıklıkla uygulanmaktadır [4]. Benzetim çalışmalarında daha üst derecelerdeki harmoniklerin ilave edilmesi performansı olumsuz etkilediği için üç fazlı yarı empedans kaynaklı inverter devresinde 3. harmonik eklenmesi uygulanmıştır. Maksimum yükseltici kontrol tekniğinde modülasyon indeks aralığını ($M=1,15$) ve DA bara kullanım oranını arttırmak için referans sinüs dalgasına 3. harmonik ilave edilerek gerilim kazanç aralığının artması sağlanır. Şekil 6'da 3. harmonik ilaveli maksimum yükseltici kontrol sinyalleri gösterilmektedir. Çalışma prensibi olarak maksimum yükseltici kontrol ile aynı olup değişen tek şey referans sinyallerinin dalga şeklidir.



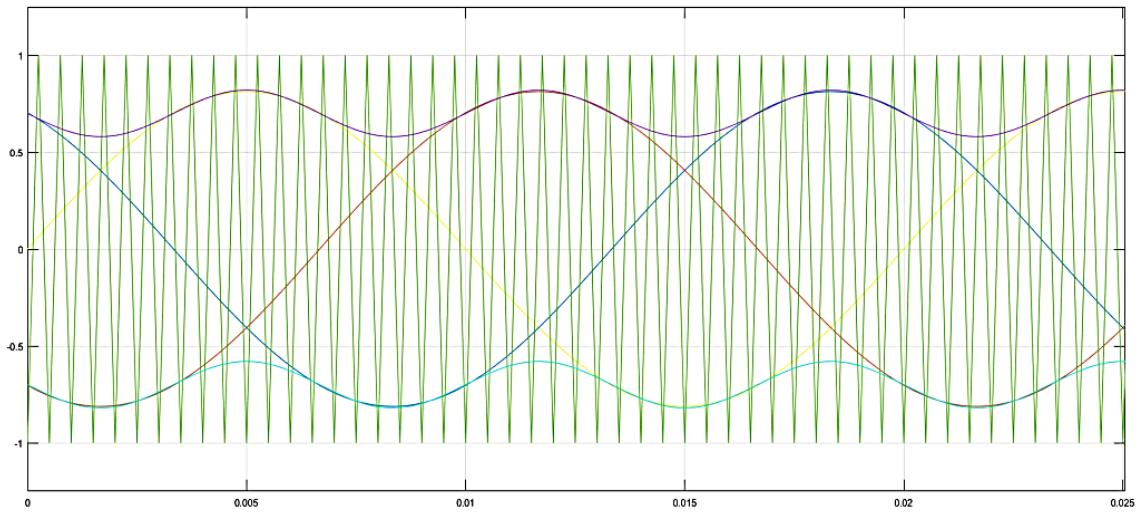
Şekil 6. 3. harmonik ilaveli maksimum yükseltici kontrol sinyalleri (**Figure 6.** Third harmonic injection maximum boost control waveforms)

Maksimum yükseltici kontrol tekniğinin dezavantajı, sabit olmayan bir yükseltme faktörüne sahip

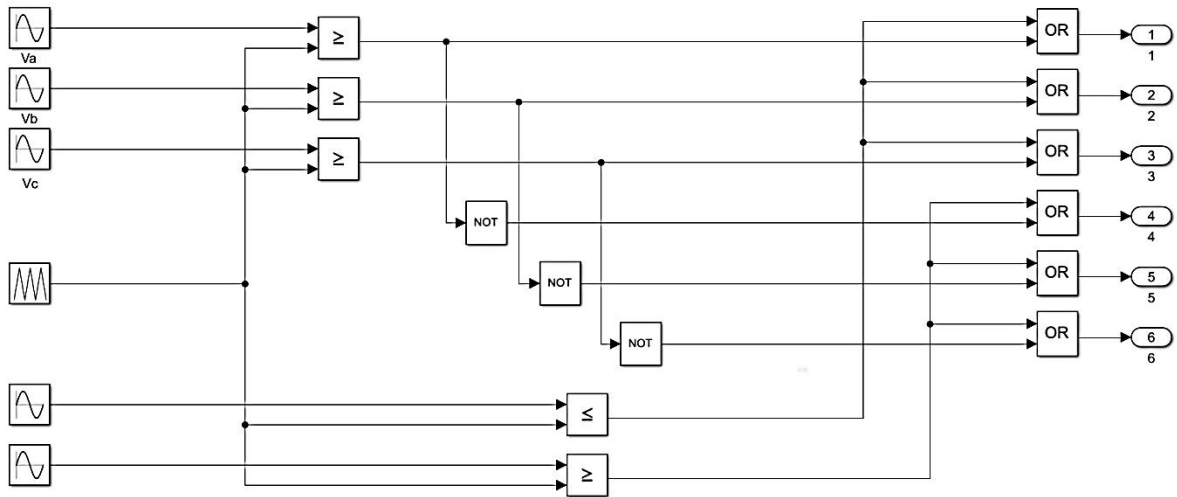
olduğu için empedans katında kullanılan bobinlerde düşük frekansta dalgalanma oluşumuna neden olmaktadır. Bobinler üzerinde düşük frekansta dalgalanma oluşumunu engellemek için empedans katında büyük boyutlarda bobin kullanımı zorunlu olup kullanılan elemanların boyutunun artması doğrudan maliyetin artışına neden olmaktadır.

Maksimum Sabit Yükseltici Kontrol Tekniği (Maximum Constant Boost Control Technique)

Maksimum sabit yükseltici kontrol tekniğinin en önemli özelliği, maksimum ve sabit bir yükseltme faktörüne sahip olmasından dolayı empedans katında kullanılan bobinlerde düşük frekansta dalgalanma oluşmaz ve büyük boyutlarda bobin kullanım ihtiyacı ortadan kalkar [5]. Bu teknikte kullanılmakta olan kontrol sinyalleri Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Maksimum sabit yükseltici kontrol sinyalleri (Figure 7. Maximum constant boost control waveforms)



Şekil 8. Maksimum sabit yükseltici kontrol blok diyagramı (Figure 8. Maximum constant boost control block diagram)

Şekil 8'de blok diyagramı verilen maksimum sabit yükseltici kontrol tekniğinde aralarında faz farkı bulunan üç referans sinyali (V_a, V_b, V_c) sinüs formunda iki kısa devre zarf sinyali (V_p, V_n) ve bir üçgen taşıyıcı dalga sinyali kullanılmaktadır. Üçgen taşıyıcı dalga sinyalinin genliği, sinüs formundaki kısa devre zarf sinyallerinden büyük olduğu durumlarda inverter kısa devre modunda, bunun dışındaki durumlarda ise taşıyıcı

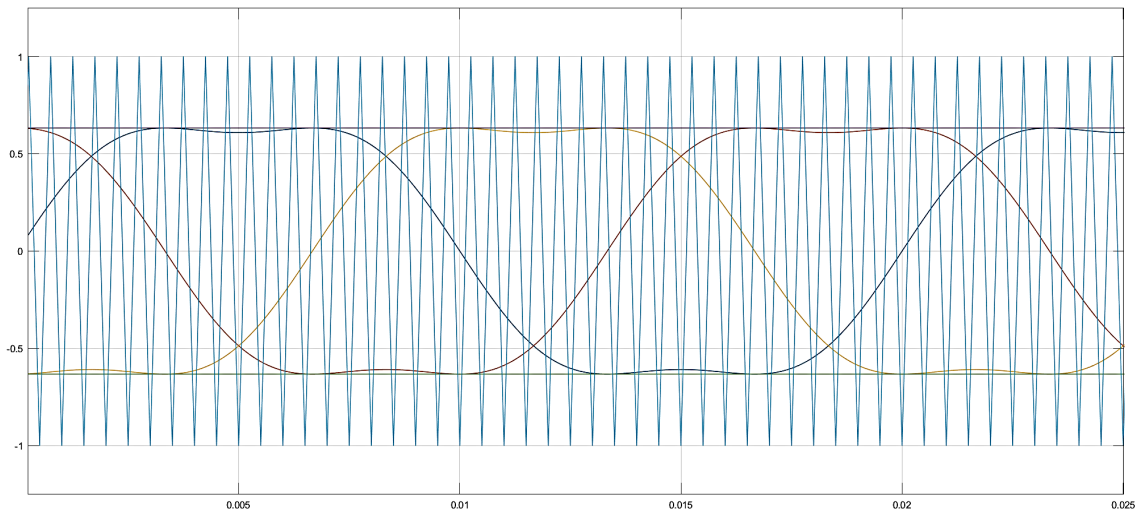
tabanlı klasik DGM inverter gibi çalışacaktır. Maksimum sabit yükseltici kontrol tekniği ile ilgili denklemler aşağıda verilmiştir.

$$B = 1/(\sqrt{3}M - 1) \quad (7)$$

$$M = (B + 1)/\sqrt{3}B \quad (8)$$

$$G = MB = 2V_{AA}/V_{DA} = (B + 1)/\sqrt{3} \quad (9)$$

Maksimum sabit yükseltici kontrol tekniğinde de modülasyon indeks aralığını ve DA bara kullanım oranını arttırmak için 3. harmonik ilavesi yapılmaktadır. Buradaki tek fark 3. harmonik ilave edildikten sonra sinüs formunda kısa devre zarf sinyalleri yerine düz kısa devre zarf sinyalleri kullanılmasıdır. Şekil 9'da 3. harmonik ilaveli maksimum sabit yükseltici kontrol sinyalleri gösterilmektedir. Çalışma prensibi olarak maksimum sabit yükseltici kontrol ile aynı olup modülasyon indeks aralığı ($M=1,14$) artmıştır [5].

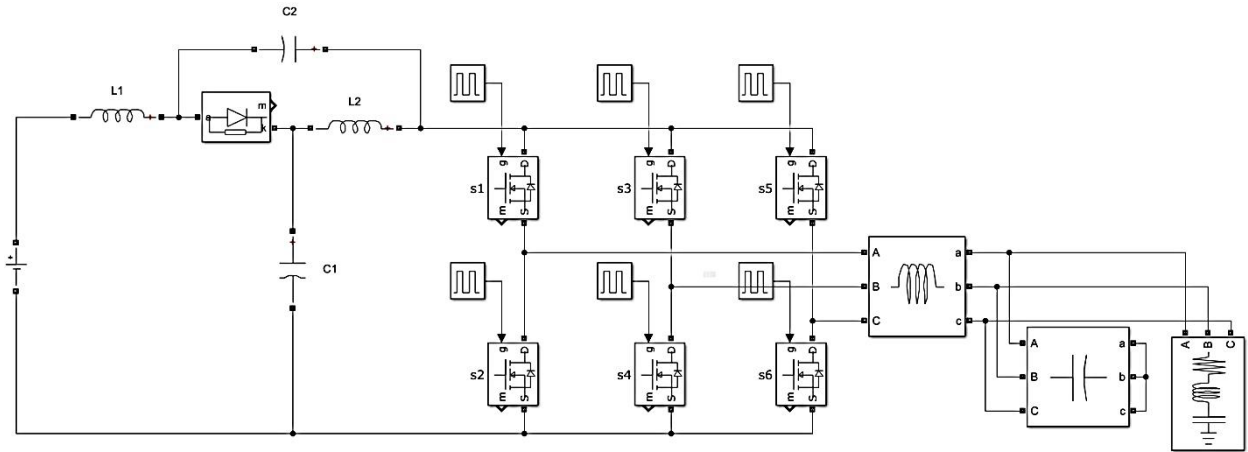


Şekil 9. 3. harmonik ilaveli maksimum sabit yükseltici kontrol sinyalleri (Figure 9. Third harmonic injection maximum constant boost control waveforms)

BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Basit yükseltici kontrol, maksimum yükseltici kontrol, 3. harmonik ilaveli maksimum yükseltici kontrol, maksimum sabit yükseltici kontrol ile 3. harmonik ilaveli maksimum sabit yükseltici kontrol teknikleri için belirli bir yükseltme faktöründe modülasyon indeksi ve gerilim kazancı ilgili denklemlerle hesaplanmış ve Matlab/Simulink ortamında benzetim çalışmaları yardımıyla karşılaştırmalı analiz yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışmaları ile hangi kontrol tekniğinin yarı empedans kaynaklı inverter devresinde en iyi performansı vermesi amaçlanmıştır. Güç dönüştürücü devrelerinde amaçlanan, devre kayıplarını minimize ederek çıkıştan alınan gerilim kazancını ve sinyal kalitesini en yüksek seviyede tutabilmektir. Klasik DGM inverterlerde uygulanan kontrol tekniklerini, yarı empedans kaynaklı inverter devresine uygulayarak ve analiz ederek gerilim kazancı ve sinyal kalitesi anlamında en iyi sonuç veren yöntemi ortaya çıkarmak bu çalışmanın en büyük hedefidir. Yarı empedans kaynaklı inverter devresinde hangi kontrol tekniğinin ne ölçüde faydalı olduğunun tespit edilmesi ve elde edilen sonuçların bundan sonra yapılacak olan çalışmalara öneride bulunması bu çalışmanın en özgün tarafını oluşturmaktadır. Şekil 10'da benzetim çalışmaları gerçekleştirilen yarı empedans kaynaklı inverter devresinin temel blok şeması gösterilmektedir. Devre incelendiğinde temel olarak DA giriş katı, kontrol katı ve anahtarlama elemanlarının oluşturduğu güç dönüştürücü katı olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Giriş katına uygulanan DA gerilimi yarı empedans katında kısa devre çalışma prensibine göre yükseltilerek, seçilen kontrol yöntemine göre sürülen anahtarlama elemanları yardımıyla AA

gerilimine dönüştürülür. Devre çıkışında harmonikleri azaltmak amacıyla filtre devresi kullanılmıştır.



Şekil 10. Yarı empedans kaynaklı inverter devresinin temel blok şeması (Figure 10. Quasi-Z-Source inverter main circuit configuration)

DA giriş gerilim değeri, kullanılan kaynağa, yükten çekilen akıma ve ortam şartlarına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir [3-5]. Genellikle empedans kaynaklı inverterlerde, DA giriş kaynağı olarak yakıt hücreleri veya fotovoltaiik paneller tercih edilir ve devrenin çıkışında yaklaşık olarak şebeke gerilimi hedeflenir. Benzetimi yapılan çalışmada DA giriş gerilimi ortalama 100V kabul edilerek 210V-230V şebeke gerilimi elde etmek amacıyla yükseltme faktörü $B=3,5$ seçilmiştir.

Empedans katını oluşturan rezonans devresindeki bobin ve kondansatör değerleri aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanmıştır. Rezonans devresindeki elemanların değerleri hesaplanırken, maksimum kısa devre çalışma oranı $D=T_0/T$ ile yükseltme faktörü B dikkate alınarak hesaplama yapılır. Ayrıca kullanılacak olan elemanların doğru seçilmesi boyutu ve maliyeti doğrudan etkileyecektir [5]. Rezonans devresindeki bobin için akım-gerilim ilişkisi altta verilen denklem ile hesaplanır:

$$V_{DA} = L * d_i / d_t \quad (10)$$

Verilen denklemde d_i bobin ripple akım değeri, d_t ise kısa devre çalışma süresidir. Anahtarlama frekansı $f_s=5\text{KHz}$ ve maksimum kısa devre çalışma oranı dikkate alınarak kısa devre çalışma süresi $d_t=50\mu\text{s}$ olmak üzere, Şekil 10'da verilen yarı empedans kaynaklı inverter devresinde bobin akım değeri giriş akım değerine eşittir ($I_L=I_m=50\text{A}$). Rezonans devresindeki bobinin çok fazla dalgalanmaya maruz kalmadan çalışabilmesi için bobin ripple akım değeri teorik olarak bobin akım değerinin yaklaşık 0,1 katı seçilerek $d_i=5\text{A}$ bulunur. (10)'da verilen denklem kullanılarak d_i yerine yazıldığında rezonans devresindeki bobin değeri $L=1\text{mH}$ hesaplanır. Rezonans devresindeki kondansatör için akım-gerilim ilişkisi altta verilen denklem ile hesaplanır:

$$I_{giriş} = C * d_v / d_t \quad (11)$$

Kondansatör ripple gerilim değeri teorik olarak kondansatörün gerilim değerinin ($V_c=270\text{V}$) yaklaşık 0,1 katı seçilerek $d_v=2,7\text{V}$ bulunur. (11)'de verilen denklem kullanılarak d_v yerine yazıldığında rezonans devresindeki kondansatör değeri $C=1000\mu\text{F}$ hesaplanır. Devre çıkışındaki harmonikleri azaltmak amacıyla kullanılan filtre devresindeki bobin ve kondansatör değerleri aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanmıştır. Yarı empedans kaynaklı inverter devresinin çıkış filtresi için köşe frekansı (f_o) hesabı (12)'de verilen denklem ile hesaplanır. Filtre köşe frekansını anahtarlama frekansının (f_s) onda biri olarak belirlemek 40dB zayıflatma sağlamakta ve bu değer harmonik bozulma şartı için yeterli olmaktadır. Bundan dolayı filtre köşe frekansı $f_o=500\text{Hz}$ seçilir. Bu şekilde filtre elemanlarını mümkün olduğunca küçük tutarak hem boyut hem de maliyeti avantajı sağlanabilmektedir. Daimi kondansatör değeri uygun gerilim değerinde $C_f=100\mu\text{F}$ olarak seçilirse

(12)'de verilen denklem kullanılarak bobin değeri $L_F=1\text{mH}$ bulunur.

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{L_f C_f} \quad (12)$$

Benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler şu şekildedir: DA kaynak gerilimi $V_{DA}=100\text{V}$, empedans katı bobin ve kondansatör değerleri sırasıyla $L_1=L_2=1\text{mH}$, $C_1=C_2=1000\mu\text{F}$, anahtarlama frekansı $f_s=5\text{kHz}$, filtre elemanları $L_F=1\text{mH}$, $C_F=470\mu\text{F}$ ve endüktif yük değerleri de $R=10\Omega$ ve $L=1\text{mH}$. Kısa devre çalışma oranı $D=T_0/T$, empedans katındaki kondansatör değerleri V_{C1} ve V_{C2} ile anahtarlama elemanlarına uygulanan gerilim stresi V_S , aşağıdaki denklemlerde hesaplanmıştır.

$$B = 1/\{1 - 2(T_0/T)\} = 3,5 \Rightarrow T_0/T = 0,35 \quad (13)$$

$$V_{C1} = T_1/(T_1 - T_0)V_{DA} = 216\text{V} \quad (14)$$

$$V_{C2} = T_0/(T_1 - T_0)V_{DA} = 116\text{V} \quad (15)$$

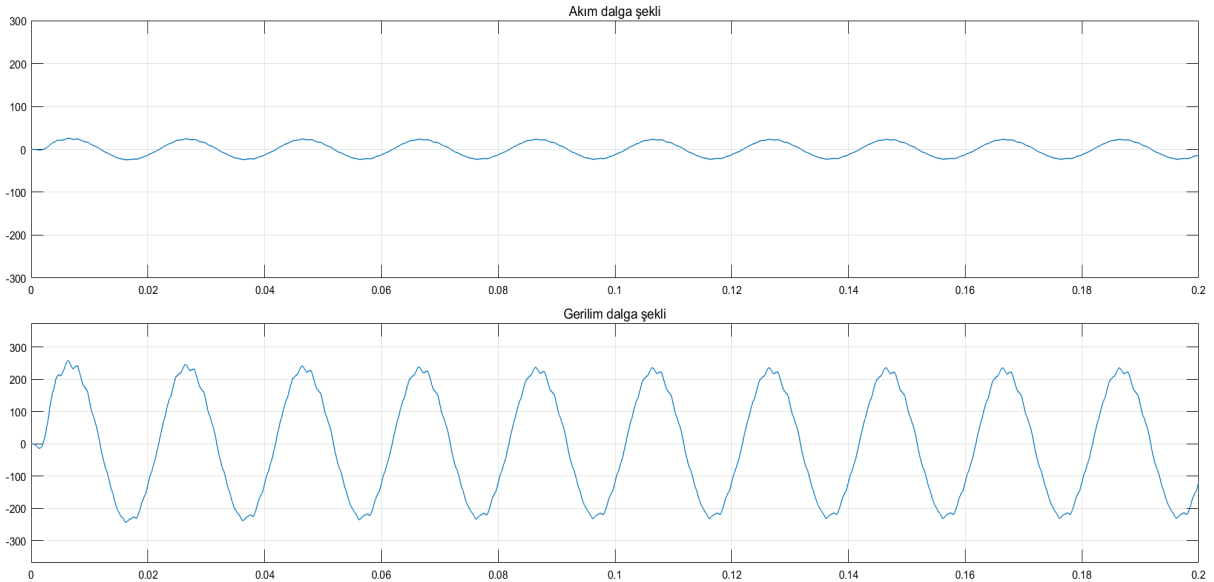
$$V_S = BV_{DA} = 350\text{V} \quad (16)$$

Basit yükseltici kontrol tekniğinde $B=3,5$ yükseltme faktöründe modülasyon indeksi ve gerilim kazancı ilgili denklemler yardımıyla aşağıda hesaplanmıştır.

$$M = (B + 1)/2B = 0,64 \quad (17)$$

$$G = MB = 2,25 \quad (18)$$

Şekil 11'de basit yükseltici kontrol tekniği için LC filtresi kullanılarak çıkış akım ve gerilim dalga şekillerinin tepe değerleri görülmektedir. Filtre edilmiş çıkış akım sinyalinin etkin değerinin $16,1\text{A}$ ve filtre edilmiş gerilim sinyalinin etkin değerinin 161V olduğu görülmektedir.



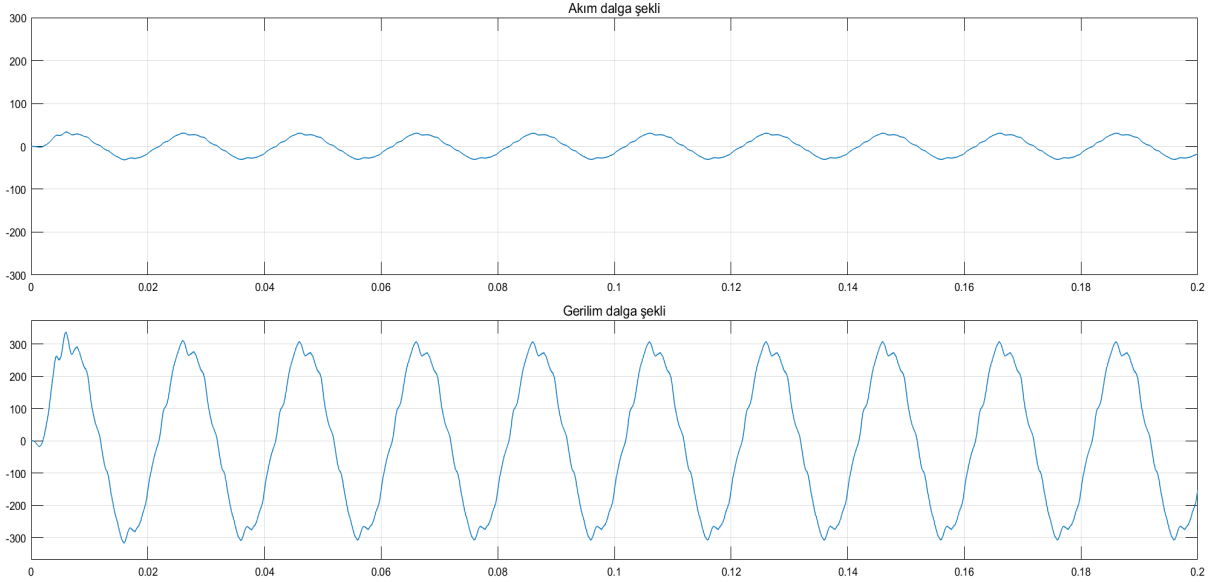
Şekil 11. Basit yükseltici kontrol çıkış akım-gerilim dalga şekilleri (Figure 11. Current and voltage output waveforms using simple boost)

Maksimum yükseltici kontrol tekniğinde $B=3,5$ yükseltme faktöründe modülasyon indeksi ve gerilim kazancı ilgili denklemler yardımıyla aşağıda hesaplanmıştır.

$$M = \pi(B+1)/3\sqrt{3}B = 0,77 \quad (19)$$

$$G = MB = 2,72 \quad (20)$$

Şekil 12'de maksimum yükseltici kontrol tekniği için LC filtresi kullanılarak çıkış akım ve gerilim dalga şekillerinin tepe değerleri görülmektedir. Filtre edilmiş çıkış akım sinyalinin etkin değerinin 20,7A ve filtre edilmiş gerilim sinyalinin etkin değerinin 207V olduğu görülmektedir.



Şekil 12. Maksimum yükseltici kontrol çıkış akım-gerilim dalga şekilleri (Figure 12. Current and voltage output waveforms using maximum boost)

Maksimum sabit yükseltici kontrol tekniğinde $B=3,5$ yükseltme faktöründe modülasyon indeksi ve gerilim kazancı ilgili denklemler yardımıyla aşağıda hesaplanmıştır.

$$M = (B+1)/\sqrt{3}B = 0,74 \quad (21)$$

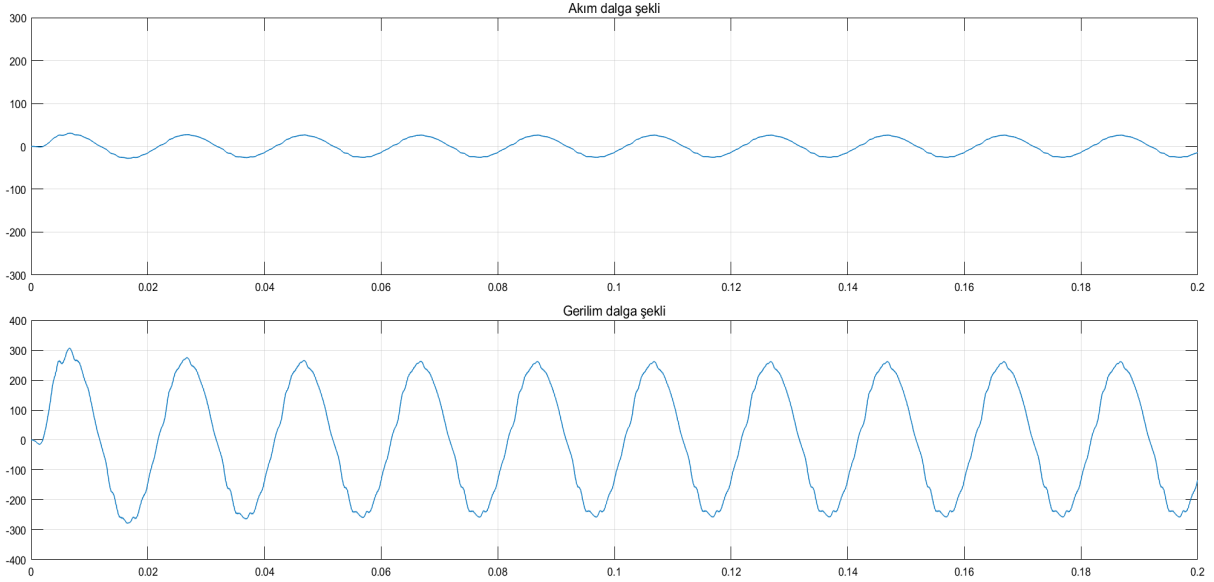
$$G = MB = 2,60 \quad (22)$$

Şekil 13'te maksimum sabit yükseltici kontrol tekniği için LC filtresi kullanılarak çıkış akım ve gerilim dalga şekillerinin tepe değerleri görülmektedir. Filtre edilmiş çıkış akım sinyalinin etkin değerinin 18A ve filtre edilmiş gerilim sinyalinin etkin değerinin 180V olduğu görülmektedir.

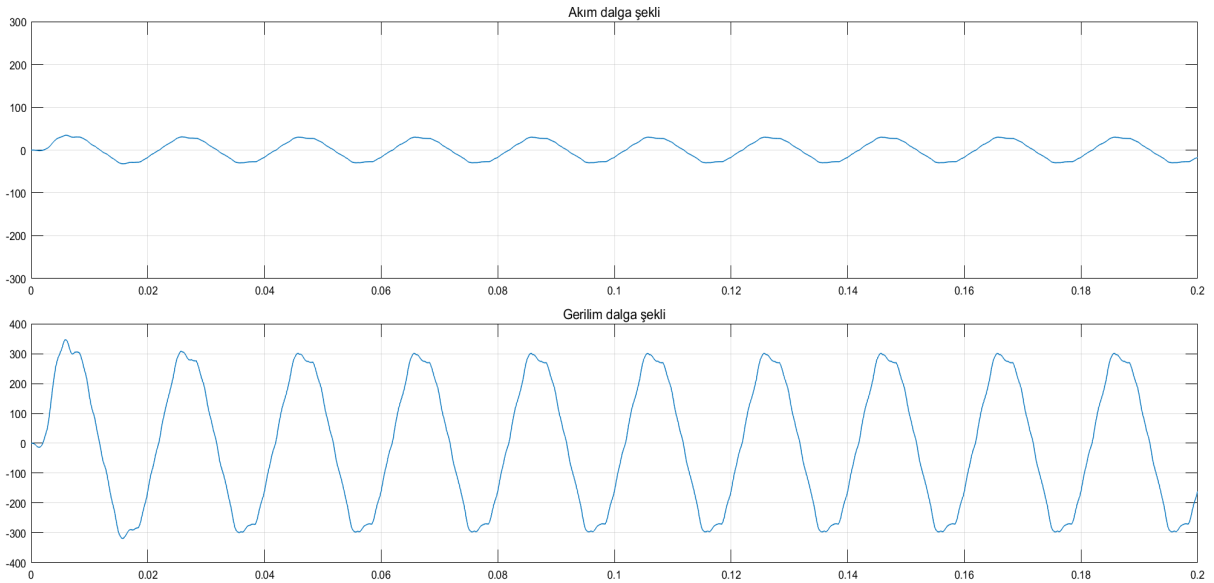
3. harmonik ilaveli maksimum yükseltici kontrol tekniği için modülasyon indeksi ve gerilim kazanç denklemleri maksimum yükseltici kontrol tekniği ile aynıdır. Benzer şekilde 3. harmonik ilaveli maksimum sabit yükseltici kontrol tekniği için de modülasyon indeksi ve gerilim kazanç denklemleri maksimum sabit yükseltici kontrol tekniğiyle aynıdır. Şekil 14 ve Şekil 15'te sırasıyla 3. harmonik ilaveli maksimum yükseltici kontrol ile maksimum sabit yükseltici kontrol teknikleri için LC filtresi kullanılarak çıkış akım ve gerilim dalga şekillerinin tepe değerleri görülmektedir. Yapılan benzetim çalışmaları neticesinde belirtilen yükseltme faktöründe elde edilen çıkış akım ve gerilim dalga şekillerinin etkin değerleri ile modülasyon indeksleri çizelge 1'de verilmiştir.

Şekil 16, Şekil 17 ve Şekil 18'de görüldüğü üzere yarı empedans kaynaklı inverterin çıkış akım sinyali aynı şartlar altında tüm kontrol teknikleri için Matlab/Simulink Hızlı Fourier dönüşüm (FFT) analizi kullanılarak harmonik açıdan karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Fourier analizi, belirli bir periyotta sürekli haldeki dalga formlarının, temel frekans ve temel frekansın tam katları olan diğer frekanslardaki sinüzoidal

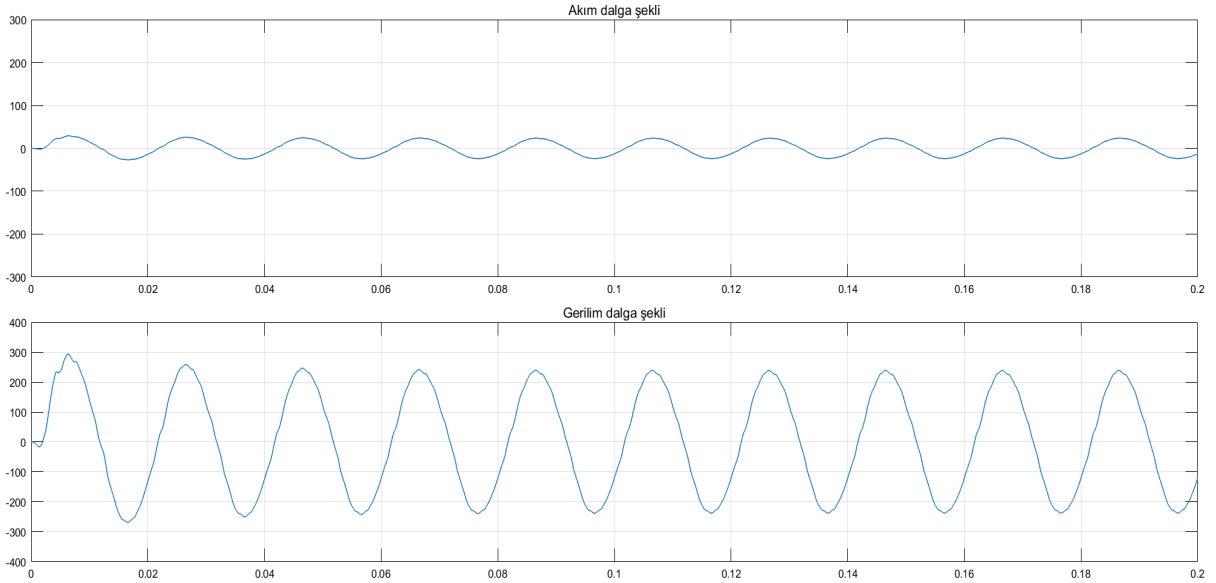
dalga formlarının diğer adıyla harmoniklerin toplamı şeklinde matematiksel olarak ifade edilmesine dayanır. Devre çıkışından alınan akım ve gerilim dalga formlarının sinüs şekliyle uzaklaşmasına Toplam Harmonik Bozulma (THB) denir. Bu bozulma toplam güç kalitesini belirler [2]. Uluslararası harmonik standartları (IEEE STD 519-1992) %5 değerinin altında olup yapılan benzetim sonuçlarına göre tüm kontrol teknikleri için çıkış akım sinyalinde sırasıyla %3,03, %6,49, %5,19, %3,66 ve %2,74 harmonik bozulma görülmüştür.



Şekil 13. Maksimum sabit yükseltici kontrol çıkış akım-gerilim dalga şekilleri (**Figure 13.** Current and voltage output waveforms using maximum constant boost)



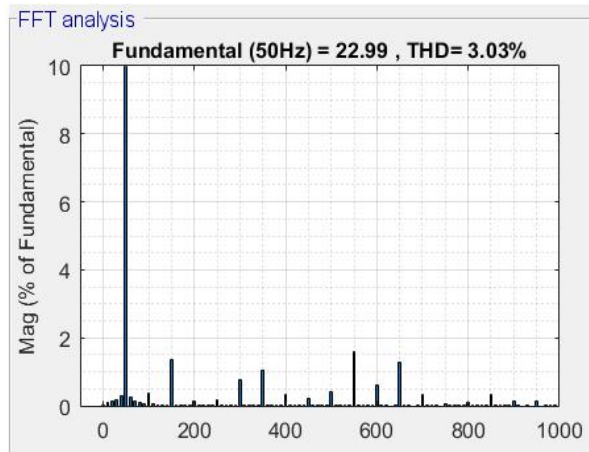
Şekil 14. 3. harmonik ilaveli maksimum yükseltici kontrol çıkış akım-gerilim dalga şekilleri (**Figure 14.** Current and voltage output waveforms using third harmonic injection maximum boost)



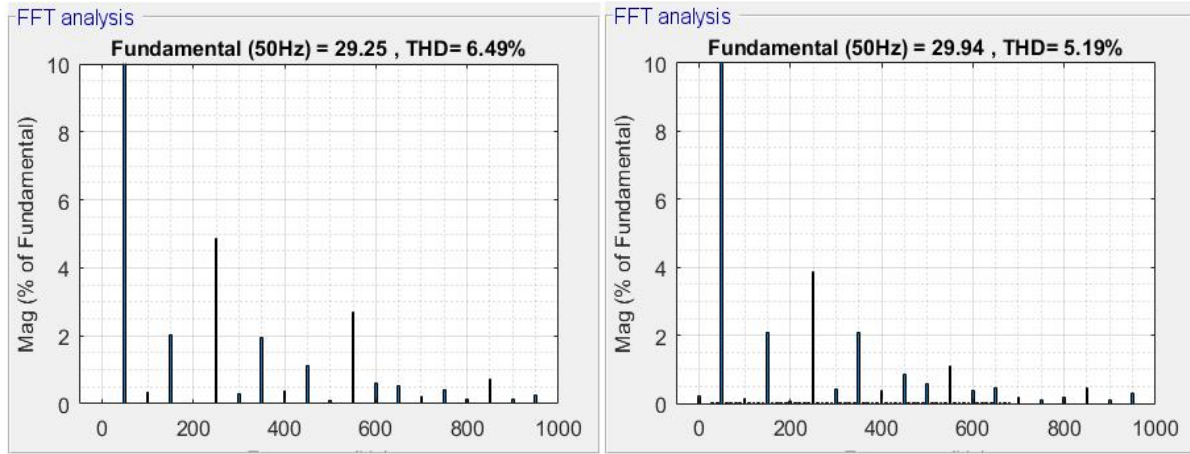
Şekil 15. 3. harmonik ilaveli maksimum sabit yükseltici kontrol çıkış akım-gerilim dalga şekilleri
(Figure 15. Current and voltage output waveforms using third harmonic injection maximum constant boost)

Tablo 1. Çıkış akım ve gerilim genlik değerleri ve modülasyon indeksleri ($B=3,5$ için) (Table 1. Output peak phase current and voltage values and modulation indexes for $B=3.5$)

$V_{DA}=100$ V ve $B=3,5$	Akım (A)	Gerilim (V)
BYK için $M=0,64$	16,1 A	161 V
MYK için $M=0,77$	20,7 A	207 V
3. Harmonik ilaveli MYK için $M=1,15$	21,2 A	212 V
MSYK için $M=0,74$	18 A	180 V
3. Harmonik ilaveli MSYK için $M=1,14$	18,5 A	185 V

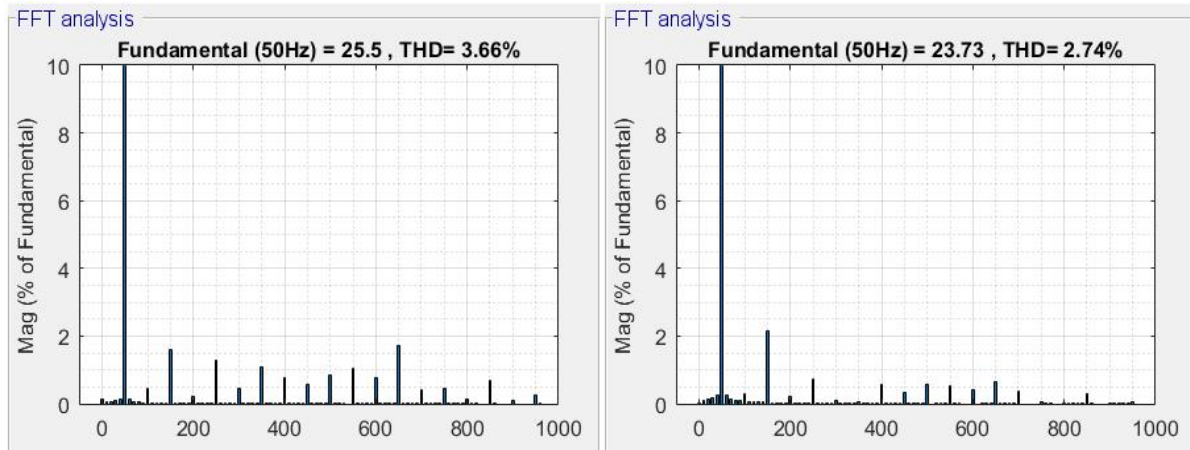


Şekil 16. Basit yükseltici kontrol FFT analizi (Figure 16. FFT analysis of the simple boost control)



Şekil 17. a) Maksimum yükseltici kontrol FFT analizi **b)** 3. harmonik ilaveli maksimum yükseltici kontrol FFT analizi

(Figure 17. a) FFT analysis of the maximum boost control b) FFT analysis of the maximum boost control with third harmonic injection)



Şekil 18. a) Maksimum sabit yükseltici kontrol FFT analizi **b)** 3. harmonik ilaveli maksimum sabit yükseltici kontrol FFT analizi

(Figure 18. a) FFT analysis of the maximum constant boost control b) FFT analysis of the maximum constant boost control with third harmonic injection)

Belirli bir yükseltme faktöründe basit yükseltici kontrol tekniğinde modülasyon indeksi ($M=0,64$) en küçük değer olarak hesaplanmış ve gerilim kazancı ($G=2,25$) en düşük teknik olmuştur. Bu teknikte modülasyon indeksinin düşük değerde olması hem kısa devre çalışma oranının yükselmesine hem de yarı iletken anahtarlama elemanlarına uygulanan gerilim stresinin artmasına neden olmuştur.

Maksimum yükseltici kontrol tekniğinde, modülasyon indeksi ($M=0,77$) en büyük değer olarak hesaplanmış ve gerilim kazancı ($G=2,72$) en büyük teknik olarak gözlemlenmiştir. Bu tekniğin tek dezavantajı sabit olmayan bir yükseltme faktörüne sahip olmasından dolayı empedans katında kullanılan bobinlerde düşük frekansta dalgalanma oluşumuna neden olmasıdır. Modülasyon indeks aralığını arttırmak amacıyla 3. harmonik ilaveli maksimum yükseltici kontrol tekniğinde, gerilim kazancının maksimum yükseltici kontrol tekniğine kıyasla yaklaşık %2 arttığı benzetim çalışması neticesinde gözlemlenmiştir.

Maksimum sabit yükseltici kontrol tekniğinde modülasyon indeksi ($M=0,74$) ve gerilim kazanç değeri

($G=2,60$) maksimum yükseltici kontrol tekniğine oldukça yakın olarak bulunmuştur. Bu tekniğin en büyük avantajı hem sabit hem de büyük bir yükseltme faktörüne sahip olmasıdır. Benzer şekilde modülasyon indeksi aralığını arttırmak amacıyla 3. harmonik ilave edilmesi burada da uygulanmış, benzetim çalışmalarına göre gerilim kazancının maksimum sabit yükseltici kontrol tekniğine kıyasla yaklaşık %3 arttığı gözlemlenmiştir.

Yarı empedans kaynaklı inverter devresi çıkış akım sinyalindeki harmonik bozulma açısından 20. derece harmoniğe kadar analiz edilmiştir. En başarılı sonuç %3,03 harmonik bozulma ile basit yükseltici kontrol tekniğinde sağlanmıştır. Maksimum yükseltici kontrol tekniği gerilim kazancı olarak en başarılı teknik olsa da diğer iki tekniğe nazaran %6,49 ile en fazla harmonik bozulmaya sahiptir. Maksimum sabit yükseltici kontrol tekniği ise %3,66 harmonik bozulma ile basit yükseltici kontrol tekniğine yakın değer almıştır. 3. harmonik ilavesinin uygulanan tekniklerde harmonik bozulmayı azalttığı görülmüştür. 3. harmonik ilavesi ile harmonik bozulma maksimum yükseltici kontrol tekniğinde %6,49'dan %5,19'a, maksimum sabit yükseltici kontrol tekniğinde ise %3,66'dan %2,74'e düşmüştür. Her üç kontrol tekniğinde de hem teorik analiz hem de yapılan benzetim çalışmaları sonucu en büyük kazanç $G=2,72$ ile maksimum yükseltici kontrol tekniğinde, en düşük harmonik bozulma %3,03 ile basit yükseltici kontrol tekniğinde sağlanmıştır. Tüm kontrol tekniklerinde gözlemlenen harmonik bozulma değerleri, IEEE tarafından belirlenen ve uluslararası bazda standart kabul edilen değerlerle yakın olarak bulunmuştur.

SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada yarı empedans kaynaklı inverterde kullanılan klasik taşıyıcı tabanlı DGM kontrol teknikleri analiz edilmiştir. Her bir kontrol tekniğinde belirli bir yükseltme faktöründe modülasyon indeksi ve gerilim kazancı ilgili denklemler yardımıyla hesaplandıktan sonra yapılan benzetim çalışmaları neticesinde maksimum yükseltici kontrol tekniği diğer tekniklere kıyasla en büyük modülasyon indeksine sahip olup aynı zamanda gerilim kazancı en yüksek teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. Çıkış akım sinyalinin harmonik açıdan kalitesi benzetim çalışmaları kullanılarak incelenmiş ve en iyi performans basit yükseltici kontrol tekniğinde sağlanmıştır. Burada hangi tekniğin seçileceği uygulanacak güç dönüştürücü devresinin hedefleri doğrultusunda şekillenecektir. Gerçekleştirilen benzetim sonuçları ile yapılan teorik analizlerin uyumlu olduğu görülmüştür.

Bu çalışma sonucunda elde edilen bulgular, DA gücün AA güce en yüksek verimlilikle dönüştürülmek istendiği güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji sistemlerinde ve diğer güç dönüşümünün yapıldığı endüstriyel uygulamalarda fikir sunması açısından önemli bir araştırma konusu teşkil etmektedir.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

M: Modülasyon indeksi
 B: Yükseltme faktörü
 f_s : Anahtarlama frekansı
 T: Anahtarlama periyodu
 T_0 : Kısa devre anahtarlama süresi
 T_1 : Kısa devre olmayan anahtarlama süresi
 D: Kısa devre görev oranı
 G: Kazanç

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- A. O. Özkan, H. B. Demir, Fotovoltaik Panellerde Sıcaklık ve Zenit Açısının Panel Güç Üretimine Etkisi, *Necmettin Erbakan University Journal of Science and Engineering*, 1 (1) (2019), 1-9.
- M. S. Endiz, Ş. Erel, M. Yağcı, Comparative Study of Single Phase Power Inverters Based on Efficiency and Harmonic Analysis, *i-Manager's Journal on Instrumentation & Control Engineering*, 4(1) (2015), 1-

9. doi: 10.26634/jic.4.1.3773

- F. Z. Peng, Z-Source Inverter, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(2) (2003), 504-510. doi: 10.1109/TIA.2003.808920
- F. Z. Peng, M. Shen, Z. Qian, Maximum Boost Control of the Z Source Inverter, *IEEE Trans. Power Electron.*,20(4) (2005), 833–838. doi: 10.1109/TPEL.2005.850927
- M. Shen, J. Wang, A. Joseph, F.Z. Peng, L.M. Tolbert, D.J. Adams, Maximum Constant Boost Control of the Z-Source Inverter, *Industry Applications Conference (IEEE/IAS)*, USA, 2004, 142–147.
- J. Anderson, F.Z. Peng, Four Quasi-Z-Source Inverters, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Greece, 2008, 2743-2749.
- Y. Liu, H. Abu-Rub, B. Ge, Z-source/quasi-Z-source inverters: Derived networks, modulations, controls and emerging applications to Photovoltaic conversion, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 8 (4) (2014), 32–44. doi: 10.1109/MIE.2014.2307898
- Y. Liu, B. Ge, F. J. Ferreira, A. T. de Almeida, H. Abu-Rub, Modelling and SVPWM control of Quasi-Z-source inverter, *International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, Portugal, 2011, 1–7.
- Y. Zhou and H. Li, “A single-phase PV quasi-Z-source inverter with reduced capacitance using modified modulation and double-frequency ripple suppression control”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31 no. 3, pp. 2166-2173, 2015. doi: 10.1109/TPEL.2015.2432070.
- A. Battiston, E. Miliani, S. Pierfederici, and F. Meibody-Tabar, “Efficiency improvement of a quasi-Z-source inverter-fed permanent-magnet synchronous machine-based electric vehicle”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 2, no. 1, pp. 14-23, 2016. doi: 10.1109/TTE.2016.2519349.
- S. Rahman, K. Rahman, M. A. Ali, M. Meraj, and A. Iqbal, “Quasi Z Source Inverter Fed V/f Controlled Five Phase Induction Motor Drive Powered” No. 1736, *EasyChair*, 2019. doi: 10.1049/joe.2018.8042.
- N. Subhani, R. Kannan, M. A. Mahmud, and M. F. Romlie, “Performance Analysis of a Modernized Z-Source Inverter for Robust Boost Control in Photovoltaic Power Conditioning Systems”, *Electronics*, vol. 8, no. 2, pp. 139, 2019. doi: 10.3390/electronics8020139.
- S. Priyanka, and FX E. Deepak, "A Double Frequency Ripple Suppression Control in Quasi Z-Source Inverter", *National Power Engineering Conference (NPEC)*, pp. 1-6, 2018. doi: 10.1109/NPEC.2018.8476744.