

Atf İçin: Karakılıç, M. (2025). Çok Seviyeli Eviriciler için Sinüzoidal Alan Eşleme Modülasyon Tekniği. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(3), 904-912.

To Cite: Karakılıç, M. (2025). A Sinusoidal Area Matching Modulation Technique for Multilevel Inverters. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 15(3), 904-912.

Çok Seviyeli Eviriciler için Sinüzoidal Alan Eşleme Modülasyon Tekniği

Murat KARAKILIÇ*

Öne Çıkanlar:

- Yeni Modülasyon Tekniği
- NLC'ye Alternatif
- Düşük THD

Anahtar Kelimeler:

- Alan Eşleştirme Modülasyonu (AEM)
- Çok Seviyeli Evirici
- Modülasyon Tekniği
- NLC
- THD

ÖZET:

Bu çalışmada, çok seviyeli inverter (ÇSE) sistemleri için yeni bir modülasyon yaklaşımı olan Sinüzoidal Alan Eşleştirme Modülasyonu (AEM) tekniği önerilmiştir. Geleneksel En Yakın Seviye Kontrol (NLC) yönteminde, referans sinyalin en yakın seviyeye yuvarlanması esas alınırken, AEM yöntemi sinüzoidal referans sinyali ile çıkışın basamaklı yapısı arasındaki alan eşitliği ilkesine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle çıkış gerilim dalga formunun basamaklı üretildiği inverter sistemlerinde ortalama güç doğruluğu ve daha düşük toplam harmonik bozulma (THD) elde edilmesini sağlar. AEM yöntemiyle elde edilen THD oranı %8.91'e düşerken, NLC yöntemiyle bu oran %9.36 olarak hesaplanmıştır. Yöntem, asimetrik yapıdaki Kaskat H-Köprü (CHB) topolojisine uygulanmış ve detaylı simülasyon çalışmaları ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen AEM tekniğinin NLC yöntemine kıyasla daha düşük THD ve gelişmiş RMS performansı sunduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca sinüs dalgasının farklı tepe değerleri için yapılan analizlerde, AEM'nin değişken genlik koşullarında da üstün performans sergilediği gözlemlenmiştir.

A Sinusoidal Area Matching Modulation Technique for Multilevel Inverters

Highlights:

- Alternative to NLC
- Low THD
- New Modulation

Keywords:

- Area Matching Modulation (AMM)
- Multilevel Inverter
- Modulation Technique
- NLC
- THD

ABSTRACT:

In this paper, a new modulation approach, Sinusoidal Area Matching Modulation (AMM), is proposed for multilevel inverter (MLI) systems. While the conventional Nearest Level Control (NLC) method is based on rounding the reference signal to the nearest level, the AMM method is based on the principle of field equality between the sinusoidal reference signal and the cascaded structure of the output. This approach provides average power accuracy and lower harmonic distortion (THD), especially in inverter systems where the output voltage waveform is cascaded. While the THD rate obtained with the AMM method was reduced to 8.91%, it was calculated as 9.36% with the NLC method. The method is applied to an asymmetric Cascaded H-Bridge (CHB) topology and evaluated through detailed simulation studies. The results show that the proposed AMM technique offers lower THD and improved RMS performance compared to the NLC method. Moreover, the analysis for different peak values of the sine wave shows that the AMM also exhibits superior performance under variable amplitude conditions.

GİRİŞ

Çok seviyeli invertörler (ÇSE), geleneksel iki seviyeli dönüştürücülere kıyasla daha düşük voltaj gerilimi, daha az elektromanyetik girişim ve üstün harmonik performans gibi avantajlar sunarak modern güç elektroniğinde temel bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır (Iqbal ve ark., 2024; Khalid, 2024; M. Karakılıç ve ark., 2025). Bu özellikler, ÇSE'leri özellikle şebekeye bağlı yenilenebilir enerji sistemleri, elektrikli araç sürücüler ve endüstriyel motor kontrolü gibi orta ve yüksek güçlü uygulamalar için son derece uygun hale getirmektedir (Gupta ve ark., 2016; Choudhary ve ark., 2024). Güç kalitesi gereksinimleri sıkılaştıkça, ÇSE'lerde daha verimli modülasyon ve kontrol tekniklerine olan talep artmaya devam etmektedir (Kürşat Aktar ve ark., 2024; Sharma ve ark., 2025).

Kademeli H-Köprüsü (CHB), Nötr Nokta Kenetli (NPC) ve Anahtarlama Kapasitör (SC) yapıları gibi çok seviyeli invertör topolojilerinin potansiyelini en üst düzeye çıkarmak için araştırmalar, bileşen sayısını azaltmaya (Barzegarkhoo ve ark., 2022), hata toleransını iyileştirmeye (Lingom ve ark., 2024) ve daha iyi harmonik kontrolü sağlamaya (Al Shaheer ve ark., 2024) yoğun bir şekilde odaklanmıştır. Bununla birlikte, birçok pratik uygulamada, modülasyon stratejisi dalga şekli kalitesini, anahtarlama kayıplarını ve dinamik yanıtı etkileyen baskın faktör haline gelmektedir (Prasad Panda ve ark., 2020). Seçici Harmonik Eliminasyon (SHE) ve Uzay Vektör Modülasyonu (SVM) iyi harmonik bastırma sağlarken, genellikle karmaşık gerçek zamanlı hesaplamalar veya çevrimdışı ön işleme gerektirirler (M. Karakılıç, 2025). Öte yandan, En Yakın Seviye Kontrolü (NLC) basitliği ve yüksek frekanslı çalışma ile uyumluluğu ile öne çıkmaktadır, ancak enerji veya ortalama güç açısından referans dalga biçimini doğru bir şekilde izleme yeteneğinden yoksundur (Jayakumar ve ark., 2024; Rajesh ve ark., 2024).

Geleneksel NLC yaklaşımının önemli bir sınırlaması, referans sinüzoidal sinyali yalnızca en yakın voltaj seviyesine genlik yakınlığına dayalı olarak gerçekleştirmesidir (Hu ve Jiang, 2015). Bu ayrık yuvarlama işlemi, özellikle düşük modülasyon indekslerinde veya asimetrik DC kaynaklarıyla çalışan CHB inverterlerde ideal sinüzoidal dalga formu ile gerçek kademeli çıkış arasında meydana gelen alan (enerji) uyumsuzluğunu ihmal eder (Varesi ve ark., 2019). Ortaya çıkan hata, önemli ölçüde harmonik bozulmaya neden olabilir ve optimum olmayan RMS performansına yol açabilir. Bu sınırlamalar, dalga biçimi enerjisini veya öngörücü davranışı dikkate alan kontrol stratejilerinin geliştirilmesini motive etmiştir (Hatas ve Almali, 2023; Murat Karakılıç, 2025), ancak bu tür yöntemlerin çoğu hassasiyet için basitlikten ödün vermektedir.

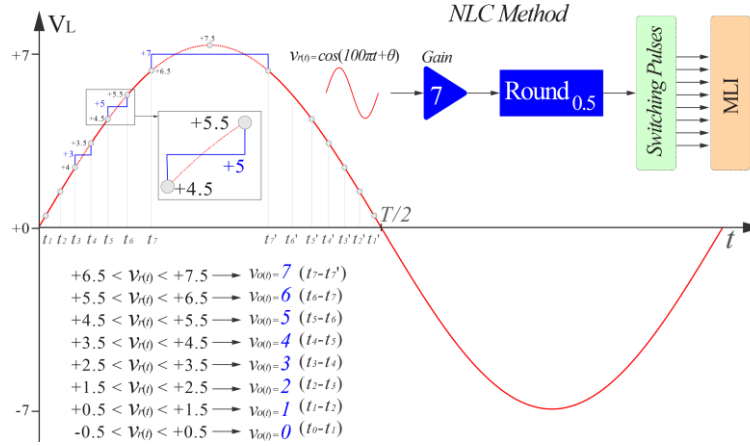
Bu boşluğa yanıt olarak, referans dalga formu ile uygulanan çıkış voltaj seviyeleri arasındaki alan eşdeğerliğine dayanan temelde farklı bir anahtarlama kriteri getiren yeni bir Sinüzoidal Alan Eşleştirme Modülasyonu (AEM) tekniği öneriyoruz. AEM, anlık genliğe dayalı en yakın seviyeyi seçmek yerine, anahtarlama anlarını dinamik olarak ayarlar, böylece belirli bir zaman segmentinde kademeli dalga formunun entegre alanı (veya enerjisi) ideal sinüs dalgasınıninkine eşleşir. Bu basit ancak etkili mekanizma, çok çeşitli çalışma koşulları altında gelişmiş izleme doğruluğu, azaltılmış toplam harmonik bozulma (THD) ve daha iyi güç kalitesi sağlar. Önerilen yöntem, ayrıntılı simülasyonlar kullanılarak asimetrik bir CHB topolojisi üzerinde doğrulanmış ve THD, RMS voltajı ve farklı modülasyon indeksleri altında yanıt açısından geleneksel NLC ile karşılaştırılmıştır.

MATERYAL VE METOT

En Yakın Seviye Kontrolü

NLC, basit uygulaması ve gerçek zamanlı anahtarlama kabiliyeti nedeniyle çok seviyeli inverterler için yaygın olarak benimsenen bir modülasyon stratejisidir. NLC'de referans sinyali yüksek frekansta örneklenir ve her örnekleme anında mevcut en yakın çıkış voltaj seviyesi seçilir. Bu yöntemle üretilen

çıkış dalga biçimi, tipik olarak sinüzoidal bir sinyal olan referans dalga biçiminin kademeli bir yaklaşımıdır.



Şekil 1. En Yakın Seviye Kontrol Yöntemi (HATAŞ, 2025)

Şekil 1'de gösterildiği gibi, referans sinüs dalgası (kırmızı ile gösterilmiştir) sürekli olarak inverter tarafından üretilen mevcut ayrılt voltaj seviyeleri ile karşılaştırılır. Kontrol sistemi referans sinyalin anlık değerini mevcut en yakın seviyeye yuvarlayarak merdiven çıkış dalga şeklini (mavi ile gösterilmiştir) elde eder. Bu işlem dinamik enerji içeriğini veya dalga şeklinin altındaki integrali (alanı) dikkate almaz, özellikle düşük modülasyon indekslerinde veya seviye sayısı sınırlı olduğunda doğal bozulmaya yol açar.

Bir n-seviyeli invertördeki mevcut gerilim seviyeleri şu şekilde tanımlansın:

$$V_{\text{levels}} = \{V_1, V_2, \dots, V_n\} \quad (1)$$

Her t zaman anında, $V_{\text{ref}}(t)$ referans gerilimi tüm seviyelerle karşılaştırılır ve en yakın $V_{\text{out}}(t)$ seviyesi şu şekilde seçilir:

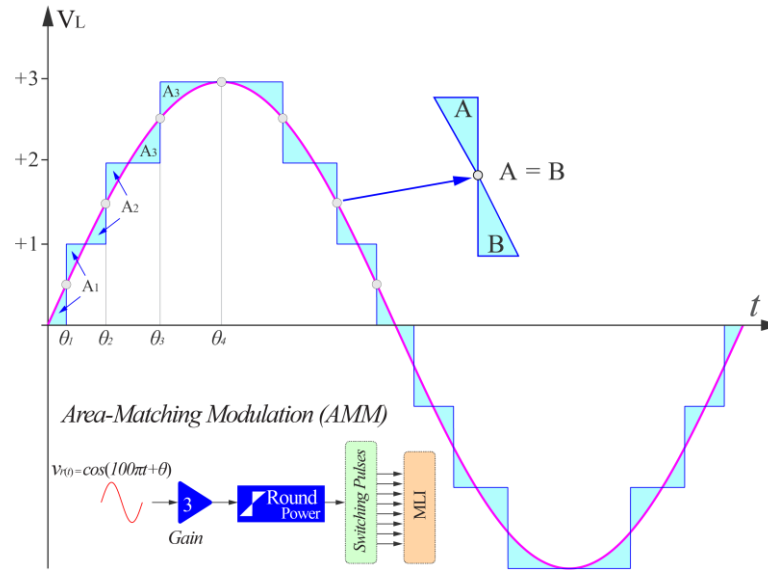
$$V_{\text{out}}(t) = \arg \min_{V_i \in V_{\text{levels}}} |V_{\text{ref}}(t) - V_i| \quad (2)$$

Bu doğrudan genlik tabanlı niceleme, düşük hesaplama karmaşıklığı ve yüksek anahtarlama hızı sağlayarak NLC'yi gerçek zamanlı gömülü kontrol sistemleri için uygun hale getirir. Ancak bu teknik, herhangi bir aralıktaki ortalama voltajı veya gücü korumayı amaçlamadığından önemli harmonik bozulmalara yol açmaktadır. Özellikle daha az gerilim seviyesi kullanıldığında veya düşük modülasyon indekslerinde çalışma sırasında, referans ve çıkış dalga şekilleri arasındaki tutarsızlık artar ve bu da yüksek THD neden olur.

Bu sınırlamalara rağmen NLC, düşük uygulama maliyeti ve hem simetrik hem de asimetrik CHB çok seviyeli invertörlerle uyumluluğu nedeniyle popülerliğini korumaktadır (Saeedian ve ark., 2019). Performansını artırmak için çeşitli modifikasyonlar ve hibrit teknikler önerilmiştir, ancak çoğu temel enerji uyumsuzluğunu ele almadan temel en yakın seviye niceleme kavramını korumaktadır.

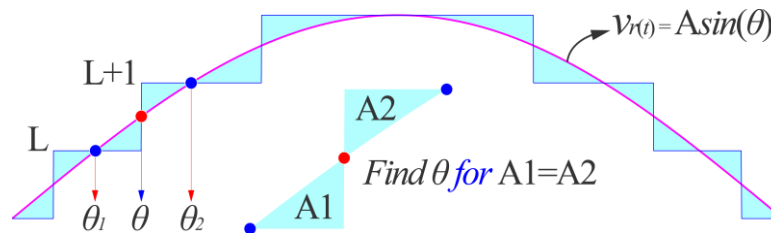
Önerilen Alan Eşleştirme Modülasyon (AEM) Tekniği

AEM tekniği, kontrol stratejisini genlik tabanlı nicelemeden enerji tabanlı eşdeğerliğe kaydırarak çok seviyeli inverterlerde çıkış voltaj seviyesi seçimine yeni bir yaklaşım getirmektedir. Anlık referans sinyaline en yakın gerilim seviyesini seçen geleneksel NLC farklı olarak AEM, anahtarlama anını ve çıkış seviyesini, çıkış dalga formu altındaki alan bir anahtarlama aralığı boyunca referans sinüzoidal dalga formu altındaki alanla yakından eşleştirecek şekilde seçer.



Şekil 2. Önerilen AEM Tekniği

Şekil 2'de gösterildiği gibi, referans dalga şekli bir sinüzoid (kırmızı ile gösterilmiştir) ve gerçek invertör çıkışı bir kademeli dalga şekli (mavi ile gösterilmiştir) olsun. Her örnekleme periyodunda algoritma, kademeli çıkışın alanının (integralinin) sinüzoidal referans altındaki karşılık gelen alanla eşleştiği noktayı arar. Bu, zaman içinde invertör tarafından sağlanan ortalama gücün ideal sinüzoidal davranışı yakından takip etmesini sağlar, bu da harmonik bozulmayı önemli ölçüde azaltır ve dalga şekli kalitesini iyileştirir.



Şekil 3. AEM Algoritması Alan Eşitleme Teorik Modeli

Önerilen Alan Eşleştirmeli Modülasyon (AEM) tekniğinin uygulaması Şekil 3'te sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere algoritma, basamaklı çıkış seviyesi ile sinüzoidal referans sinyali arasındaki alan farkını minimize edecek şekilde, bu iki eğri arasında kalan A_1 ve A_2 alanlarının eşit olduğu θ noktasını aramaktadır. İlgili senaryoda, çıkış sinyali L seviyesinde iken sinüs dalgasının değeri θ_1 açısına karşılık gelmektedir. Benzer şekilde, çıkışın L+1 seviyesine geçtiği anda da referans sinyali θ_2 açısına ulaşmıştır. Bu iki açı arasında, algoritmanın bulmayı hedeflediği geçiş noktası θ olup, bu noktada A_1 alanı, yani sinüs ile L seviyesi arasındaki alan, ve A_2 alanı, yani sinüs ile L+1 seviyesi arasındaki alan birbirine eşitlenmektedir. Bu durum matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$A_1 = \int_{\theta_1}^{\theta} A \sin \theta d\theta - L(\theta - \theta_1) \quad (3)$$

$$A_2 = (L+1)(\theta_2 - \theta) - \int_{\theta}^{\theta_2} A \sin \theta d\theta \quad (4)$$

$A_1=A_2$ için

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} A \sin \theta d\theta - L(\theta - \theta_1) = (L+1)(\theta_2 - \theta) - \int_{\theta}^{\theta_2} A \sin \theta d\theta \quad (5)$$

$$-A \cos \theta \Big|_{\theta_1}^{\theta} - L\theta + L\theta_1 = L\theta_2 + -L\theta + \theta_2 - \theta + A \cos \theta \Big|_{\theta}^{\theta_2} \quad (6)$$

$$-A \cos \theta + A \cos \theta_1 + L\theta_1 = L\theta_2 + \theta_2 - \theta + A \cos \theta_2 - A \cos \theta \quad (7)$$

$$\theta = A(\cos \theta_2 - \cos \theta_1) + L(\theta_2 - \theta_1) + \theta_2 \quad (8)$$

Denklem 8 aradığımız alan eşitleme açılarını vermektedir. Denklemde kullanılan parametreler aşağıdaki gibi hesaplamamaktadır.

$$L = A \sin \theta_1 \rightarrow \theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{L}{A}\right) \quad (9)$$

$$L+1 = A \sin \theta_2 \rightarrow \theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{L+1}{A}\right) \quad (10)$$

Önerilen Alan Eşleştirmeli Modülasyon (AEM) tekniğinin etkinliği ve esnekliği, çok seviyeli inverter yapılarına sahip sistemlerde 2 seviyeli, 3 seviyeli ve 4 seviyeli çıkış konfigürasyonları için şekil 4'te gösterilmiştir. Şekilde θ_i açısı noktalarının sağındaki ve solundaki alanların eşit olduğunu aynı renk ile vurgulanmıştır. Her bir durumda algoritma, her basamak geçiş noktasında, basamaklı çıkış dalga formu ile referans sinüs dalgası arasındaki alanların eşit olduğu anahtar açısı θ_i 'yi belirler. Bu sayede, inverterin ürettiği çıkış dalgası ideal sinüs formuna daha yakın hale gelir ve harmonik bozulma azaltılır.

Şekil 4'ün üst kısmında, AEM algoritmasının 2 seviyeli çıkış yapısı için uygulandığı gösterilmiştir. Referans yarım sinüs dalgası iki bölgeye ayrılmış ve geçiş açıları şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\theta_1=0.2556 \text{ rad}, \quad \theta_2=0.8859 \text{ rad}, \quad \theta_3=1.5708 \text{ rad}$$

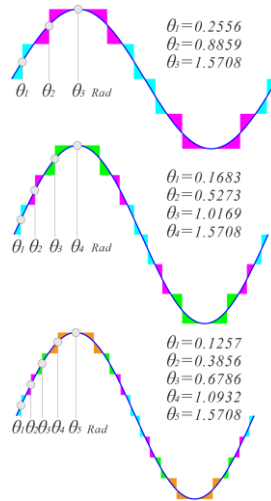
Şekil 4'ün orta kısmı, üç farklı gerilim seviyesinin kullanıldığı durumu göstermektedir. Bu durumda, referans çeyrek sinüs dalgası dört eş alanlı bölgeye ayrılmıştır ve anahtarlama açıları aşağıdaki gibidir:

$$\theta_1=0.1683 \text{ rad}, \quad \theta_2=0.5273 \text{ rad}, \quad \theta_3=1.0169 \text{ rad}, \quad \theta_4=1.5708$$

Şekil 4'ün alt kısmında 4 seviyeli çıkış yapısı sunulmuştur. Bu konfigürasyonda referans sinüs dalgası beş eşit alanlı bölgeye ayrılmış ve anahtarlama açıları aşağıdaki şekilde elde edilmiştir:

$$\theta_1=0.1257 \text{ rad}, \quad \theta_2=0.3856 \text{ rad}, \quad \theta_3=0.6786 \text{ rad}, \quad \theta_4=1.0932 \text{ rad}, \quad \theta_5=1.5708 \text{ rad}$$

Daha fazla çıkış seviyesi sayesinde, basamaklı çıkış dalga formu sinüs dalgasını çok daha hassas şekilde takip eder. AEM algoritması yine aynı alan eşitliği prensibini uygular; ancak bu kez geçişler daha sık ve daha hassas olduğundan, THD daha da düşer ve dalga formu kalitesi belirgin biçimde artar.



Şekil 4. AEM Algoritması ile 2,3 ve 4 basamaklı sinyaller için açısı noktalarının hesaplanması

Önerilen Alan Eşleştirmeli Modülasyon (AEM) algoritması, çok seviyeli inverterler arasında yaygın olarak kullanılan Cascaded H-Bridge (CHB) topolojisi üzerine uygulanmıştır. Şekil 5'te gösterilen yapı, iki adet H-köprü hücresinden oluşmaktadır ve her hücre farklı DC kaynaklarla

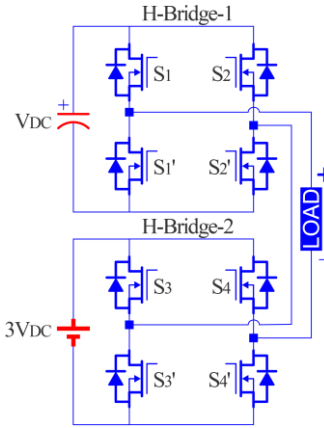
beslenmektedir. Bu konfigürasyon, asimetrik CHB topolojisi olarak adlandırılır ve daha az anahtar kullanarak daha fazla çıkış seviyesi elde edilmesini sağlar.

Şekilde görüldüğü gibi iki aşamalı CHB sırasıyla V_{DC} ve $3V_{DC}$ asimetrik kaynak yapılandırmasında çalışmaktadır.

- H-Köprü-1 hücresi V_{DC} seviyesinde bir DC kaynakla beslenirken,
- H-Köprü-2 hücresi $3V_{DC}$ seviyesinde bir kaynakla çalışmaktadır.

Böylece, çıkışta dokuz farklı gerilim seviyesi oluşturulmasına imkân tanır. Her bir H-köprü hücresi dört anahtardan (S_1 – S_4 ve S_1' – S_4') oluşur ve klasik H-köprü bağlantısı kullanılarak bipolar çıkış üretimi sağlanır. Yük, iki köprünün seri bağlanmasıyla elde edilen toplam çıkış gerilimini alır.

AEM algoritması, her bir anlık çıkış gerilimi seviyesinin, hedef sinüs dalgası ile alan eşitliği sağlayacak şekilde dinamik olarak seçilmesini sağlar. Bu sayede, CHB yapısındaki asimetrik DC kaynaklara rağmen çıkış dalgası yüksek doğrulukla sinüse yaklaşır, klasik NLC'ye kıyasla çok daha düşük harmonik içerik üretir.



Şekil 5. Kaskat H-Köprü (CHB) Topolojisi

BULGULAR VE TARTIŞMA

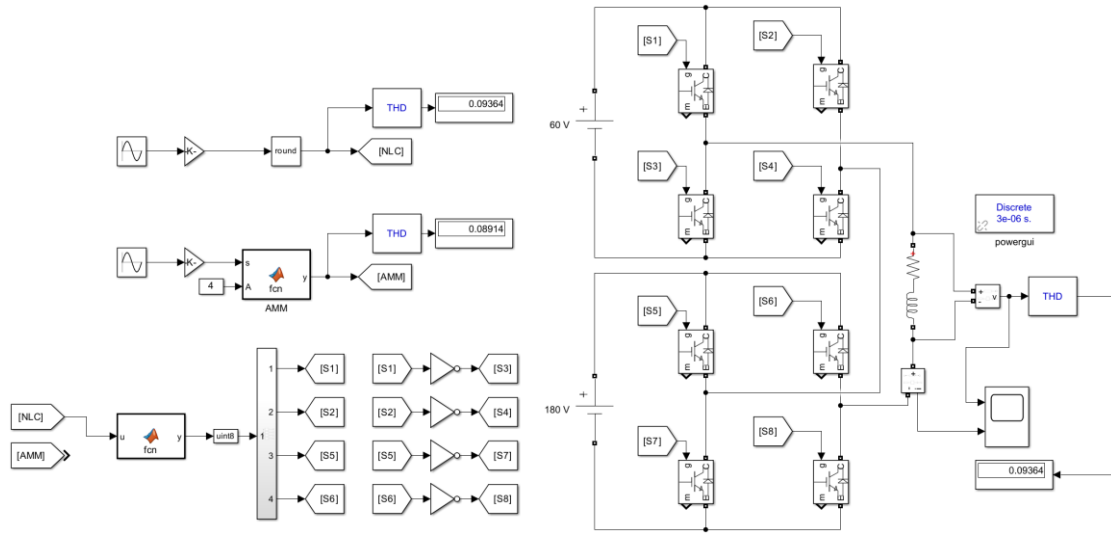
NLC ve AEM algoritmaları ile hesaplatılmış açı değerleri Çizelge 1'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tablodaki veriler, AEM ve NLC algoritmalarıyla elde edilen anahtarlama açıları arasındaki farkları ortaya koymaktadır. Düşük seviyelerde açı farkları belirgin şekilde daha büyüktür. Özellikle ilk ve ikinci açı noktalarında, AEM algoritmasının sinüs ile ortalama güç eşitlemesi yaptığı için NLC'ye göre daha geç anahtarlama yaptığı gözlemlenmektedir. Seviye sayısı arttıkça, AEM ve NLC arasındaki açı farkları mutlak olarak küçülmektedir, ancak özellikle tepe noktalarına yakın farklar (örneğin son açı noktası θ_5) hala önemini korur. Sinüs dalgası tepeye yaklaştıkça eğimi azaldığından, küçük açılardaki farklar dahi çıkış dalgasının RMS ve THD değerlerini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu durum, AEM'nin özellikle dalga tepe bölgelerinde daha hassas enerji eşleşmesi sağladığını ve çıkışın sinüs dalgasına daha iyi yaklaştığını göstermektedir. Bu da doğrudan daha düşük THD ve daha yüksek güç kalitesi anlamına gelir.

Önerilen AEM tekniğinin performansını değerlendirmek amacıyla, Şekil 5'te sunulan asimetrik CHB topolojisi, hem AEM hem de geleneksel NLC yöntemleri ile aynı çalışma koşulları altında test edilmiştir. Simülasyonlar MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş ve her iki modülasyon yöntemi için çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri analiz edilmiştir.

Çizelge 1. 5 Seviyeli Sinyal için AEM Algoritması ve NLC ile Üretilmiş Açık Noktaları

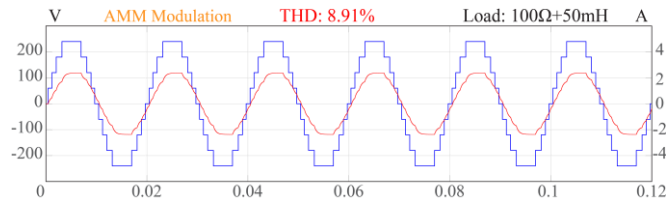
Seviye	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	
2	0.2556	0.8859				NLC
	0.2527	0.8481				AEM
3	0.1683	0.5273	1.0169			NLC
	0.1674	0.5236	0.9851			AEM
4	0.1257	0.3856	0.6786	1.0932		NLC
	0.1253	0.3844	0.6751	1.0654		AEM
5	0.1003	0.3053	0.5249	0.7787	1.1448	NLC
	0.1002	0.3047	0.5236	0.7754	1.1198	AEM

Şekil 7'de, önerilen AEM ve karşılaştırma amacıyla kullanılan NLC modülasyon tekniklerinin, asimetrik CHB topolojisine uygulandığı MATLAB/Simulink benzetim modeli sunulmuştur. Modelde her iki modülasyonun çıkışları, aynı inverter donanımı üzerinde test edilmiş ve THD ölçüm blokları ile harmonik analiz gerçekleştirilmiştir.

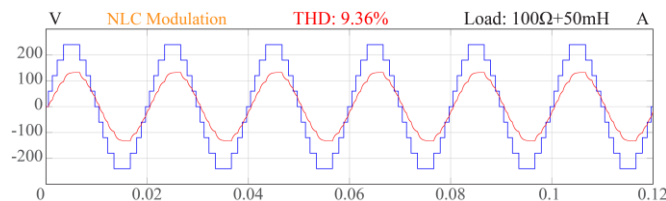


Şekil 6. Devre Simülasyon Modeli

Şekil 7 ve 8'de, sırasıyla AEM ve NLC yöntemleriyle elde edilen çıkış gerilim ve akım dalga formları sunulmaktadır. Şekilden de görülebileceği gibi, AEM ve NLC yöntemleri ile elde edilen çıkış dalga formları benzerlik gösterir. Buna karşılık, NLC ile elde edilen dalga formu, özellikle sinüs tepe bölgelerinde daha büyük basamak farkları sergilemektedir. Buda her iki sinyalin THD değerleri arasında farklara neden olur.



Şekil 7. AEM tekniği ile CHB çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri



Şekil 8. NLC tekniği ile CHB çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri

Şekil 7’de, AEM tekniği uygulandığında elde edilen CHB çıkış gerilimi ve yük akımı dalga şekilleri sunulmaktadır. Şekil, çıkış geriliminin basamaklı yapısına rağmen sinüs dalgasına oldukça yakın bir form sergilediğini ve yük akımının da düşük harmonik içerikle düzgün bir şekilde izlendiğini göstermektedir. Dalga formunun kalitesini sayısal olarak değerlendirebilmek için, her iki modülasyon tekniğiyle elde edilen çıkış geriliminin harmonik analizi yapılmıştır. Elde edilen THD değerleri, doğrudan karşılaştırma imkânı sağlamak üzere Şekil 7 ve 8 de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, AEM tekniği ile CHB çıkış gerilimi THD’si 8.91% iken NLC için 9.36% olarak hesaplanmıştır. Bu AEM’nin özellikle düşük seviyelerde NLC’ye göre çok daha düşük THD ile çalıştığını açıkça göstermektedir. Ayrıca simülasyonlar, farklı yük koşulları altında da gerçekleştirilmiş ve AEM tekniğinin bu koşullar altında da çıkış gerilimi kalitesini ve düşük THD performansını başarılı bir şekilde koruduğu gözlemlenmiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada, çok seviyeli inverter sistemlerinde kullanılan klasik NLC yöntemine alternatif olarak geliştirilen AEM tekniği sunulmuştur. AEM yöntemi, referans sinüs dalgası ile basamaklı çıkış gerilimi arasındaki alan eşitliğine dayalı geçiş noktalarını esas alarak, özellikle harmonik içeriğin azaltılması ve dalga formu kalitesinin artırılması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Yöntem, asimetrik yapıdaki CHB topolojisine uygulanmış ve NLC yöntemiyle kapsamlı şekilde karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarında, AEM ile elde edilen çıkış gerilimlerinin sinüs dalgasına daha yakın olduğu, bu sayede toplam harmonik bozulma oranında anlamlı bir iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir. Nitekim NLC yöntemiyle %9.36 olan THD oranı, AEM yöntemiyle %8.91’e düşürülmüştür. Bu, AEM’nin harmonik performans açısından kayda değer bir üstünlük sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Ayrıca, yapılan simülasyon testlerinde çıkış gerilim dalgasının RMS değerlerinde AEM lehine iyileşmeler görülmüştür. Bu bulgular, AEM’nin dalga şekli kalitesini artıran ve enerji verimliliğini yükselten güçlü bir modülasyon tekniği olduğunu göstermektedir. Gelecek çalışmalarda, AEM algoritmasının üç fazlı sistemlere, yük değişkenliğine ve gerçek zamanlı DSP/FPGA uygulamalarına entegrasyonu hedeflenmektedir. Ayrıca, AEM’nin diğer modülasyon teknikleriyle daha gelişmiş kontrol stratejileri geliştirilme potansiyeli de mevcuttur.

Çıkar Çatışması

Makale yazarı herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR

- Al Shaheer, A., Mohammad Hammad, S., Sarwar, A., Zaid, M., Ahmad, S., Liu, H. D. (2024). A Single Phase Five Level Switched Capacitor Inverter With Common Ground Configuration. *IEEE Access*, 12, 101814-101828. doi:10.1109/ACCESS.2024.3430538
- Barzegarkhoo, R., Forouzesh, M., Lee, S. S., Blaabjerg, F., Siwakoti, Y. P. (2022). Switched-Capacitor Multilevel Inverters: A Comprehensive Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*. doi:10.1109/TPEL.2022.3164508
- Choudhary, A., Kumar, R., Letha, S. S., Bakhsh, F. I., Singh, A., Khan, M. J. (2024). Review of recent trends of advancements in multilevel inverter topologies with reduced power switches and control techniques. *IET Power Electronics*. doi:10.1049/PEL2.12564
- Gupta, K. K., Ranjan, A., Bhatnagar, P., Sahu, K., Jain, S. (2016). Multilevel Inverter Topologies With Reduced Device Count: A Review. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 31(1). doi:10.1109/TPEL.2015.2405012
- Hatas, H., Almali, M. N. (2023). Design and control of bypass diode multilevel inverter using a single DC source. *Electric Power Systems Research*, 216, 109039. doi:10.1016/J.EPSR.2022.109039

- HATAŞ, H. (2025). Design and implementation of a novel switched rectifier based voltage multiplexer for multilevel inverters. *Electric Power Systems Research*, 247, 111760. doi:10.1016/J.EPSR.2025.111760
- Hu, P., Jiang, D. (2015). A level-increased nearest level modulation method for modular multilevel converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(4), 1836-1842. doi:10.1109/TPEL.2014.2325875
- Iqbal, S., Alshammari, N. F., Shouran, M., Massoud, J. (2024). Smart and Sustainable Wireless Electric Vehicle Charging Strategy with Renewable Energy and Internet of Things Integration. *Sustainability 2024, Vol. 16, Page 2487*, 16(6), 2487. doi:10.3390/SU16062487
- Jayakumar, V., Sivaselvan, S., Nanthakumar, P., Yogeshwaran, S., Kaviyarasan, T. (2024). Analysis of Multilevel Inverter with Different Control Techniques. *2nd International Conference on Integrated Circuits and Communication Systems, ICICACS 2024*. doi:10.1109/ICICACS60521.2024.10498477
- Karakılıç, M. (2025). A Novel Hexagonal Switched Capacitor Unit (HSCU) Design With Seven-Level Multilevel Inverter Topology. *International Journal of Circuit Theory and Applications*. doi:10.1002/cta.4469
- Karakılıç, M., Zeynalov, J. I., Hataş, H. (2025). Low-cost single-source 17 level multilevel inverter with reduced switch count. *Engineering Research Express*, 7(1). doi:10.1088/2631-8695/adaac1
- Karakılıç, Murat. (2025). A Novel Enhanced Switched Capacitor (ESC) Unit and ESC Based 9L MLI Topology. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. doi:10.1007/s42835-025-02202-9
- Khalid, M. (2024). Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges. *Energy Strategy Reviews*. doi:10.1016/j.esr.2024.101299
- Kürşat Aktar, A., Karakılıç, M., Makalesi Başvuru, A., Özet, G., Graphical, (, Tabular, /. (2024). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Beslenen Bir Mikro Şebekenin Enerji Depolama Sistemleri Desteği ile Optimum Çalışması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 12(4), 1018-1034. doi:10.29109/GUJSC.1533522
- Lingom, P. M., Song-Manguelle, J., Nyobe-Yome, J. M., Doumbia, M. L. (2024). A Comprehensive Review of Compensation Control Techniques Suitable for Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter Operation with Unequal DC Sources or Faulty Cells. *Energies*. doi:10.3390/en17030722
- Prasad Panda, K., Ranjan Bana, P., Panda, G. (2020). FPA Optimized Selective Harmonic Elimination in Symmetric-Asymmetric Reduced Switch Cascaded Multilevel Inverter. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 56(3). doi:10.1109/TIA.2020.2981601
- Rajesh, C. R., Meenalochini, P., Kannaiah, S. K., Bindu, A. (2024). A hybrid control topology for cascaded H-bridge multilevel inverter to improve the power quality of smart grid connected system: NBO-RERNN approach. *Expert Systems with Applications*, 238. doi:10.1016/j.eswa.2023.122054
- Saeedian, M., Ebrahim Adabi, M., Mehdi Hosseini, S., Adabi, J., Pouresmaeil, E., Member, S. (2019). A Novel Step-Up Single Source Multilevel Inverter: Topology, Operating Principle, and Modulation; A Novel Step-Up Single Source Multilevel Inverter: Topology, Operating Principle, and Modulation. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 34(4), 3269. doi:10.1109/TPEL.2018.2848359
- Sharma, B., Manna, S., Saxena, V., Raghuvanshi, P. K., Alsharif, M. H., Kim, M. K. (2025). A comprehensive review of multi-level inverters, modulation, and control for grid-interfaced solar PV systems. *Scientific Reports*, 15(1), 1-23. doi:10.1038/S41598-024-84296-1;SUBJMETA=166,4077,639;KWRD=ENERGY+SCIENCE+AND+TECHNOLOGY,ENGINEERING
- Varesi, K., Karimi, M., Kargar, P. (2019). *A New Cascaded 35-Level Inverter with Reduced Switch Count. 2019 Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG)*. doi:10.1109/ICREDG47187.2019.190239