

AYARLANABİLİR HIZLI SÜRÜCÜLERİN ŞEBEKE ARAYÜZLERİ İÇİN 30 DARBELİ BİR DOĞRULTUCU TASARIMI

İbrahim SEFA ve Necmi ALTIN

Elektrik Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500, Beşevler, Ankara
isefa@gazi.edu.tr, necmialtin@gmail.com

(Geliş/Received: 13.11.2008 ; Kabul/Accepted: 09.11.2009)

ÖZET

Değişken hızlı motor sürücülerinin şebeke arayüzünde kullanılan 6 darbeli doğrultucular şebekeden yüksek harmonik bileşenler içeren akımlar çekmektedirler. Şebekeden çekilebilecek akımın harmonik seviyesinin uluslararası standartlarda belirtilen sınırlar içerisinde olabilmesi için kullanılan yöntemlerden biriside doğrultucu darbe sayısının artırılmasıdır. Bu çalışmada, geniş yük aralığında çalışan alternatif akım motor sürücülerinde kullanılmak üzere yaklaşık birim güç faktörlü 30 darbeli bir doğrultucu tasarlanmıştır. 30 darbeli doğrultucu girişinde kullanılmak üzere aralarında 12° faz farkı bulunan 5 adet üç fazlı gerilim seti üreten çatal yıldız bağlı bir oto transformator önerilmiştir. Önerilen oto transformatorün gücü toplam yük gücünün sadece %20,9'u olmaktadır. Böylece transformator boyutları ve sistem maliyeti azaltılmıştır. Tasarlanan 30 darbeli doğrultucu MATLAB/Simulink'de modellenmiş ve benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim sonuçlarından düşük yük koşullarında dahi 30 darbeli doğrultucu akım harmoniklerinin uluslararası standartlarda belirlenen sınırlar dâhilinde olduğu, birim güç faktörüne çok yakın değerlerin elde edildiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çok darbeli doğrultucu, 30 darbeli doğrultucu, akım harmonikleri.

30 PULSE RECTIFIER DESIGN FOR GRID INTERFACES OF THE VARIABLE SPEED DRIVES

ABSTRACT

Six pulse rectifiers that are used in grid interfaces of variable speed drives draws currents that include harmonic components from grid. Increasing the rectifier pulse number of the rectifier is one of the useful methods that are used to keep the harmonic in the limits of international standards. In this study, a near unity power factor 30 pulse rectifier is designed for alternating current motors that operate under heavily varying load conditions. 12° phase shifted five three-phase voltage sets that are needed for 30 pulse rectification are generated by proposed star-differential autotransformer. Proposed autotransformer's power is only 20.9% of output power. So transformer size and system total cost is reduced. The designed autotransformer is modeled and simulated with MATLAB/Simulink. It is seen from simulation results that, the line current harmonics of the 30 pulse rectifier are in the limits of international standards even under the light load condition, and the nearly unity power factor is achieved.

Keywords: Multipulse rectifier, 30 pulse rectifier, current harmonics.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güç anahtarlarının yüksek akım-gerilim değerlerinde ve kabul edilebilir maliyette üretilebilmesi ve sağladığı avantajlar nedeniyle güç elektroniği dönüştürücülerinin kullanım alanları ile uygulandıkları güç seviyeleri her geçen gün artmaktadır. Değişken frekanslı

asenron motor sürücüleri pompa ve fan uygulamaları, kâğıt ve tekstil endüstrisi, gemi tahrik sistemleri, haddehaneler, iklimlendirme ve taşımacılık sistemleri gibi pek çok alanda kullanılmaktadır [1]. Değişken hız uygulamalarında yüksek güvenilirlikleri ve az bakım gerektirmeleri nedeniyle üç fazlı sincap kafesli asenron motorlar kullanılmaktadır. Günümüzde,

vektör kontrol gibi gelişmiş kontrol teknikleri kullanılarak asenkron motorlardan DA motorlarına benzer özellikte performans elde edilebilmektedir [2]. Vektör denetimli asenkron motor sürücüsü (VDAMS), yapısında bir gerilim kaynaklı evirici (GKE) ile bu eviriciye DA gerilim sağlamak için genellikle üç fazlı köprü tipi (6 darbeli) kontrolsüz bir doğrultucu içermektedir. 6 darbeli kontrolsüz doğrultucu doğrusal olmayan yapısı nedeniyle güç faktörünün düşmesine ve şebekeden harmonik bileşenler içeren akımlar çekilmesine neden olur. Şebekeden çekilen harmonik akımlar şebeke empedansına bağlı olarak sinüsoidal olmayan gerilim düşümlerine, dolayısıyla da ortak bağlantı noktasında gerilim kalitesini düşürür. Bu durum aynı noktadan beslenen diğer alıcıların olumsuz etkilenmelerine neden olur. Şebeke geriliminde oluşabilecek olumsuz etkileri en aza indirmek amacıyla alıcıların akım harmonik seviyelerini sınırlandıran IEEE 519-1992, EN 61000-3-2 gibi uluslararası standartlar yayınlanmıştır [3,4].

Güç elektroniği dönüştürücülerinin hızlı gelişimi, güç kalitesi ve harmoniklerin azaltılmasına yönelik ilgiyi artırmıştır. Bu alandaki çalışmalar sonucunda aktif ve pasif yöntemler geliştirilmiştir. Aktif yöntemlerin karmaşık yapıları, yüksek maliyetleri, düşük verimleri ve her güç seviyesinde yapılamamaları kullanımlarını sınırlamaktadır [5-7]. Pasif yöntemler ise belirli harmonikler için tasarlanmış LC filtrelerdir. Bunlar ancak tasarlandıkları harmonikler için ve yine ancak belirli yük seviyelerinde etkilidirler. Sistem maliyetini ve boyutlarını artıran pasif yöntemler ayrıca rezonans tehlikesi de oluştururlar. Özellikle kompanzasyon sistemi ile birlikte çalışması durumunda rezonans tehlikesi artmaktadır [1,5]. Harmoniklerin azaltılmasında kullanılan en güvenilir, basit ve performans-maliyet açısından uygun yöntem çok darbeli doğrultucu kullanmaktır [8-10].

Çok darbeli doğrultucu aralarında belirli bir faz farkı olan birden fazla üç fazlı gerilim sistemi ile beslenen doğrultucuların paralel veya seri bağlı olarak çalışmasını temel alır. Bu gerilim sistemleri izoleli transformatörler ile elde edilebilse de şebeke ile izolasyonun gerekli olmadığı uygulamalarda transformatörün güç oranını dolayısıyla sistemin toplam maliyetini ve boyutlarını azaltmak için genellikle oto transformatörler kullanılmaktadır. Darbe sayısı arttıkça doğrultucuların şebekeden çektiği akımın harmonik bileşenleri azalmaktadır. Darbe sayısı ile şebeke akımı harmoniklerinin ilişkisi Eş. 1'de verilmiştir [5,10].

$$h = P \cdot n \mp 1; n=1,2,3,\dots \quad (1)$$

Bu ifadeye; P doğrultucunun darbe sayısını, h ise bu doğrultucunun şebekede ürettiği harmonikleri vermektedir. Literatürde pek çok 12 darbeli doğrultucu ve 30° faz farkını sağlayan farklı güç oranlarında oto transformatör sunulmuştur. Ancak bu uygulamalarda şebekeden çekilen akım harmonikleri IEEE 519

sınırlarını sağlayamamaktadır. 18 darbeli doğrultucuların IEEE 519 şartlarını karşılayan en az darbe sayılı doğrultucu oldukları rapor edilmektedir [9,11]. Ancak bu doğrultucular da düşük yük koşullarında ve düşük hat endüktans değerleri için bu şartları sağlayamamaktadırlar. Bu nedenle özellikle savunma ve havacılık sanayisi gibi daha katı şartların geçerli olduğu uygulamalar için daha yüksek darbe sayısına ihtiyaç duyulmuş, 24 ve 30 darbeli doğrultucular geliştirilmiştir [12].

Darbe katlama yöntemi ile geliştirilen ve benzetimleri yapılan 24 darbeli bir doğrultucu ile akım harmoniklerinin tam yük için %4,28, %20 yük seviyesi için %5,98 olarak rapor edilmiştir. Bu uygulama kullanılan üçgen oto transformatörün güç oranı %28,8'dir [1]. Singh ve diğerleri tarafından yine darbe katlama yöntemi ile 24 darbeli yıldız oto transformatörlü bir doğrultucu sunulmuştur. Bu uygulamada akım harmonikleri %100 ve %20 yük seviyeleri için sırasıyla %3,9 ve %4,9 olarak rapor edilmiştir. Sunulan oto transformatörün güç oranı ise %32,5'dir [13]. Garg ve diğerleri 24 darbeli oto transformatörünün kullanıldığı bir uygulamada akım harmoniklerinin %100 ve %20 yük seviyeleri için sırasıyla %4,4 ve %5,0 oto transformatörün güç oranının ise %57,07 olduğunu bildirmişlerdir [14]. Singh ve diğerleri tarafından geliştirilen 30 darbeli bir doğrultucu da akım harmonikleri %100 ve %20 yük seviyeleri için sırasıyla %3,3 ve %4,4, transformatör güç oranı ise %30,06 olarak rapor edilmiştir [15]. Singh ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise yapılan benzetim çalışmaları sonucunda 30 darbeli doğrultucu şebeke akım harmoniklerinin %100 ve %20 yük seviyeleri için sırasıyla %2,9 ve %3,52, transformatör güç oranının ise %56,2 olduğu belirtilmiştir [16].

Bu çalışmada oto transformatörlü 30 darbeli bir doğrultucu tasarlanmıştır. Doğrultucuda kullanılmak üzere 30 darbeli bir oto transformatör sunulmuş, bu transformatörün matematiksel analizi yapılmış ve daha sonra MATLAB/Simulink modeli oluşturulmuştur. Sunulan oto transformatörün gücü toplam yük gücünün sadece %20,9'udur. Bu düşük güç oranı sayesinde sistem maliyeti ve boyutları önemli miktarda azaltılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında geliştirilen 30 darbeli doğrultucunun şebeke akım harmonikleri tam yük için %1,64, %20 yük için ise %4,18 olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar geliştirilen 30 darbeli doğrultucunun herhangi bir ek filtre devresine ihtiyaç duymadan uluslararası standartlarda belirtilen harmonik standartlarını karşıladığı ve birim güç faktörünün elde edildiği görülmektedir. Hatta düşük yük koşullarında dahi 30 darbeli doğrultucu ile yüksek güç kalitesi elde edilebilmektedir.

2. 30 DARBELİ OTO TRANSFORMATÖRÜN ANALİZİ (ANALYSIS OF 30 PULSE AUTOTRANSFORMER)

30 darbeli doğrultucu, 12° faz farklı gerilimler ile beslenen beş adet üç fazlı doğrultucunun akım paylaşım bobinleri (IPT) üzerinden bağlanmasıyla oluşur. Şekil 1'de DA uçlarında iki adet akım paylaşım bobininin kullanıldığı, 30 darbeli doğrultucunun temel bağlantı şekli görülmektedir. Besleme gerilimleri arasındaki faz farkı nedeniyle doğrultucu köprülerinden elde edilen DA gerilimlerin dolayısıyla akımlarının ani değerleri arasında fark bulunmaktadır. IPT'ler her bir üç fazlı doğrultucu köprülerindeki bu akım farklılıklarını dengelemek için kullanılır [11]. IPT'lerin endüktans değerleri doğrultucu gücüne ve çıkış akım değerine göre belirlenmektedir. IPT endüktansının küçük seçilmesi akımdaki harmonik bileşen miktarını artırırken büyük seçilmesi de sistemin boyutlarını ve maliyetini arttırmaktadır [17].

Önerilen çatal yıldız bağlı oto transformatörün bağlantısı Şekil 2'de verilmiştir. Oto transformatör primer ve sekonder sargıları altı darbeli köprü tipi doğrultucuların beslemesi için ihtiyaç duyulan 12° şer derece faz farklı gerilimleri elde edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Oto transformatörün yıldız bağlı L_a , L_b ve L_c primer sargıları V_a , V_b ve V_c şebeke gerilimleri ile beslenmiştir. L_a , L_{a1} , L_{a2} , L_{a3} , L_{a4} , L_{a5} ve L_{a6} sargılarının tamamı nüvenin aynı bacağına yerleştirilmişlerdir. Bu sargılar birbirleriyle manyetik bağa sahip olduklarından V_{La1} , V_{La2} , V_{La3} , V_{La4} , V_{La5} ve V_{La6} gerilimleri aynı fazda olmaktadır. Bu durum diğer sargılar içinde geçerlidir. Şekil 3'de oto transformatör gerilimlerinin vektör diyagramı görülmektedir.

($+12^\circ$) ve (-12°) faz farklı gerilimleri oluşturan sekonder sargıların gerilimleri aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$V_{Lb2} = V_{Lc1} = V_a \cdot \frac{\sin(12)}{\sin(108)} = 0,2186 \cdot V_a \quad (2)$$

12° faz kaymasını sağlayan sargı dönüştürme oranı, (n_2) ise Eş. 3 ile bulunur.

$$n_2 = \frac{V_a}{V_{Lb1}} = \frac{V_a}{0,2186 \cdot V_a} = 4,574 \quad (3)$$

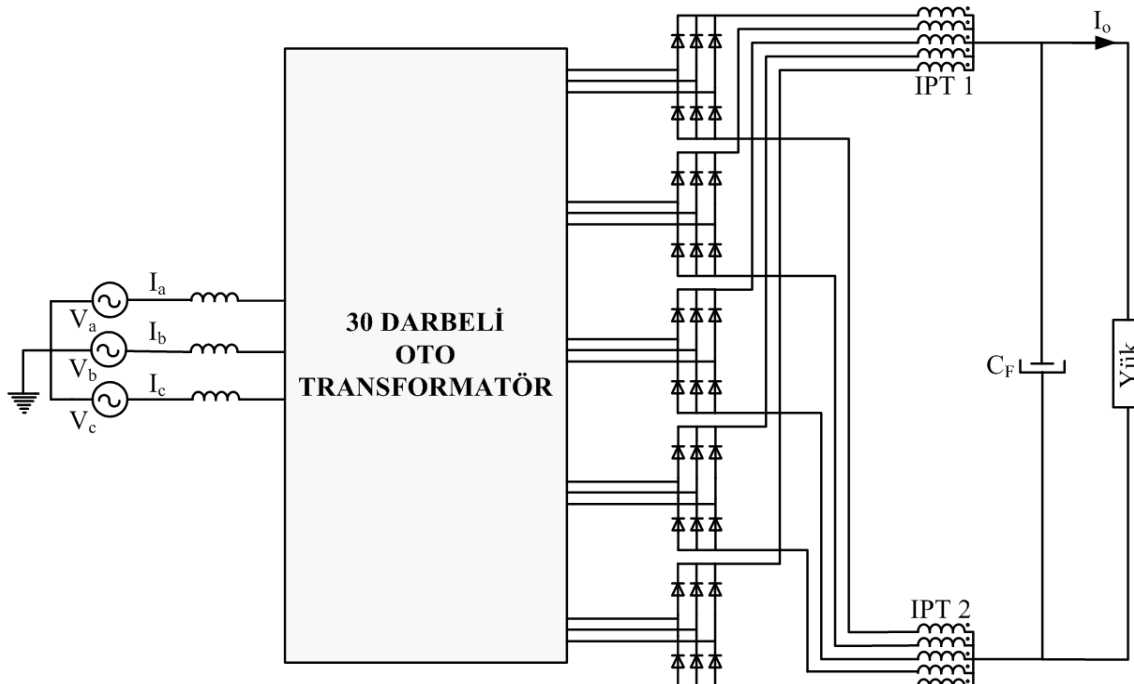
Bu sonuç, sekonder sarım sayısının primer sarım sayısından 4,574 oranında daha az olduğunu göstermektedir. Sanal nötr noktası olan N' 'ye göre sekonder gerilimleri Eş. 4 ile tanımlandığında,

$$V_{b2} = V_{c1} = V_a \cdot \frac{\sin(60)}{\sin(108)} = 0,9105 \cdot V_a \quad (4)$$

olmaktadır. Eş. 4'den görüldüğü gibi çıkış gerilimlerinin AA değeri giriş geriliminin %91'ine karşılık gelmektedir.

Aynı değerde ve ($+24^\circ$) ve (-24°) faz farklı gerilimleri üretebilmek için iki sekonder sargısı gerekmektedir. Bunlardan birisi faz farkını ayarlar iken diğeri gerilim değerini V_{b2} ve V_{c1} gerilimlerine eşitlemek için kullanılır. Şekil 3'deki vektör diyagramı kullanılarak aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$V_{c5} = V_a + V_{Lb2} + V_{Lb3} + V_{Lc5} \quad (5)$$



Şekil 1. 30 darbeli doğrultucu (30 pulse rectifier)

Bu eşitlik sargıların dönüştürme oranları kullanılarak yeniden yazılabilir:

$$V_{c5} = V_a + n_2 V_b + n_3 V_c + n_4 V_c \quad (6)$$

Primer sargılarına göre (-24°) faz farklı ve primer geriliminin 0,9105 değerinde bir gerilim elde edilebilmesi için n_3 ve n_4 dönüştürme oranları:

$$n_3 = 6,121 \quad (7)$$

$$n_4 = 21,929 \quad (8)$$

olarak hesaplanır. Şebeke ile aynı fazda olan çıkış geriliminin değeri de diğer sekonder gerilim

değerlerine eşit olmalıdır. Bunun için Eş. 9 yazılabilir:

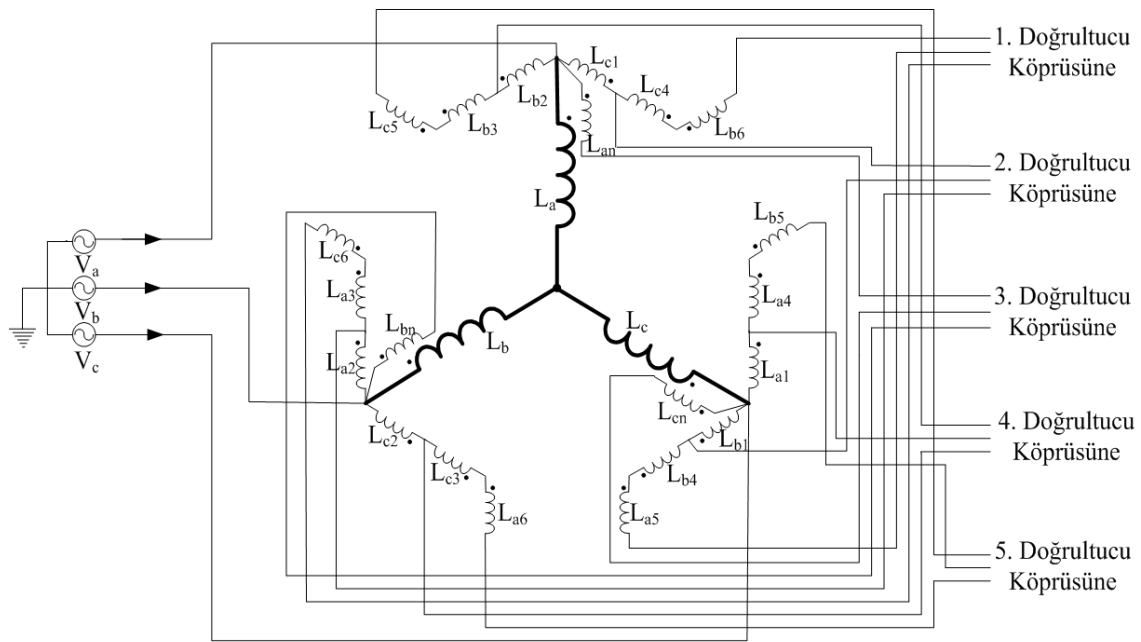
$$V_{Lan} = V_a - 0,9105 \cdot V_a = 0,0895 \cdot V_a \quad (9)$$

Buradan dönüştürme oranı (n_1)'in değeri Eş. 10 ile bulunabilir.

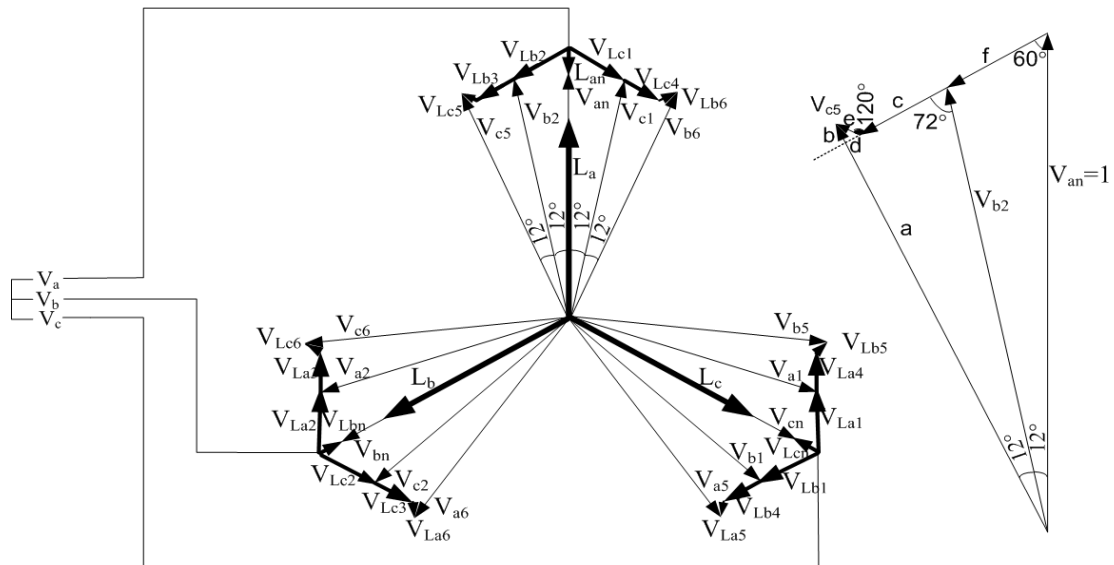
$$n_1 = \frac{V_a}{V_{Lan}} = \frac{V_b}{V_{Lbn}} = \frac{V_c}{V_{Lcn}} = \frac{1}{0,0895} = 11,173 \quad (10)$$

Sekonder terminalleri ile sanal nötr noktası arasındaki gerilim değeri de, Eş. 11-13 ile hesaplanmaktadır.

$$V_{an} = 0,9105 \cdot V_a \quad (11)$$



Şekil 2. Çatal yıldız bağlı oto transformörlü 30 darbeli doğrultucu (Star-differential autotransformer based 30 pulse rectifier)



Şekil 3. 30 darbeli oto transformör gerilimlerinin vektör diyagramı (Vector diagram of 30 pulse autotransformer voltages)

$$V_{bn}=0,9105.V_b \quad (12)$$

$$V_{cn}=0,9105.V_c \quad (13)$$

2.1. Sargı Akımlarının Analizi (Analysis of The Winding Currents)

30 darbeli doğrultucu, beş adet üç fazlı doğrultucu köprüsünden oluşmaktadır. Her doğrultucu köprüsü yük akımının (I_o) 1/5'ini taşımaktadır ve akımlar aynı zamanda transformatörün sekonder akımlarıdır. Şebeke gerilimi ve sekonder sargı akımlarından birinin (I_{an}) dalga şekilleri Şekil 4'de görülmektedir. Bu dalga şekilleri diğerleri için açısız referans olarak kullanılacaktır.

I_{an} akımının fourier analizi klasik yoldan yapılabilir. Akım dalga şekli tek simetri özelliği gösterdiği için ortalama değeri sıfırdır. Kosinüslü terim ve çift sayılı harmonikler bulunmamaktadır. I_{an} akımının fourier analizi Eş. 14'de verilmiştir.

$$I_{an}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{I_o}{5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot n\right) \sin(n \cdot \omega t) \quad (14)$$

$n = 1,3,5, \dots$

Şebeke ile aynı fazlı olan diğer sekonder sargılarının dalga şekilleri 20° faz farkı haricinde aynıdır. Bu akımların Fourier analizleri de Eş. 15-16 ile hesaplanabilir.

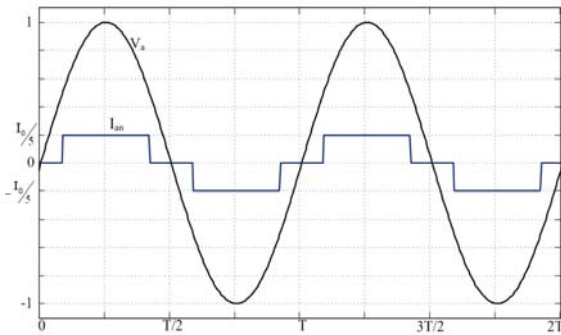
$$I_{bn}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{I_o}{5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(n \cdot \frac{\pi}{6}\right) \sin\left(n \left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \quad (15)$$

$n = 1,3,5, \dots$

$$I_{cn}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{I_o}{5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(n \cdot \frac{\pi}{6}\right) \sin\left(n \left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \quad (16)$$

$n = 1,3,5, \dots$

(-12°) faz farklı sekonder sargı akımlarının açılımları da Eş. 17-19 ile yapılabilir.



Şekil 4. Primer referans gerilimi ve a fazının sekonder akımı (Primary reference voltage and current of a phase)

$$I_{b2}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{I_o}{5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot n\right) \sin\left(n \left(\omega t - \frac{24\pi}{180}\right)\right) \quad (17)$$

$n = 1,3,5, \dots$

$$I_{a1}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{I_o}{5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(n \cdot \frac{\pi}{6}\right) \sin\left(n \left(\omega t + \frac{96\pi}{180}\right)\right) \quad (18)$$

$n = 1,3,5, \dots$

$$I_{c2}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{I_o}{5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(n \cdot \frac{\pi}{6}\right) \sin\left(n \left(\omega t - \frac{144\pi}{180}\right)\right) \quad (19)$$

$n = 1,3,5, \dots$

($+12^\circ$) faz farklı sekonder sargı akımlarının açılımları Eş. 20-22'de verilmiştir.

$$I_{c1}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{I_o}{5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot n\right) \sin\left(n \left(\omega t + \frac{24\pi}{180}\right)\right) \quad (20)$$

$n = 1,3,5, \dots$

$$I_{b1}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{I_o}{5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(n \cdot \frac{\pi}{6}\right) \sin\left(n \left(\omega t + \frac{144\pi}{180}\right)\right) \quad (21)$$

$n = 1,3,5, \dots$

$$I_{a2}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{I_o}{5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(n \cdot \frac{\pi}{6}\right) \sin\left(n \left(\omega t - \frac{96\pi}{180}\right)\right) \quad (22)$$

$n = 1,3,5, \dots$

(-24°) faz farklı sekonder sargı akımlarının açılımları da aşağıdaki eşitlikler ile yapılabilir.

$$I_{c5}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{I_o}{5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot n\right) \sin\left(n \left(\omega t - \frac{48\pi}{180}\right)\right) \quad (23)$$

$n = 1,3,5, \dots$

$$I_{b5}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{I_o}{5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(n \cdot \frac{\pi}{6}\right) \sin\left(n \left(\omega t + \frac{72\pi}{180}\right)\right) \quad (24)$$

$n = 1,3,5, \dots$

$$I_{a6}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{I_o}{5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(n \cdot \frac{\pi}{6}\right) \sin\left(n \left(\omega t - \frac{168\pi}{180}\right)\right) \quad (25)$$

$n = 1,3,5, \dots$

($+24^\circ$) faz farklı sekonder sargı akımlarının açılımları Eş. 26-28 ile yapılabilir.

$$I_{b6}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{I_o}{5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(\frac{\pi}{6} \cdot n\right) \sin\left(n \left(\omega t + \frac{48\pi}{180}\right)\right) \quad (26)$$

$n = 1,3,5, \dots$

$$I_{a5}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{I_o}{5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos(n \cdot \frac{\pi}{6}) \sin\left(n\left(\omega t + \frac{168\pi}{180}\right)\right)$$

$$n = 1,3,5,\dots \quad (27)$$

$$I_{c6}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{I_o}{5} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos(n \cdot \frac{\pi}{6}) \sin\left(n\left(\omega t - \frac{72\pi}{180}\right)\right)$$

$$n = 1,3,5,\dots \quad (28)$$

Oto transformatörün primer sargı akımları (I_a , I_b ve I_c), nüvenin aynı bacağında bulunan ve birbirleri ile manyetik bağa sahip olan bütün sekonder sargı akımlarının dönüştürme oranları dikkate alınarak toplamına eşittir. Oto transformatör primer akımları Eş. 29-31'de verilmiştir.

$$I_a(t) = \frac{I_{a1}(t) + I_{a2}(t)}{n_2} + \frac{I_{b5}(t) + I_{c6}(t)}{n_2}$$

$$+ \frac{I_{b5}(t) + I_{c6}(t)}{n_3} - \frac{I_{a5}(t) + I_{a6}(t)}{n_4} \quad (29)$$

$$- \frac{I_{an}(t)}{n_1}$$

$$I_b(t) = \frac{I_{b1}(t) + I_{b2}(t)}{n_2} + \frac{I_{a5}(t) + I_{c5}(t)}{n_2}$$

$$+ \frac{I_{a5}(t) + I_{c5}(t)}{n_3} - \frac{I_{b5}(t) + I_{b6}(t)}{n_4} \quad (30)$$

$$- \frac{I_{bn}(t)}{n_1}$$

$$I_c(t) = \frac{I_{c1}(t) + I_{c2}(t)}{n_2} + \frac{I_{a6}(t) + I_{b6}(t)}{n_2}$$

$$+ \frac{I_{a6}(t) + I_{b6}(t)}{n_3} - \frac{I_{c5}(t) + I_{c6}(t)}{n_4} \quad (31)$$

$$- \frac{I_{cn}(t)}{n_1}$$

Eş. 29 ile Eş. 3, 7, 8, 10, 14, 18, 22, 24, 25, 27 ve 28 kullanılarak C++ ile çizilen I_a primer akımı dalga şekli Şekil 5'de görülmektedir.

2.2. Şebeke Akımlarının Analizi (Analysis of Line Currents)

I_{ia} , I_{ib} , I_{ic} şebeke akımları Şekil 2'de aynı noktaya bağlı olan bütün akımların toplamına eşittir. Üç faz giriş akımları Eş. 32-34'de verilmiştir.

$$I_{ia}(t) = I_a(t) + I_{an}(t) + I_{b2}(t) + I_{c1}(t)$$

$$+ I_{b6}(t) + I_{c5}(t) \quad (32)$$

$$I_{ib}(t) = I_b(t) + I_{bn}(t) + I_{a2}(t) + I_{c2}(t)$$

$$+ I_{c6}(t) + I_{a6}(t) \quad (33)$$

$$I_{ic}(t) = I_c(t) + I_{cn}(t) + I_{a1}(t) + I_{b1}(t)$$

$$+ I_{a5}(t) + I_{b5}(t) \quad (34)$$

2.3. Oto Transformatörün Güç Oranı (Power Rating of Autotransformer)

Bütün sekonder akımlarının aynı dalga şeklinde olmaları ve aralarında sadece faz farkı olması nedeniyle bütün sekonder akımlarının etkin değeri aynıdır ve Eş. 35 ile hesaplanabilir.

$$I_{an} = I_0 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{I_{an}(t)^2}{I_0^2} d\omega t}$$

$$I_{an} = 0,163I_0 \quad (35)$$

Primer akımlarının da etkin değerleri birbirine eşittir ve Eş. 36 ile bulunabilir.

$$I_a = I_0 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{I_a(t)^2}{I_0^2} d\omega t}$$

$$I_a = 0,036I_0 \quad (36)$$

30 darbeli doğrultucunun çıkış doğru gerilimin ortalama değeri (V_o) Eş. 37 ile hesaplanabilir.

$$V_o = \frac{1}{\frac{96\pi}{180} - \frac{84\pi}{180}} \int_0^{\frac{96\pi}{180}} (\sqrt{2}\sqrt{3} \cdot 0,9105 \cdot V_a \sin(\omega t)) d\omega t \quad (37)$$

$$= 2,2V_a$$

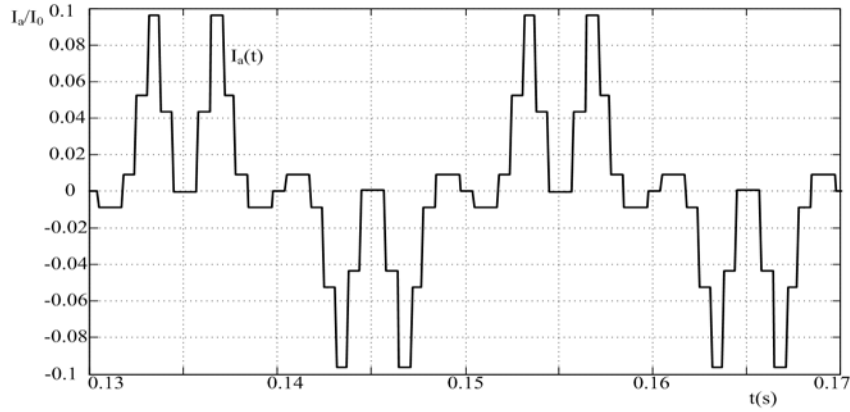
Sargı gücü, sargı gerilimi ile o sargı üzerinden geçen akımın çarpımıdır. Tüm sekonder sargıların güçleri hesaplanır ve toplanırsa sekonder toplam gücü bulunur. Eş. 38'de sekonder toplam gücünün (S_2) çıkış gücüne (P_o) oranı verilmektedir.

$$S_2 = 0,35P_o \quad (38)$$

Aynı şekilde hesaplanan primer toplam sargı gücü (S_1)'de Eş. 39'da görülmektedir.

$$S_1 = 0,06818P_o \quad (39)$$

Bu eşitliklerde P_o doğrultucunun çıkış gücüdür ve Eş. 40 ile hesaplanabilir.



Şekil 5. Primer akımı dalga şekli (Primary current waveform)

$$P_0 = V_0 \cdot I_0 \quad (40)$$

Oto transformatörün güç oranı primer ve sekonder sargı güçlerinin aritmetik ortalamasıdır ve Eş. 41 ile verilmiştir.

$$S = 0,209P_0 \quad (41)$$

3. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Tasarlanan 30 darbeli doğrultucunun değişken yük şartlarında karakteristiğinin incelenebilmesi için, 50 HP, 400 V değerlerinde bir dolaylı VDAMS'nde şebeke arayüzü olarak kullanılmış ve MATLAB/Simulink ortamında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları yapılan 30 darbeli doğrultucu ile beslenen VDAMS sistemin blok diyagramı ve 30 darbeli oto transformatörün modeli Şekil 6'da görülmektedir. Bütün benzetim çalışmalarında gerçek uygulamalarda sıkça kullanılan %3 hat empedansı ve 25 mH değerinde IPT'ler kullanılmıştır. Benzetim çalışmalarında kullanılan transformatörlerin bütün sargılarının dirençleri (R), kaçak endüktansları (L), mıknatıslama dirençleri (R_m) ve mıknatıslama reaktanslarının (L_m) birime indirgenmiş (p.u.) değerleri birbirine eşittir ve Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Transformatörün sargı parametreleri (Transformer winding parameters)

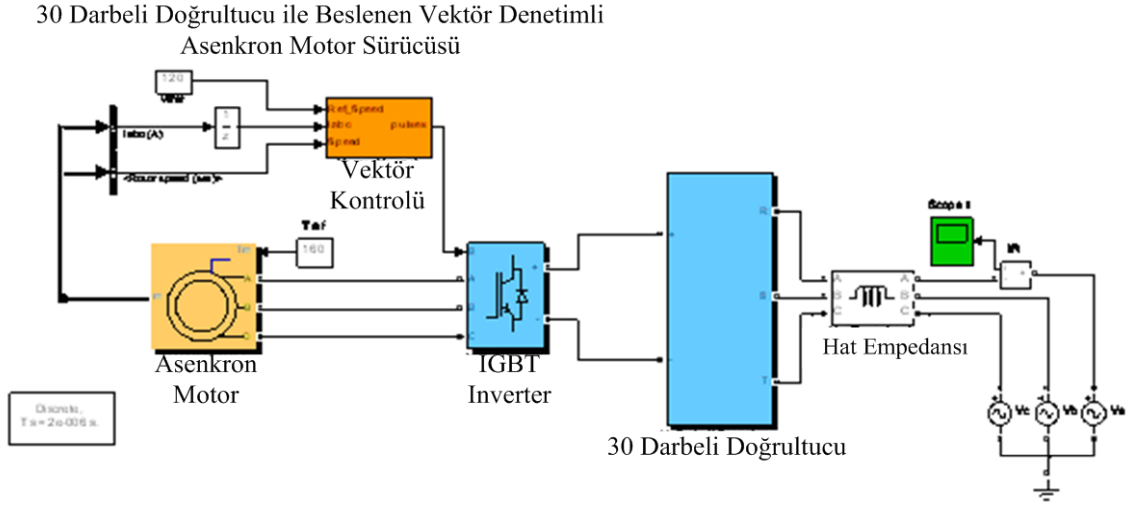
Parametre	Değer (pu)
R	0,005
L	0,02
R_m	50
L_m	50

Şekil 7 ve 8'de sırasıyla 6 ve 30 darbeli doğrultucuların filtre kondansatörünün kullanılmadığı durumdaki çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri görülmektedir. 30 darbeli doğrultucunun çıkış geriliminin kalitesi dolayısıyla 6 darbelye göre çok daha küçük değerlerde bir filtre kondansatörüne ihtiyaç duyacağı açık biçimde görülmektedir.

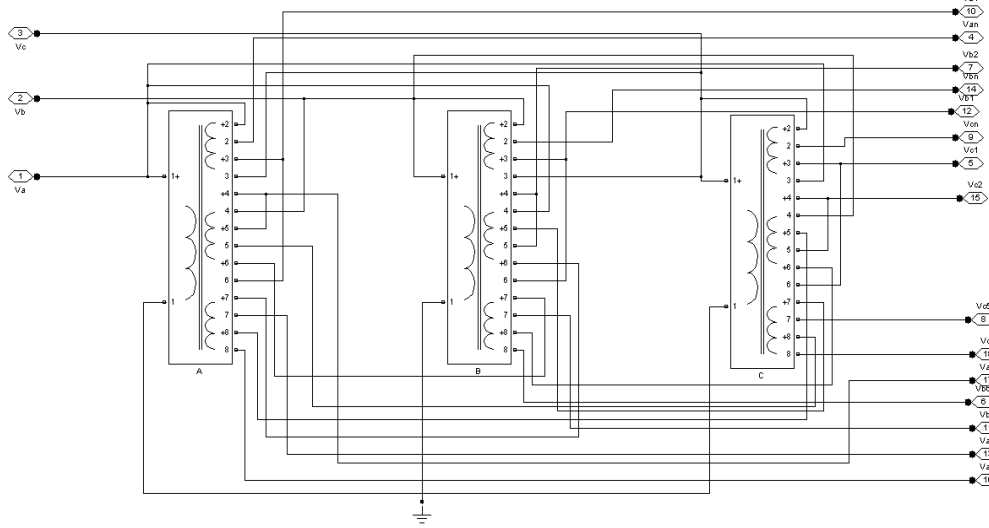
Değişken hızlı motor sürücüleri sıklıkla anma yükünün altındaki yük seviyelerinde çalışmaktadırlar. Bu nedenle bu sürücülerin şebekeden çektikleri akım harmonikleri sadece tam yük durumu için değil düşük yük seviyeleri için de incelenmelidir. Bu nedenle bu çalışmada doğrultucu performansı tam yük ve oldukça düşük kabul edilebilecek bir seviye olan %20 yük seviyeleri için incelenmiştir. Şekil 9'de günümüzde pek çok ticari üründe olduğu gibi VDAMS'nin beslemesinde kullanılan 3 fazlı 6 darbeli bir doğrultucunun sırasıyla tam yük ve %20 yük durumları için şebeke akımı ve bu akımın harmonik spektrumu görülmektedir. Tam yüklü durumda şebeke akımı toplam harmonik bozulumu (THD) %29,81'dir ve bu değer uluslararası standartlara uygun değildir. Yük miktarı azaldıkça akım dalga şeklindeki bozulma artmakta ve %20 yük değerinde akım THD'si %76,49 değerini almaktadır. Değişken moment veya değişken güç uygulamalarında kullanılan ayarlanabilir hızlı sürücülerin genellikle anma yükünün altında çalıştığı göz önüne alınırsa güç kalitesinin iyileştirilebilmesi için bu tip sürücülerde şebeke ara yüzünün iyileştirilmesi gerektiği görülmektedir.

Şekil 10'da önerilen 30 darbeli doğrultucunun aynı sürücüyü beslerken sırasıyla tam yük ve %20 yük durumları için şebeke akımı ve bu akımın harmonik spektrumu görülmektedir. Tam yüklü durumda şebeke akımı toplam harmonik bozulumu (THD) %1,64 olup IEEE 519 standartlarına uygundur (%1,64 < %5). Yük miktarı azaldıkça akım THD'si bir miktar artmasına karşın %20 yük değerinde %4,18 değerini almaktadır. Görüldüğü gibi %20 yük durumunda dahi 30 darbeli doğrultucu şebeke akım harmonikleri uluslararası standartlarda belirlenen sınırlar dâhilindedir.

Şekil 11'de aynı şartlarda çalışan 6 darbeli ve 30 darbeli doğrultucuların güç faktörlerinin ve şebeke akım THD'lerinin yük ile değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi 30 darbeli doğrultucu çok geniş bir yük aralığında IEEE 519-1992'nin en sıkı şartı olan %THD < %5 şartını sağlarken güç faktörü de 0.997 olup birim güç faktörüne çok yakın değerdedir.

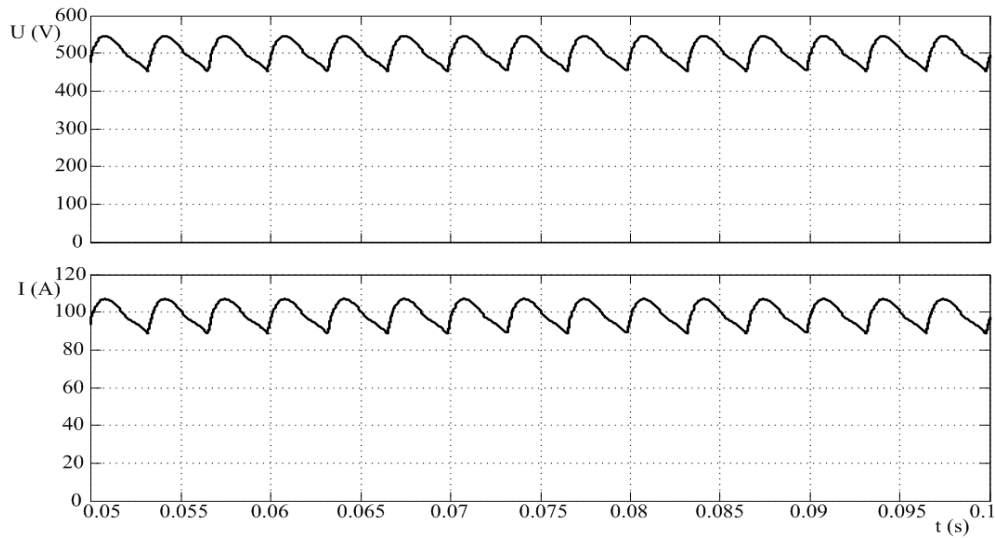


(a)

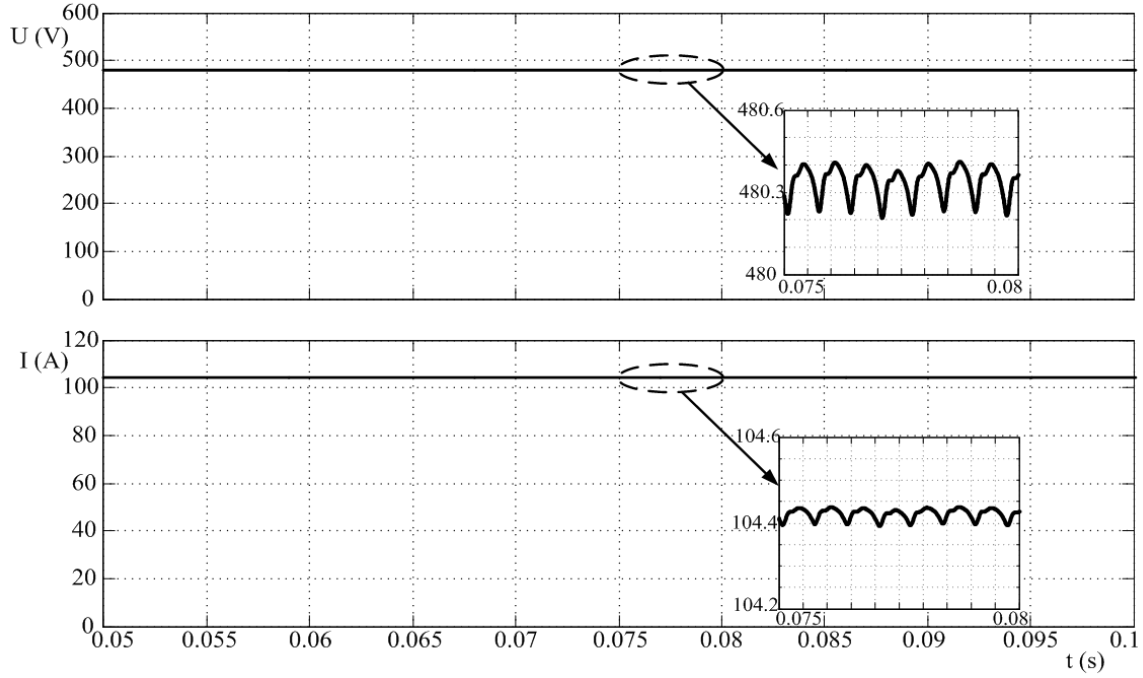


(b)

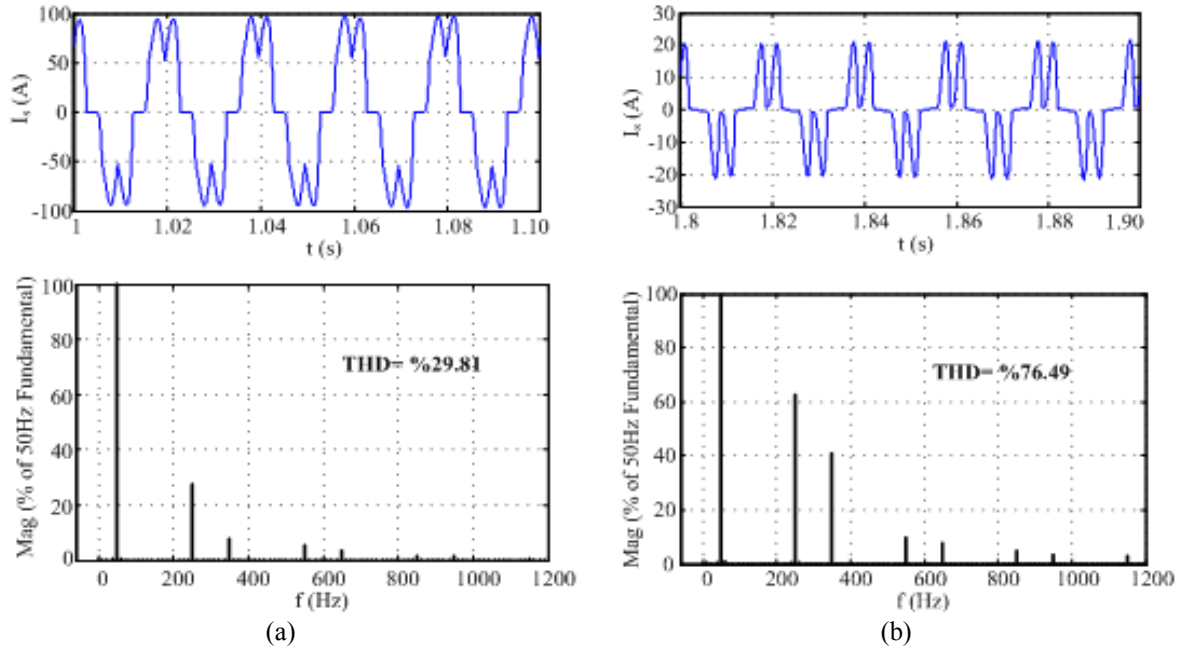
Şekil 6. a) 30 darbeli doğrultucu ile beslenen VDAMS sisteminin b) 30 darbeli oto transformatörün MATLAB/Simulink modeli (a)MATLAB/Simulink model of the 30 pulse rectifier supplied VCIMD, b) MATLAB/Simulink model of the 30 pulse auto-transformer)



Şekil 7. 6 darbeli doğrultucu çıkış gerilimi ve akım dalga şekilleri (Output voltage and current waveforms of the 6 pulse rectifier)



Şekil 8. 30 darbeli doğrultucu çıkış gerilimi ve akım dalga şekilleri (Output voltage and current waveforms of the 30 pulse rectifier)

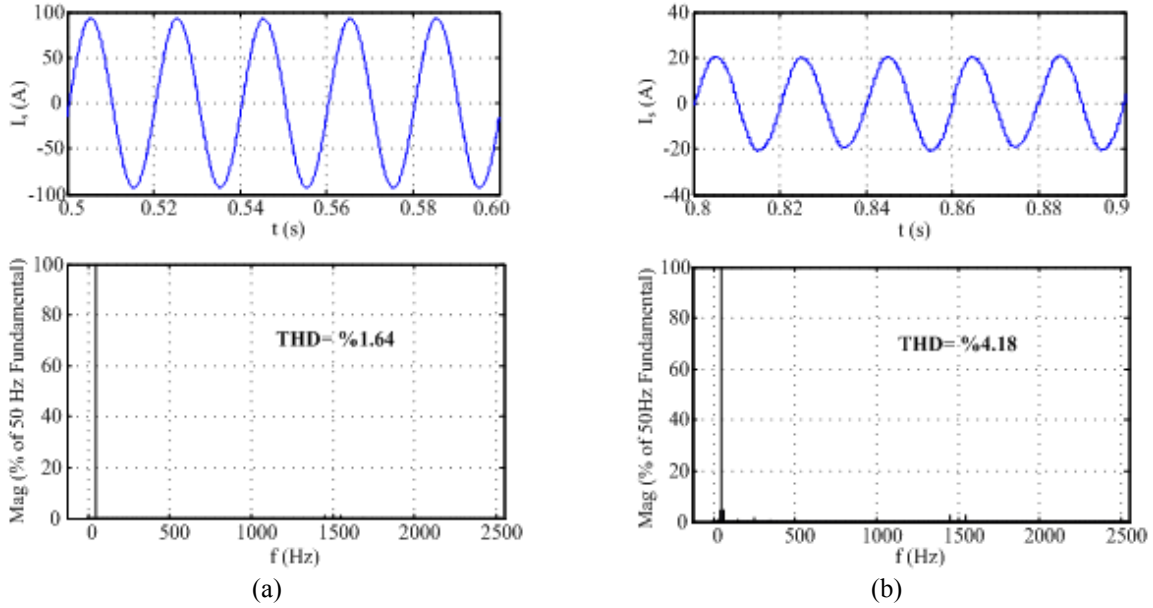


Şekil 9. VDAMS beslemesinde kullanılan 6 darbeli doğrultucu şebeke akımı ve akım harmonikleri a) Tam yük durumu için b) %20 yük durumu için (Line current and current harmonics of the 6 pulse rectifier supplying VCIMD a) At full load condition b) At 20% load condition)

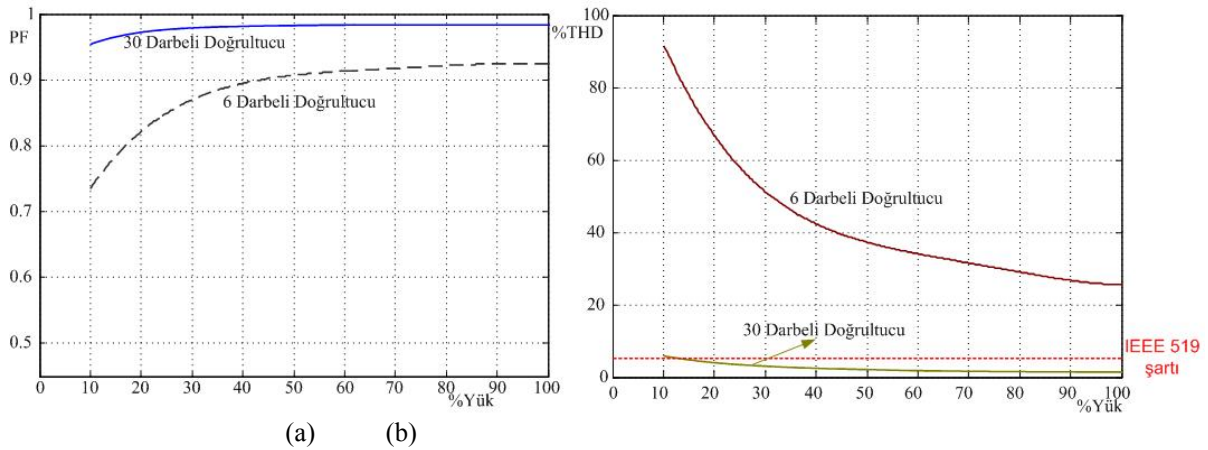
4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada alternatif akım motor sürücülerinin şebeke arayüzlerinde kullanılmak üzere 30 darbeli oto transformatörlü bir doğrultucu tasarlanmıştır. Tasarlanan 30 darbeli doğrultucunun performansı MATLAB/Simulink benzetimleri ile VDAMS uygulaması için test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile literatürdeki benzer çalışmaların karşılaştırılması Tablo 2'de verilmiştir. 30 darbeli doğrultucu tasarımında oto transformatör kullanımı ile manyetik

elemanların boyutları ve doğrultucunun maliyeti azaltılmıştır. Önerilen 30 darbeli oto transformatörün gücü toplam doğrultucu gücünün sadece %20,9'dur. Tasarlanan 30 darbeli doğrultucu ile şebekeden çekilen akım harmonikleri azaltılmış ve geniş bir çalışma aralığında IEEE-519 standardına uygunluk sağlanmıştır. Ayrıca birim güç faktörüne yakın değerler elde edilmiştir.



Şekil 10. VDAMS beslemesinde kullanılan 30 darbeli doğrultucu şebeke akımı ve akım harmonikleri a) Tam yük durumu için b) %20 yük durumu için (Line current and current harmonics of the 30 pulse rectifier supplying VCIMD a) At full load condition b) At 20% load condition)



Şekil 11. 6 ve 30 darbeli doğrultucu için a)Yük ile güç faktörü b)Yük ile şebeke akım THD'lerinin değişimi (For 6 and 30 pulse rectifiers a)Power factor versus load variation b)Line current THD versus load variation)

Tablo 2. Önerilen 30 darbeli doğrultucu ile literatürdeki çalışmaların karşılaştırılması (Comparison of the proposed 30 pulse rectifier and the previous studies)

Yöntem	Şebeke Akımı Toplam Harmonik Bozulumu Seviyesi				Transformatör Güç Oranı
	Benzetim		Uygulama		
	%20 Yük	%100 Yük	%20 Yük	%100 Yük	
24 Darbeli Doğrultucu [1]	5,98	4,28	-	-	%28,8
24 Darbeli Doğrultucu [13]	5,89	4,66	4,9	3,9	%32,5
24 Darbeli Doğrultucu [14]	6,56	3,45	5,0	4,4	%57,07
30 Darbeli Doğrultucu [15]	3,71	2,63	4,4	3,3	%30,56
30 Darbeli Doğrultucu [16]	3,52	2,9	-	-	%56,2
Önerilen 30 Darbeli Doğrultucu	4,18	1,64	-	-	%20,9

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1- Singh, B., Bhuvaneswari, G., Garg, V., "Power quality improvements in Vector-Controlled Induction Motor Drive Employing Pulse Multiplication in AC-DC Converters", **IEEE**

Transaction Power Delivery, Vol. 21, No 3, 1578-1586, 2006.

2- Vas, P., **Sensorless Vector Control and Direct Torque Control**, Oxford Univ. Pres, Oxford, U.K., 1999.

- 3- IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electrical power systems, Newyork IEEE, 1992.
- 4- IEC 61000-3-4, Limitation of harmonic current in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A, 1998.
- 5- Alexa D, Sirbu A, D. Dobrea M. "An analysis of three-phase rectifiers with near-sinusoidal input currents", **IEEE Transaction on Industrial Electronics**, Vol. 51, No 4, 884-891, 2004.
- 6- Hahn J. Kang M. P. Enjeti N, I. Pitel J., "Analysis and design of harmonic subtractors for three phase rectifier equipment to meet harmonic compliance", **IEEE Applied Power Elect. Conf. and Exposition**; New Orleans, Louisiana, 211–217, 6-10 February 2000.
- 7- Oguchi K, Maeda G, Hoshi N, Kubata T., "Coupling rectifier systems with harmonic cancelling reactors", **IEEE Ind. Appl. Magazine**, Vol. 7, Issue 4, 53–63, 2001.
- 8- De Seixas F. J. M., Barbi I., "A 12 kW three-phase low THD rectifier with high-frequency isolation and regulated DC output". **IEEE Transaction on Power Electronics**, Vol. 19, 371-377, 2004.
- 9- Kanath G. R., Benson D., Wood R., "A novel autotransformer based 18-pulse rectifier circuit" **IEEE Applied Power Elect. Conf. and Exposition**, Dallas, Texas, 795–801, 10-14 March 2002.
- 10- Sefa, İ, Altın N., "Kesintisiz Güç Kaynakları İçin 18 Darbeli Bir Doğrultucu", **Politeknik Dergisi**, Cilt 9, Sayı 3, 147-152, 2006.
- 11- Skibinski G., Guskov N., Zhou D., "Cost effective multi-pulse transformer solutions for harmonic mitigation in ac drives", **IEEE Industry Applications Conference**, Salt Lake City, 1488-1498, 12-16 October 2003.
- 12- Hammond, R., Johnson, L., Shimp, A., Harder, D., "Magnetic Solutions to Line Current Harmonic Reduction", **Proc. of Conf. Power Conversion**, Galway, Ireland, 354-364, 14-16 Sept. 1994.
- 13- Singh, B., Bhunaveneswari, G., Garg, V., "24-Pulse AC-DC Converter for Power Quality Improvement in Vector Controlled Induction Motor Drives", **Electric Power Components and Systems**, Vol. 34, No 10, 1077-1098, 2006.
- 14- Garg, V., Singh, B., Bhuvanewari, G., "A Tapped Star Connected Autotransformer Based 24-Pulse AC-DC Converter for Power Quality Improvements in Induction Motor Drives", **International Journal of Emerging Power Systems**, Vol. 7, Issue 4, 1-22, 2006.
- 15- Singh, B., Bhunaveneswari, G., Garg, V., "An Improved Power-Quality 30-Pulse AC-DC for Varying Loads", **IEEE Transaction Power Delivery**, Vol. 22, No 2, 1179-1187, 2007.
- 16- Singh, B., Bhuvanewari, G., Garg, V., Chandra, A., "Star Connected Autotransformer Based 30-Pulse AC-DC Converter For Power Quality Improvement In Vector Controlled Induction Motor Drives" **IEEE Power India Conference**, New Delhi, India, 1-6, 10-12 April 2006.
- 17- Sefa, İ., Altın, N., "Dengesiz Şebeke Koşullarında Çalışan 18 Darbeli Doğrultucularda Harmoniklerinin Azaltılması Üzerine Bir Yaklaşım", **Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Politeknik Dergisi**, Vol.10, No.3, 229-234, 2007.