

Tümleşik Modüler Motor Sürücü Sistemi Tasarımı

Design of an Integrated Modular Motor Drive System

Mesut Uğur¹, Ozan Keysan²

¹Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
ugurm@metu.edu.tr

²Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
keysan@metu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, bir Tümleşik Modüler Motor Sürücü (TMMS) sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. TMMS sistemi için modüler bir kesirli oluklu, konsantre sargılı (FSCW), sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım (PM-BLDC) motoru ile birlikte Galyum Nitrat (GaN) teknolojisine dayalı modüler motor sürücü güç katı tasarımı yapılmıştır. Konvansiyonel sistemlere göre %2'lik verim artışı sağlanmıştır. Tümleşik motor sürücü sistemine uygun DA bara kondansatör seçimi gerçekleştirilmiştir. Interleaving tekniği kullanılarak kondansatör boyutu, sığa ve akım gereksinimi yaklaşık yarı yarıya azaltılmıştır. Tasarlanan sistemin başarımı, MATLAB/Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları ile elde edilmiştir. TMMS sistemi ile konvansiyonel sistemlerde mümkün olmayan 15 W/cm³'ün üzerinde güç yoğunluğuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Tümleşik modüler motor sürücü, sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru, galyum nitrat, DA bara kondansatör bankası

Abstract

In this study, design of an Integrated Modular Motor Drive (IMMD) System is performed. Design of a modular fractional slot concentrated winding (FSCW) permanent magnet brushless direct current (PM-BLDC) motor and the modular motor drive power stage is performed based on Gallium nitride (GaN) technology. The efficiency of the motor drive is increased by 2% compared to conventional motor drive system. Selection of optimum DC bus capacitor suitable for the IMMD is achieved. DC Link capacitor bank size is reduced to its half in terms of both capacitance and current requirement with the utilization interleaving technique. The performance of the designed system is obtained via the simulations carried on MATLAB/Simulink. Power density values larger than 15 W/cm³ is achieved with the IMMD system which is not possible for a conventional drive.

Keywords: Integrated modular motor drive, permanent magnet brushless direct current motor, gallium nitride, DC bus capacitor bank

1. Giriş

Geleneksel motor sürücü sistemlerinde, motor sürücü üniteleri ayrı bir birim olarak kullanılır ve motora uzun kablolar ile bağlanırlar. Motorun ve sürücünün ayrı birimler olarak bulunması, sistemin toplam hacminin ve ağırlığının artmasına, böylece toplam güç yoğunluğunun azalmasına neden olmaktadır. Özellikle elektrikli çekiş sistemlerinden ve havacılık ve uzay uygulamalarında güç yoğunluğunun azaltılması önemlidir [1]. Buna ek olarak, uzun kablo bağlantılarından dolayı, darbe genişlik modülasyonu (PWM) operasyonu ile motor sargılarında geçici rejim yüksek gerilimleri oluşmakta, bu gerilimler yüzünden stator sargılarının izolasyonu üzerinde kaçak akımlar meydana gelmekte ve bu da izolasyonların yıpranmasına neden olarak motor ömrünü kısaltmaktadır [2].

Son yıllarda, bahsedilen problemlere çözüm olabilecek, Tümleşik Motor Sürücüler (TMMS) kavramı ortaya atılmıştır. Buna göre, motor sürücü sisteminde yer alan tüm sürücü bileşenleri (güç katı, kontrol elektronığı, pasif elemanlar ve soğutucu) motor üzerine bütünleştirilebilir ve böylece tek bir tümleşik birim elde edilir [1]. Bu sayede motor sürücü sisteminin güç yoğunluğu önemli ölçüde artırılabilir [3],[4]. Buna ek olarak, panoların ve bağlantı elemanlarının elimine edilmesinden dolayı % 20'ye varan maliyet azaltılması mümkün olmaktadır. Ayrıca, bağlantı kablolarının olmamasından dolayı motor ömrü uzatılabilir ve elektromanyetik girişim (EMI) problemleri en aza indirgenebilmektedir [5].

Bu uygulamada sistem ayrıca, toplam gücü eşit olarak paylaşan alt parçalara bölünerek modüler hale getirilmektedir. Bu sayede, sistemin hata toleransı büyük oranda artmaktadır, yani sistem bir veya daha fazla birimde hata oluşması durumunda bile düşük güçte çalışmaya devam edebilmektedir [6],[7]. Bunun yanında, her bir birim ve sargı üzerindeki gerilim düşürülebilmekte ve böylece düşük dayanma gerilimine sahip güç yarıiletkenleri kullanılabilir hale gelmektedir [8]. Isı üreten parçaların daha geniş bir alana yayılmasından dolayı da güç elektroniğinin ısıl başarımı iyileştirilmekte ve sıcak nokta oluşumu olasılığı azalmaktadır. Buna ek olarak, modüler yapı

sayesinde, üretim, kurulum, bakım ve onarım maliyetleri düşürülebilmektedir [1],[8].

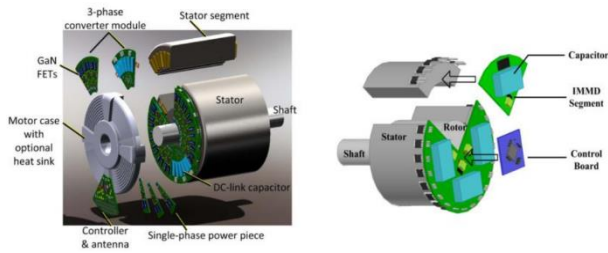
Tüm bu avantajların yanında, motorun ve sürücünün bütünleştirilmesinden dolayı pek çok zorlukla karşılaşmaktadır [8]. İlk olarak, sürücüdeki tüm elemanları küçük bir hacme yerleştirmek, boyut optimizasyonu ve parçaların en uygun şekilde yerleştirilmesini gerektirmektedir. Ayrıca, motorun ve sürücünün aynı anda soğutulması zordur ve detaylı ısı analiz gerektirmektedir. Buna ek olarak, tüm elektronik devre elemanları doğrudan fiziksel titreşime maruz kalmaktadır [6]. Pasif elemanların boyutunu küçültmek için Galyum Nitrat (GaN) gibi yeni nesil geniş bant aralıklı (WBG) güç yarıiletkenlerinin yüksek anahtarlama frekansında kullanımı önerilmiştir [8]. Bu yarıiletkenler ile ayrıca yüksek verimlere çıkılarak soğutucu boyutunu küçültmek de mümkündür. Yüksek frekansta GaN kullanıldığında, hem kapı sürücü devresinde hem de güç katında yer alan parazitik bileşenler kritik hale gelmekte ve devre yerleşim tasarımı önem kazanmaktadır [3].

Konsantre sargılı motorlar üretim kolaylığı açısından ve modüler stator yapısına uygunluğundan dolayı tercih edilmektedir. Kesirli oluklu PM-BLDC motorlar ise, yüksek güç yoğunluğuna, yüksek verime, düşük vuruş momentine sahiptir ve hata toleransları iyidir [9].

TMMS tasarımlarında DA bara kondansatörünün hacmini düşürmek kritiktir. Motor sürücü sistemlerinde, DA bara kondansatörlerinin, toplam hacmin büyük bir kısmını kaplamasından dolayı ve TMMS uygulamalarında motor sürücü alanının kısıtlı olması, DA bara kondansatörlerinin optimizasyonunu zorunlu hale getirir [8],[10].

2. TMMS Teknolojisi İncelemesi

Motor sürücünün motorla bütünleştirilmesi farklı şekillerde yapılabilmektedir. Bu makalede, stator nüvesi üzerinde bütünleştirme adı verilen ve sistemi aynı zamanda modüler haline getiren yapı üzerinde durulmuştur. Bu yapıda her bir parça, bir bölünmüş stator kutbu, konsantre sargı ve denetleyicisi üzerinde olan ve ilgili stator sargısına özel güç çeviricisinden oluşur. Bahsedilen TMMS yapısına dair örnekler Şekil 1’de incelenebilir [1].

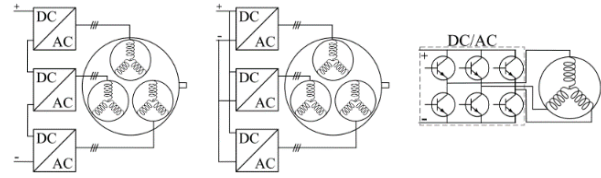


Şekil 1. TMMS örnekleri [1]

Geleneksel motorlarda genellikle farklı kutuplardaki stator sargıları seri bağlanarak her bir fazda tek bir sargı elde edilir. Modüler motorlarda ise kutup sargıları farklı motor sürücülere bağlanırlar. Bu nedenle bu tip motorlara ayırık sargılı motorlar da denir. Bu yapı sayesinde sistem modüler hale gelmekte, yedekliliği ve hata toleransı artmaktadır. Ayrıca motor sürücü

parçalarının farklı şekillerde bağlanabilmesi sayesinde tasarımdaki esneklik artmaktadır. Üretim kolaylığından dolayı ayırık stator yapısı genellikle konsantre sargılar ile oluşturulur.

Motor sürücü çeviricileri için, sistemin çalışma değerlerine bağlı olarak çeşitli topolojiler ortaya atılmıştır. TMMS’lerde çok sayıdaki motor sürücü parçalarının DA bara üzerinde seri ve/veya paralel olarak bağlanabilmesi ile bu topolojiler büyük oranda çeşitlendirilebilmektedir. Şekil 2’de geleneksel motor sürücü yapısı ve ayırık sargılı motor yapısı farklı tipte çevirici bağlantıları için gösterilmiştir [8]. Ayrıca, ayırık sargı yapısından dolayı sürücülerin bağlandığı yükün doğası gereği izole olması sayesinde çeviriciler arasında dolaşım akımları oluşmamaktadır. Yüksek DA bara gerilimi olduğu durumda bu özellik kullanılarak, düşük gerilim değerlerine sahip yarıiletken anahtarların kullanılması ile oluşturulan sürücü parçaları DA bara üzerinde seri bağlanabilmektedir. Bu durum, yeni nesil yüksek güç yarıiletkenlerinin (GaN gibi) motor sürücülerde kullanılmasına olanak vermiştir.



Şekil 2. Ayırık sargılı motor yapısı ve farklı tipte motor sürücü bağlantıları [8]

TMMS uygulamaları WBG yarıiletkenlerinin kullanımına oldukça uygundur, çünkü bu tip yarıiletkenler düşük iletim durumu direncine, yüksek anahtarlama hızına ve yüksek maksimum jonksiyon sıcaklığına sahiptirler. Geleneksel yarıiletkenlerle (IGBT gibi) yapılan yüksek güç uygulamalarında anahtarlama frekansı 20 kHz ile sınırlı iken Silikon Karbür (SiC) veya GaN gibi yarıiletkenlerde kW mertebesinde dahi 100 kHz’e kadar çıkılabilmektedir. Düşük iletim direncinden dolayı iletim kayıplarının düşürülebilmesi, yüksek anahtarlama hızlarından dolayı yüksek anahtarlama frekanslarında çalıştırılabilmesi ve böylece sürücü sistemi pasif elemanlarının boyutlarının küçültülebilmesi ve ısıl başarımlarının iyi olmasından dolayı TMMS uygulamalarına yönelik ilk örnek çalışmalarında GaN transistörleri sıklıkla tercih edilmiştir [8], [11]. GaN ile geliştirilen TMMS sistemlerinin verimleri de, hem anma değerlerinde hem de tüm güç çıkışı aralığında yüksek olmuştur [11].

TMMS uygulamalarında DA baranın modellenmesi ve DA bara kondansatörü seçimi özellikle kritiktir çünkü bu kondansatörler sistemin hacminin %20’sini, ağırlığının ise %30’unu oluşturmaktadır [1]. Ayrıca motor sürücü devresinin yüksekliğini yine bu elemanlar belirlemektedir. Motor sürücü uygulamalarında alüminyum elektrolitik kondansatörler ucuz olmaları ve hacim başına kapasitanslarının yüksek olması sebebiyle tercih edilmektedir. Ancak bu kondansatör tipinin ömrü kısadır ve çalışma değerlerine bağlıdır [12]. Ayrıca hacim başına akım dayanma değerleri düşüktür. Diğer bir taraftan, metal film tipi kondansatörler ömür ve akım değerleri açısından daha iyidir. Bu sebeple TMMS sistemleri için daha uygun oldukları söylenebilir. Standart uygulamaların aksine, TMMS’lerde kondansatör bankası tasarımında gerilim, sığa ve dalgalanma akımına ek olarak güç yoğunluğu, maliyet,

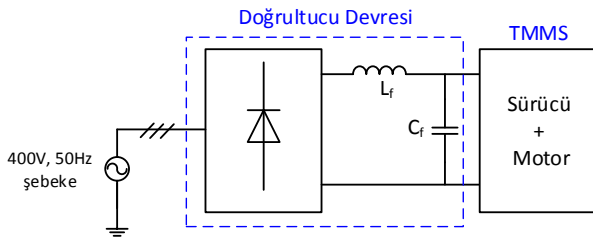
kondansatör yüksekliği, ısı model ve çalışma sıcaklığının kondansatör ömrü üzerine etkileri gibi parametreler de incelenmelidir.

3. TMMS Tasarımı

Bu bildiride gerçekleştiren tasarımda motor sürücü giriş devresi standart diyot köprü doğrultucu olarak düşünülmüştür ve giriş tarafının motor sürücüyü etkileri kapsamı dışında bırakılmıştır. Sistemde kullanılan doğrultucu devre şeması Şekil 3'te gösterilmiştir. Motor olarak ise konsantre sargılı kesirli oluklu stator yapısına sahip, üç fazlı sinüs dalga şekli uyarımlı sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru kullanılmıştır. Tasarımda kullanılan anma değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1: TMMS sisteminin anma değerleri

DA bara gerilimi	540 V
Motor toplam çıkış gücü	8 kW
Stator oluk sayısı	48
Motor güç faktörü	0.9
Motor anma verimi	% 90
Rotor kutup sayısı	40
Motor anma hızı	540 rpm
Motor uzunluğu	150 mm
Stator dış çapı	230 mm
Stator iç çapı	150 mm

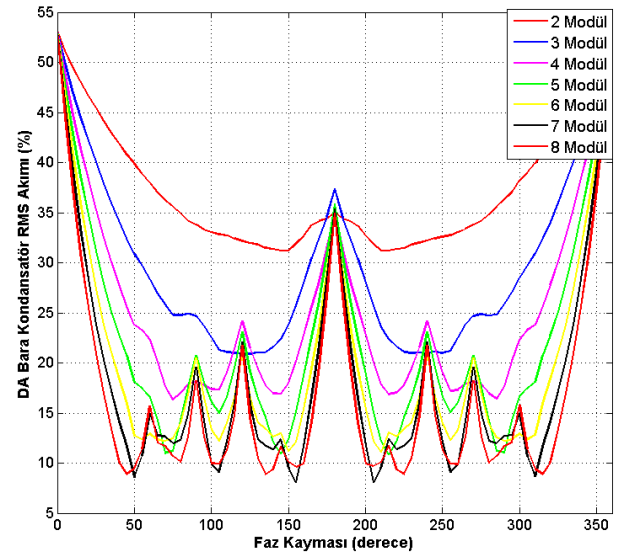


Şekil 3. Sistemde kullanılan doğrultucu devre şeması

Standart motor sürücü uygulamalarının aksine TMMS tasarımında motor tasarımı ile sürücü tasarımı bir arada düşünülmelidir. Tasarım aşamasında belirlenmesi gereken ilk parametre kullanılacak modül sayısıdır. Daha önce bahsedildiği gibi, önerilen TMMS topolojisi esnek bir yapıya sahiptir, yani istenilen sayıda sürücü evirici modülü DA bara üzerinde seri ve/veya paralel olarak bağlanabilmektedir. Yüksek sürücü verimine ulaşabilmek için yeni nesil WBG güç yarıiletkenlerinden olan GaN'lar kullanılacaktır. Şu anda piyasadan hazır temin edilebilen GaN ürünleri en fazla 650V dayanma gerilimine sahiptir [13]. İki seviyeli evirici modülleri kullanıldığında mevcut DA bara gerilimine uyumlu olarak gerekli olan transistor minimum dayanma gerilimi DA baranın 1,5 katı, yani 810 V olmalıdır. Bu değer hesaplanırken motor sürücüdeki parazitik indüktansların (transistor, kondansatör ve baradan kaynaklı) anahtarlama anlarında transistorlar üzerinde yarattığı gerilim yükselmelerinden dolayı güvenlik payı bırakılmıştır. Sözü geçen GaN malzemeleri kullanıldığında en az 2 adet seri bağlantı ihtiyacı olduğu görülebilir. Buradan seri bağlı modül sayısının 2 olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca toplam modül sayısı da çift sayılı olmak zorundadır.

Paralel bağlı modül sayısı açısından belirleyici olan bir çok parametre vardır. Bunlardan birisi modül başına düşen güç ihtiyacıdır. Bu parametre seçilen transistorların akım anma değerini ve sistemin verimini etkiler. Diğer bir parametre ise stator yapısının, yani oluk sayısının uygunluğudur. Standart motorlarda faz ve kutup başına düşen oluk sayısı bir parametre olarak kullanılır. TMMS'de yer alan motorlarda ise faz ve modül başına oluk sayısı kullanılmalıdır (w). w değeri en az 1 olmalı ve tam sayı olmalıdır. Buna göre, örneğin 48 oluklu bir makina için seçilebilecek modül sayısı 2, 4 ve 8'dir. Seçilebilecek modül sayıları arasından en iyisini bulabilmek için, son olarak DA bara kondansatör akımları düşünülmüştür. Bu akımlar ve kondansatör bankası boyutuna etkisi interleaving tekniği ile doğrudan bağlantılıdır.

Interleaving tekniği uygulanarak DA bara akımının dalgalanması düşürülebilir ve böylece DA bara kondansatörü akım gereksinimi azaltılabilir. Interleaving ve faz kaymalı PWM tekniği kullanıldığında, farklı modül sayıları için, uygulanan faz kayması miktarı ile DA bara dalgalanma akımının değişimi Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu çalışmaya göre, DA bara akımının etkin değerindeki düşüş, 4 modülden sonra çok fazla olmamaktadır. Bu çalışmadan da faydalanılarak en iyi modül sayısını 4 olarak seçilmiştir. Bu seçim sonucu da paralel bağlı modül sayısı 2 olur. Sonuç olarak tasarlanan TMMS güç katı topolojisi devre şeması Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Interleaving tekniği kullanıldığında DA bara akımının etkin değerinin farklı modül sayıları ve faz kayması açılara göre değişimi

Tasarımda bir sonraki aşama yarıiletken anahtarların seçimidir. 600 Volt ve üzeri dayanma gerilimlerinde şu anda piyasada iki tip GaN bulunmaktadır: Transphorm tarafından üretilen kaskod yapıdaki GaN'lar ve GaN Systems tarafından üretilen enhancement mode GaN'lar. GaN seçiminde ilk olarak gerekli anma akımı değeri hesaplanmalıdır. Bunun için de, stator sargıları üzerinde indüklenen gerilimden yola çıkılabilir.

Bir modülün bir fazına ait stator sargı indüklenen gerilimi etkin değeri Eşitlik 1'de gösterilmiştir. Bu eşitlikte, N_{phm} , faz başına ve modül başına sarım sayısı olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada sarım içi tur sayısı 22 olarak seçilmiştir. Toplam tur

sayısı ise Eşitlik 2’de gösterildiği gibi 88 olarak bulunmuştur. Ayrıca motor hava aralığındaki tepe akı yoğunluğu, motor nüvesini doyuma ulaştırmayacak şekilde 0.9 olarak alındığında, kutup başına akı yoğunluğu Eşitlik 3’te gösterildiği gibi bulunabilir. Kesirli oluklu makinalara yönelik var olan tablolara bakıldığında sarım faktörü 48/40 oluk/kutup oranı için 0.933’tür [9]. Son olarak, gerekli anma rotor hızı için gerekli olan stator akım frekansı da Eşitlik 4’teki gibi bulunmuş ve faz ve modül başına indüklenen gerilim etkin değeri 69.6 V olarak hesaplanmıştır. Motor sürücü modüllerinin sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu ile anahtarlendiğinde (S-PWM) gerekli olan modülasyon endeksi değeri Eşitlik 5’teki gibi 0,8 olarak hesaplanabilir. Bu hesapta modül ve faz başına sürücü çıkış gerilimi (V_{p-rms}), yüzde 10’luk gerilim düşümü hesaba katılarak 76.5 V olarak alınmış ve modül başına DA gerilim (V_{dc-m}), seri bağlı modül sayısından elde edilmiştir. Sonuç olarak, motor güç faktörü ve anma verimi kullanılarak faz ve modül başına sürücü çıkış akımı Eşitlik 6’da gösterildiği gibi 10,75 amper olarak bulunmuştur.

$$E = 4.44 N_{phm} f \Phi_{pp} k_w \quad (1)$$

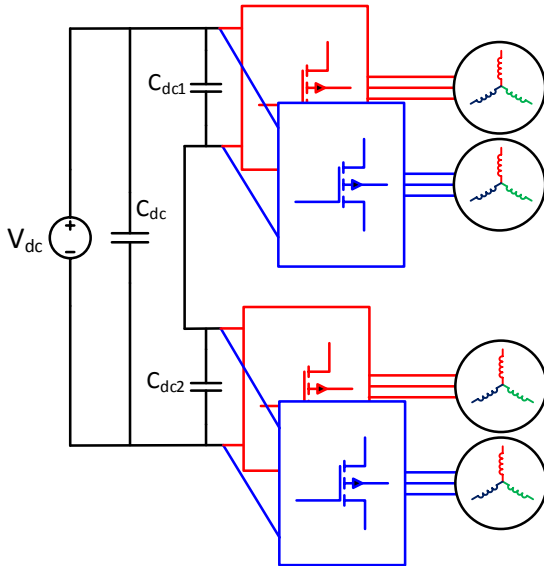
$$N_{phm} = \frac{\text{katman } zQ w}{2} \quad (2)$$

$$\Phi_{pp} = \frac{2 L D \hat{B}}{p} \quad (3)$$

$$f = \frac{N p}{120} \quad (4)$$

$$m_a = \frac{V_{p-rms} 2 \sqrt{2}}{V_{dc-m}} \quad (5)$$

$$I_{p-rms} = \frac{P_{out-m}}{3 \eta \cos(\varphi) V_{p-rms}} \quad (6)$$



Şekil 5. Önerilen TMMS güç katı topolojisi devre şeması

Bu çıkarımlar doğrultusunda, iki farklı tipte GaN seçilmiş ve bu iki anahtar üzerinde kayıp analizi yapılarak en iyi anahtarlama frekansı seçilmiştir. Bu analiz sırasında sürücü verimi (yalnızca yarıiletkenler dâhil olmak üzere) hedefi % 98 olarak belirlenmiştir. TMMS’lerde anahtarlama frekansı seçiminde iki kritik durum vardır. Anahtarlama frekansı arttıkça DA bara kondansatör boyutları küçültülebilmektedir. Diğer bir taraftan, anahtarlama frekansı arttıkça yarıiletkenlerin kayıpları artmaktadır. Bu çalışmada anahtarlama frekansı verim hedefi kullanılarak belirlenecektir. TMMS sistemini standart motor sürücü sistemi ile karşılaştırmak amacıyla, aynı anma değerlerinde tek bir motor sürücü evircisine sahip IGBT’li bir devre daha tasarlanmıştır. Bu tasarımda kullanılan IGBT ve seçilen iki farklı tipte GaN transistörler ve parametreleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2: Seçilen GaN’lar ve parametreleri

Transistör	FP35R12KT4P	TPH3205WSB	GS66508B
Tipi	IGBT	Cascode GaN	E-mode GaN
Üretici	Infineon	Transphorm	GaN systems
Gerilim	1200 V	650 V	650 V
Akım	35 A	35 A	30 A
$V_{ce,sat}$	2,15 V	-	-
$R_{ds,on}$	-	60 mΩ	50 mΩ

Güç yarıiletken kayıpları, transistor iletim kayıpları (P_{tc}) ve anahtarlama kayıpları (P_{ts}), ters paralel diyot (veya ters iletim transistor) iletim kayıpları (P_{dc}) ve anahtarlama kayıpları (P_{dr}) şeklinde incelenmiştir. Sözü geçen kayıpların hesaplanmasında kullanılan formüller Eşitlik 7-11’de görülebilir. Bu eşitliklerde, E_{on} ve E_{off} açılma ve kapanma enerjileri, I_{cp} ve I_{ep} iletim ve ters iletim tepe akımları, $V_{ce,sat}$ doyma gerilim düşümü, $R_{ds,on}$ iletim durumu direnci, V_{ec} diyotun gerilim düşümü, I_{rr} ve t_{rr} diyotlar için toparlanma akımı ve zamanı, ve $V_{ce,p}$ ise ters toparlanma gerilimi tepe değeridir. Kayıp analizi sonuçları ve karşılaştırmalar 4. Bölümde sunulmuştur.

$$P_{tc} = I_{cp} V_{ce,sat} \left(\frac{1}{8} + \frac{M pf}{3 \pi} \right) \quad (IGBT) \quad (7)$$

$$P_{tc} = I_{cp}^2 R_{ds,on} \left(\frac{1}{8} + \frac{M pf}{3 \pi} \right) \quad (GaN) \quad (8)$$

$$P_{ts} = (E_{on} + E_{off}) \frac{f_{sw}}{\pi} \quad (9)$$

$$P_{dc} = I_{ep} V_{ec} \left(\frac{1}{8} - \frac{M pf}{3 \pi} \right) \quad (10)$$

$$P_{dr} = I_{rr} t_{rr} V_{ce,p} \frac{f_{sw}}{8} \quad (11)$$

Daha önce de bahsedildiği gibi, TMMS sistemlerinde DA bara kondansatörü seçimi oldukça kritiktir. Bu çalışmada, tasarımı yapılan TMMS sistemi için metal film kondansatörler kullanılarak optimum DA bara kondansatör bankası seçimi yapılmıştır. Ayrıca yine konvansiyonel IGBT’li sistem için aynı tasarım yöntemi kullanılarak kondansatör seçimi yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Kondansatör seçimini etkileyen temel parametreler DA gerilim değeri (V_{dc}), gerilim dalgalanması sınırlaması için gerekli sığa değeri (C_{dc}) ve kondansatör

dalgalanma akımından dolayı gereken akım etkin değeridir ($I_{c,rms}$). Buna ek olarak, kondansatör sıcaklık artışı (T_{core}) da kondansatör ömrünü etkilediğinden dolayı incelenmelidir. Tüm bu parametrelerin analitik olarak elde edilmiş ve Eşitlik 12-15'te gösterilmiştir [12]. Eşitliklerde yer alan parametrelerden M modülasyon derinliğini, $V_{dc,r}$ DA bara gerilimi tepe-tepe dalgalanma değerini, f_{sw} anahtarlama frekansını, pf güç faktörünü, T_a ortam sıcaklığını, $R_{th,c}$ kondansatör ısıl direncini ve R_c kondansatör ESR değerini ifade etmektedir.

$$C_{dc} = \frac{M (\hat{I}_s - I_{avg})}{2 V_{dc,r} f_{sw}} \quad (12)$$

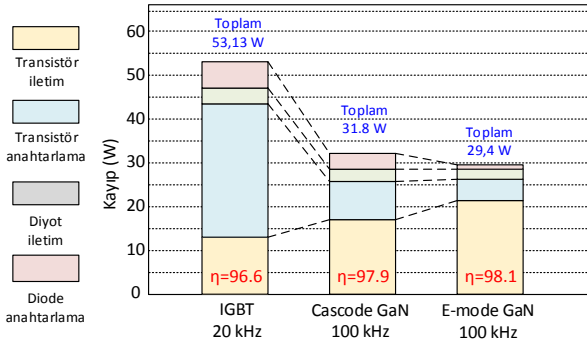
$$I_{c,rms} = I_{s,rms} \sqrt{\left[2M \left(\frac{\sqrt{3}}{4\pi} + pf^2 \left(\frac{\sqrt{3}}{\pi} - \frac{9}{16} M \right) \right) \right]} \quad (13)$$

$$T_{core} = T_a + p_c(T_{core}) R_{th,c} \quad (14)$$

$$p_c = I_{c,rms}^2 R_c(T_{core}) \quad (15)$$

4. Benzetim Sonuçları

Konvansiyonel IGBT'li motor sürücü ile iki farklı tipte GaN'lı TMMS sistemi kayıp analizi karşılaştırmalı sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Konvansiyonel motor sürücü sistemi ile TMMS sistemi kayıp analizi sonuçları

Kayıp analizi sonuçlarına bakıldığında GaN kullanımı ile her iki tipte de anahtarlama frekansı beş katına çıkartılmasına rağmen yarıletken kayıplarının toplamda hemen hemen yarıya düştüğü gözlenmiştir. IGBT'lerde pratikte anahtarlama frekansı üst sınırı 10 kHz'tir, bu nedenle daha yüksek frekanslarda analiz yapılmamıştır. Kayıp bileşenleri ayrı ayrı incelendiğinde ise, öngörüldüğü gibi kayıptaki ana düşüş transistor ve diyot anahtarlama kayıplarında olmaktadır. Diğer bir taraftan, diyot iletim kayıplarında büyük bir değişim gözlenmemiştir ancak transistor iletim kayıpları GaN'larda daha yüksek olmuştur. Bu durumun başlıca nedenleri, IGBT'lerin yüksek akımlı uygulamalarda iletim durumunda genel olarak iyi performans göstermesi ve GaN gibi WBG anahtarların henüz teknolojik olarak istenilen iletim durumu düzeyine ulaşamamasıdır. Diğer bir neden ise sistemin iki paralel ve iki seri modülden oluşmasıdır. Tamamının paralel bağlanmasına durumuna

oranla her bir modül iki kat fazla akım taşımakta ve GaN'larda iletim kayıpları akımın karesi ile artmaktadır. Sonuç olarak, 100 kHz anahtarlama frekansında hem Kaskod hem de E-mode GaN'da yaklaşık %98 verime ulaşılmıştır ve daha yüksek verim hedeflendiğinde anahtarlama frekansı düşürülebilir.

Bu çalışmada, elde edilen kayıp analizi bilgileri doğrultusunda optimum anahtarlama frekansı DA bara kondansatör bankası tasarımı ile son haline gelecektir. Sistemin DA barası iki adet seri bağlı çevirici olduğundan dolayı iki adet seri kondansatör bankası olarak düşünülmüştür. DA bara kondansatörü seçiminde ilk olarak tasarlanan sistemde gerekli olacak kondansatör dalgalanma akımı etkin değeri ve sığa değerleri Eşitlik 12 ve 13'teki gibi belirlenmiştir. Daha sonra bu değerler, hem interleaving uygulandığı hem de uygulanmadığı durumlar için benzetimlerle doğrulanmıştır.

Buna göre tek bir modülün DA baradaki akımının ortalama değeri 8.23 A, dalgalanma akımı etkin değeri ise 6.39 A olmaktadır ve dalgalanma akımı ortalama akımın %77'sine karşılık gelmektedir. Interleaving tekniği uygulanmadığında her bir kondansatördeki akım etkin değeri 12.78 A'dır. Interleaving tekniği ile en uygun açılı değeri olan 90 derece faz kayması uygulandığında ise her bir kondansatörün akım etkin değeri 6.69 A'e düşmüştür ve bu %48 oranında iyileştirmeye karşılık gelir.

Kondansatör bankası toplam sığa değeri DA bara gerilimi dalgalanmasına ve seçilen anahtarlama frekansına göre belirlenir. Bu çalışmada sistemin soğutmasını kolaylaştırmak ve bu amaçla verimi daha da arttırmak adına anahtarlama frekansı 40 kHz olarak düşülmüştür ve DA bara gerilimi dalgalanma sınırı tepe-tepe değeri %1, yani 5.4V olarak alınmıştır. Buna göre gerekli en düşük sığa değeri interleaving uygulanmadığında 26 µF, uygulandığında ise yine %48'lik iyileşme ile 14 µF olarak bulunur.

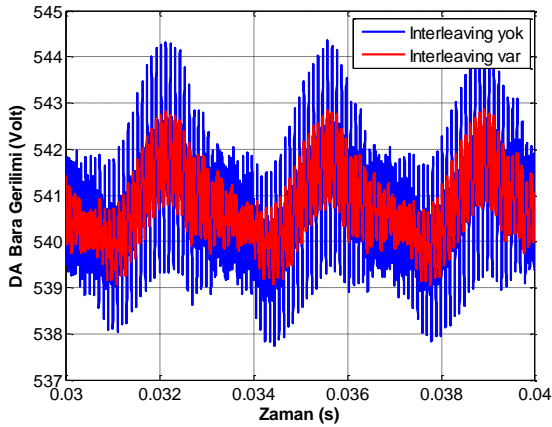
Aynı tasarım, merkezi ve IGBT'li tek bir motor sürücü olduğu durum için de tekrarlanmış ve bu durumda DA bara kondansatör bankası akımı etkin değeri 12.78 A, 10 kHz anahtarlama frekansındaki en düşük sığa değeri 100 µF olarak bulunur. Bu durumda interleaving tekniği uygulamak mümkün değildir.

Hesaplanan değerlere göre DA bara kondansatör bankası seçimi yapılmış ve seçilen kondansatörler ile benzetim çalışması yapılmıştır. Seçilen kondansatör veri sayfası teknik bilgileri Tablo 3'te gösterilmiştir. Kondansatör seçiminde belirleyici etmen akım etkin değerinden çok sığa değeri olmuştur ve bu da metal film kondansatörler için beklenen bir durumdur. Benzetim çalışmaları sonucu elde edilen, interleaving tekniği ile ve olmadan DA bara gerilim dalgalanması Şekil 7'de, kondansatör bankası akım dalgalanması Şekil 8'de, interleaving tekniği ile oluşan her bir çeviricinin çektiği DA bara akımı ve toplam DA bara akımı Şekil 9'da gösterilmiştir. Ayrıca her bir kondansatörün ısınma miktarı Eşitlik 14 ve 15'ten ve veri sayfası parametrelerinden yola çıkılarak 10°C olarak bulunmuştur. Buna göre, motor sargılarının ısınmasından dolayı oluşan yüksek ortam sıcaklığına rağmen kondansatör iç sıcaklıkları kabul edilebilir değerlerde olacak ve bu sayede de kondansatör ömrü uzun olacak ve ısınmanın kondansatör akım değeri üzerine etkisi olmayacaktır.

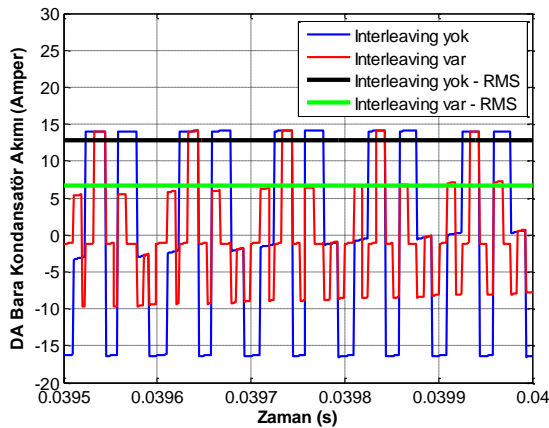
Son olarak, hem kondansatör bankasına yönelik hem de tüm sürücü sistemine yönelik güç yoğunluğu analizi yapılmış ve sistemin başarımı doğrulanmıştır. Kondansatör boyutlarından yola çıkılarak elde edilen kondansatör bankası güç yoğunluğu değeri 35.27 W/cm^3 olarak bulunmuştur. Ayrıca tüm sistemin güç yoğunluğunu bulmak için sürücü baskı devre kartı boyutları stator ve rotor iç ve dış çapları düşünülerek bulunmuştur. Baskı devre kartı yüksekliği ise doğrudan kondansatör yüksekliği ile ilişkilidir çünkü TMMS sisteminde kondansatörler hem en büyük hacme sahiptir hem de en yüksek devre elemanlarıdır. Bundan yola çıkılarak da tüm sürücü sistemi güç yoğunluğu 16.57 W/cm^3 olarak bulunur. Başlangıçta konan, endüstriyel ve özel uygulamalardaki konvansiyonel motor sürücü sistemlerinde ulaşılması mümkün olmayan ve TMMS prototiplerinde ulaşmaya çalışılan 15 W/cm^3 güç yoğunluğu hedefine mevcut tasarım ile ulaşılabilceği görülmüştür.

Tablo 3: Seçilen kondansatör veri sayfası teknik bilgileri (seri baranın yalnızca bir parçası)

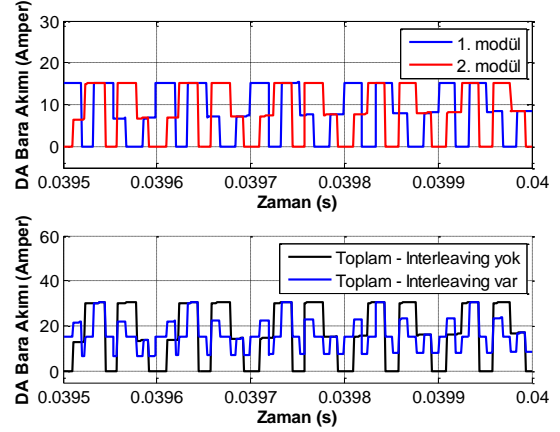
Kodu	B32676G3306	Bağlantı	2 adet paralel
Tipi	Metal Film	Toplam sığa	60 μF
Sığa	30 μF	Gerilim	300 V
ESR	2.8 m Ω	Akım	26 A
Boyutlar	30x42 mm	ESL	12 nH
Termal direnç	10 $^{\circ}\text{C/W}$	Yükseklik	45 mm



Şekil 7. DA bara gerilimi dalgalanması



Şekil 8. DA bara kondansatör bankası akım dalgalanması



Şekil 9. Her bir modülün DA baradan çektiği akım ve toplam akım

5. Sonuçlar

Bu çalışmada konvansiyonel motor sürücü sistemlerine alternatif olabilecek tümleşik ve modüler yapıda bir motor sürücü sistemi önerilmiş ve tasarımı yapılmıştır. Sistemin getirdiği belli başlı avantajlar hem ağırlık hem hacim açısından yüksek güç yoğunluğu, arttırılmış hata dayanıklılığı ve güvenilirlik, yarıiletkenlerde ve motor sargılarındaki gerilim streslerinin ve aşırı salınımların azaltılması ve ısı kaynaklarının dağıtılması ile soğutmanın kolaylaşması olarak sıralanabilir. Bu özellikleri ile önerilen sistemin özellikler havacılık, uzay ve elektrikli araçlar gibi uygulamalarda önemli rol oynayacağı düşünülmektedir.

Mevcut TMMS teknolojisi incelenmiş ve henüz laboratuvar prototipi aşamasında olan çalışmalar ve başarımları irdelenmiştir. Özellikle seri modüler yapıdaki seri bağlı motor sürücü topolojisi üzerinde durulmuş ve bu topoloji hem seri hem paralel bağlı bir topoloji olarak geliştirilmiştir. DA bara kondansatör bankasını küçültmek amacıyla uygulanan interleaving tekniği sonucu kondansatör akımı etkin değerinde meydana gelen küçülmeye bakılarak topolojideki optimum modül sayısı 4 olarak belirlenmiştir. Bunun yanında piyasadaki GaN yarıiletkenlerinin kullanılabileceği bir topolojide 2 seri 2 paralel modül olması gerektiği anlaşılmıştır. Bu topolojiye göre seçilen örnek bir motor üzerinde tasarım yapılmıştır.

Seçilen GaN'lar ile kayıp analizi yapılmış ve standart IGBT'li sürücü sistemi ile karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda her iki tipte de standart sisteme göre beş katı anahtarlama frekansına rağmen yüzde iki verim artışı sağlanmıştır. Buna ek olarak, DA bara kondansatör bankası seçimi gerçekleştirilmiş ve yapılan tasarım benzetim sonuçları ile doğrulanmıştır. Interleaving tekniği ile kondansatör akım etkin değeri ve sığa değeri yarı yarıya düşürülmüştür. Ayrıca tüm sistemin güç yoğunluğu hedeflenen değerin üzerinde elde edilmiştir. Gelecekte tasarımı yapılan sistemin prototipi üretilecek ve laboratuvar test edilecektir. Bu testler arasında verim, güç yoğunluğu ve hata dayanıklılığı yer alacaktır.

6. Kaynaklar

- [1] G. Lo Calzo *et al.*, “Integrated motor drives: state of the art and future trends,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 10, no. 8, pp. 757–771, Sep. 2016.
- [2] A. Shea and T. M. Jahns, “Hardware integration for an integrated modular motor drive including distributed control,” in *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2014, pp. 4881–4887.
- [3] S. M. Lambert, B. C. Mecrow, R. Abebe, G. Vakil, and C. M. Johnson, “Integrated Drives for Transport - A Review of the Enabling Electronics Technology,” *IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, pp. 1–6, 2015.
- [4] J. Wang, Y. Li, and Y. Han, “Evaluation and design for an integrated modular motor drive (IMMD) with GaN devices,” *2013 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2013*, no. Immd, pp. 4318–4325, 2013.
- [5] J. J. Wolmarans, M. B. Gerber, H. Polinder, S. W. H. De Haan, J. A. Ferreira, and D. Clarenbach, “A 50kW integrated fault tolerant permanent magnet machine and motor drive,” *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 345–351, 2008.
- [6] M. D. Hennen, M. Niessen, C. Heyers, H. J. Brauer, and R. W. De Doncker, “Development and control of an integrated and distributed inverter for a fault tolerant five-phase switched reluctance traction drive,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 2, pp. 547–554, 2012.
- [7] A. Galassini, A. Costabeber, C. Gerada, G. Buticchi, and D. Barater, “State space model of a modular speed-drooped system for high reliability integrated modular motor drives,” *Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propulsion, ESARS*, vol. 2015–May, 2015.
- [8] J. Wang, Y. Li, and Y. Han, “Integrated Modular Motor Drive Design With GaN Power FETs,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. c, pp. 3198–3207, 2015.
- [9] A. Roekke and R. Nilssen, “Analytical Calculation of Yoke Flux Patterns in Fractional-Slot Permanent Magnet Machines,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 9464, no. c, pp. 1–1, 2016.
- [10] G. Su and L. Tang, “A segmented traction drive system with a small dc bus capacitor,” in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 2847–2853.
- [11] T. Morita *et al.*, “99.3 % Efficiency of Three-Phase Inverter for Motor Drive Using GaN-based Gate Injection Transistors,” pp. 481–484, 2011.
- [12] J. W. Kolar and S. D. Round, “Analytical calculation of the RMS current stress on the DC-link capacitor of voltage-PWM converter systems,” *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, vol. 153, no. 4, p. 535, 2006.
- [13] E. A. Jones, F. F. Wang, and D. Costinett, “Review of Commercial GaN Power Devices and GaN-Based Converter Design Challenges,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 4, no. 3, pp. 707–719, 2016.