

# Tümleşik Modüler Motor Sürücü Sistemi (TMMS) Tasarımı

## Design of an Integrated Modular Motor Drive (IMMD) System

Mesut Uğur<sup>1</sup>, Ozan Keysan<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Elektrik 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 teknolojisi avantajları ve dezavantajları yönünden incelenmiş, uygun motor sürücü topolojileri, güç yarıiletkenleri ve kapı sürücü teknikleri araştırılmıştır. TMMS sistemi için modüler bir fraksiyonel oluklu, kümelenmiş sargılı (FSCW), sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım (PM-BLDC) motoru tasarımı yapılmıştır. Galyum Nitrat (GaN) teknolojisine dayalı modüler motor sürücü güç katı tasarımı yapılmıştır. Tümleşik motor sürücü sistemine uygun optimum DA bara kondansatör seçimi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistemin başarımı, MATLAB/Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları ile elde edilmiştir. Sistem, güç yoğunluğu verim ve ısınma açısından değerlendirilmiştir.*

*Anahtar kelimeler: Tümleşik modüler motor sürücü, sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru, galyum nitrat*

### Abstract

*In this study, design of an Integrated Modular Motor Drive (IMMD) System is performed. IMMD technology is investigated in terms of its advantages and disadvantages, and suitable motor drive topologies, power semiconductor devices and gate drive techniques are investigated. Design of a modular fractional slot concentrated winding (FSCW) permanent magnet brushless direct current (PM-BLDC) motor is achieved for the IMMD system. A modular motor drive power stage design is performed based on Gallium nitride (GaN) technology. Selection of optimum DC bus capacitor suitable for the integrated motor drive system is achieved. The performance of the designed system is obtained via the simulations carried on MATLAB/Simulink. The system is evaluated in terms of power density, efficiency and cooling.*

*Keywords: Integrated modular motor drive, permanent magnet brushless direct current motor, gallium nitride*

### 1. Giriş

Geleneksel motor sürücü sistemlerinde, motor sürücü üniteleri bir pano içerisinde yer alır ve motora uzun kablolar ile bağlanırlar. Motorun ve sürücünün ayrı 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 kiplenimi (PWM) operasyonu ile motor sargılarında geçici rejim yüksek gerilimleri oluşmakta, bu gerilimler yüzünden stator sargılarının izolasyonunun 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 elektroniği, 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 uzatılabilmekte 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 zorluk meydana gelmektedir [8]. İlk olarak, sürücüdeki tüm elemanları küçük bir hacme yerleştirmek, boyut optimizasyonu ve parçaların optimum yerleştirilmesini gerektirmektedir. Ayrıca, motorun ve sürücünün aynı anda soğutulması zordur ve detaylı ısı analiz gerektirmektedir. Buna ek olarak, tüm elektronik devre

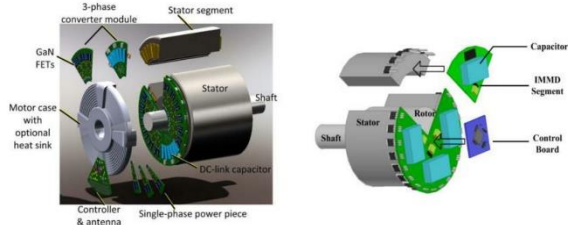
elemanları doğrudan fiziksel titreşime maruz kalmaktadır [6]. Pasif elemanların boyutunu küçültmek için Galyum Nitrat (GaN) gibi yeni nesil geniş bant aralıklı (WBG) güç yarıiletkenlerinin yüksek anahtarlama frekansında kullanımı önerilmiştir [8]. Bu yarıiletkenler ile ayrıca yüksek verimlere çıkılarak 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].

Kümelenmiş sargılı motorlar üretim kolaylığı açısından ve modüler stator yapısına uygunluğundan dolayı tercih edilmektedir. Fraksiyonel 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 nüve üzerine bütünleştirme adı verilen ve sistemi aynı zamanda modüler haline getiren yapı üzerinde durulmuştur. Bu yapıda her bir parça, bir bölünmüş stator kutbu, kümelenmiş sargı ve denetleyicisi üzerinde olan ve ilgili stator sargısına özel güç çeviricisinden oluşur. Bahsedilen TMMS yapısına dair örnekler Şekil 1’de incelenebilir [1].

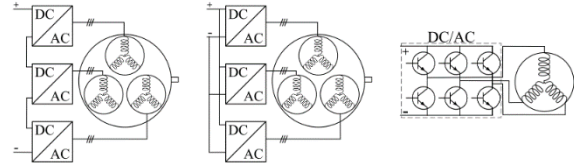


Şekil 1. TMMS örnekleri [1]

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 ayrı 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 ayrı sargılı stator yapısı genellikle kümelenmiş sargılar ile oluşturulur.

Motor sürücü çeviricileri için, sistemin çalışma değerlerine bağlı olarak çeşitli topolojiler ortaya atılmıştır. TMMS’lerde çok sayıda 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 ayrı sargılı motor yapısı farklı tipte çevirici

bağlantıları için gösterilmiştir [8]. Ayrıca, ayrı 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. Ayrı 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 yarıiletkenlerde (IGBT gibi) 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 ısı başarımalarının 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]. [4]’te, 200V dayanma gerilimine sahip GaN’lar ile 40 kHz anahtarlama frekansında yapılan TMMS uygulamasında sistem soğutucu olmadan çalıştırılmıştır.

TMMS uygulamalarında DA baranın modellenmesi ve DA bara kondansatörü seçimi özellikle kritiktir çünkü bu kondansatörler sistemin hacminin yüzde yirmisini, ağırlığının ise yüzde otuzunu 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, ısıl model ve çalışma sıcaklığının kondansatör ömrü üzerine etkileri gibi parametreler de incelenmelidir.

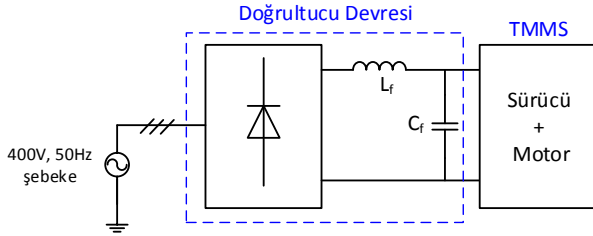
## 3. TMMS Tasarımı

Bu bildiride gerçekleştiren tasarımda motor sürücü giriş devresi standart diyot köprü doğrultucu olarak düşünülmüştür ve giriş

tarafının motor sürücüye etkileri kapsamın dışında bırakılmıştır. Sistemde kullanılan doğrultucu devre şeması Şekil 3: Sistemde kullanılan doğrultucu devre şeması'te gösterilmiştir. Motor olarak ise kümelenmiş sargılı fraksiyonel oluklu stator yapısına sahip, üç fazlı sinüs dalga şekli uyartımlı 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  |



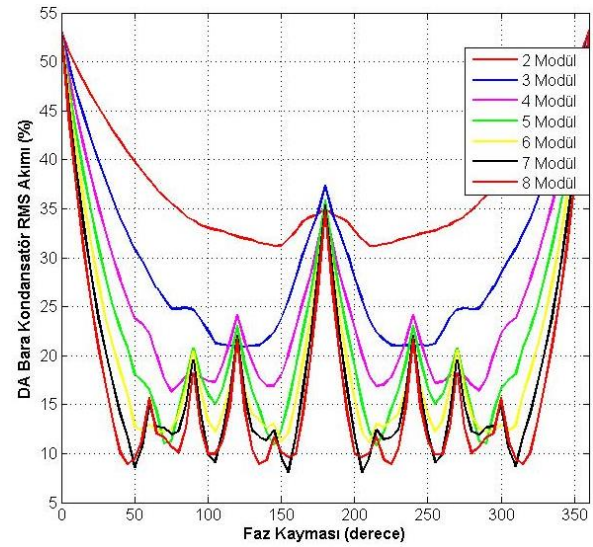
Şekil 3: Sistemde kullanılan doğrultucu devre şeması

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 transistör minimum dayanma gerilimi DA baranın 1,5 katı, yani 810 V olmalıdır. Bu değer hesaplanırken motor sürücüsündeki parazitik indüktansların (transistor, kondansatör ve baradan kaynaklı) anahtarlama anlarında transistörler 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 transistörlerin 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: Interleaving tekniği kullanıldığında DA bara akımının etkin değerinin farklı modül sayıları ve faz kayması açılarına göre değişimi'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 açılarına 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. Fraksiyonel 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.

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

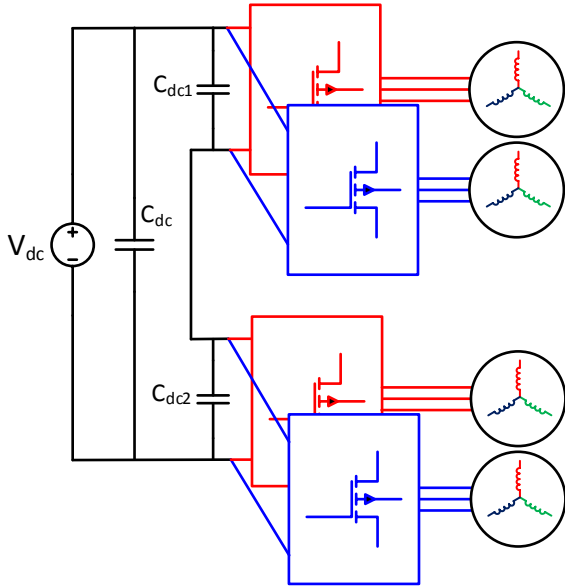
$$N_{phm} = \frac{\text{katman } zQ w}{2} \quad (2)$$

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

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

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

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



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 eviricisine sahip IGBT'li bir devre daha tasarlanmıştır. Bu tasarımda kullanılan IGBT ve seçilen iki farklı tipte GaN transistörler ve kritik parametreleri Tablo 2: Seçilen GaN'lar ve kritik parametreleri'de gösterilmiştir.

Tablo 2: Seçilen GaN'lar ve kritik 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, transistör iletim kayıpları ( $P_{tc}$ ) ve anahtarlama kayıpları ( $P_{ts}$ ), ters paralel diyot (veya ters iletim transistör) 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.

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

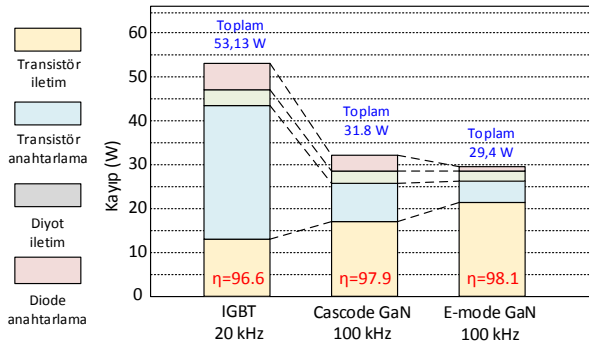
$$I_{c,rms} = I_{s,rms} \sqrt{2M \left( \frac{\sqrt{3}}{4\pi} + pf^2 \left( \frac{\sqrt{3}}{\pi} - \frac{9}{16}M \right) \right)} \quad (13)$$

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

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

#### 4. Benzetim Sonuçları

Konvansiyonel IGBT'li motor sürücü ile iki farklı tipte GaN'lı TMMS sistemi kayıp analizi karşılaştırmalı sonuçları Şekil 6: Konvansiyonel motor sürücü sistemi ile TMMS sistemi kayıp analizi sonuçları'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 yarıiletken 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 transistör ve diyot anahtarlama kayıplarında olmaktadır. Diğer bir taraftan, diyot iletim kayıplarında büyük bir değişim gözlenmemiştir ancak transistör iletim kayıpları GaN'larda daha yüksek olmuştur. Bu durumun başlıca nedenleri, IGBT'lerin yüksek akım uygulamalarında 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 açı 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. Aynı tasarım merkezi ve IGBT'li tek bir motor sürücü olduğu durum için de yapılmış ve bu durumda DA bara ortalama akımı xyz, kondansatör bankası akımı etkin değeri xyz olarak bulunur. Bu durumda interleaving tekniği uygulamak mümkün değildir.

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 düşünülmüştür. Buna göre

Interleaving grafiği

Kondansatör sayısal sonuçlar

Kondansatör seçim sonuçları

DC Link gerilimi dalgalanma - Balance olayı

4 modül birden DC bara akımları

Power density sonucu



## 5. Sonuçlar

Bu bildiride

TMMS teknolojisi incelenmiş, özellikle güç yoğunluğu ve güvenliğin önemli olduğu kritik uygulamalardaki yerine bakılmış

Sürücü topolojileri, stator sargı konfigürasyonları, yarı iletken teknolojisi incelenmiş

DC baranın önemine bakılmış

GaNlar ile modüler motor sürücü tasarımı yapılmış, performansına bakılmış, kayıp analizi yapılmış

Motor performansına bakılmış

Kondansatör seçimi yapılmış

Sonuçlar ve çıkarımlar sunulmuştur.

## 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.