

# 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, motor sürücü için MATLAB/Simulink ortamında ve motor için Ansys/Maxwell 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 on MATLAB/Simulink for motor drive, and Ansys/Maxwell for the motor. 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 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].

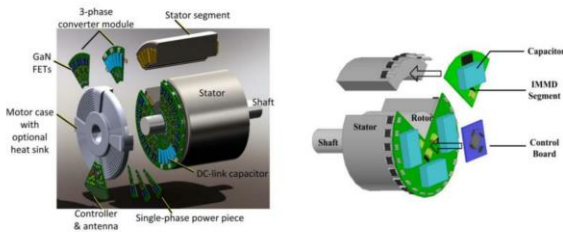
Tüm bu avantajların yanında, motorun ve sürücünün bütünleştirilmesinden dolayı pek çok zorluk meydana gelmektedir [8]. İlk olarak, sürücüdeki tüm elemanları küçük bir hacme yerleştirmek, boyut optimizasyonu ve parçaların optimum yerleştirilmesini gerektirmektedir. Ayrıca, motorun ve sürücünün aynı anda 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.

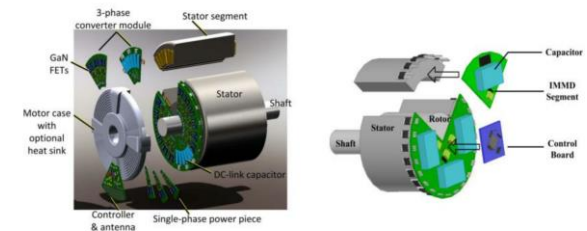


Şekil 1. TMMS örnekleri

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 kümelenmiş 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. 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

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.

Kondansatör bankası

### **3. TMMS Tasarımı**

Bu taslağı web sayfasında bulabilirsiniz.  
<http://bilimseldergi.emo.org.tr>

EMO BİLİMSEL DERGİ Yayın Kurulu makalelerinizi bu taslağa uygun bir şekilde hazırlayıp sorunsuz olarak dergi sekreteryasına ulaştırdığınız için tüm katılımcılara teşekkür eder.

#### 4. Benzetim Sonuçları

Bu taslağı web sayfasında bulabilirsiniz.  
<http://bilimseldergi.emo.org.tr>

EMO BİLİMSEL DERGİ Yayın Kurulu makalelerinizi bu taslağa uygun bir şekilde hazırlayıp sorunsuz olarak dergi sekreteryasına ulaştırdığınız için tüm katılımcılara teşekkür eder.

#### 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. 4, 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.