

Ek.3. Projedeki Bilimsel Gelişmeler ve Sonuçlar

Raporun bu bölümünde, projenin ilk altı aylık döneminde gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar sunulacaktır. Bu çalışmalar içerisinde;

- Literatür araştırması sonucu proje konusu ile ilgili elde edilen bulgular
- Motor tipi ve sargı konfigürasyonu, sürücü modül sayısı ve topolojisinin belirlenmesi
- Motor sürücü sistemi tasarımı ve yarıiletkenlerin seçimi
- Kondansatör bankası optimizasyonu
- Benzetim çalışmaları ve sonuçlar
- Baskı devre kartının şematik tasarımı

yer almaktadır.

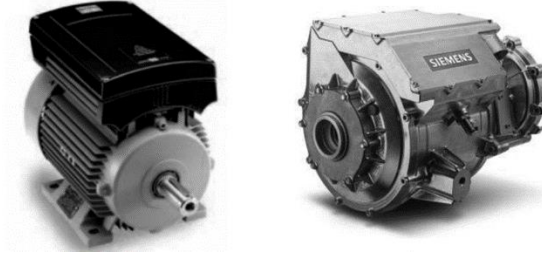
1. Literatür araştırması:

Tümüleşik modüler motor sürücü (integrated modular motor drive, IMMD) uygulamaları son yıllarda popülerlik kazanmaya başlanmıştır. Ancak konunun henüz akademik çevrelerde yapılan araştırmalarla ve laboratuvar prototipi çalışmaları ile sınırlı kaldığı görülmüştür. Bunun başlıca sebepleri; konunun henüz araştırma anlamında yeterli doygunluğa ulaşmaması, teknolojiye önerilen devre bileşenlerinin ve fiziksel yapıların hem çok yaygın olmaması hem de ticari olarak görece pahalı olması, belirli bir güç seviyesinin üzerine ısınma sorunlarından dolayı çıkılamaması, kullanılagelmiş standart ticari uygulamaların halen hem fiyat olarak hem de ticari erişilebilirlik olarak daha avantajlı olması olarak gösterilebilir.

Günümüze kadar yapılan uygulamalarda genellikle tümleşik motor sürücü (IMD) yapıları denenmiştir ancak sistemi tümüyle modüler hale getirme fikri yeni bir olgudur. Bu entegrasyonun en büyük avantajı sistemin hacminin azaltılarak güç yoğunluğunun artırılmasıdır. Ek olarak, sürücü ile motoru tümşelik yapma ile sürücü için gerekli olan ayrı kabinler ve uzun bağlantı kabloları çıkarılabilmekte ve böylece % 20-40 arasında bir maliyet azalması mümkün olmaktadır. Bunun yanında, bağlantı kablolarından dolayı oluşan gerilim salınımları yok edilerek motor girişinde kullanılan filtreler de sistemden çıkarılabilmektedir. Aynı zamanda, bu sayede elektromanyetik girişim (EMI) problemleri de önemli ölçüde azalmaktadır. Yapılan çalışmalar genellikle tümleşik yapıdan dolayı meydana gelen zorlukları gidermeye yöneliktir. Bunlardan en önemlisi motoru ve sürücüyü aynı anda soğutmaktır. Bu sebeple günümüze kadar çıkılabilen en büyük güç değeri en fazla 7.5 kW olabilmektedir. Ayrıca, motorun yarattığı titreşimin güç elektroniği ve kontrol devreleri üzerinde meydana getireceği olumsuz etkilerden de bahsedilmiştir.

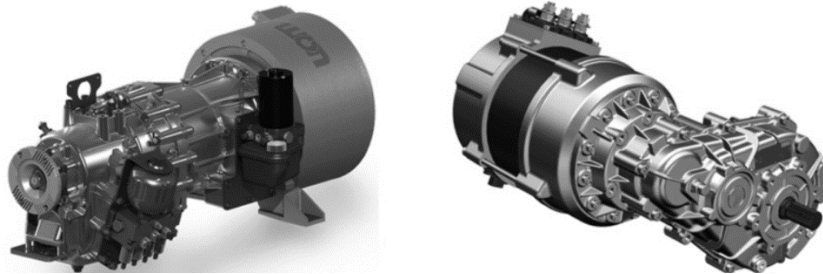
Yapılan IMD uygulamalarında şu ana kadar üç tip bütünleştirme yöntemi önerilmiştir: yüzey monteli entegrasyon, son katman entegrasyonu ve stator nüvesi üzerine entegrasyon. Yüzey monteli entegrasyon en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Bu yapıda sürücü motorun

mekanik gövdesi üzerinde herhangi bir yere yerleştirilmektedir. Bu yöntem üretiminin ucuz olmasından, uygulamasının kolay olmasından ve basitliğinden dolayı ilgi görmüştür. Burada motor şasesi aynı zamanda bir soğutucu görevi görür. Yüksek güçlere çıkılmak için genellikle ekstra hava ve su soğutma sistemleri kullanımı gerekmektedir. Bu tip yapılara ticari olarak çeşitli güçlerde rastlanmaktadır. SIEMENS firmasının elektrikli araçlar için geliştirdiği IMD sistemleri 30-200 kW güçlerindedir ve 2.6 kg/W güç yoğunluğuna ulaşmıştır. Şekil 1’de Siemens ve Danfoss’a ait örnek yüzey monteli entegrasyon uygulamaları görülebilir.



Şekil 1: Yüzey monteli entegrasyon örnekleri

Son katman entegrasyonu yöntemi sürücü devreleri için kararlı bir mekanik yapı içermekte, aynı zamanda motor ve sürücü için termal izolasyon sağlamaktadır. Ancak bu sistemde yine ekstra soğutma yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Örnek olarak Şekil 2’de yine elektrikli araçlar için üretilen ve ticarileşen 45-250 kW güç aralığındaki UQM PowerPhase ve NextDrive uygulamaları gösterilmiştir.

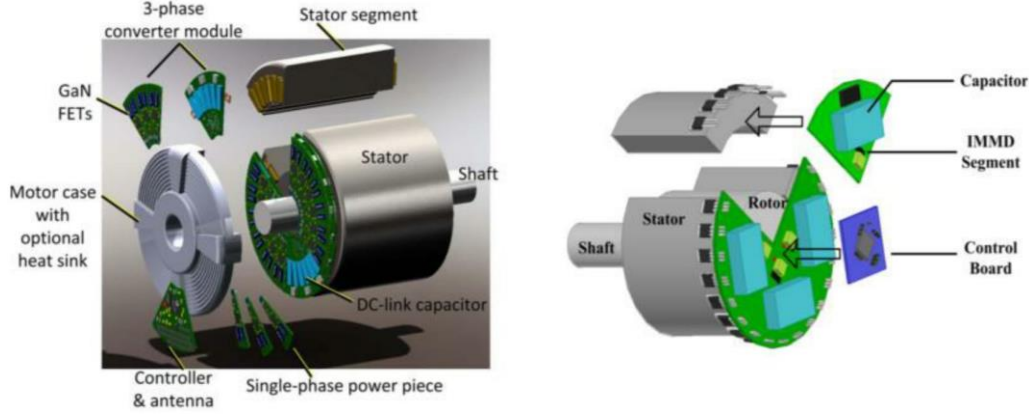


Şekil 2: Son katman entegrasyonu örnekleri

Stator nüvesi üzerine entegrasyonda temel amaç daha kompakt ve yüksek güç yoğunluğuna sahip IMD elde etmektir. Bu yapıda tüm motor sürücü bileşenleri (güç katı, kontrol devreleri, pasif elemanlar, soğutucu) stator nüvesi üzerine monte edilmektedir ve bu proje kapsamında geliştirilecek olan sistem bu kategoriye girmektedir. Örnek olarak Şekil 3’te gösterilen bu yapının en büyük zorlukları, kullanılabilir hacmin çok küçük olması, sürücü yüksekliğinin kısıtlı olması ve elektronik devre elemanlarının motora çok yakın olmasıdır.

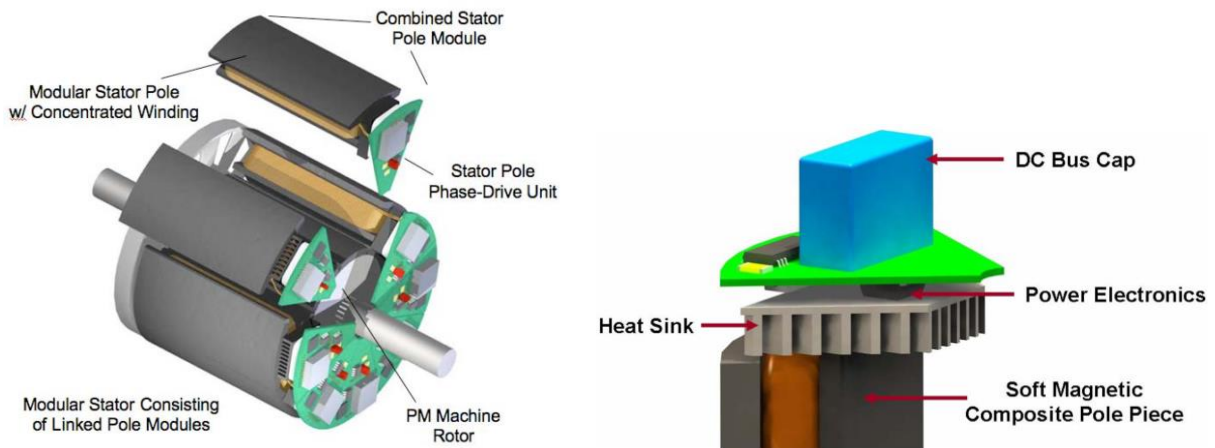
Bu yapının en temel avantajı entegrasyona ek olarak motorun sürücünün segmentasyon ile modüler hale getirilebilmesidir. Bu nedenle önerilen yapılarda gerçek IMMD uygulaması olarak düşünülebilir. Yapıda farklı motor sürücüleri kendine özgü sargıları beslemektedir. Bu

sayede sistemin hata toleransı artmaktadır, yani bir veya daha fazla modül arızalandığında sistem düşük güçte çalışmaya devam edebilmektedir. Ayrıca hem sargılar hem de sürücü bileşenleri üzerindeki gerilim ve akım stresleri azaltılmaktadır. Ek olarak ısı kaynakları daha geniş bir alana yayılacağından dolayı soğutma merkezi bir sisteme görece daha kolay olacaktır. Bu avantajların yanında uygulamada karşılaşılan en büyük zorluklar ise hacim azaltma, termal tasarım zorluğu ve titreşimdir.



Şekil 3: Stator nüvesi üzerine entegrasyon örnekleri

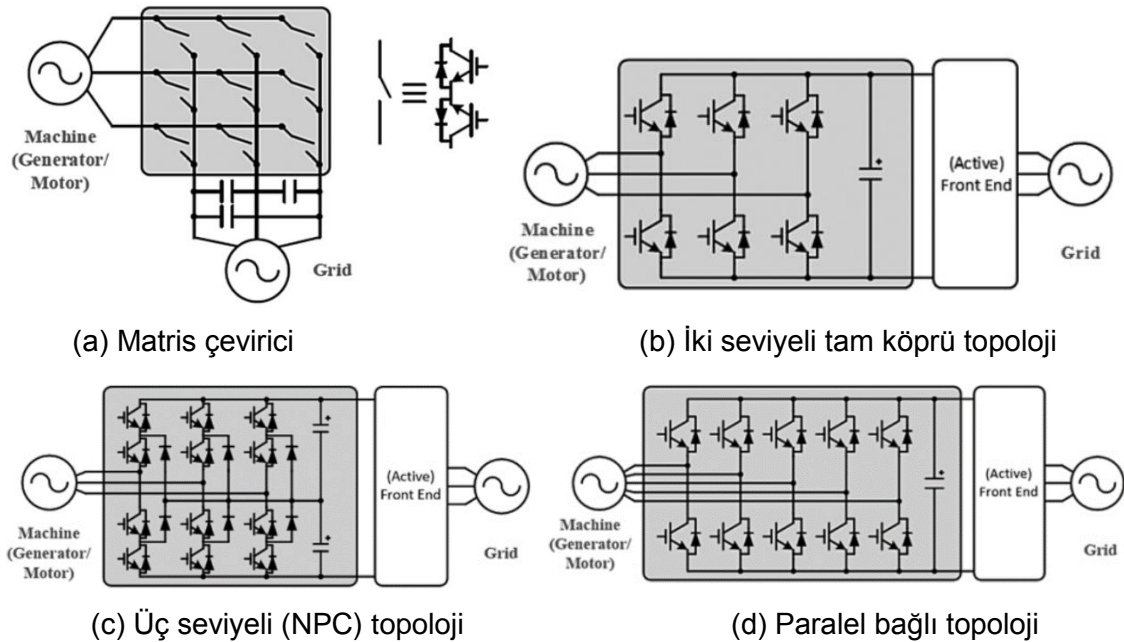
IMMD konusunda gidilmek istenen asıl nokta sistemi tümüyle modüler yapmaktır. Bu amaçla modüler parçalara ayrılan motorun, güç elektroniğinin ve kontrol elektronik bileşenlerinin tamamını tek parça halinde üretilmesi hedeflenmektedir. Bu **plug and play** yapısında bir sistem anlamına gelmektedir. Bu yapı için konvansiyonel laminasyonlu stator yapısı yerine soft magnetic composite (SMC) adı verilen bir materyal ile ve konsantre sargılar ile bu modüler stator kutup parçalarının üretilebileceği öne sürülmüştür. Örnek olarak önerilen çizimler Şekil 4'te görülebilir.



Şekil 4. SMC ile üretilcek olan ve tümüyle modüler yapıda IMMD örnek çizimleri

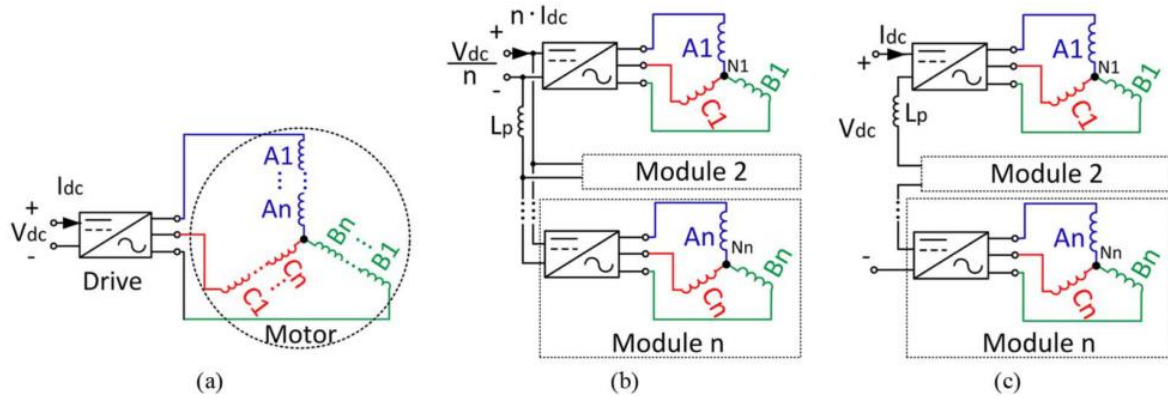
Motor sürücü topolojileri

IMMD sistemleri için pek çok motor sürücü devre topolojisi önerilmiştir. Sözü geçen topolojiler **Şekil X'te** gösterilmiştir. Önerilen topolojilerden ilki **matris çeviriciler**dir. Bu topolojinin en önemli avantajı kompak olması ve DA bara kondansatörü bulunmamasıdır. Ayrıca iki yönlü güç akışı sağlanabilmektedir (regenerative braking) ve hattan çekilen akım sinüzoidaldir. Diğer bir taraftan, gerilim transfer oranının düşük olması, koruma için ve giriş filtresi için ekstra devrelere ihtiyaç duyması ve yarıiletken devre elemanı sayısının oldukça yüksek olmasıdır. Ayrıca DA bara olmadığı için giriş ve çıkış arasında dekaplaj mümkün değildir. **İki seviyeli tam köprü eviriciler** motor sürücü sistemlerinde en yaygın olarak kullanılan topolojidir. Topolojinin belli başlı avantajları basit olması, yarıiletken sayısının az olması ve back-to-back yapısı ile basitçe rejeneratif yapılabilmesidir. Ancak çok seviyeli topolojilere görece harmonik bozunumu daha fazladır. **Üç seviyeli neutral point clamped (NPC) topolojisi** en yaygın kullanılan çok seviyeli topolojidir. En önemli avantajı harmonik bozunumunun seviye sayısının artmasından dolayı düşük olmasıdır. Ayrıca aynı Da bara geriliminde daha düşük gerilim anma değerinde yarıiletken anahtarlar kullanılabilmektedir ve bu sayede toplam anahtarlama kayıpları daha düşük olmaktadır. Diğer bir taraftan, kenetleme diyotları nedeniyle daha maliyetlidir, DA bara gerilim dengeleme ihtiyacı nedeniyle sensör gereksinimi ve kontrol karmaşıklığı daha fazladır. **Paralel bağlı topoloji** IMMD sistemine uygun diğer bir topolojidir. Bu topoloji başlı başına modüler olup hata toleransı yüksektir. Ayrıca devre elemanlarının güç anma değerleri küçültülebilmekte ve ısı yayılımı daha geniş bir alana yayılabilmektedir. Bunun yanında esnek bir yapıda olup sargı konfigürasyonuna göre değişiklik gösterebilir.



Şekil X. IMMD sistemi için önerilen motor sürücü topolojileri

Bahsedildiği gibi sistemin modülerliği topoloji seçiminde büyük esneklik sağlamaktadır. Hangi toğoloji seçilirse seçilsin DA bara gerilimi, yarıiletken anahtar dayanma gerilimi, dayanma akımı vb. parametrelere bağlı olarak bu topolojiler de seri veya paralel şekilde bağlanabilir. Bu bağlantı yapıları **Şekil X'te** gösterilmiştir. Bu esnekliğin getirdiği en büyük avantaj, ticari olarak dayanma gerilimleri henüz standart 400V'luk şebeke uygulamalarına uygun olmayan GaN gibi transistörlerin kullanımına olanak sağlamasıdır. Bu sayede bir çok zorluğu beraberinde getiren çok seviyeli (NPC gibi) topolojilere ihtiyaç ortadan kalkmaktadır. Literatürde seri bağlı topolojide GaN kullanılarak gerçekleştirilen IMMD prototip uygulaması mevcuttur ve raporun ilerleyen bölümlerinde detaylı olarak anlatılmıştır.



Şekil X. Modüler yapıda farklı bağlantı şekilleri: (a) Konvansiyonel motor sürücü, (b) Paralel bağlı modüller, (c) Seri bağlı modüller

Yarıiletken teknolojisi

IMMD sistemlerinde karşılaşılan zorluklara karşı önerilen en yaygın yöntem geniş bant aralıklı (WBG) güç yarıiletkenleri kullanmaktır. Bu yarıiletkenlerin ticari olarak üretilebilen belli başlı örnekleri Silisyum Karbür (SiC) ve Galyum Nitrat (GaN)'dır. Bu anahtarların geleneksel silikon tabanlı güç yarıiletkenlerine (IGBT gibi) karşı en büyük avantajları:

- Düşük iletim durumu dirençleri sayesinde geleneksel yarıiletkenler ile karşılaştırılabilir hatta bazen daha düşük ölçüde iletim kayıpları
- Hızlı anahtarlama ile açılma ve kapanma kayıplarının çok daha düşük olması
- Daha yüksek maksimum jonksiyon sıcaklıklarında çalışabilmeleri

olarak sıralanabilir. Ayrıca **Şekil X'te** yer alan materyal özellikleri tablosunda Silikon, Silisyum Karbür, Galyum Nitrat ve Elmas malzemelerinin farklı özellikleri tablo olarak gösterilmiştir.

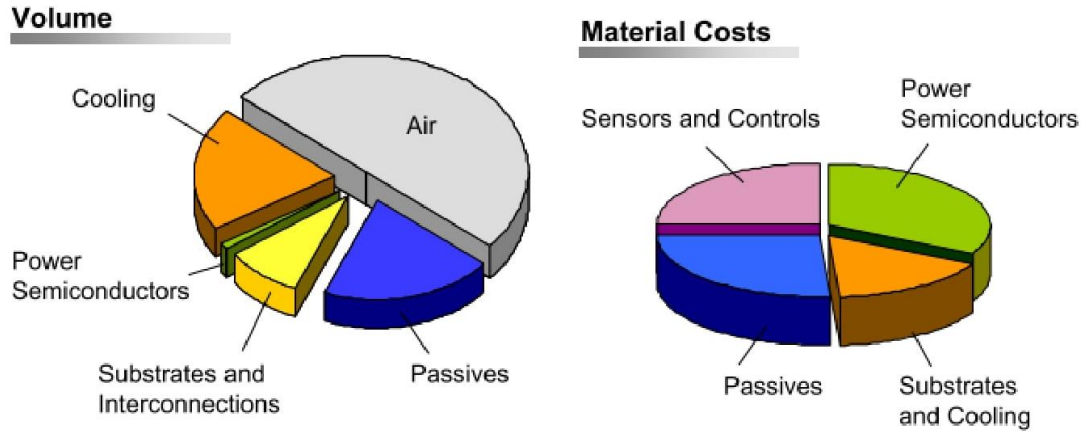
IMMD uygulamalarında bu avantajların getirdiği kazanımlardan ilki yüksek verimlere çıkılarak termal yönetimin kolaylaşması ve soğutucu ihtiyacının azaltılabilmesidir. Ayrıca, yüksek anahtarlama frekanslarında çalıştırılarak sürücüdeki pasif elemanların boyutları küçültülebilir.

Şekil X'te de görüleceği gibi, genel bir güç elektroniği sisteminde gerek hacim gerek maliyet

olarak en büyük bileşenler soğutucu ve pasif elemanlardır. Ayrıca IMMD sisteminin yüksekliğini de genelde pasif elemanlar olan DA bara kondansatörleri belirlemektedir. Bu nedenlerle IMMD uygulamalarında WBG güç anahtarları kullanımı zorunlu hale gelmiştir.

Property	Si	6H-SiC	4H-SiC	GaN	Diamond
Bandgap E_g (eV)	1.1	3.03	3.26	3.45	5.45
Dielectric Constant, ϵ_r	11.9	9.66	10.1	9	5.5
Breakdown Field, E_c (kV/cm)	300	2500	2200	2000	10000
Electron mobility, μ_n (cm^2/Vs)	1500	500	1000	2000	2200
Hole mobility μ_p (cm^2/Vs)	600	101	115	850	850
Thermal conductivity, κ (W/cmK)	1.5	4.9	4.9	1.3	22
Thermal Expansion ($\times 10^{-6}$)/ $^\circ\text{K}$	2.6	3.8	4.2	5.6	1-2
Saturated E-Drift Velocity, V_{sat} ($\times 10^7$ cm/s)	1	2	2	2.2	2.7

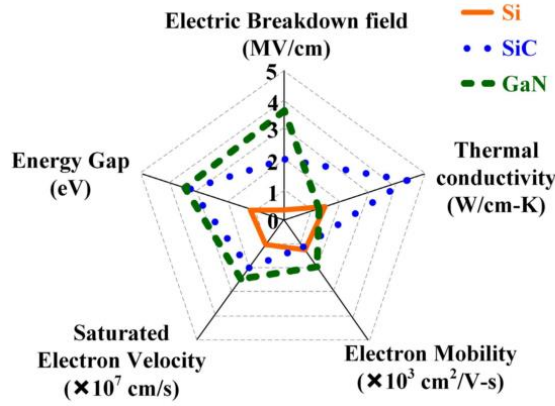
Şekil X. Silikon, Silisyum Karbür, Galyum Nitrat ve Elmas malzemelerinin özellik tablosu



Şekil X: Bir güç elektroniği devresinde yer alan elemanların hacim ve maliyet oranları

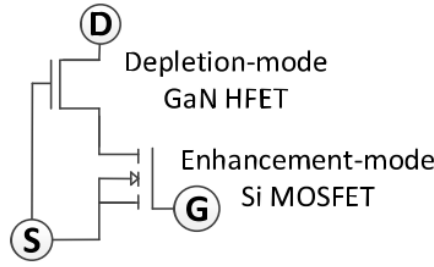
WBG yarıiletkenlerde bir karşılaştırma yapılacak olursa GaN'ların SiC'lara göre çalışma frekansı ve kayıplar açısından daha avantajlı olduğu görülebilir. Tabloda da görülebileceği gibi yüksek elektron hareketliliğine (electron mobility) ve yüksek bozulma alanına (breakdown field) sahip olmaları sayesinde iletim durumu dirençleri küçük olmaktadır. Ayrıca paketlerinin küçük olması ile giriş ve çıkış kapasitansları küçük olmakta ve böylece daha hızlı açılıp kapanabilmektedirler. Bunun yanında düşük kapasitansları düşük ve doyum hızları yüksek (saturation velocity) olduğundan dolayı erişilebilir anahtarlama frekansı çok yüksektir. GaN'ların SiC'lara oranla bir dezavantajı daha düşük termal iletkenlikte olmalarıdır. Ancak daha geniş bant aralıklı oldukları ve maksimum jonksiyon sıcaklıkları daha yüksek olduğu

için termal başarımları ticari uygulamalarda kullanılabilecek ölçüde iyidir. Silikon, SiC ve GaN yarıiletkenlerin grafiksel özellik karşılaştırmaları **Şekil X'te** görülebilir. Diğer bir taraftan GaN'ların SiC'lara göre en büyük dezavantajı ticari olarak erişilebilir akım ve gerilim değerlerinin görece çok düşük olmasıdır.



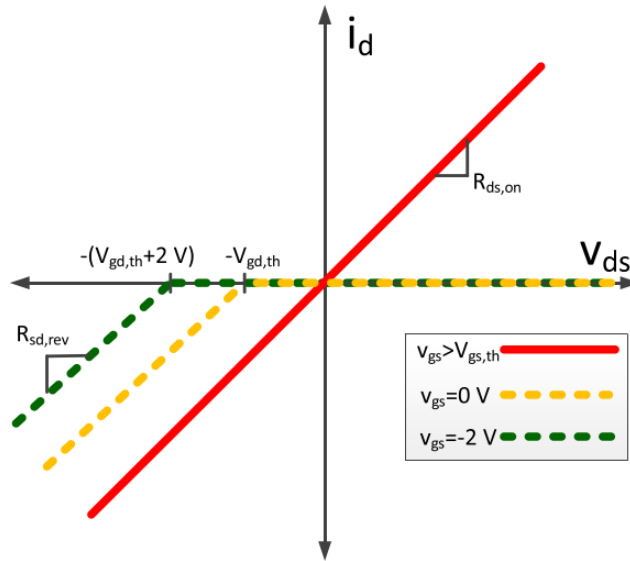
Şekil X. Silikon, SiC ve GaN grafiksel özellik karşılaştırmaları

GaN teknolojisi kullanılarak geliştirilen güç yarıiletkenlerini temelde dik ve yanal olarak sınıflandırılmaktadır. Dik yapıdaki teknolojide GaN üzerine GaN ve Silikon üzerine GaN gibi yapılar araştırılmaktadır. Ancak dik yapıdaki GaN teknolojisi yonga plakalarının pahalı olması ve üretim teknolojisinin zorluğu nedenleriyle ticari olarak henüz erişilebilir değildir. Diğer bir yapı olan yanal GaN teknolojisi ile bugün 600-650V gerilim seviyelerinde ticari ürünler bulmak mümkündür. Bu yarıiletkenler temelde heterojunction field-effect transistor (HFET) ve high electron mobility transistor (HEMT) olarak sınıflandırılır. HFET yapıdaki transistörlerin en önemli özelliği depletion-mode yani normalde iletim durumunda olmalarıdır. Bu özellik gerilim kaynaklı güç elektroniği uygulamaları için büyük bir problemdir. Bu nedenle HFET yapıdaki transistörlerden normalde kesim durumunda olan yarıiletkenler geliştirilmeye çalışılmıştır. Buna örnek olarak kaskod transistörler verilebilir. Bu yapıda depletion-mode olan GaN **Şekil X'te** gösterildiği gibi normalde kesim durumunda olan bir transistöre dönüştürülür. Bu yöntem iki yarıiletkenin birleşimi ve yeniden paketleme gerektirdiğinden dolayı parazitik bileşenleri yüksek olur ve anahtarlama başarımları normal GaN'lara göre düşüktür. Kaskod GaN'ların ticari olarak bir çok üreticisi vardır ancak bunlardan yalnızca Transphorm firmasına ait GaN'lar seri üretimle satılmaktadır ve en yaygın kullanılan GaN'lardır. Bunun yanında enhancement-mode (e-mode) yani normalde kesim durumunda olan GaN'lar daha düşük akım ve gerilim değerlerinde üretilmektedir. Bu GaN'lar transistör yapısındaki kapıların modifiye edilmesi ile elde edilir ve anahtarlama başarımları kaskodlara göre çok daha iyidir. Ticari olarak e-mode GaN siparişi alan üç büyük firma vardır: EPC, GaN Systems, ve Panasonic. Bu firmaların ürünleri 30V'tan 650V'a kadar gerilim değerlerine sahiptir. Akım değerleri ise henüz 60A seviyelerine çıkabilmiştir.



Şekil X. Kaskod yapıdaki HFET GaN

GaN transistörlerin ters iletim davranışları bilinen MOSFET veya IGBT'lere göre oldukça farklıdır. MOSFET'lerde gövde diyodu ters iletimi sağlarken IGBT'ler genellikle aynı pakette gerçekleştirilen ters-paralel diyotlarla kullanılır. GaN'larda, MOSFET'te olan body bölgesi olmadığı için gövde diyodu yoktur ancak hem kaskod hem de e-mode GaN'larda ters iletim mekanizmaları vardır. Kaskod yapıda, sonradan eklenen e-mode MOSFET body diyodu görevi görür. Bu yapının silikon tabanlı MOSFET'ten farkı, eklenen e-mode transistörün düşük gerilimde olması ve ters toparlanma kaybının standart MOSFET'lere göre çok düşük olmasıdır. Bu nedenle kaskod GaN'ların ters toparlanma kayıpları sıfır değildir ancak düşüktür. E-mode GaN'lar self-commutated reverse conduction (SCRC) adı verilen bir mekanizmaya sahiptir (Şekil X) ve iletim durumunda olan bir GaN aynı iletim durumu direnci ile ($R_{ds,on}$) ters yönde de akım geçirir. Ancak kapı gerilimi 0V olursa veya negatif olarak uygulanırsa bu dirence ek olarak sabit gerilim düşümü olur ve iletim kayıpları yükselir. Bu mekanizmada kapı sürüş yöntemi optimum değilse standart MOSFET'e göre ters iletim kayıpları daha yüksek olabilir, ancak e-mode GaN'ların teorik olarak ters toparlanma kayıpları sıfırdır.



Şekil X. E-mode GaN'ların ters iletim karakteristikleri

GaN kullanımı getirdiği avantajların yanında pek çok problemi de doğurur. İlk olarak hızlı açılıp kapanmalarından ve yüksek frekansta sürülmelerinden dolayı parazitik elemanların önemi artmaktadır. Bu da kapı sürücü devresi ve yerleşim tasarımını zorlaştırmaktadır. $R_{ds,on}$ direncinin dinamik yapısı da GaN'ların bir diğer dezavantajıdır. Bu direnç sıcaklık, yük akımı, çalışma gerilimi gibi parametrelerden kolaylıkla etkilenebilmektedir ve test edilmesi zordur. Ayrıca anahtarlama frekansının da bu direnç üzerinde etkisi olabileceği öngörülmektedir ancak yapılan testlerde bu durumun farkedilemeyeceği ve kayıpların anahtarlama kaybı olarak gözükebileceği söylenmektedir. Yanal GaN'larda aşırı gerilim durumu çok tehlikeli, yıkıcı ve geri döndürülemez bir breakdown mekanizmasına yol açmaktadır. Bu durum breakdown field değerlerinin çok yüksek olmasına rağmen GaN'ların neden düşük anma gerilimlerinde üretilebildiğini açıklar. Son olarak GaN teknolojisi henüz ticari ürünlerde güvenilirliğini büyük oranda ispatlayamamıştır, ancak yaygınlaştıkça hem ticari erişilebilirliğinin hem de güvenilirliğinin artacağı öngörülmektedir.

Belirtildiği gibi GaN'lar henüz ticari olarak çok yaygın değildir, daha pahalıdır ve erişilebilir akım ve gerilim anma değerleri SiC'lara göre daha azdır. 600 V ve altı düşük güç uygulamalarında genellikle GaN tavsiye edilirken, 600 V üzeri ve daha yüksek güç uygulamalarında SiC önerilmektedir. IMMD sistemi, modüler motor sürücü yapısından dolayı GaN kullanımına uygundur çünkü birden çok modül seri bağlanabilmektedir. Bu projede de seçilen yarıiletken anahtar tipi bu nedenle GaN'dır. Bunun yanında anahtarlama başarımının daha iyi olması ve 650V değerlerinde ulaşılabilir olması nedeniyle GaN Systems firmasına ait e-mode GaN'lar kullanılması tercih edilmiştir.

Projeye de girdi olması amacıyla GaN ile geliştirilen çeviricilerin tasarımında dikkat edilmesi gereken noktalar da araştırılmıştır. GaN'ların anahtarlama hızının 200V/ns'nin üzerinde olduğu bilinmektedir. Bunun yanında 400V çalışma geriliminde açılma ve kapanma gecikme zamanları 10 ns'nin altındadır. Bunlar teorik hızlar olup kapı sürücü devresine, çevirici topolojisine ve PCB yerleşim tasarımına büyük oranda bağlıdır. Bu nedenle GaN ile yapılan tasarımda tüm bu bileşenleri birarada düşünmek gereklidir. Akımın hızlı bir şekilde değişimi (yüksek di/dt) akım yolunda yer alan parazitik endüktanslar nedeniyle, eşitlikte görüldüğü gibi gerilim yükselmelerine neden olmaktadır.

$$v = L_{stray} \frac{di}{dt} \quad (1)$$

Bu durum tüm yarıiletkenler için geçerlidir ancak yüksek anahtarlama hızları nedeniyle elde edilen küçük dt değerleri bu etkiyi GaN'lar için daha önemli hale getirir. Standart bir iki-seviyeli motor sürücü eviricisinde parazitik endüktansın içerisinde transistör paket endüktansları (L_d , L_s ve L_g), kapı sürücü yolu endüktansı, DA bara endüktansı, bağlantı yolları endüktansları, Da bara kapasitansı ESL'i vb. yer almaktadır ve bu gerilim yükselmesi

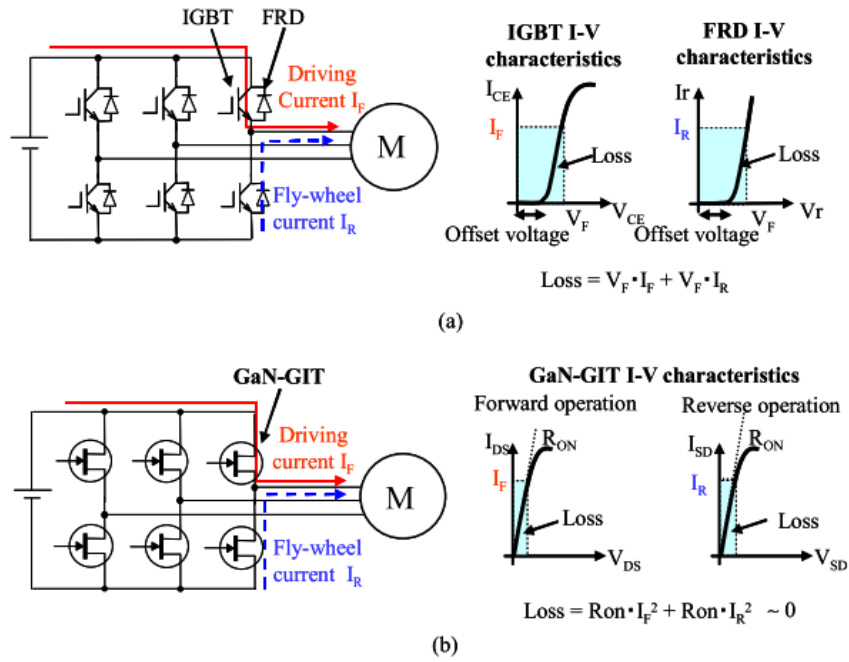
etkisi hem güç katında hem de kapı devresinde görülür. Burada önemli olan bir diğer etki de güç katı ile kapı sürücü arasındaki kuplajdan dolayı bu iki yapının birbirini etkilemesidir. Buradaki temel zorluk, diğer endüktansların aksine bu ilişkinin modellenmesinin zorluğudur. GaN'larda dikkat edilmesi gereken etki yalnızca yüksek di/dt değildir. Güç katında yaratılan yüksek dv/dt değerleri de jonksiyon kapasitansları (C_{ds} , C_{gs} , C_{gd}) üzerinde akım endüklenmesine neden olabilir.

E-mode GaN'ların kapı eşik gerilimleri genellikle 1-2V seviyesindedir ve kapı sürücü pozitif gerilimleri genelde 5V'ta tutulur. Bunun yanında kapı dayanma gerilimleri 7V civarı olduğu için izin verilen gerilim yükselmesi en fazla 2V olmaktadır. Bu da kapı sürücü devresinin optimum yerleşim tasarımını özellikle önemli hale getirir ve gerilim yükselmesine karşı özel önlemler alınmasını zorunlu kılar. Motor sürücü sistemlerinde kapı sürücü devresindeki bir başka sıkıntı da Miller etkisinden dolayı üstteki transistör (high-side) ve alttaki transistör (low-side) arasında meydana gelen girişimdir. Bu mekanizmaya çapraz konuşma (crosstalk), çapraz iletim (cross-conduction) veya Miller turn-on denir ve bir anahtar istenerek iletime sokulduğunda diğer anahtarın Miller kapasitansının yüksek dv/dt oranından dolayı yanlışlıkla iletime girmesinden dolayı meydana gelir. Sonucunda da Da bara kısa devre olmuş olur. Buna önlem olarak anahtarın kapanma hızları yüksek tutulurken iletime girme hızları çeşitli yöntemlerle (açılma kapı direncinin yükseltilmesi veya gate-source'a paralel dışarıdan kondansatör eklenmesi) istenilerek düşürülür. Böylece anahtarlama kayıplarının da istenilenin üzerinde çıkması göze alınmış olur. Aslında Miller etkisinin önlenmesi için IGBT veya SiC MOSFET gibi anahtarlarda yaygın olarak kullanılan bir yöntem kapanma için negatif kapı gerilimi uygulanır. Ancak e-mode GaN'lar için bunu yapmak iyi değildir çünkü negatif gerilim ters iletim kayıplarını arttırmaktadır (Şekil X).

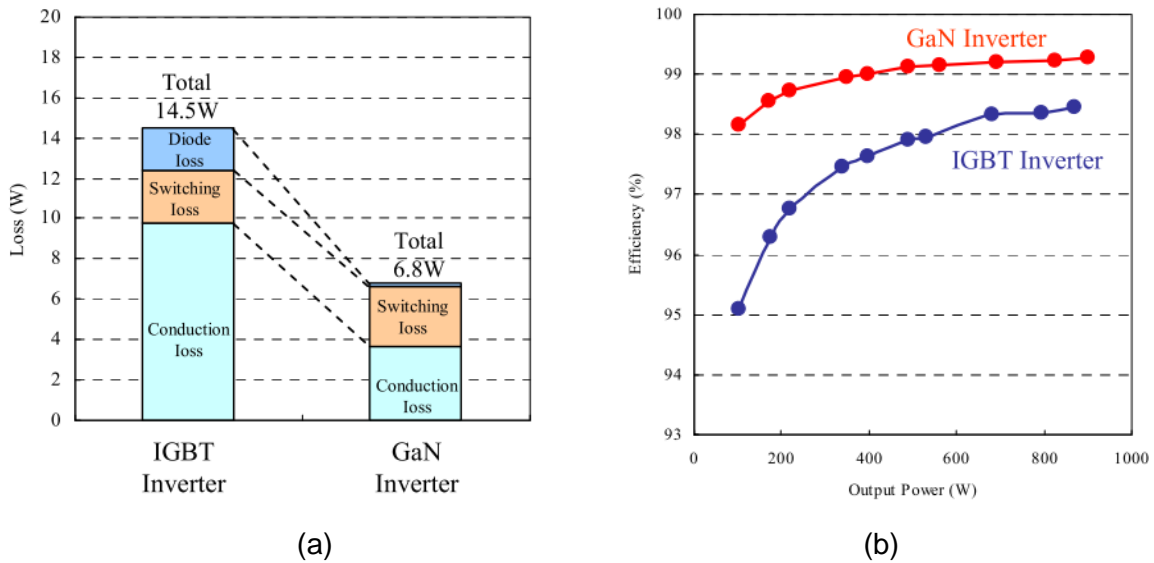
GaN yarıiletken tansistörleri pozitif sıcaklık katsayısına sahiptir, yani $R_{ds,on}$ dirençleri sıcaklık arttıkça yükselmektedir. Örnek olarak GaN Systems firmasına ait e-mode GaN'ların 150 °C'deki iletim dirençleri 25 °C'dekini 2.5 katından fazladır. Bunun yanında GaN kullanılan devrelerde soğututucu tasarımı daha zordur, yüzey monteli transistörlerin alttan soğutmalı olanlarında PCB üzerinde soğutucuya bağlanabilmek için termal delikler açılması gerekmektedir. Ayrıca pozitif sıcaklık katsayısı nedeniyle thermal runaway (sıcaklık arttıkça direncin artması ve böylece kayıpların artıp sıcaklığın daha fazla artması ve sonucunda maksimum jonksiyon sıcaklığının aşılması) mekanizması GaN'larda daha sık görülür.

GaN'ların sözü geçen başarımlarını doğrulamak amacıyla gerçekleştirilen bir çalışmaya örnek olarak bir üç faz motor sürücü eviricisi gösterilebilir. Bu çalışmada GaN tabanlı Gate-Injection Transistör'ler (GIT) kullanılmış ve 6kHz frekansında anahtarlanan 900W'lık bir prototipte %99.3 verim elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada silikon tabanlı IGBT'li motor sürücü devresi ile çeşitli performans karşılaştırmaları yapılmıştır. Karşılaştırmalı olarak

IGBT'li ve GaN'lı motor sürücü devre yapıları ve iletim karakteristikleri Şekil X'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere IGBT'li yapıda ters-paralel hızlı toparlanan diyotlar (FRD) kullanımına ihtiyaç vardır ancak GaN'lar ters yönde iletim yapabilmektedir, ayrıca ters toparlanma kayıpları yoktur. Ayrıca bir diğer önemli nokta GaN'ların sabit bir iletim direncinin olması, IGBT'lerin ise hem ileri yönde hem ters yönde iletimde diyot tipi karakteristik göstererek sabit iletim gerilimi ve ek olarak dirençlerinin olmasıdır. IGBT'li ve GaN'lı motor sürücülerin aynı koşullarda farklı kayıp bileşenlerinin karşılaştırılması ve yük akımına göre verim grafikleri Şekil Y'de gösterilmiştir. Bu sonuçlarda göze çarpan bir diğer nokta GaN'ların yalnızca tam yükte değil bütün yük profili boyunca yüksek verimde çalışmasıdır.



Şekil X. Motor sürücü devresi ve iletim karakteristikleri: (a) IGBT + FRD, (b) GaN GIT



Şekil Y. IGBT ve GaN karşılaştırması: (a) Kayıp bileşenleri, (b) Verim grafiği

Pasif elemanlar

Daha önce de bahsedildiği gibi IMMD tasarımında en büyük meydan okuma pasif elemanlarında boyut küçültmedir. Motor sürücü sisteminde en büyük devre elemanı DA bara kondansatörleridir. DA bara kondansatör bankası temelde şu görevleri görürler:

- Anahtarlama frekansı ve katlarındaki yüksek frekans gerilim salınımlarını azaltmak.
- Pasif doğrultucu kullanıldığı durumda oluşan düşük frekans (üç fazlı sistemde 300 Hz) gerilim salınımlarını sınırlamak.
- Kesinti durumunda sistemin belirli bir süre (genelde yarım ya da bir şebeke gerilimi periyodu) boyunca sistemin açık kalmasını sağlamak (hold-up)
- Ani değişimlere karşı bir tarafın diğerini etkilemesini önlemek

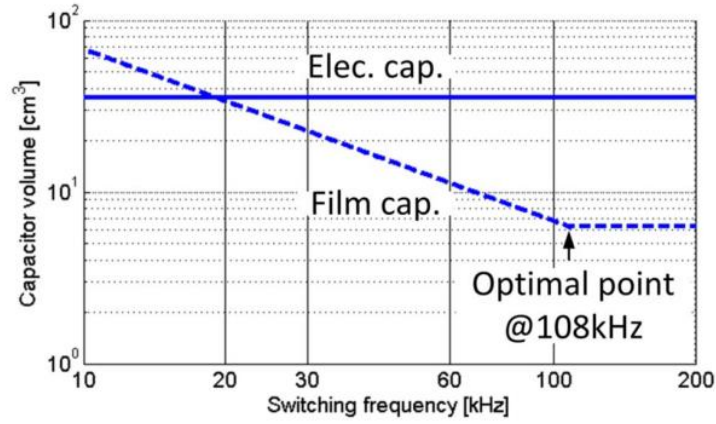
Literatürde incelenen DA barada kullanılabilecek kondansatör tipleri şunlardır:

- Alüminyum elektrolitik kondansatörler
- Metal film kondansatörler
- Multi-layer seramik kondansatörler (MLCC)

Elektrolitik kondansatörler ucuz olmaları ve hacim başına sığa değerlerinin yüksek olması nedenleriyle motor sürücü sistemlerinde kullanılan en yaygın kondansatör tipidir. Boyutlarının büyük olması, hacim başına etkin akım değerinin düşük olması, ömürlerinin kısa olması ve güvenilirlik problemlerinin olması belli başlı dezavantajlarıdır. Ayrıca dayanma sıcaklıkları düşük olup, ısınmaya karşı ömürleri daha da kısalmaktadır. IMMD sistemlerinde var olan yüksek çalışma sıcaklıkları ve sınırlı hacimden dolayı elektrolitik kondansatörler uygun değildir. Film kondansatörler daha pahalı olmasına ve sığa değerlerinin daha düşük olmasına karşın akım etkin değerleri en yüksek kondansatörlerdir. Ayrıca oldukça güvenilir olan bu kondansatörlerin ömürleri görece çok daha uzundur. İç dirençleri (ESR) ve endüktansları (ESL) elektrolitliklere göre oldukça düşüktür ve dayanma sıcaklıkları çok daha yüksektir. IMMD sistemleri için en uygun kondansatör tipi olan metal film kondansatörler şu ana kadar yapılan prototip çalışmalarında da sıklıkla kullanılmıştır. Ticari olarak ulaşılabilir güç kapasitesi değerleri çok düşük olduğundan dolayı DA bara uygulamalarında seramik kondansatörler en az kullanılan tiptir. Bu kondansatörler genellikle çok sayıda seri ve paralel bağlantı yapılarak baraya dönüştürülür. Boyutlarının küçük olması ve ucuz olmaları başlıca avantajlardandır. Mekanik dayanımlarının düşük olması nedeniyle yüksek titreşim ortamına sahip IMMD uygulamaları için pek uygun değildir.

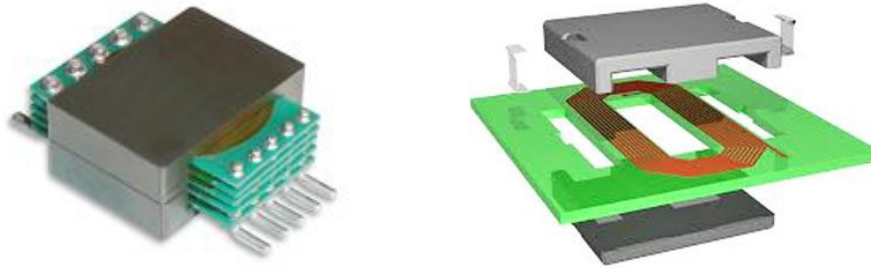
IMMD uygulamalarına yönelik DA bara kondansatörleri için yapılan bir çalışmada anahtarlama frekansının kondansatör hacmine etkisi tartışılmıştır. Elektrolitik kondansatörlerde akım değerini sağlayan bir DA baranın kapasitansı gerilim dalgalanmasını herhangi bir frekansta sağlamaktadır. Bu nedenle frekansın hacme etkisi olmamaktadır. Film

kondansatörlerde ise sığa değerleri düşük olduğundan dolayı frekans artırılarak hacim küçültülebilmektedir, ancak bu da belirli bir frekansa kadar mümkün olmaktadır. Bu çıkarım görsel olarak **Şekil X**'te gösterilmiştir.



Şekil X. Elektrolitik ve film kondansatörlerin anahtarlama frekansına bağlı olarak hacim değişimi

IMMD sistemlerinde boyut küçültme ihtiyacı olan bir diğer devre elemanı da filtre bobinidir. Bunun için **planar magnetics** teknolojisi önerilmiştir. Planar devre elemanlarının yüksekliğinin standart sargılılara oranla dörtte birine düşeceği öngörülmüştür. Planar magnetics yapısı örnekleri **Şekil X**'te görülebilir.



Şekil X. Planar magnetics örnekleri

Planar magnetics uygulamasının geleneksel manyetik sistemlere göre belli başlı avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Planar manyetik elemanlar genelde daha düşük profile sahip olup, boyut küçültmeye uygundur.
- Planar manyetik çekirdekleri temelde daha yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahiptir. Bu sayede soğutulmaları daha kolaydır. Aynı zamanda güç yoğunlukları (W/cm^3) daha yüksektir.
- Üretim süreçleri daha kolaydır ve üretim yöntemleri standardize edilebildiğinden dolayı seri üretimde maliyetleri çok düşürülebilir.

- Üretim hata payları daha düşüktür.
- Doğrudan baskı devre kartı üzerine üretilebildiklerinden dolayı modülerdirler, yani fazladan bağlantılara ihtiyaç duymazlar.
- Çok katlı PCB'ler üzerine yapıldıkları için sarımlar arası interleaving uygulaması kolaydır. Bu sayede de kaçak endüktanslar küçültülebilir ve aynı zamanda yüksek frekans etkilerden doğan (yüzey etkisi ve yakınlık etkisi) kayıpları düşüktür.
- Parazitik parametrelerinin modellenmesi ve tahmin edilmesi daha kolaydır.

Motor

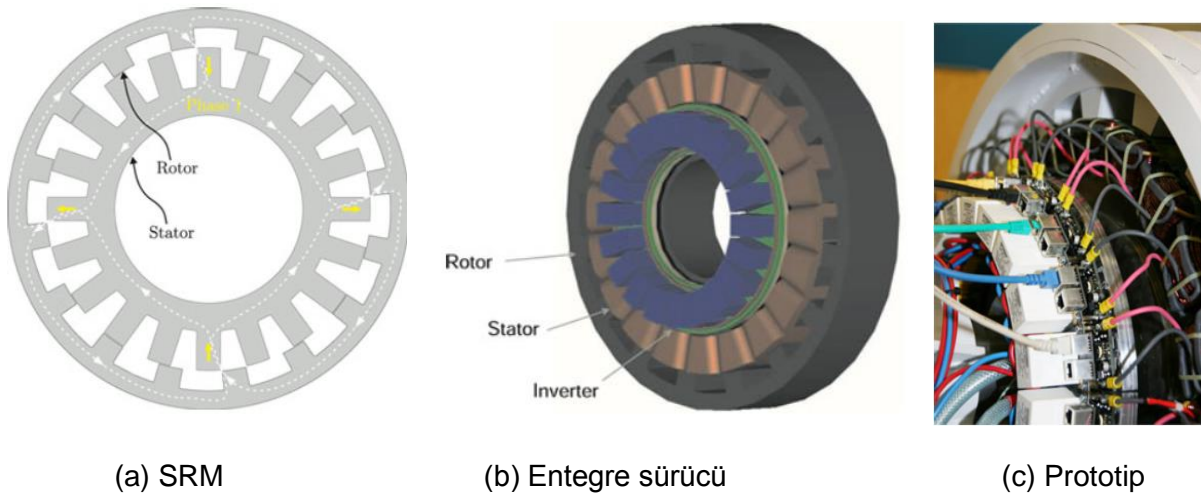
Termal tasarım

Daha önce de belirtildiği gibi IMMD uygulamasındaki en büyük zorluklardan birisi hem güç elektroniğini hem de motoru aynı yapı içerisinde soğutabilmektir. Bu nedenle termal tasarım problemi her iki taraf için de birarada düşünülmelidir. Birleştirilmiş bir soğutma sistemi standart uygulamalara ek olarak yeni problemler meydana getirir. Termal yollar paralel veya seri olarak ayarlanabilir. Paralel şekilde yapılırsa her bir ısı kaynağının oluşturduğu termal akılar birbirinden bağımsız olur ve birbirini etkilemez. Ancak bu durumda birbirine yakın termal kaynakların termal izolasyonlarının sağlanması gereklidir. Seri konfigürasyonda ise termal yollar en sıcak noktadan başlayan bir termal gradyant olarak düşünülebilir. Bu en sıcak nokta makine olacaktır, aradaki nokta sürücü devresi ve en soğuk nokta da soğutucu olacaktır. Bu yöntem tasarımı en zor olandır çünkü termal gradyantın çok iyi ayarlanması gereklidir. Literatürde ek olarak seri/paralel konfigürasyon önerilmiştir. Bu yapıda her bir ısı kaynağı kendi içinde termal gradyanttan oluşur ve ortak soğutucuya bağlanırlar. IMMD sistemine en uygun yapının bu hibrit yapı olacağı söylenmiştir. Örnek olarak 30 kW'lık hava soğutmalı bir motorun arkasına monte edilmiş bir sürücü yapısı mevcuttur. Burada sürücü devresi ile yerleştirildiği kısımdaki end-winding'ler termal olarak tümüyle izole edilmiştir. Ayrıca motordaki fan kapasitesi büyütülmüştür ve ısıнын radyal olarak dağılabilmesi için sürücü ile motor arasına ekstra soğutucu plakası konulmuştur. Bu örnekte de hibrit soğutma yapısı kullanılmıştır. Ayrıca literatürde göze çarpan başka bir yöntem de yarıiletkenlerin ayrı paketlenmesi ve böylece soğutucuya daha düşük termal dirençle bağlanabilmesidir. Buna ek olarak halihazırda satılan yarıiletken anahtarların paketlerinde yüksek sıcaklığa dayanamayan malzeme olabilmesidir. Bir diğer dikkat çekilen nokta ise daha yüksek sıcaklıklara çıkıldığında sistemdeki diğer elektronik devre elemanlarının da bu sıcaklıklara uygun olması gerekliliğidir. Kapı sürücü devreleri, mikrodenetleyiciler ve diğer elektronik entegreler (örneğin OPAMPlar) standart uygulamalara oranla daha dikkatli seçilmelidir. Özellikle kapı sürücü devreleri, parazitik etkileri azaltmak ve böylece yüksek frekans etkilerini

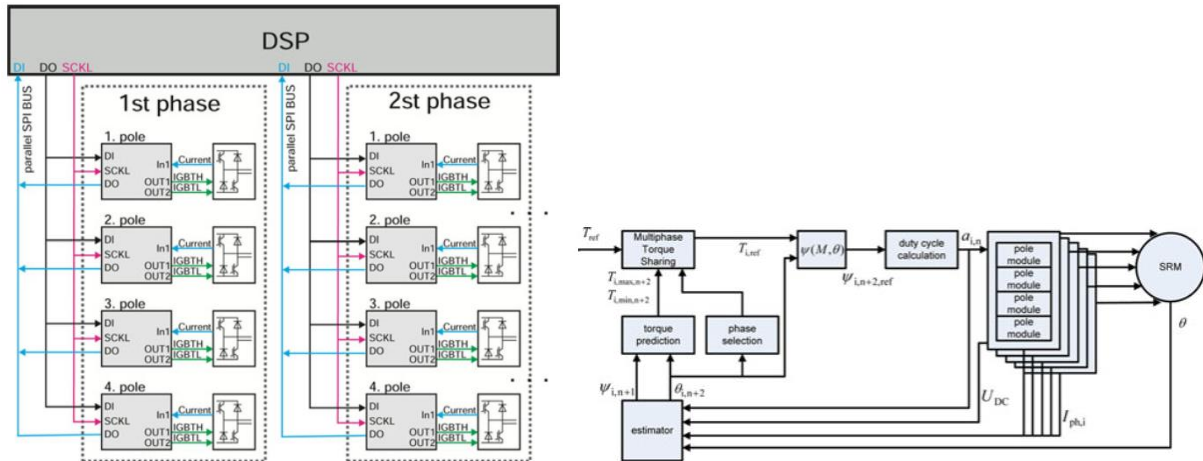
azaltmak adına transistöre olabildiğince yakın konulmaktadır ısınma problemleri ile karşılaşılabilir.

IMMD örnek prototip çalışmaları

Raylı ulaşım araçları çekiş sistemine yönelik 67 kW gücünde 5-faz anahtarlama relüktans motoru (SRM) ile yapılan bir IMMD uygulaması mevcuttur. Bu uygulamada her fazdaki sargı kendine ait sürücüler ile beslenmiş ve böylece modüler yapı oluşturulmuştur. Ayrıca sürücü sistemi tümüyle motora entegre edilmiştir. Prototip uygulaması **Şekil X'te** gösterilmiştir. Bu uygulamada hata toleransı, moment salınımı titreşim ve gürültü gibi etkiler incelenmiştir. Sistem 10 kHz anahtarlama frekansına sahip 20 adet evirici modülünden oluşmaktadır. DA bara kondansatörü olarak film kondansatörleri kullanılmıştır. Sistem bir adet master ve modül sayısı kadar slave modda çalışan işlemci (DSP) içermektedir. Ayrıca kontrol yöntemi tahminlemeli PWM doğrudan anlık tork kontrolüne (predictive PWM direct instantaneous torque control, PWM-DITC) dayalıdır. Haberleşme yapısı ve kontrol blok şeması **Şekil X'te** görülebilir.



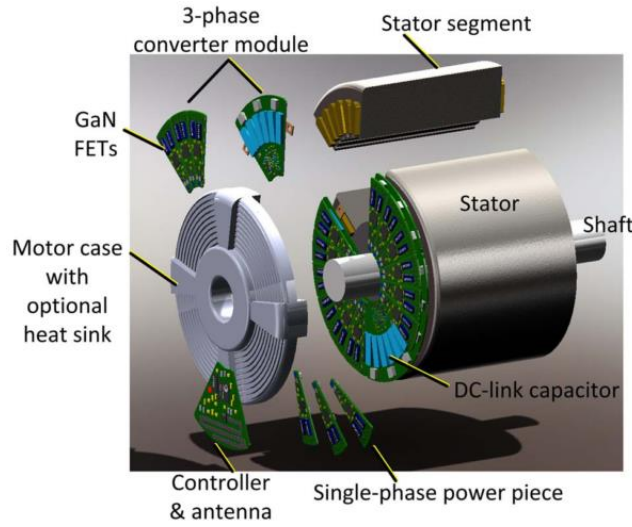
Şekil X. Örnek IMMD prototipi



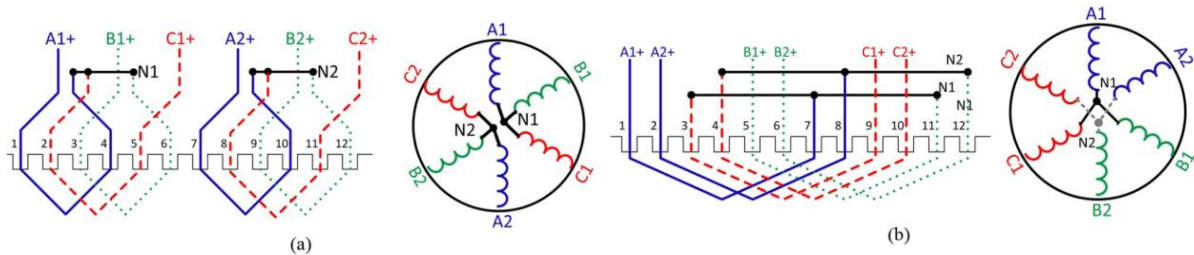
Şekil X. Haberleşme yapısı ve kntrol blok şeması

Bir başka örnekte 200 V dayanma gerilime sahip GaN transistörleri ile oluşturulan tam köprü modüller DA bara üzerinde seri olarak bağlanmıştır. Film kondansatörler optimize edilerek devre yüksekliği de azaltılmış ve anahtarlama frekansa buna göre belirlenmiştir. 100 kHz frekansında çalıştırılmış ve güç elektroniği için fazladan bir soğutucuya ihtiyaç duyulmadan sistem test edilmiştir. Da bara kondansatörlerinde boyut küçültülebilmek için interleaving tekniği kullanılmıştır. Sistem yapısı ve bileşenleri Şekil X'te görülebilir. Ayrıca önerilen ayrık sargı (split winding) yapısı da Şekil X'te gösterilmiştir. Geliştirilen sistemin getirdiği belli başlı avantajlar şu şekilde sıralanmıştır:

- Farklı IMMD modüllerine interleaving uygulanmıştır ve böylece DA bara kondansatörü küçültülebilmektedir.
- Modüler yapı sayesinde standart bir motor sürücüyeye oranla maliyet düşürülmüştür.
- Yarıiletkenler daha geniş bir alana yayıldığından dolayı soğutma kolaylaşmıştır ve ısı kaybı dağıtılmıştır.
- Düşük modül gerilimi ile dv/dt oranları da azalmış (yakın olmasından dolayı da büyük oranda azalmıştı) ve motor izolasyonlarının ömrü uzamıştır.
- IMMD devre yüksekliği kondansatörler optimize edilerek azaltılmıştır.

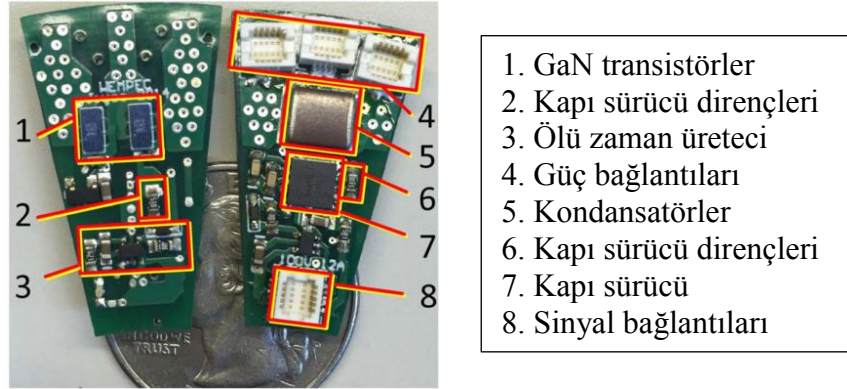


Şekil X. Seri bağlı modüllerle geliştirilen IMMD sistem yapısı

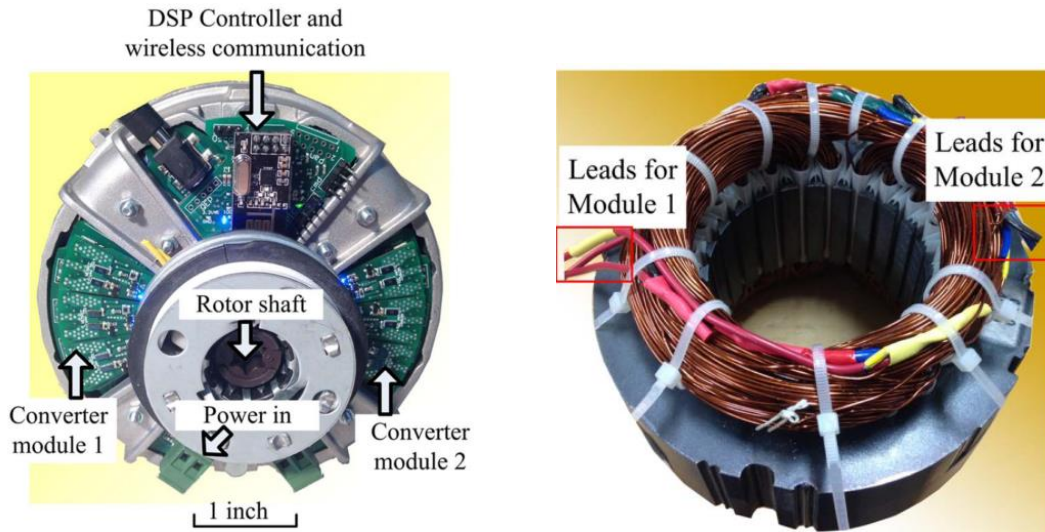


Şekil X. Geliştirilen IMMD sistemi için önerilen ayırık sargı yapıları: (a) Farklı kutuplarda, (b) Aynı kutupta ancak farklı oluklarda

Geliştirilen prototipe ait fotoğraflar Şekil X'te ve Şekil Y'de yer almaktadır. Bu çalışmada sürücü devresi motora monte edilmemiş, kablolarla bağlanarak test edilmiştir. Ayrıca sistem çok düşük güçte test edilmiştir.

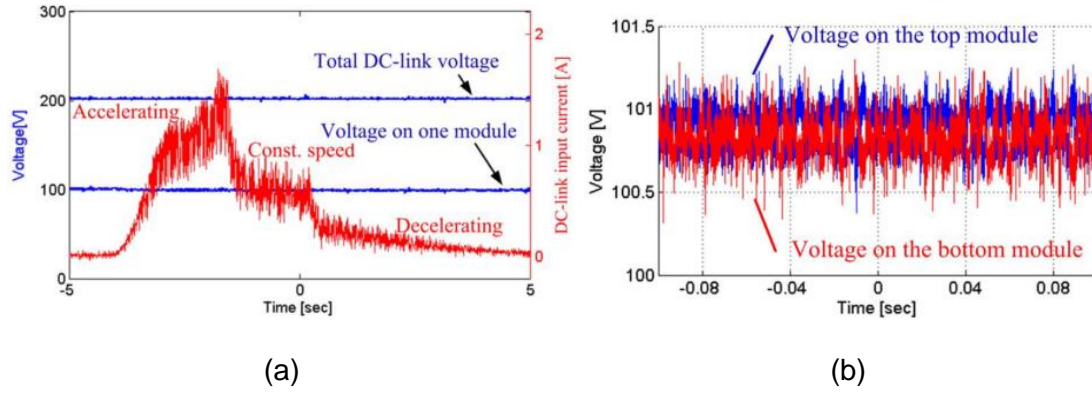


Şekil X. Geliştirilen prototipe ait fotoğraflar

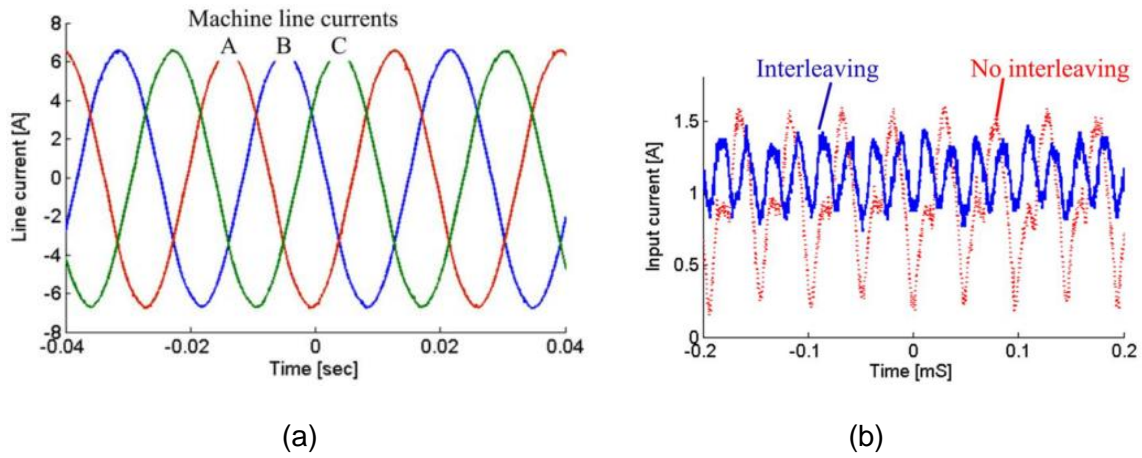


Şekil X. Geliştirilen prototipe ait fotoğraflar

Prototipten elde edilen deney sonuçlarının bazıları Şekil X ve Y'de gösterilmiştir. Bu çalışma literatürde karşılaşılan en başarılı IMMD prototip çalışmasıdır.

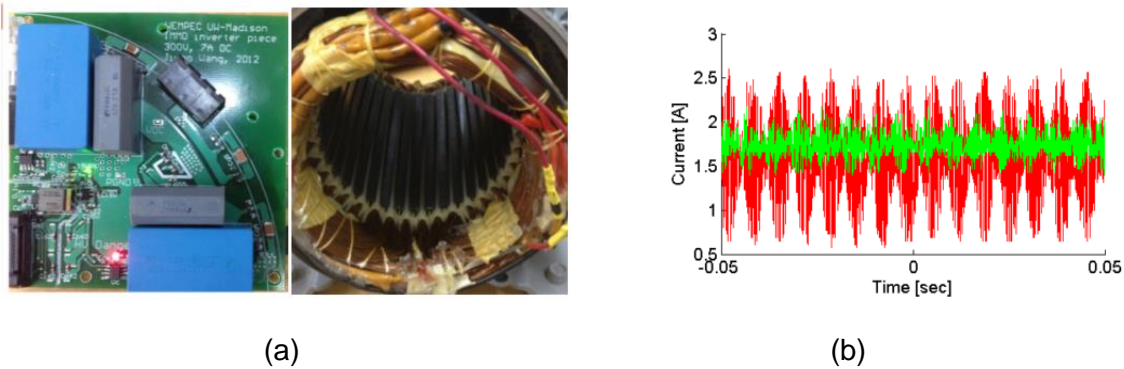


Şekil X. Prototipten elde edilen deney sonuçları: (a) Farklı profillerde elde edilen DA bara akım ve gerilimleri, (b) DA bara modül gerilimleri dengesi



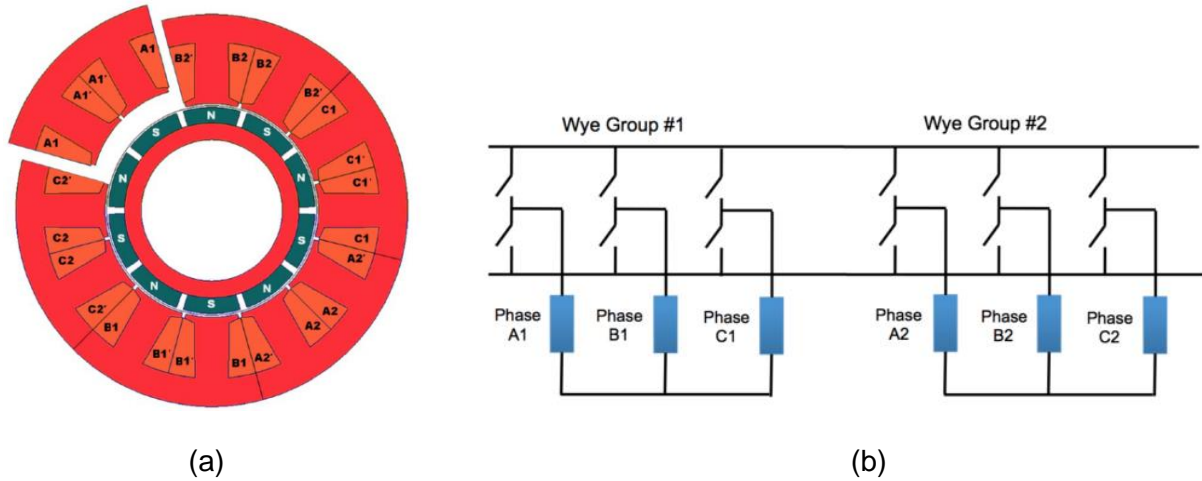
Şekil Y. Prototipten elde edilen deney sonuçları: (a) Motor akımları, (b) Interleaving varken ve yokken gözlenen akım dalgalanması

Aynı enstitüde yapılan benzer bir çalışma kapsamında geliştirilen modüler sürücü ve motor fotoğrafı **Şekil X'te** yer almaktadır. Bu çalışmada da yine interleaving tekniğine vurgu yapılmıştır. Yine **Şekil X'te** interleaving varken ve yokken gözlenen DA bara akımları yer almaktadır.

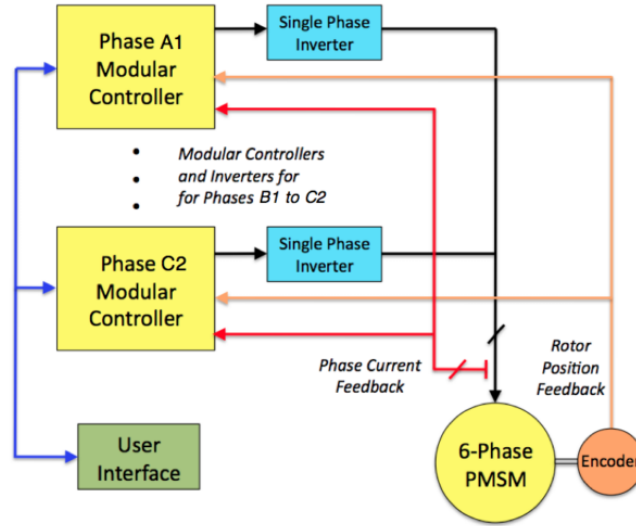


Şekil X. Örnek uygulama: (a) Geliştirilen IMMD fotoğrafları, (b) Interleaving varken ve yokken gözlenen akım dalgalanması

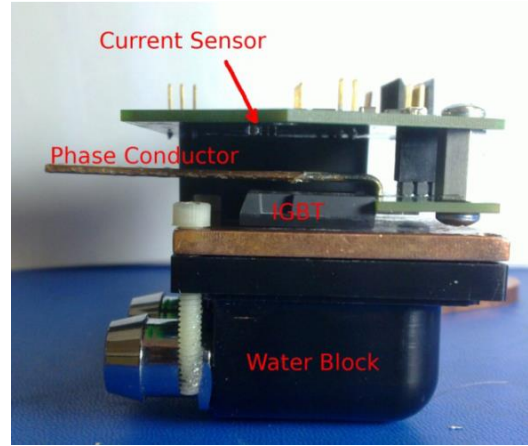
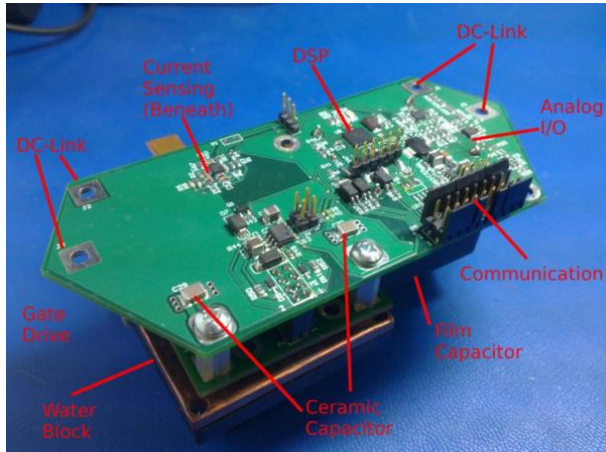
Bir başka IMMD prototip çalışmasında 6-faz 10 kW sabit mıknatıslı bir motora birbirinden bağımsız ve kendi denetleyicileri olan modüler yapıda sürücü sistemi tasarlanmıştır. Motor 12 oluklu olup 10 kutuptan oluşmaktadır (kesirli oluk). Motor yapısı ve sürücü topolojisi Şekil X'te gösterilmiştir. Ayrıca modüler kontrol blok şeması Şekil Y'de yer almaktadır. Her bir modül hem encoder pozisyon bilgisini hem de kendine ait faz akımı bilgisini (hall effect sensörler ile) okumaktadır. DA bara anma gerilimi 325V'tur ve sistem 600V'luk IGBT tipi güç yarıiletkenleri ile gerçekleştirilmiştir ve her bir faz bir adet yarım köprü evirici ile sürülmektedir. Motor ile sürücü devresi arasına paslanmaz çelikten bir plaka konulmuş ve böylece bir tarafın manyetik ve elektrik alanlarının diğer tarafı etkilemesi önlenmiştir. Tüm sürücü devresi (güç katı, kontrol ve kapı sürücü) 4 katlı baskı devre kartı (PCB) ile gerçekleştirilmiştir. Bunun iki katı parazitik endüktansı küçültmek için DA baraya ayrılmıştır. Ayrıca bu çalışmada DA barada hem metal film kondansatör hem de seramik kondansatör kullanılmıştır. Bunun amacı her kondansatör tipinin farklı frekanslara farklı tepkiler vermesidir. Bir faza ait modül devresi üstten görünümü ve yandan görünümü Şekil Z'de görülebilir. Soğutma için sulu soğutma kullanılmıştır. Tüm sisteme ait prototip fotoğrafı ve deneyler sonucu elde edilen bir faz akımı dalga şekli Şekil T'de görülebilir.



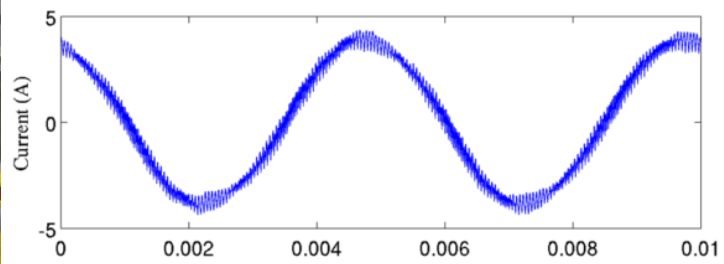
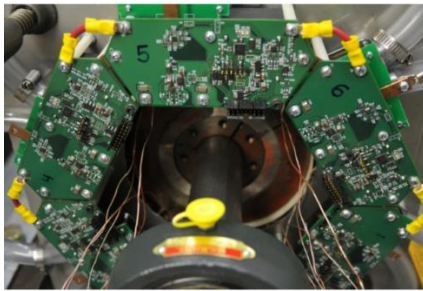
Şekil X. Örnek IMMD uygulaması: (a) Motor yapısı, (b) sürücü topolojisi



Şekil Y. Kontrol blok şeması



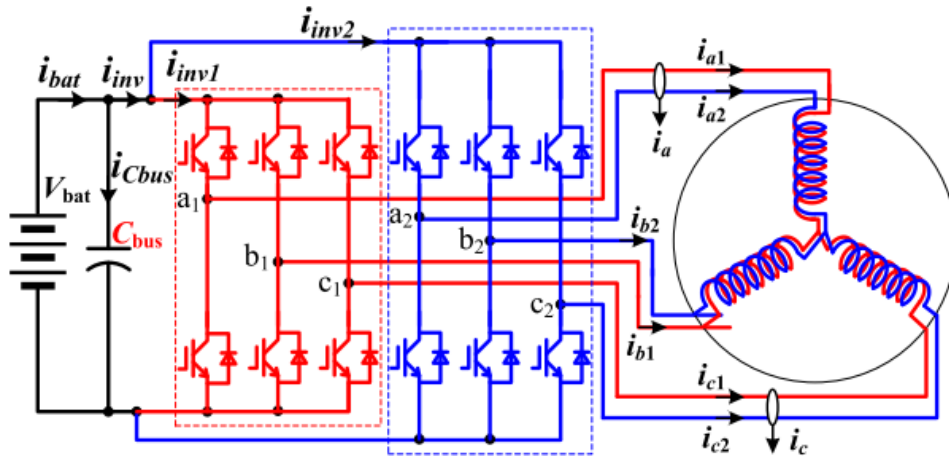
Şekil Z. IMMD uygulaması prototip resimleri: Bir faza ait sürücünün (a) üstten görünüşü, (b) yandan görünüşü



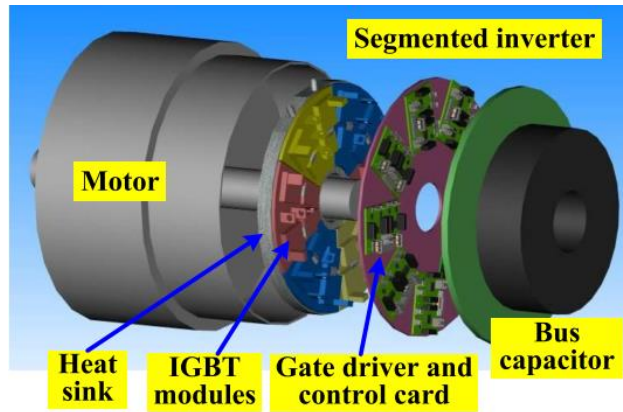
Şekil T. (a) IMMD prototip fotoğrafı, (b) Faz akımı dalga şekli

Konu ile ilgili literatürde yayınlanan bir başka çalışma elektrikli araç çekiş sistemlerine yöneliktir. Bu çalışmada elektrikli araçlarda DA bara kondansatörlerinin dalgalanma akımı taşıma kapasitesinin batarya ömrüne etkileri üzerine çalışılmıştır. Ancak var olan dalgalanma akımını bataryaya yansıtmamak için gereken kondansatör ihtiyacı elektrolitik kondansatörler için hacimsel olarak çok fazla olup, film kondansatörler için çok pahalı olmaktadır. Bu amaçla

çekiş sürücü sisteminin segmente edilerek (modüler yapı) kondansatör gereksiniminin azaltılması hedeflenmiştir. DA bara dalgalanma akımının düşürülmesi için paralel bağlı segmente edilmiş sürücüler interleaving tekniği ile anahtarlanmaktadır. Buna ek olarak sürücü sistemi aynı zamanda motora entegre edilmiş ve bir IMMD yapısı elde edilmiştir. Elektrikli araçlar için önerilen segmente edilmiş motor sürücü sistemi devre şeması **Şekil X'te** görülebilir. Çalışmanın sonucunda DA bara kondansatör boyutları %55 ile %75 arasında küçültülmüştür. Power ring film capacitor adı verilen ve çörek tipi kondansatör yapısında olan bir DA baraya sahip IGBT'li bir IMMD sistemi önerisi **Şekil Y'de** gösterilmiştir.

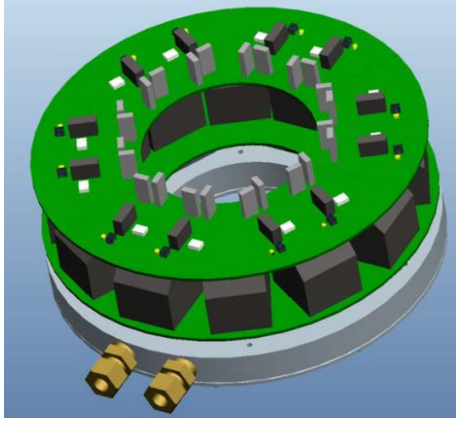


Şekil X. Elektrikli araçlar için önerilen segmente edilmiş motor sürücü sistemi devre şeması

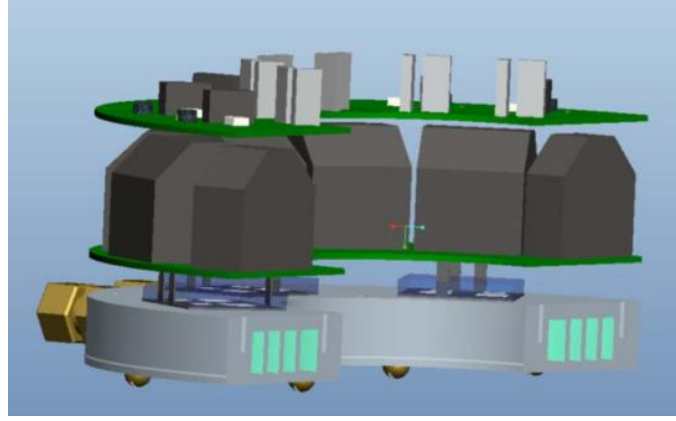


Şekil Y. Önerilen bir IMMD yapısı

İlk olarak 55 kW gücünde bir prototip çalışması yapılmıştır. Sulu soğutma kullanılan bu yapının üstten ve kesilmiş olarak yandan görünüş çizimleri **Şekil Z'de** yer almaktadır. Bu çalışma ile 17.1 kW/litre ve 15.6 kW/kg güç yoğunluklarına ulaşılmıştır. Termal başarımı arttırmak için benzer ikinci bir prototip üretilmiştir. Bu iki prototipe ait fotoğraflar **Şekil T'de** görülebilir. Deneyisel çalışmalar sonucunda batarya akımı etkin değerinde %66'lık bir azalma gerçekleştiği gözlenmiştir.

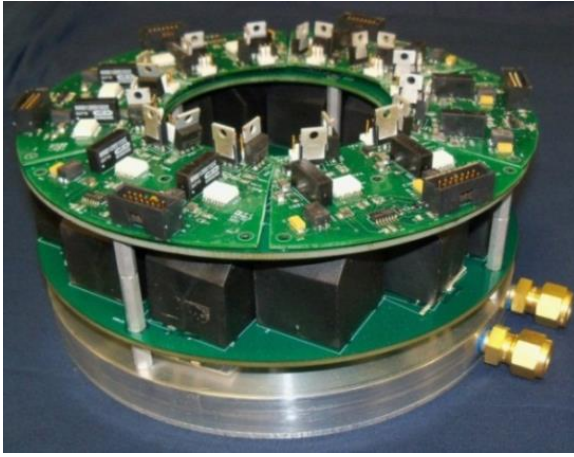


(a)

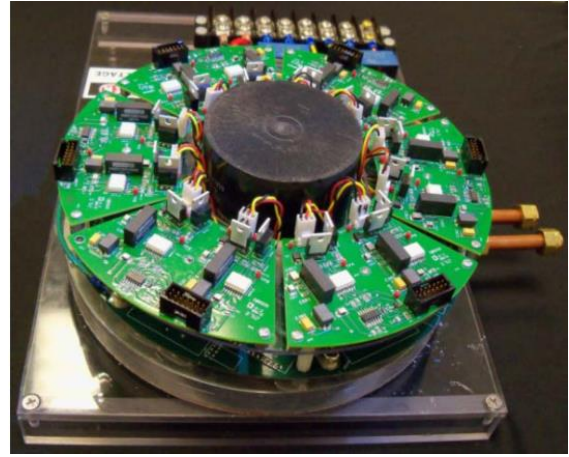


(b)

Şekil Z. 55 kW'lık sulu soğutmalı ilk prototip: (a) Üstten görünüş, (b) Yandan görünüş



(a)

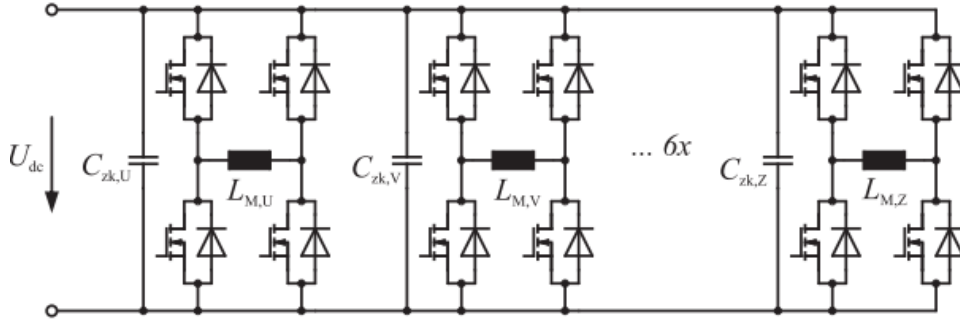


(b)

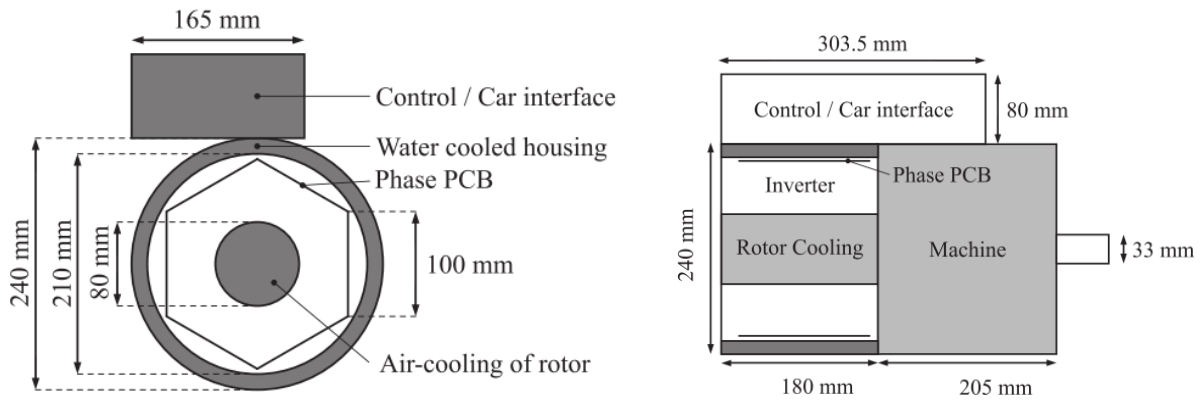
Şekil T. Protoip fotoğrafları: (a) İlk prototip, (b) İkinci prototip

Bir başka çalışmada farklı tipte bir entegrasyon denenmiştir ve bu çalışmanın en dikkat çekici noktası DA baranın MLLC tipi kondansatörler ile gerçekleştirilmiş olmasıdır. Bu çalışmada da yine elektrikli araçlar için bir tümleşik motor sürücü sistemi çalışılmıştır. Her faz tam köprü olacak şekilde 6-faz bir motor sürücü sistemi önerilmiştir (**Şekil X**) ve sürücü sisteminin büyük bir kısmı motorun iç kısmına yerleştirilmiştir (**Şekil Y**). Motor sürücü devresinde güç MOSFET'leri kullanılmıştır. Soğutma sistemi **Şekil Z'de** gösterilmiştir. Kırmızı çizgiler termal yolları göstermektedir. Güç yarıiletkenlerinden motorun kasasına ısının iletimi alüminyum soğutucu plakaları ile sağlanmıştır ve motorun kasasında sulu soğutma sistemi bulunmaktadır. Yine **Şekil Z'de** görülebileceği gibi sistem DA barasında seramik kondansatörler kullanılmıştır. Bunun temel sebepleri hem motor içerisinde çok kısıtlı bir hacim olması hem de devre yüksekliğinin çok kısıtlı olmasıdır. Her bir fazdaki DA bara kondansatör bankası 0.22 μF 'lık 828 adet seramik kondansatörden oluşturulmuştur. Toplamda 4.35 mF/litre'lik sığa yoğunluğuna ulaşılmıştır ve bu değer film, elektrolitik veya

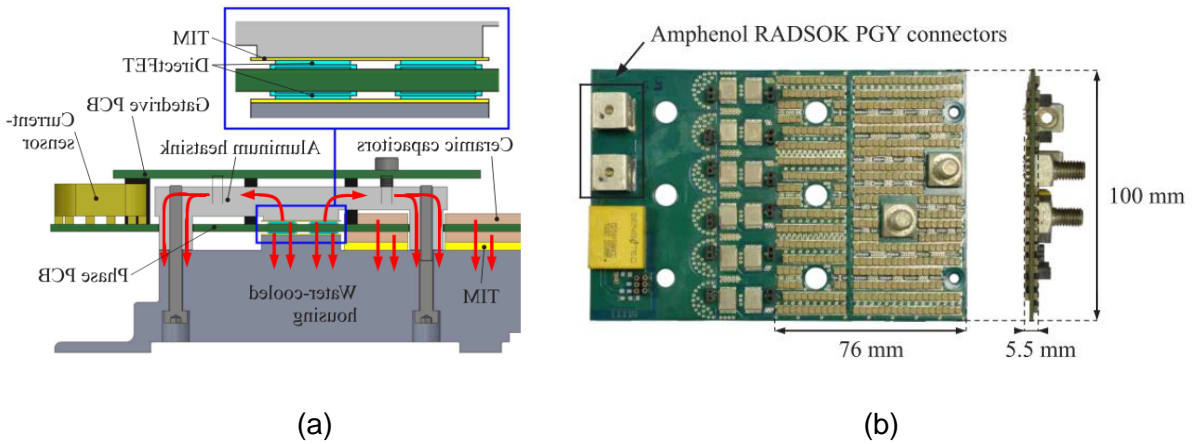
folyo tipi kondansatörlerle mümkün değildir. Sonuç olarak elde edilen sistem **Şekil T'deki** gibidir. Bu çalışma ile 145V DA bara anma geriliminde %97 verime ulaşılmıştır ancak PCB ve önemli alt sistem parçalarının ısınması beklenenin üzerinde olmuştur. Çalışmanın sonucunda SiC veya GaN gibi WBG yarıiletken anahtarların kullanımı önerilmiştir. Ayrıca seramik kondansatörlerde DA bara gerilimi arttıkça sığa değerinin azaldığı gözlemlenmiş ve seramik kondansatör bankasının yüksek gerilimdeki DA bara uygulamaları için pek uygun olmadığı anlaşılmıştır.



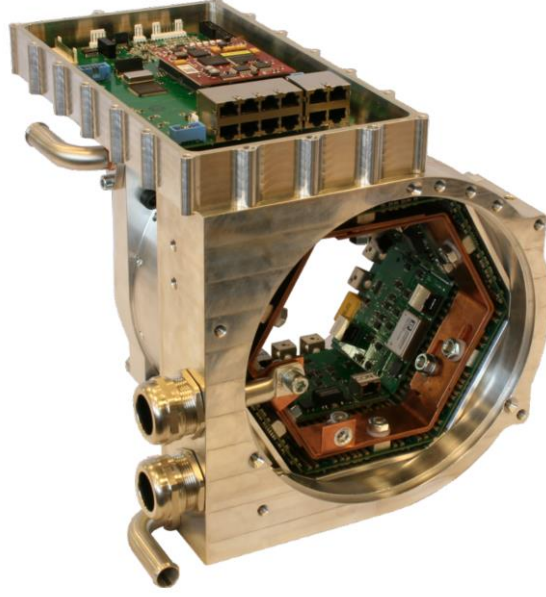
Şekil X. 6-faz motor sürücü topolojisi



Şekil Y. IMMD sistemi mekanik yerleşimi



Şekil Z. (a) Soğutma sistemi, (b) Seramik kondansatörlerden oluşan DA bara



şekil T. IMMD prototipi görünüşü

sd

Literatür zeti:

2. Motor ve sürücü n tasarımı:

3. Motor sürücü sistemi güç katı tasarımı:

4. Kondansatör bankası tasarımı:

5. Benzetim alışmaları:

6. Baskı devre kartı şematik tasarımı:

sdf