

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.

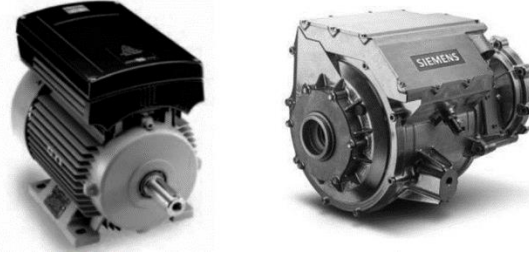
1. Literatür araştırması:

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

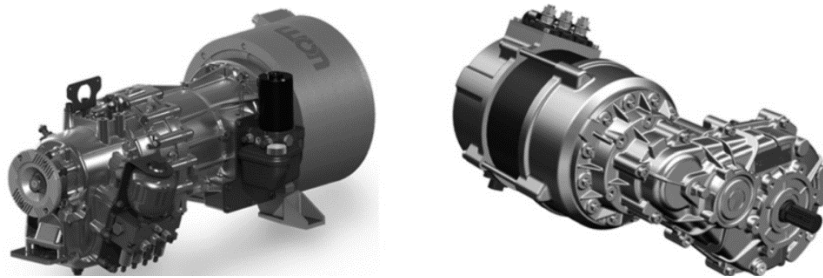
çıkılabilen anma güç değeri en fazla 7.5 kW olabilmektedir. Ayrıca, motorun yarattığı titreşimin güç elektroniği ve kontrol devreleri üzerinde meydana getireceği olumsuz etkilerden de bahsedilmiştir.

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.



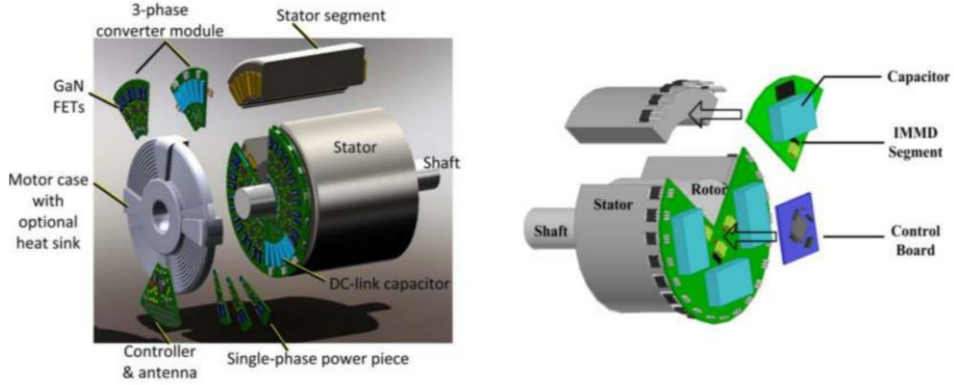
Şekil 1: Yüzey monteli entegrasyon örnekleri

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.



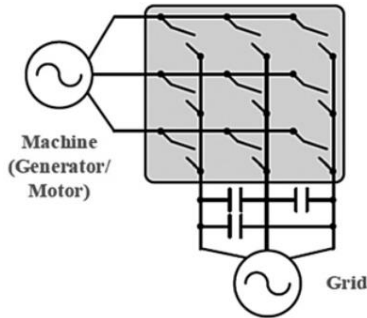
Şekil 3: Stator nüvesi üzerine entegrasyon örnekleri

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.

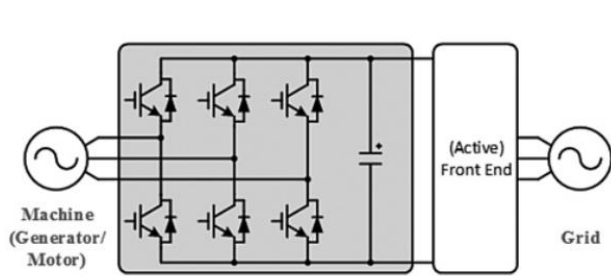
Topolojiler

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 kompakt olması ve DA bara kondansatörü

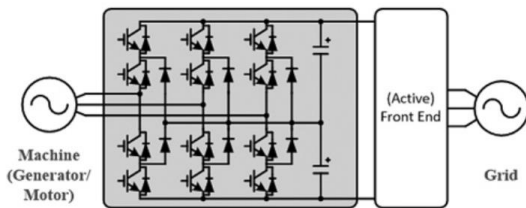
bulunmamasıdır. Ayrıca iki yönlü güç akışı sağlanabilmektedir (regenerative braking) ve hattan çekilen akım sinüzoidaldir. Diğer bir taraftan, gerilim transfer oranının düşük olması, koruma için ve giriş fltresi için ekstra devrelere ihtiyaç duyması ve yarıiletken devre elemanı sayısının oldukça yüksek 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.



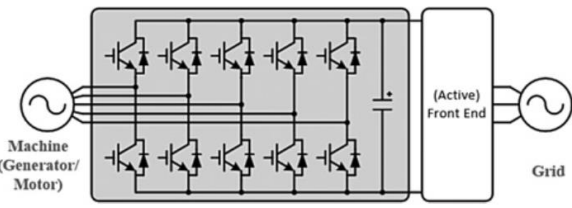
(a) Matris çevirici



(b) İki seviyeli tam köprü topoloji



(c) Üç seviyeli (NPC) topoloji



(d) Paralel bağlı topoloji

Şekil X. IMMD sistemi için önerilen motor sürücü topolojileri**Yarıiletken teknoloji**

IMMD sistemlerinde karşılaşılan zorluklara karşı önerilen en yaygın yöntem geniş bant aralıklı (WBG) güç yarıiletkenleri kullanmaktır. Bu yarıiletkenlerin ticari olarak üretilen 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. 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.

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. Ancak 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.

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
- **SZ**

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.

Kapasitörlerle ilgili challenge'lar

IMMD rnek prototip alışmaları:

Literatür özet:

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