



Sonlu Elemanlar Yöntemi Tabanlı ANSYS-Maxwell Kullanılarak Elektrikli Araç Uygulamaları için Yüksek-Hızlı Motorların Tasarımı ve Performanslarının Karşılaştırılması

Yıldırım ÖZÜPAK¹,

Dicle Üniversitesi, Silvan Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Programı, Diyarbakır, Türkiye

✉ Sorumlu Yazar: yildirim.ozupak@dicle.edu.tr

Geliş tarihi / Received: 04/10/2022

Kabul tarihi / Accepted: 03/11/2022

Özet: Elektrikli Araçların (EA) motorlarının boyut ve ağırlıklarındaki azalmalar sayesinde gelecekte bu motorların maksimum hızlarının ve çekiş güçlerinin artacağı tahmin edilmektedir. Yüksek hızlı motorların, geniş çalışma alanında yüksek çıkış gücü ve yüksek verimliliğe sahip olmasının yanı sıra, yüksek hızlar için rotorun yüksek mekanik mukavemete sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle motorların avantaj ve dezavantajlarının hem elektriksel hem de mekanik açıdan değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu araştırmada, 110 kW çıkış gücüne ve maksimum 46.000 rpm hıza ulaşması hedeflenen Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor (KMSM) ve Anahtarlamalı Relüktans Motor (ARM) olmak üzere iki motor tipi, EA motor uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Tasarım ve analiz için Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) tabanlı çözüm gerçekleştiren ANSYS-Rmxpert-Maxwell programları ortak kullanılmıştır. Çalışmada, mekanik dayanıklılık ve elektriksel özellikleri bakımından elektrikli araç uygulamalarında yüksek hız, maksimum verimlilik ve yüksek çıkış gücü için en uygun motor tipinin hangisinin olabileceği açıklanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Elektrikli Araçlar, Verim, Yüksek-Hız, Sonlu Elemanlar Yöntemi

Design and Performance Comparison of High-Speed Motors for Electric Vehicle Applications using Finite Element Method Based ANSYS-Maxwell

Abstract: Thanks to the reduction in the size and weight of the engines of Electric Vehicles (EV), it is estimated that the maximum speed and traction power of these engines will increase in the future. High-speed motors must have high output power and high efficiency in a wide working area, as well as high mechanical strength of the rotor for high speeds. For this reason, the advantages and disadvantages of motors should be evaluated both electrically and mechanically. In this research, two motor types, namely Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) and Switched Reluctance Motor (SRM) which are aimed to reach 110 kW output power and a maximum speed of 46,000 rpm, are designed to be used in EV motor applications. For design and analysis, ANSYS-Rmxpert-Maxwell programs, which realize Finite Element Method (FEM)-based solutions, were used jointly. In the study, it is explained which engine type can be most suitable for high speed, maximum efficiency and high output power in electric vehicle applications in terms of mechanical endurance and electrical properties.

Keywords: Electric Vehicles, Efficiency, High-Speed, Finite Element Method.

1. Giriş

Elektrikli araçların (EA), enerji tasarrufu sağlamak ve hava kirliliğini azaltmak için kullanımı popüler hale gelmeye başlamıştır. Enerji verimliliği ve tasarrufu için EA çekiş motorlarının yüksek verimliliğe, yüksek güç yoğunluğuna, düşük üretim maliyetlerine ve küçültülmüş hacime sahip olması gerekmektedir. Son zamanlarda, elektrik gücü tüketim seviyelerini iyileştirmek ve motorun bulunduğu alanı korumak için özellikle küçültülmüş motorlara ihtiyaç duyulduğu görülmüştür. Motor hacmini küçültmek için kullanılan yöntemlerden biri motor hızını arttırmaktır (Besharati vd., 2015). Motorların çıkış gücü, tork ve devir hızının çarpımı ile tanımlanır. Çıkış gücü sabit tutulup motorun devir hızı artırılarak motorun hacminde küçültme gerçekleştirilebilir. Yüksek devir hızı için motorların yeterli

mekanik ve elektriksel performansları (yani rotorun yüksek mekanik mukavemeti ve kayıpta azalma) sağlaması gerekir.

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (KMSM), yüksek tork yoğunluğu ve yüksek verime sahip oldukları için elektrikli araçlarda çekiş motorları olarak kullanılmaktadır (Chau vd., 2008). Bununla birlikte, KMSM'lerin rotorda kullanılan kalıcı mıknatısları nedeniyle yüksek üretim maliyetleri ve düşük mekanik mukavemet gibi çeşitli dezavantajları vardır. Bu mıknatıslar merkezkaç kuvveti tarafından kırılır, çünkü yüksek hızlı tahrikte bu mıknatıslar yüksek Mises (Von Mises gerilmesi çeşitli matematiksel kanıtlamalar yardımı ile elemanlar üzerinde oluşan gerilmelerin ve kayma gerilmelerin ortalamasıdır) gerilimine maruz kalmaktadır. Dahili kalıcı mıknatıslı senkron motorlar (DKMSM) bu mıknatısların kırılmasını engellese de yüksek devirden dolayı akı bariyerinin kenarında yüksek Mises gerilimi meydana gelir. Bu nedenle, Mises gerilimini azaltmak için tasarım sürecinde ayrıntılı rotor şeklinin gelişmiş optimizasyonu gerekmektedir (Yamazaki vd., 2013). Bu arada, yüzey sabit mıknatıslı senkron motorlar (YKMSM'ler), Mises gerilimini DKMSM'lere kıyasla daha etkili bir şekilde azaltabilir. Bu motorların rotoru karbon fiber ve titanyum alaşımı gibi takviye malzemeleri kullanılarak güçlendirilebilir (Rakesh vd., 2019). Ancak bu durum karmaşık ve yüksek maliyetli bir yapı gerektirir. Ayrıca, rotorun mıknatısından dolayı zıt elektromotor kuvvet artabilir. Bu durum bakır kaybının daha fazla meydana gelmesine sebep olduğundan yüksek hız bölgesinde akı zayıflatma kontrolü ile d-ekseni akımına enerji verilmesi gerekebilir.

Anahtarlamalı relüktans motorlar (ARM) aday otomotiv motorları olarak öne sürülmüştür. ARM'ler stator ve rotorda belirgin bir kutup yapısına sahip sadece lamine çekirdek ve sargıdan oluşmaktadır. Bu nedenle, ARM'ler sağlam bir yapıya sahiptir ve mıknatısları olmadığı için rotorda oluşan Mises gerilimini azaltabilmektedir. KMSM'lere oranla ARM'ler yüksek devirlerde kullanıma daha uygundur. Çünkü ARM'ler hem yüksek mekanik mukavemete sahipler hem de bir rotordaki mıknatısların neden olduğu zıt elektromotor kuvvetini bulundurmazlar. Ancak, ARM'lerin tork yoğunluğu, KMSM'lerinkinden daha düşüktür. Bu nedenle, KMSM'lerle aynı torku elde etmek için sarım sayıları fazla ve motor hacmi ise daha büyük olmaktadır. Yüksek hızlı devirlerde demir kaybı arttığından ARM'lerde motor verimi düşmektedir. Bu dezavantajların üstesinden gelmek amacıyla, yüksek hızlı bölgede yüksek verim elde etmek için düşük demir kayıplı çelik, silikonlu çelik ve amorf çelik saclar kullanan ARM'ler önerilmektedir (Emma vd., 2016).

Yukarıda bahsedildiği gibi, KMSM'lerin ve ARM'lerin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Otomobil motor uygulamalarında hangi motorun daha uygun olduğunu belirlemek için bu iki motorun performansları karşılaştırılmıştır (Zhu vd., 2018). Bununla birlikte, önceki çalışmaların çoğunda, tipik bir otomobil motorunun normal çalışma hızındaki performansı değerlendirmiştir. Boyut ve ağırlıktaki azalmalar nedeniyle gelecekte otomobil motorlarının maksimum hızının artacağı öngörülmekte olup, her motorun özelliklerinin hem elektriksel hem de mekanik açıdan daha yüksek hız aralığında değerlendirilmesi gerekmektedir (Özüpak, 2022). Bu çalışmada, 110 kW çıkış gücüne ve 46.000 d/d maksimum hıza ulaşan motorlar EA çekiş motorları olarak önerilmiştir. Çalışmada, belirlenen çıkış gücüne ve maksimum hıza ulaşılması için hangi motor tipinin en uygun olduğu ortaya koymaya çalışılmıştır. İki motorun mekanik ve elektriksel karakteristikleri, yüksek hızlı devirlerde kullanım için gereken performansları elde etmek üzere belirlenmiştir. Tasarlanan bu motorların performansları Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) tabanlı çözüm gerçekleştiren ANSYS-Rmxpert-Maxwell bütünleşik programı kullanılarak değerlendirilmiş ve yüksek hızlı devirlerde söz konusu motorların kullanımlarının avantaj ve dezavantajları açıklanmıştır.

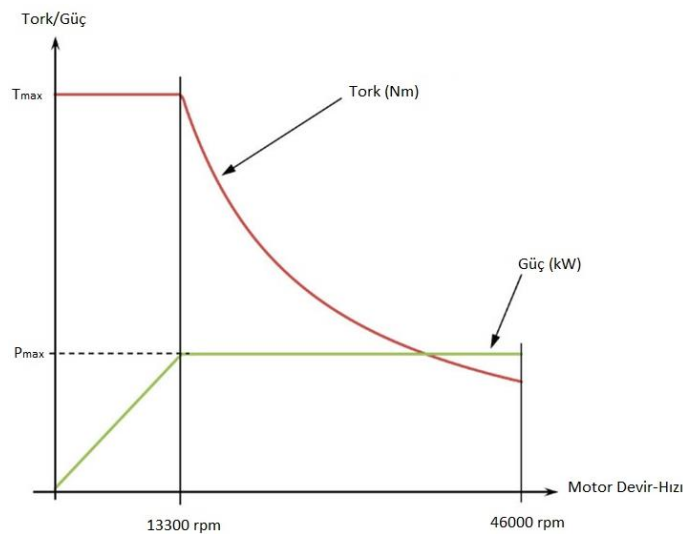
2. Materyal ve Metot

Motorların temel bazı parametreleri Tablo 1'de ve gerekli hız-tork özellikleri ise Şekil 1'de verilmiştir. Tablo 1 ve Şekil 1'de sunulduğu gibi çıkış gücü 110 kW, maksimum tork 150 Nm, taban hız 13.300 d/d ve maksimum hız 46.000 d/d olarak belirlenmiştir. Maksimum faz akımı, maksimum DC gerilimi ve akım yoğunluğu sırasıyla 625 A, 330 V ve $26 A/mm^2$ olarak her üç motor içinde sabittir. Maksimum hız 46.000 d/d, bu hız genel bir EA çekiş motoruyla karşılaştırıldığında çok yüksektir. Yüksek çıkış gücü elde etmek için bir motorun devir sayısı arttırılarak motorun hacmini büyük ölçüde

küçültmek mümkündür. En küçük motor hacmini elde etmek için KMSM ve ARM tasarlanmış, motorların maksimum torku, maksimum çıkış gücü, kayıp ve verimlilik gibi performansları farklı devir hızları için değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Hedeflenen performans değerleri

Parametre	Değer
Çıkış gücü	110 kW
En yüksek tork	150 Nm
Gerilim	330 V
En yüksek akım	625 As
Akım yoğunluğu	26 A/mm ²
Motorun çapı	300 mm



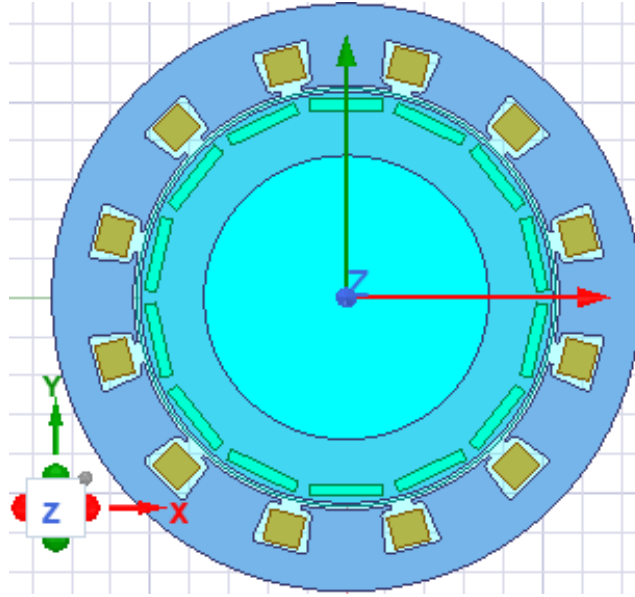
Şekil 1. Motorun devir, tork ve güç grafiği

Motorların tasarımı, mekanik dayanıklılık, elektriksel özellikler ve motor performansının değerlendirilmesi gibi üç bölüme gerçekleştirilmiştir. Mekanik dayanıklılık tasarımında, merkezkaç kuvveti analizi kullanılarak belirlenen maksimum 46.000 d/d hız ile yeterli mekanik mukavemeti elde etmek için rotor çapı ve şekli belirlenmiştir. Elektriksel karakteristiklerin belirlenmesinde, maksimum 150 Nm tork elde etmek ve endüklenen gerilimi DC gerilimden daha az tutmak için sarım sayısı, stator şekli ve kutup sayısı belirlenmiştir. Bu çalışmada, KMSM ve İndüksiyon Motorunun (IM) tüm hız bölgelerinde sensörlü vektör kontrol tarafından sinüzoidal olarak sürüldüğü, ARM'nin düşük hız bölgesinde histerezis kontrolü ve yüksek hızda gerilimin tek darbe kontrolü ile sürüldüğü varsayılmıştır. Aslında, yüksek hızlı bölgede sinüzoidal dalga tarafından sürülmek invertörde yüksek anahtarlama frekansı gerektirir. Ancak bu çalışmanın amacı, ideal koşullar altında motor özelliklerini değerlendirmektir. Burada sürücü devresinin koşullarının etkileri dikkate alınmamıştır.

2.1. KMSM'nin tasarımı

Bu bölümde, tasarlanan KMSM'nin özellikleri ve gerekli performansları gerçekleştirebilmek için kullanılan tasarım süreci anlatılmıştır. Şekil 2'de tasarlanan KMSM'nin ANSYS-Maxwell modeli sunulmuştur. Tablo 2'de, KMSM'nin tasarım özellikleri verilmiştir. Şekil 2 ve Tablo 2'de görüldüğü gibi, bu tasarımda YKMSM seçilmiştir. Genel olarak, DKMSM, mıknatıs torku, yüksek çıkış torku ve geniş bir hız aralığından dolayı EA çekiş motorları olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Öte yandan, YKMSM'nin rotor şekli, rotorda üretilen Mises gerilimini DKMSM'ninkinden daha etkili bir şekilde azaltabildiğinden, YKMSM, DKMSM'ye kıyasla mekanik dayanım açısından daha uygundur. Kutup ve yuva kombinasyonu 12/14 olarak belirlenmiştir. Ek olarak, sabit mıknatıs, girdap akımı kaybını azaltmak için eksenel olarak katmanlı bölümlere ayrılmıştır ve kalıcı rotor mıknatısının, karbon

fiber takviyeli plastikten yapıldığı ve güçlendirildiği varsayılmaktadır. KMSM'nin sinüzoidal bir dalga tarafından sürüldüğü varsayılmaktadır. Detaylı tasarım süreci aşağıdaki gibi belirtilmiştir.



Şekil 2. Tasarlanan KMSM'nin modeli

Tablo 2. KMSM'nin özellikleri

Mıknatis genişliği	38mm
Mıknatis kalınlığı	6mm
En büyük çap	300mm
İç çap	217mm
Uzunluk	75mm
Çelik tipi	M27_29G
Kutup sayısı	12
Oluk sayısı	14
Akım yoğunluğu	26 A/mm ²

Motorun tasarımı ve analizi için simülasyon aracı olarak ANSYS-Rmxpert-Maxwell kullanılmıştır. Sabit rotor çapları ile tasarlanan DKMSM ve YKMSM'deki iki tip mıknatis dikkate alınmıştır. Bunlar sırasıyla YKM tipi ve DKM tipi olarak adlandırılan yüzey kalıcı mıknatis türü ve iç kalıcı mıknatis türüdür. VCODYM744 mıknatis ve çekirdek için manyetik çelik M27_29G sac malzemeler kullanılmıştır.

Elektriksel tasarımda, maksimum 150 Nm tork elde edebilmek ve indüklenen gerilimi her devir hızında DC gerilimin yarısından daha az bir değerde tutmak amacıyla devir sayıları belirlenir. Tork denklemi Denklem (1)'de verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$T = p\Psi_d i_q \quad (1)$$

Burada T torku, p kutup çifti sayısını, Ψ_d manyetik akıyı ve i_q q-ekseni akımını ifade etmektedir. Ayrıca, mıknatis akı bağlantısı Denklem (2) gibi ifade edilmektedir.

$$\Psi_d = N\phi_d \quad (2)$$

Burada N sarım sayısı ve ϕ_d bir sarım/yuvadaki mıknatis akı bağlantısıdır. Ayrıca faz gerilimi, DC gerilimin yarısından daha az bir değerde sınırlandırılmalıdır. Faz geriliminin durumu Denklem (3)'te gibi ifade edilir.

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{v_d^2 + v_q^2} < \frac{V_{dc}}{2} \quad (3)$$

Burada v_d d-ekseni gerilimi, v_q q-ekseni gerilimi ve V_{dc} DC kaynak gerilimidir. Daha sonra, temel hızı ve çıkış gücünü elde etmek için endüktans koşulu Denklem (4)'teki gibi verilir.

$$L_b \leq \frac{\sqrt{\frac{3}{8} \left(\frac{V_{dc}}{\omega_b}\right)^2 - \Psi_d^2}}{i_q} \quad (4)$$

Burada L_b endüktans ve ω_b açısal hızdır. Denklem (4)'te, maksimum tork değeri temel hızın altındaki bir değerde varsayılmıştır. Bu nedenle, d-ekseni akımı 0 A'dır. Ayrıca, maksimum hıza ve çıkış gücüne ulaşmak için endüktans koşulu Denklem (5)'te verildiği gibi olmaktadır.

$$\omega_m \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(L_b i_q)^2 + (-L_b i_d + \Psi_d)^2} < \frac{V_{dc}}{2} \quad (5)$$

Denklem (5) kullanılarak endüktans koşulu Denklem (6)'da verildiği gibi olmaktadır.

$$L_b = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} < 0, L_a < L_b < L_c \quad (6)$$

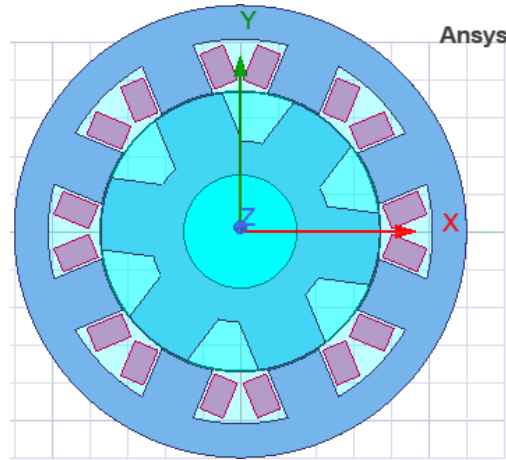
Denklem (6)'da verilen a, b, c parametreleri Denklem (7)'de verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$a = I_m^2, \quad b = -2 \Psi_d i_d, \quad c = \Psi_d^2 - \frac{3}{8} \left(\frac{V_{dc}}{\omega_m}\right)^2 \quad (7)$$

Burada ω_m , I_m ve i_d sırasıyla maksimum açısal hız, vektör genliği ve d-ekseni akımıdır. a, b ve c'nin işlevleri, 625 A'lık bir faz akımı ve belli bir beta açısında d-ekseni akımı parametreleri kullanılarak hesaplanabilir.

2.2. ARM tasarımı

Bu bölümde, tasarlanan ARM'nin özelliklerini ve gerekli performansları elde etmek için kullanılan tasarım süreci anlatılmaktadır. Şekil 3'te tasarlanan ARM'nin ANSYS modeli, Tablo 3'te ise ARM'nin özellikleri verilmiştir.



Şekil 3. Tasarlanan ARM'nin boyutu

Tablo 3. ARM'nin bazı özellikleri

Mıknatıs kalınlığı	5mm
En büyük çap	300mm
İç çap	2300mm
Uzunluk	75mm
Çelik tipi	M27_29G
Kutup sayısı	6
Oluk sayısı	8
Akım yoğunluğu	26 A/mm ²

Elektriksel tasarımda, 150 Nm'lik maksimum torku elde etmek için devir sayısı belirlenir. ARM'nin torku genel olarak Denklem (8)'de verildiği şekilde ifade edilir.

$$T = \frac{P\partial L}{2\partial\theta} i^2 \quad (8)$$

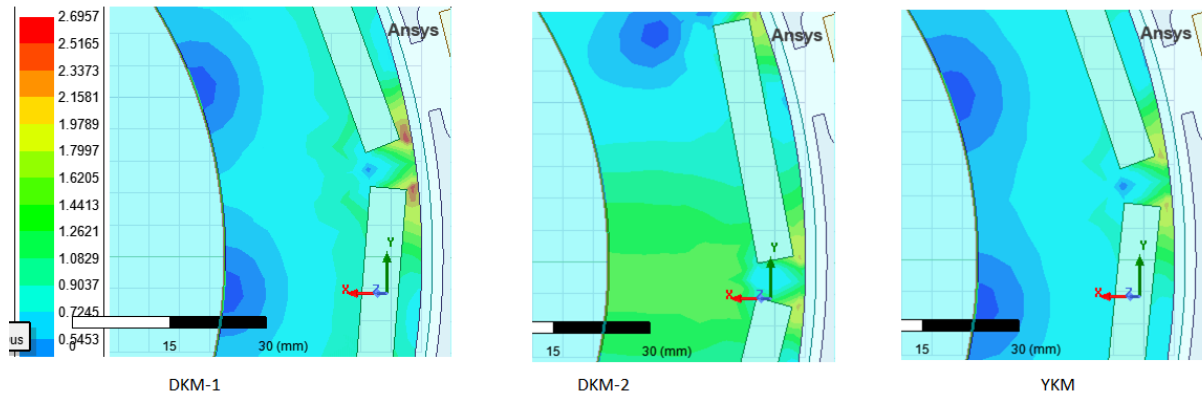
Burada T torku, $\partial L/\partial\theta$ öz endüktans değişimini ve i ise akımı ifade etmektedir. ARM'de tork, öz endüktansın değişimi ve faz akımının karesi ile orantılıdır. Denklem (8) aşağıdaki gibi yeniden yazılınca Denklem (9) elde edilir.

$$T = \frac{P\partial l}{2\partial\theta} (Ni)^2 \quad (9)$$

Denklemde görüldüğü gibi tork, sarım/yuvadaki endüktans değişimi ile sarım sayısı ve akımın karesi ile orantılıdır. Endüktans değişimi, rotorun belirgin kutup oranına bağlıdır.

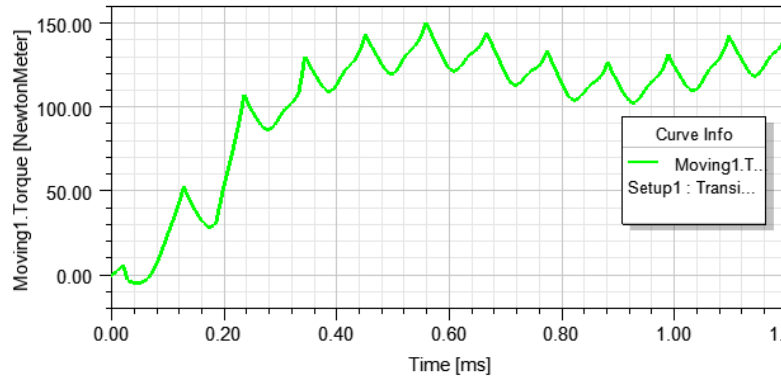
3. Bulgular

Bu bölümde, tasarlanan KMSM ve ARM'nin motor hacimleri, mekanik güçleri, çıkış güçleri, kayıpları ve verimleri açısından motor performansları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, hangi motorun yüksek hızlı bir çekiş motoru olarak kullanımının daha uygun olduğunu göstermiştir. Şekil 3'te görüleceği gibi, DKM tipinde yüksek akı bariyerin kenarında yoğunlaşmıştır. Diğer taraftan, YKM tipinin akı yoğunluğu, rotor üzerindeki kalıcı yüzey mıknatısında yoğunlaşmış ve bu gerilim değeri DKM tipine göre çok daha düşüktür. KMSM'nin manyetik alan dağılımı Şekil 3'te verilmiştir.



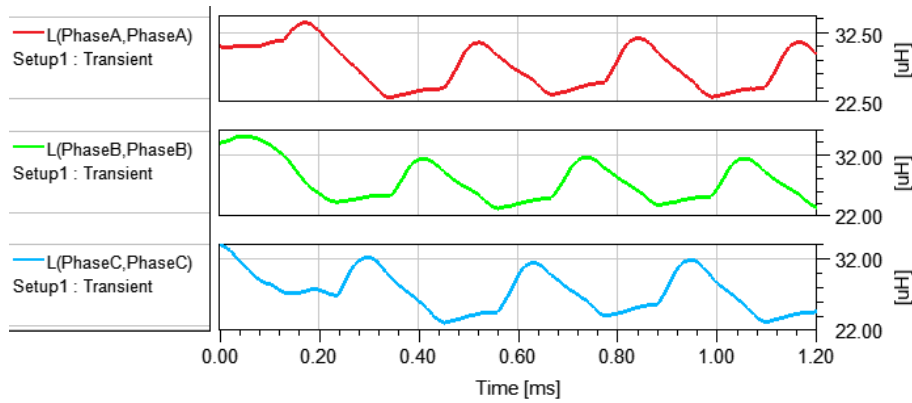
Şekil 4. DKM tipi YKM tipi için rotordaki manyetik akı dağılımı

Çıkış torkunun devir sayısının zamana bağlı grafiği arasındaki ilişki Şekil 4'te verildiği gibi olmaktadır. Dört kutup çifti vardır ve faz akımı 625 A'da sabit tutulmuştur.



Şekil 5. Motorun çıkış torku

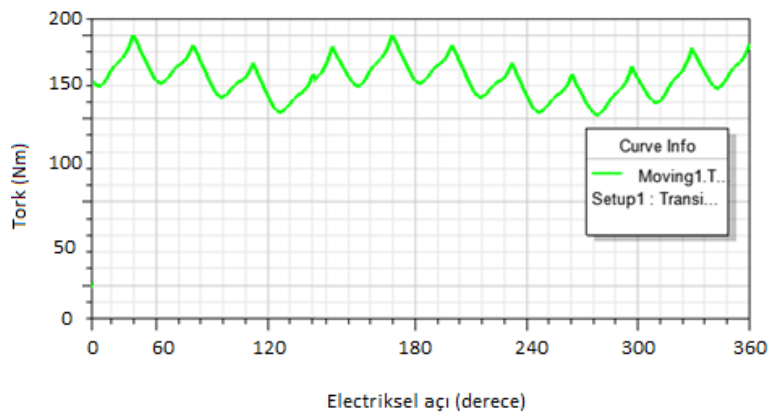
Denklem (4) ve (6)'dan, temel hız ve maksimum hızdaki faz gerilimi durumunu elde etmek için L_b 'nin endüktans aralığı Şekil 5'de verildiği gibi olmaktadır.



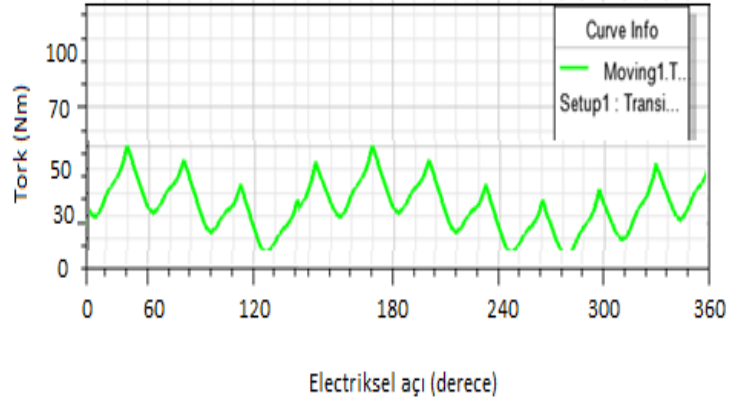
Şekil 6. Temel hız ve maksimum hız talep torkuna ulaşan endüktans durumu

3.1. KMSM'nin istenilen hızdaki tork ve faz gerilimi

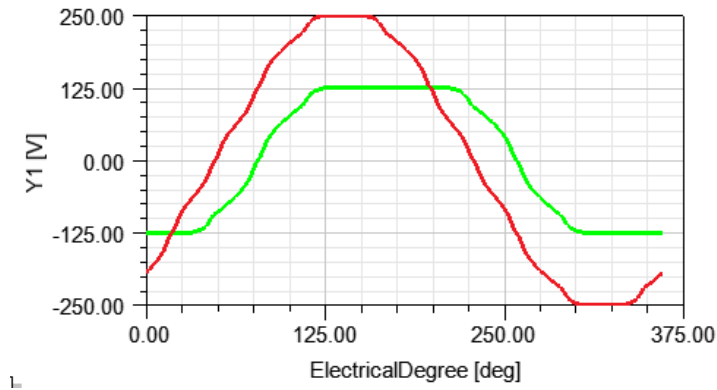
KMSM'nin performansı SEY tabanlı ANSYS programı kullanılarak analiz edilmiştir. Şekil 6'da ve Şekil 7'de sırasıyla 13.300 d/d ve 46.000 d/d çalışma hızında tork dalga şekilleri ve faz gerilimi dalga şekli verilmiştir. Şekil 8'de görüldüğü gibi, tasarlanan KMSM, 13.300 d/d'de 150 Nm'lik maksimum torka ulaşabilir. Şekil 7'de görüleceği üzere, faz gerilimi de 46.000 d/d'de 38.4 Nm tork elde edilmiştir. Şekil 10'da ise 330 V DC geriliminin yarısından daha azına indirilip grafikte sunulmuştur.



Şekil 7. 13.300 d/d hızında tork dalga biçimi



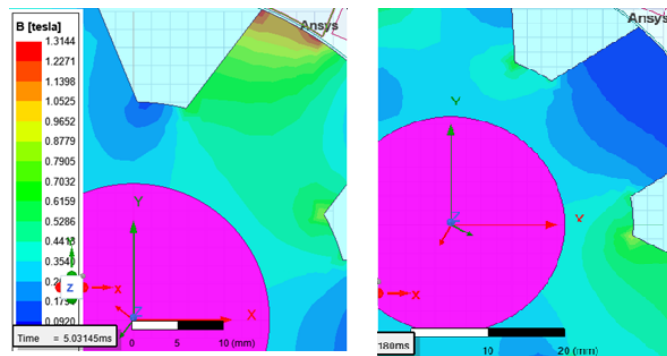
Şekil 8. 46 000 d/d hızında tork dalga biçimi



Şekil 9. KMSM motorunun gerilim değeri

13300 d/d hızda ortalama 150 Nm tork üretilirken 46000 d/d hızla ortalama tork değeri 30.4 Nm olmuştur.

Şekil 9'da hızın maksimum 46.000 d/d olduğu durumda rotor çapı için manyetik alan dağılımı verilmiştir. Şekil 10'da görüldüğü gibi shaft ve dişlerin kenarı çevresinde yüksek manyetik akı meydana gelmiştir.

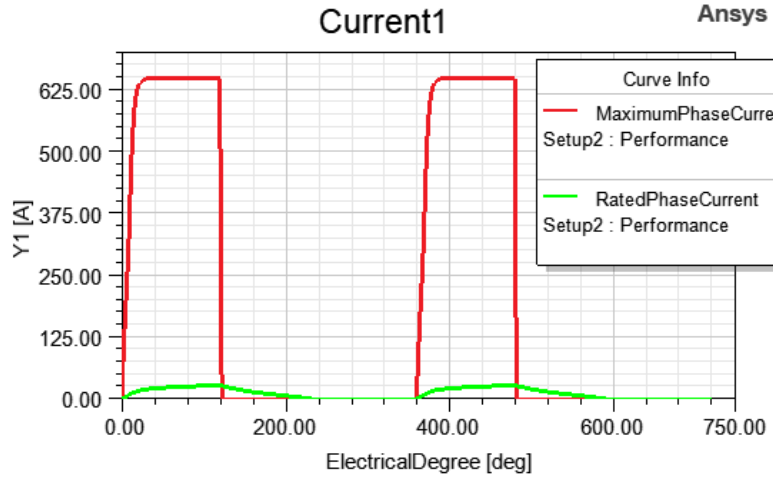


Şekil 10. Farklı zaman dilimlerindeki manyetik alan dağılımı

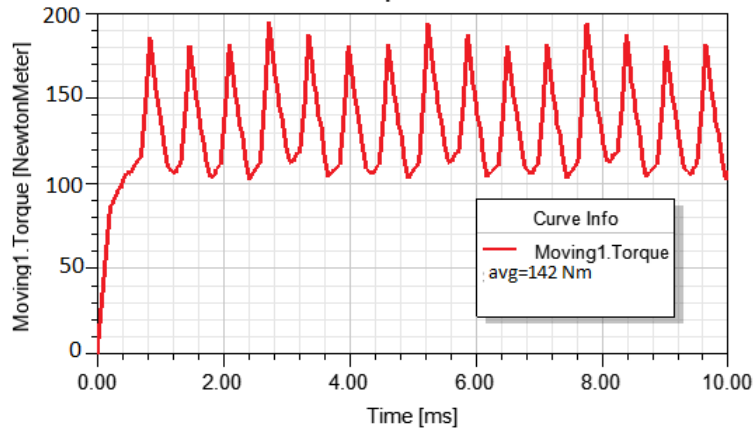
3.2. ARM'nin gerekli hızında tork ve faz gerilimi

ARM'deki sürücü yöntemindeki histerezis kontrolü sürücü kullanılarak endüktans değişiminin pozitif olduğu bölgede akım uyarımı başlatılmıştır. Daha sonra, negatif tork oluşumunu önlemek için endüktans değişimi negatif olmadan önce ortadan kaldırılmalıdır. Bu sürücü yönteminden çıkış akımı, DC gerilimi, endüktans dağılımı, açılma açısı ve kapanma açısı gibi bazı parametrelerle değiştirilir.

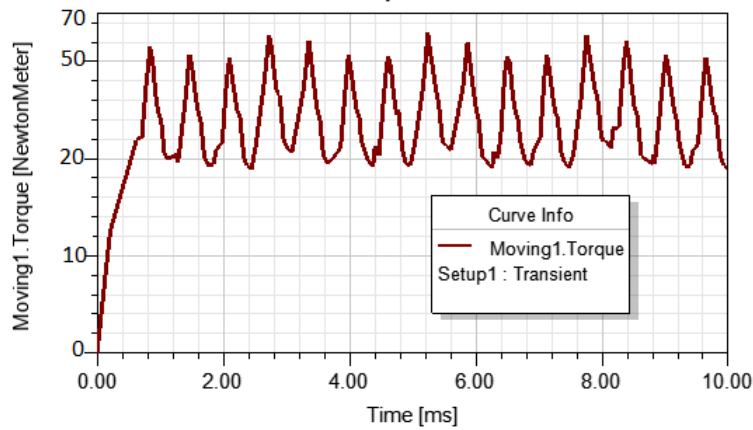
Performans değerlendirmesinde her çalışma hızı için gerekli torku elde etmek amacıyla 330 Vdc sabit giriş voltajı altında açma açısı ve kapatma açısı belirlenir. Şekil 10 ve 11’de, 13.300 d/d’de akımın dalga biçimi ve tork dalga biçimi verilmiştir. Şekil 13’te görüldüğü gibi, histerezis akım kontrolü 13.300 d/d’de kullanılır ve çıkış torku yaklaşık 142 Nm. Şekil 12’de, 46.000 d/d’de dalga formları verilmiştir. Bu şekilde gerilim tek darbe kontrolü 46.000 d/d’de kullanılmıştır. Yüksek hız bölgesinde, akım yükseltilebilir ve devir arttıkça açılma açısı erken bir zamanlamaya ayarlanarak tork elde edilebilir. Negatif torku önlemek için kapatma açısı da rotor ve statorun hizalanmış konumundan daha erken bir zamanlamaya ayarlanır.



Şekil 11. 13300 d/d tork ve akım dalga formu



Şekil 12. 13300 d/d tork grafiği



Şekil 13. 46000 d/d tork ve akım dalga formu

Tasarlanan motorların hacimlerinin karşılaştırması Tablo 6'da verilmiştir. Karşılaştırma 1.0 p.u'luk ARM hacmine dayanmaktadır. KMSM hacim açısından ARM'den daha küçüktür. Rotor çapı, maksimum hızda mekanik mukavemet sınırlamasına bağlı olarak belirlenir. Stator çapı, belirlenen akım yoğunluğunun, maksimum torkun istenilen devir sayısının ve akım değerinin elde edildiği yuva alanına göre belirlenir. KMSM, en küçük motor hacmine sahip olmuştur. Çünkü bu motorda yuva alanı kutuplar/yuvalar ve konsantre sargı kombinasyonu ile kolayca sabitlenebilir, mıknatıs torku kullanılarak gerekli tork kolayca elde edilebilir.

Tablo 4. Motor hacimlerinin karşılaştırılması

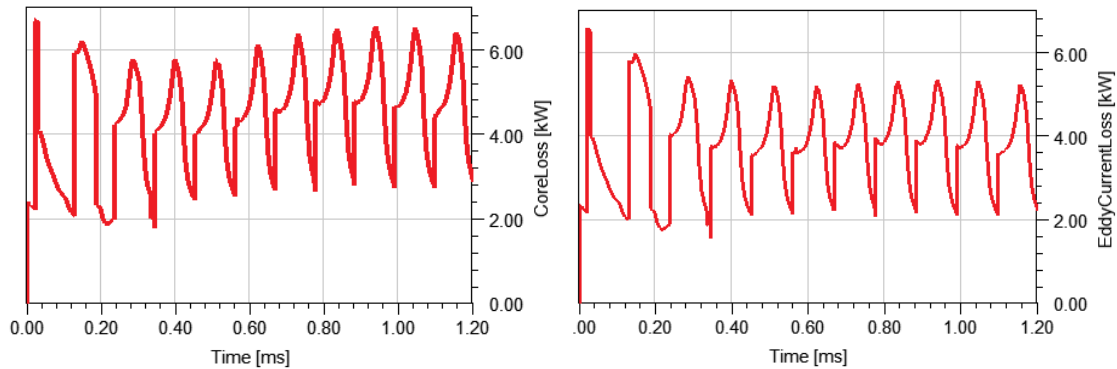
Parametre	KMSM	ARM
Genişlik (mm)	217x75	230x75
Motor hacmi (p.u.)	0.91	1.23
Akım yoğunluğu (A/mm^2)	24.6	26.5

Her iki motorun devir sayısına bağlı olarak elde edilen çıkış gücü özellikleri Tablo 7'de verilmiştir. KMSM'de 13300 d/d'de 150 Nm'lik maksimum tork ve 46.000 d/d'de 110 kW'lık çıkış gücü elde edilmiştir. ARM'de, çıkış torku 13.300 d/d'de 14 ve 46.000 d/d'de 142 Nm'dir. Çıkış gücü, gerekli olan 110 kW çıkış gücünden biraz daha düşük olsa da açılı ve dönüş açısı optimize edilerek gerekli tork elde edilebilir.

Tablo 5. Motorların çıkış değerlerinin karşılaştırılması

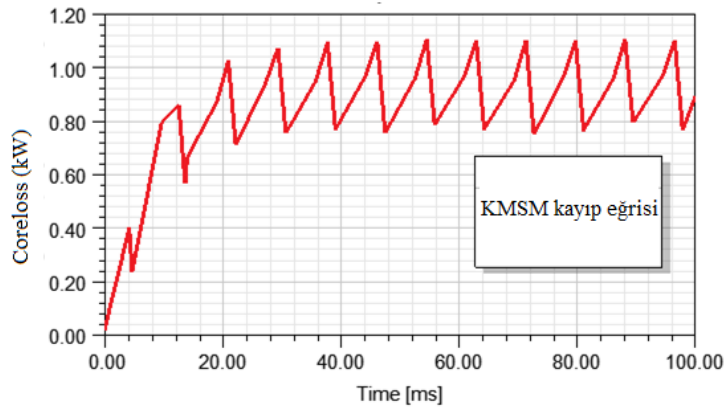
Devir-Hız	Parametre	KMSM	ARM
13300 d/d	Tork (Nm)	150	142
46000 d/d	Tork (Nm)	38.4	32.1
46000 d/d	Çıkış gücü (kW)	110	104.6

Çalışmanın bu kısmında 13.300 d/d taban hızında ve 46.000 d/d maksimum hızda kayıp ve verim değerleri analiz edilmiştir. Şekil 15'te, ARM motorunun nüvesinde meydana gelen kayıplar sunulmuştur. KMSM'deki çekirdek kaybı ve girdap akım kaybı çok daha düşük olmuştur. Çünkü giriş akımı ve sarım sayısı, sabit mıknatıs kullanımından ve küçük boyutlu motor hacminden dolayı düşüktür. ARM ve KMSM karşılaştırıldığında ARM'de çekirdek kaybı fazla olmuştur.



Şekil 14. ARM'nin 46000 d/d'daki nüve ve girdap akım kaybı

KMSM'de nominal devir hızında girdap akım kayıpları yok denecek kadar az olmuştur. Nüve kayıp eğrisi Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 15. KMSM için nüve kayıp eğrisi

Girdap akımı kaybını azaltmak için mıknatıs katmanlarının sayısı artırılmalıdır. Tasarımda, mıknatıs 16 katmana bölünerek mıknatıs girdap akımı kaybı bastırılmıştır. Bununla birlikte, mıknatısta termal demanyetizasyonu önlemek için girdap akımı kaybında daha fazla azalma gereklidir.

ARM'de, rotorun çıkıntılı kutup yapısı nedeniyle rüzgâr kaybı 46.000 d/d'de önemli ölçüde artmıştır. Örtü veya silindirik rotor yapısı kullanılarak rüzgâr kaybı azaltılabilir. Tablo 8'de, motorların verim, tork ve güçlerinin karşılaştırması sunulmuştur. KMSM 13.300 d/d'de % 96.3 ve 46.000 d/d'de %85.4 ile en yüksek verimliliğe sahip olmuştur. ARM, 13.300 d/d'de %93.2 ve 46.000 d/d'de %79.1 verimliliğe ulaşmıştır.

Tablo 6. Motor performans değerlerinin karşılaştırılması

Motor	Devir-hız	Verimlilik (%)	Tork (Nm)	Motor boyutu (p.u.)
KMSM	13300 d/d	96.3	150	0.91
ARM	13300 d/d	93.2	142	1.23
KMSM	46000 d/d	85.4	38.4	
ARM	46000 d/d	79.1	32.1	

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, EA çekiş uygulamalarında yüksek hızlı motor olarak kullanıma uygun motor tipi, motor hacmi, motorun mekanik dayanımı, çıkış gücü, kayıp ve verimlilik açısından iki motor tipi incelenmiştir. KMSM ve ARM 110 kW çıkış gücü, 150 Nm maksimum tork ve 46.000 d/d maksimum hız elde etmek amacıyla tasarlanmış ve motorların performansları SEY tabanlı ANSYS-Rmxpert ile analiz edilmiştir. Tablo 8'de verilen karşılaştırma sonuçlarına göre KMSM motorunun hacminin daha küçük ve motor verimliliği daha yüksek olmuştur. Bu motor için mıknatıs katmanlarının sayısının artırılması ve dağıtılmış sargı uygulanması harmonik akıyı azaltarak 46.000 d/d'de mıknatısın girdap akımı kaybını azalttığı görülmüştür. Burada artan maliyeti ve daha büyük motor boyutu arasındaki denge göz önünde bulundurularak tasarlanmaları gerekmektedir. ARM, rotorunun yüksek mekanik dayanımı ve yüksek hızlı devir için uygun olduğu görülmüştür. ARM'nin motor hacmi, KMS'ninkinden daha büyük olmuştur. ARM'nin verimliliği, 13.300 d/d'de yüksek yük koşullarında KMSM'den daha düşük olmasına rağmen, örtü veya silindirik rotor yapısı kullanılarak rüzgâr kaybının azaltılmasıyla 46.000 d/d'deki verimliliğinin artırılabilirdiği görülmüştür.

Çıkar Çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazarların Katkı Oranı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamışlardır.

Etik Beyan

Bu çalışmada sunulan veri, bilgi ve belgeler akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde edilmiştir.

Finansal Destek

Bu araştırma için herhangi bir fon sağlayan kurumdan / sektörden hibe alınmamıştır.

Kaynakça

Besharati, M., Widmer, J., Atkinson, G., Pickert, V., Washington, J. Super-high-speed switched reluctance motor for automotive traction. *In Proceedings of the 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, QC, Canada, 20–24 September 2015, pp. 5241–5248.

Bozhidar Stoev, George Todorov, Plamen Rizorv, Gerasimos Pagiatakis, Leonidas Dritdas—Finite element analysis of rotating electrical machines- an educational approach, *IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON) 2017*.

Bouscayrol A., Boulon L., Hofman T., Chan C.C., Special Section on Advanced Powertrains for More Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 6 (3), 995 - 997, 2016.

Chau, K.T., Chan, C.C., Liu, C. Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008, 55, 2246–2257.

Chan-Bae Park, Geochul Jeong, —Design and Analysis of Magnetic-Geared Permanent Magnet Synchronous Motor for Driving Electric Vehicles, *IEEE - International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2017.

Emma Arfa Grunditz, Torbjörn Thiringer, —Performance Analysis of Current BEVs Based on a Comprehensive Review of Specifications, *IEEE transactions on transportation electrification*, vol. 2, no. 3, 2016.

K. Yamano, S. Morimoto, M. Sanada, Y. Inoue, —Basic Study on Design of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor Using Design Assist System of PMSM, *IEEE - International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2016.

Lee J.H., Kim D., Song J., Jung S., Kim Y., Design of 100kW Propulsion Motor for Electric Conversion Vehicle Based on Vehicle Driving Performance Simulation, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Busan-Korea (South)*, 412-416, 1-4, June, 2016.

Liu J., Gong C., Wu Z., Influence Research of Rotor Structure Parameters on the Performance of IPMSM, *20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sydney-Australia, 1-5, 11-14 August, 2017.

Mr. A. Rakesh Kumar, Dr. Sanjeevikumar Padmanaban, — Electric Vehicles for India: Overview and Challenges, *IEEE India Info*. Vol. 14 No. 2, 2019.

Özüpak Y. Efficiency Analysis of BLDC for variable magnetic field. 2022. *MANAS Journal of Motorering*, Volume 10 (Issue 1) 2022.

Özüpak, Y., Investigation of the Effect of Design Parameters of Small Brushless DC Motors on Motor Performance by Finite Element Method, *Brilliant Motorering*, 3(2022), 4658. <https://doi.org/10.36937/ben.2022.4658>.

Özüpak, Y. (2022). Re-Analysis of Internal Permanent Magnet Brushless DC Motor With Increased Magnet Dimensions. *Ejoms International Journal*, 6(22), 353–365. Retrieved from <https://ejoms.org/index.php/ejoms/article/view/294>

Yamazaki, K., Kumagai, M., Ikemi, T., Ohki, S. A Novel Rotor Design of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors to Cope with Both Maximum Torque and Iron-Loss Reduction. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2013, 49, 2478–2486.

Zhu S., Hu Y., Liu C., Wang K., Iron Loss and Efficiency Analysis of Interior PM Machines for Electric Vehicle Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65 (1), 114-124, 2018.