

Anahtarlama Relüktans Makinanın Fiziksel Modeli ve Performans Analizi

Eyyüp ÖKSÜZTEPE¹

¹Fırat Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Havacılık Elektrik Elektronik Bölümü, Elazığ.

Sorumlu yazar e-posta: eoksuztepe@firat.edu.tr

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5446-4308>

Geliş Tarihi: 07.03.2023

Kabul Tarihi: 24.06.2023

Anahtar kelimeler

Anahtarlama relüktans motor; Anahtarlama relüktans generatör; Sonlu elemanlar analizi; Elektrik makinalarının modellenmesi; Matlab Simscape Toolbox.

Öz

Son yıllarda ulaşım araçlarında elektrik makinelerin hem itki hem de generatör olarak kullanılması gittikçe yaygınlaşmaktadır. Ulaşım aracının özel gereksinimleri ve çalışma şartları hangi elektrik makinasının kullanılmasının uygun olacağını belirlemektedir. Zorlu çalışma şartlarında, kullanılan elektrik makinasının performans analizi gerçek ortam yerine bilgisayar ortamında gerçekleştirilmesi prototip imalat giderlerinin azaltılması bakımından gereklidir. Bu çalışmada zorlu çalışma şartlarının olduğu ulaşım araçlarında hata toleransı yüksek olması, basit yapı ve yüksek verime sahip olması nedeniyle Anahtarlama Relüktans Makina ele alınmış ve fiziksel modeli Matlab Simscape Toolbox'da modellenmiştir. Sonlu Elemanlar Analizi'den elde edilen veriler kullanılarak modellenen makina hem motor hem de generatör olarak kontrol edilmiş ve performans analizi gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçları ile önerilen yöntemin doğruluğu ispatlanmıştır.

Physical Model and Performance Analysis of Switched Reluctance Machine

Keywords

Switched reluctance motor; Switched reluctance generator; Finite Element analysis; Modeling of electrical machines; Matlab Simscape Toolbox.

Abstract

In recent years, the use of electrical machines as both propulsion and generator in transportation vehicles has become increasingly common. The special requirements and operating conditions of the transport vehicle determine which electrical machine is suitable to use. In harsh working conditions, performing the performance analysis of the electrical machine used in the computer environment instead of the real environment is necessary in order to reduce the prototype manufacturing costs. In this study, a Switched Reluctance Machine has been discussed and its physical model has been modeled in Matlab Simscape Toolbox, due to its high fault tolerance, simple structure and high efficiency in transportation vehicles with difficult operating conditions. Using the data obtained from Finite Element Analysis, the modeled machine was controlled as both engine and generator, and performance analysis was carried out. The accuracy of the proposed method has been proven by the simulation results.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Son yıllarda ulaşım araçlarında elektrik makinelerinin kullanımı, fosil yakıtların bitmeye yüz tutması ve maliyetlerinin artması, karbon salınımlarının neden olduğu küresel ısınma, endüstrideki otomatik sistemlerin yaygınlaşması ve daha verimli sistemlerin kullanılma isteği nedeniyle yaygınlaşmaktadır (Kocabey, 2018). Elektrikli trenlerle başlayan bu eğilim, elektrikli otomobiller ve elektrikli hava araçları ile devam etmektedir. Elektrikli tren ve otomobillerde

kullanılan elektrik makineleri ile itme kuvveti elde edildiği gibi yokuş aşağı inişlerde rejeneratif çalışma ile kinetik enerjiden elektrik enerjisi de elde edilip güç kaynağına aktarılabilir. İnsansız hava araçlarında itki doğrudan elektrik makinasına bağlanan pervanelerle sağlanır (Elmas ve Alkan 2023). Yolcu uçaklarında itkinin elektrik makinası ile elde edildiği uçaklar, deneme amaçlı yapılsalar da, şu an itibarı ile jet yakıtının, batarya enerji yoğunluğuna göre daha avantajlı olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmamaktadır. Bu nedenle

günümüzde ticari taşımacılıkta kullanılan uçak üretici firmaları, sistemlerde mekanik, hidrolik, pnömatik gücün yerine elektrik gücünün daha yaygın kullanıldığı Boeing 787, Airbus 380 gibi uçaklara ilgi duymaktadır.

Ulaşım araçlarında yaygın olarak, yüksek verim, yüksek güç yoğunluğu, düşük atalet gibi üstünlüklerinden dolayı sabit mıknatıslı senkron makinalar tercih edilmektedir (Akar vd. 2021). Ancak bu makinaların rotorunda bulunan nadir toprak elementlerinden yapılmış mıknatısların zorlu çalışma şartlarında manyetik özelliklerinin değişmesi, sıcaklık ve ters manyetik alan ile manyetikliğini yitirmesi, hammaddesinin belirli bir ülkenin elinde bulunması gibi nedenlerle bilim dünyası ulaşım araçlarında farklı elektrik makinalarının kullanılmasına ilgi duymaktadır. Aslında her bir elektrik makinasının kullanım yeri, kullanım şekli, çalıştığı hız, çalışma gerilimi gibi etkenler göz önüne alındığında elektrik makinaları arasında birbirine rekabet edebilecek özellikleri ön plana çıkmaktadır. Anahtarlamalı relüktans makinalar (ARM'ler), basit yapısı, rotorunda sargı veya mıknatıs bulunmaması, yüksek hızlarda çalışabilme özellikleri, düşük atalet, verimlerinin indüksiyon makinalara göre yüksek olması gibi üstünlükleri nedeniyle özellikle zorlu çalışma şartlarında tercih edilmektedir. ARM'ler özellikle sıcaklığın yüksek olduğu, alan zayıflatma nedeniyle mıknatısların demanyetize olması ihtimalinin yüksek olduğu havacılık uygulamalarında hem motor hem de generatör olarak kullanılmaktadır. Havacılık uygulamalarının yanı sıra ARM'ler teker içi otomobil tahrik sistemlerinde de önemli bir üstünlük sağlamaktadır (Öksüztepe 2018). Ayrıca faz sargılarının birbirinden bağımsız kontrol edilmesinden dolayı, herhangi bir fazda meydana gelen arıza durumlarında, hatalı fazın devre dışı bırakılarak çalışmasını sürdürebilmesi, özellikle havacılık uygulamalarında hata toleransı yüksek ARM'lerin çok büyük üstünlüğüdür. ARM'lerin en önemli dezavantajı ise moment dalgalanmalarının fazla olmasıdır, ancak büyük kütleli sistemlerde bu moment dalgalanmaları sönmülenebilmektedir. Ayrıca ARM'lerin tasarımında ve kontrol

sistemlerinde moment dalgalanmaları belirli oranda azaltılmaktadır (Önder vd. 2019).

ARM'ler hem stator hem de rotorunda çıkıntılı bulunan, manyetik devresindeki relüktans değişiminden enerji dönüşümü yapan makinalardır. Manyetik devreyi teşkil eden çekirdekdeki doymalar, ARM'lerin performansının belirlenmesi için yapılan modellerin akım değerine ve rotor konumuna göre değişmesine neden olmaktadır. ARM'lerin yapısı gereği bu değişimler doğrusal değildir ve modellenmesi zordur (Büyükbıçakçı ve Boz 2021). ARM'nin endüktans değişimi birçok çalışmada bir fonksiyon uydurularak modellenenir. Makina akısının veya endüktansların değişimi için yapay sinir ağları gibi modeller de kullanılabilir. Makina manyetik akısının veya endüktans değerlerinin konuma göre değişimi kolaylıkla laboratuvar test düzeneği ile ölçülebilir. Ancak akının veya endüktansın konuma ve akıma göre değişimini bir test düzeneği ile elde etmek özellikle büyük güçlü makinalarda kolay değildir. Büyük güçlü ARM'nin her bir konumunda sargılarından özellikle yüksek genlikli akımları geçirmek, büyük momentlerin oluşmasına ve rotorun bu momentlerle konumunun değişmemesini sağlayacak kilitli özel mekanizmalara ihtiyaç duyulmasına sebep olur. Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ile makina çekirdeğinin manyetik özellikleri tanımlanarak rotorun her bir konumunda ve akım değerinde makinanın manyetik akısı, sargı endüktansı ve momenti yüksek doğrulukta hesaplanır (Yetgin 2021). SEA'dan alınan verilerle sargı indüktanslarının değişimi, sargı manyetik akısının değişimi ve moment değişimi belirlenir ve modellenenir.

ARM'ler için yapılan tek bir matematiksel model ile hem motor çalışma hem de generatör çalışma sağlanamaz. Bir ARM'nin zorlu çalışma şartları, deneysel çalışmalarda oluşturulması çok zor olduğu gibi, çoğu zaman da mümkün değildir. Matlab Simulink'de kullanılacak makinanın dört çalışma bölgesinde çalıştırılmasının sağlandığı elektriksel modeller mevcut olmasına rağmen, bu hazır modellerde manyetik doyma dikkate

alınmayıp, farklı kutup sayılarına, faz sayılarına ve geometrilere sahip ARM'ler için kullanılamamaktadır. Bu nedenle özel ARM'lerin hem motor hem de generatör olarak çalıştırıldığı, zorlu şartların modellenebildiği model oluşturmak bir gereklilik olmaktadır.

Bu çalışmada boyutları optimize edilen, dış rotorlu bir ARM'nin SEA'dan elde edilen veriler kullanılarak Matlab Simscape'de fiziksel modeli geliştirilmiş ve hem motor hem de generatör olarak performans analizi gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntem ile çok farklı geometrilere sahip tüm ARM'ler modellenebilir ve makinanın performans analizi gerçekleştirilebilir.

2. Materyal ve Metot

ARM'nin modellenmesi için öncelikle boyutları optimize edilmiş veya bir firma tarafından üretilmiş makina çekirdek malzemesinin B-H eğrisi, boyutları ve sargılarının sarım sayısı girilerek her bir rotor konumu ve akım değeri için *Maxwell Manyeto Statik* SEA gerçekleştirilir (Özupak 2022). Bu analizler ile akım ve rotor konumuna göre sargı halkalanma akıları ve üretilen momentlerden oluşan bir veri kümesi elde edilir. Bu veri kümesi ve makinanın matematiksel denklemleri de kullanılarak ARM modellenir.

2.1 Dış rotorlu ARM'nin yapısı ve Matematiksel Modeli

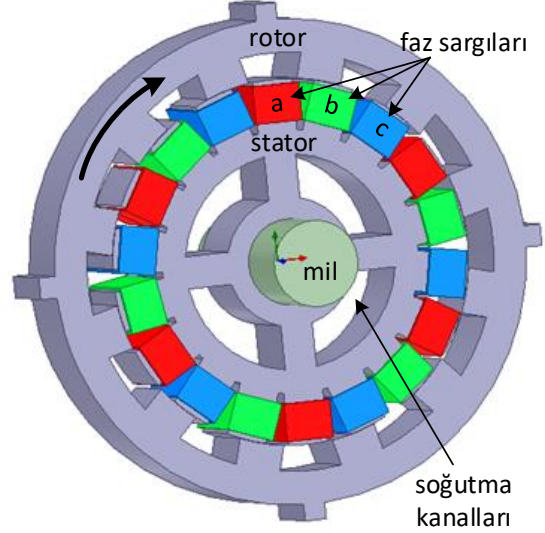
Üç fazlı, dış rotorlu, 18 stator, 12 rotor kutup sayısına sahip ARM'nin yapısı şekil 1'de verilmiştir. ARM'nin bir fazında her biri 46 sarımdan oluşmuş 6 tane toplu sargı bulunmaktadır. ARM'lerde toplu sargı kullanıldığından dolayı sargıların ortak endüktansı ihmal edilebilecek kadar küçük olmaktadır. Stator ve rotor 0.5 mm M19 silisyumlu çelik saçların preslenmesi ile oluşturulmuştur. ARM'nin bir faz gerilim denklemi (1)'de verilmiştir.

$$v_f = R_f \cdot i_f + \frac{d\lambda_f(i_f, \theta_r)}{dt} \quad (1)$$

Burada R_f bir faza ait sargının direnci, $\lambda_f(i_f, \theta_r)$ bir faz sargısına ait manyetik akı olup hem i_f faz akımına hem de θ_r rotor konumuna göre

değişmektedir. Manyetik akının kısmi integrali alındığında faz gerilimi (2) ile ifade edilir.

$$v_f = R_f \cdot i_f + \frac{\partial \lambda_f}{\partial i_f} \cdot \frac{di_f}{dt} + \frac{\partial \lambda_f}{\partial \theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \quad (2)$$



Şekil 1. ARM'nin yapısı

Rotor hızı ω_r (3)'de, bir faz endüktansı (4)'de verilmiştir.

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (3)$$

$$L_f(i_f, \theta_r) = \frac{d\lambda_f(i_f, \theta_r)}{di_f} \quad (4)$$

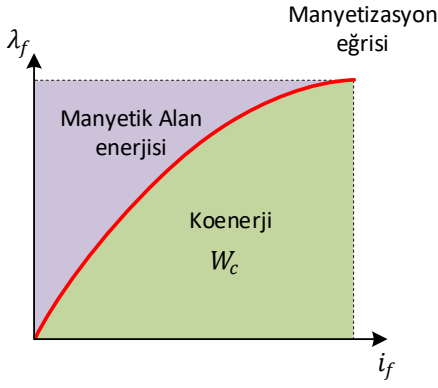
Arm'nin sargılarında indüklenen gerilim, e_f , (5)'de verilmiştir.

$$e_f = \frac{\partial \lambda_f}{\partial \theta_r} \cdot \omega_r \quad (5)$$

ARM'nin ürettiği moment, W_c koenerjinin rotor konumuna göre türevi olarak (6) ile elde edilir.

$$T_f = \frac{\partial W_c(\theta_r)}{\partial \theta_r} \quad (6)$$

Koenerji, Şekil 2'de görüldüğü gibi manyetizasyon eğrisinin altında kalan alan olarak (7) ile tanımlanıp, akıma göre kullanılan malzemede oluşan doymayla artmaktadır. Bu nedenle ARM'ler manyetik doymanın olduğu şartlarda daha fazla moment üretmektedir.



Şekil 2. ARM'nin manyetizasyon eğrisi

$$W_c(i_f, \theta_r) = \int_0^{i_f} \lambda_f(i_f, \theta_r) \cdot di_f \quad (7)$$

ARM'nin her bir sargısının ürettiği moment (8) ile ifade edilir.

$$T_f(i_f, \theta_r) = \int_0^{i_f} \frac{\partial \lambda_f(i_f, \theta_r)}{\partial \theta_r} \cdot di_f \quad (8)$$

F_s faz sayısına sahip bir ARM'nin toplam ürettiği moment (9) ile bulunur.

$$T_e(i_f, \theta_r) = \sum_{j=1}^{F_s} T_f(j) \quad (9)$$

ARM'nin mekanik denklemi (10)'da verilmiştir.

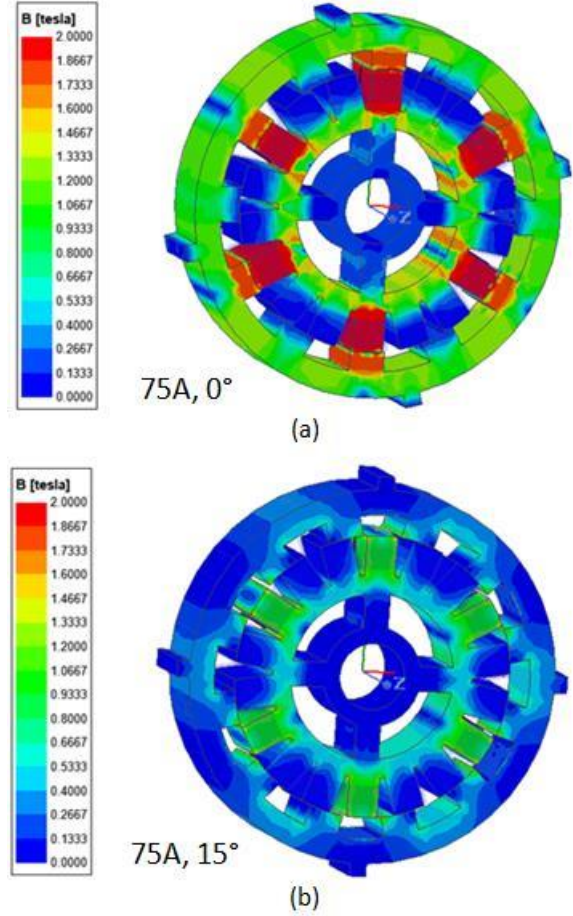
$$J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_y - B \cdot \omega_m \quad (10)$$

Burada ω_m rad/s olarak mekanik hız, T_e Nm olarak ARM'nin ürettiği moment, T_y yük momenti, B sürtünme katsayısı, J atalet momentidir (Şahin 2022).

2.2 ARM'nin Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar analizi ile tasarlanan makinanın herhangi bir konumda ve verilen akım değerlerindeki halkalanma akıları, sargı endüktansları ve üretilen moment kullanılan malzemenin manyetik özelliklerine ve boyutlarına göre hesaplanır (Omaç et al. 2018). Üç fazlı ARM'nin *manyeto statik analizi* ile birer derece rotor konum ve beşer amper sargı akım aralıkları için bir sargısının akı değişimleri ve üretilen momentler elde edilmiştir. Rotor ve stator kutuplarının çakışık olduğu konum 0° , stator

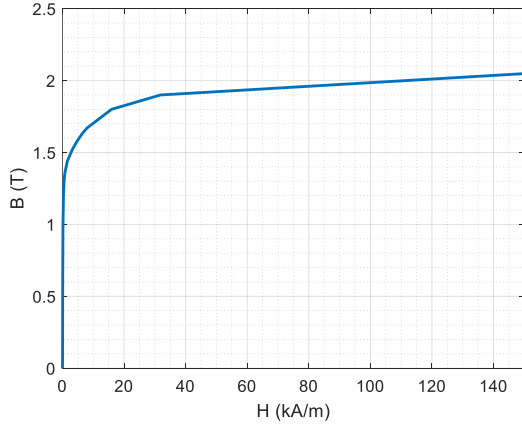
kutbunun iki rotor kutbunun tam ortasında olduğu konum 15° olarak kabul edilmiş ve bu konumlardaki manyetik alan yoğunlukları Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3.a'da rotor ve stator kutupları çakışık rotor konumunda, 75A akımda manyetik indüksiyon yoğunluğunun 1.7 ile 2T arasında değiştiği görülmektedir. Rotor kutbu ile stator kutbunun çakışık olduğu bu konumda a faz sargısının endüktansı maksimum seviyesindedir.



Şekil 3. ARM'nin manyetik alan yoğunluğu

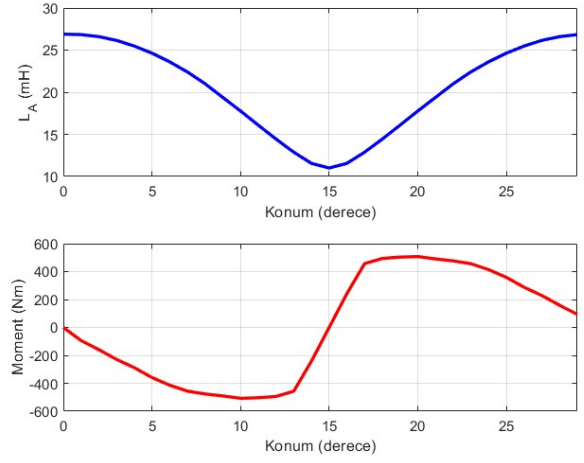
Rotor ve statorun üretildiği Şekil 4'de verilen M19 çeliğinin BH eğrisinden hem stator hem de rotor kutuplarının doyuma girdiği görülebilir. Şekil 3.b'de ise rotor ve stator kutuplarının çakışık olmadığı rotor konumunda ve A fazı sargılarından 75A akımın geçtiği durumdaki manyetik indüksiyon dağılımı verilmiştir. Şekilden stator kutuplarındaki manyetik indüksiyon değerinin yaklaşık 0.9 T değerinde olduğu, ancak rotor kutuplarındaki manyetik indüksiyon değerlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Rotor

konumunun çakışık olmadığı bu konumda A faz endüktansı ise minimum değerdedir. Her bir faz sargısından sırasıyla akımın geçmesiyle çalışan ARM'nin endüktansının hem rotor konumu hem de sargı akımıyla değişmesi, ARM'nin doğrusal olmayan bir özellik kazanmasına neden olmaktadır. Bu nedenle belirli adımlarla değiştirilen her bir rotor konumunda bir faz sargısından yine belirli adımlarla değiştirilen her bir akım değeri için endüktansın hesaplanabildiği Sonlu Elemanlar Analizinden akılar elde edilmelidir. Yapılan her bir Sonlu Elemanlar Analizinden ARM'nin ürettiği moment değerleri de elde edilmesi gerekir.



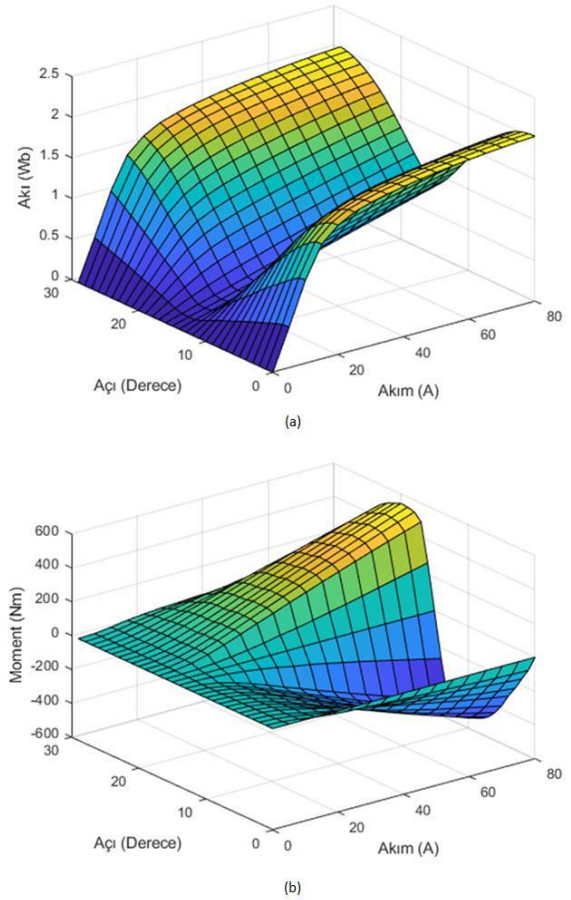
Şekil 4. M19 çeliğin BH eğrisi

ARM'nin bir faz sargılarından geçirilen 75A akımda rotor konumuna göre endüktans ve moment değişimi sonlu elemanlar *manyeto statik analiz* sonuçları Şekil 5'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre A sargısına ait endüktansın azaldığı konumlarda negatif yönde bir moment üretilirken, endüktansın arttığı konumlarda pozitif yönde bir moment üretildiği görülmektedir. Böylece ARM motor olarak pozitif yönde çalışıyorsa pozitif momentin üretildiği konumlarda, negatif yönde çalışıyorsa negatif momentin üretildiği konumlarda sargı enerjilendirilmelidir. ARM generatör olarak pozitif yönde dönerken negatif momentin üretildiği konumlarda, negatif yönde dönüyorsa pozitif momentin üretildiği konumlarda sargı uyarılmalıdır.



Şekil 5. 75A'de rotor konumuna göre endüktans ve moment değişimi

Bu çalışmada üç fazlı dış rotorlu ARM'nin sıfırdan başlayarak 30 dereceye kadar birer derece aralıklarla ve 5A'den başlayıp 80A'e kadar 5A aralıklarla akı ve moment değişimleri elde edilmiş ve sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. ARM'nin akım ve rotor konumuna göre manyetik akı ve moment değişimi

Şekil 6'da verilen sonuçlar tek bir faz için elde edilmiştir ve ARM üç fazlı olduğundan 10 derece faz farkı dikkate alınarak diğer sargılara ait moment, akı ve endüktans değerleri elde edilir. Tasarlanan ARM'nin elektriksel ve mekanik parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

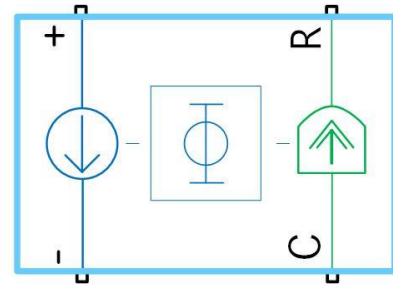
Çizelge 1. ARM'nin elektriksel ve mekanik parametreleri

Parametre	Değer
Faz sayısı	3
Güç	25 Kw
Hız	3000 dev/dk
Maksimum moment	500 Nm
Minimum endüktans (75A için)	7.94 mH
Maksimum endüktans (75A için)	26.7 mH
Bir faz sargı direnci	0.5 Ω
Sürtünme katsayısı, B	0.01
Atalet momenti, J	0.9
Rotor dış çapı	450 mm
Hava aralığı	0.5 mm
Stator kutup açısı	12.30°
Rotor kutup açısı	12.81°
Paket boyu	100 mm
Stator boyunduruk uzunluğu	82.31 mm
Rotor boyunduruk uzunluğu	19.94 mm
Bir faz toplam sarım sayısı	270

2.3. SEY verilerinin kullanıldığı ARM modeli

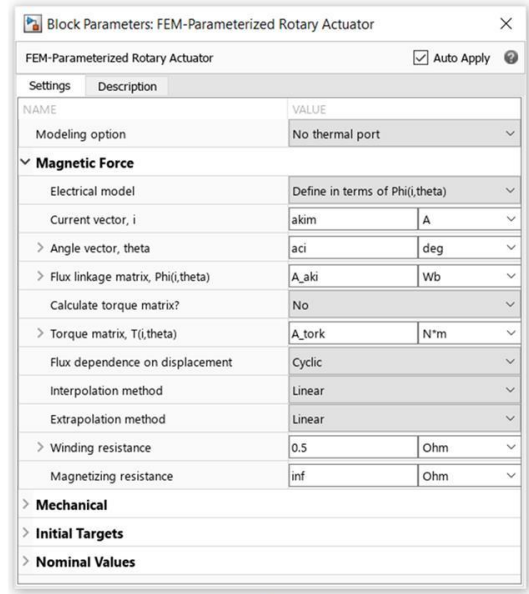
18/12 kutup sayısına sahip dış rotorlu ARM'nin her bir fazı için *Matlab Simscape Toolbox*'da bulunan bir *FEM-Parameterized Rotary Actuator* kullanılarak modellenir. Şekil 7'de *FEM-Parameterized Rotary Actuator* görseli ve blok parametreleri verilmiştir.

Blok parametrelerinde SEA'dan elde edilmiş akım vektörü, açı vektörü ve bunlara karşılık gelen akı ve moment matrisleri, sargı direnci girilerek ARM'nin bir fazı modellenir. Modellenmesi istenen ARM'nin faz sayısı kadar *FEM-Parameterized Rotary Actuator* kullanılır. *FEM-Parameterized Rotary Actuator*'un pozitif ve negatif terminallerine bir gerilim uygulandığında kaynaktan çekilen akıma karşılık C terminaline göre üretilen moment, açı ve hız bilgileri R portundan alınabilir. Aynı zamanda R terminalinden uygulanan bir mekanik enerji ile pozitif negatif terminallerinden gerilim elde edilir.



FEM-Parameterized Rotary Actuator

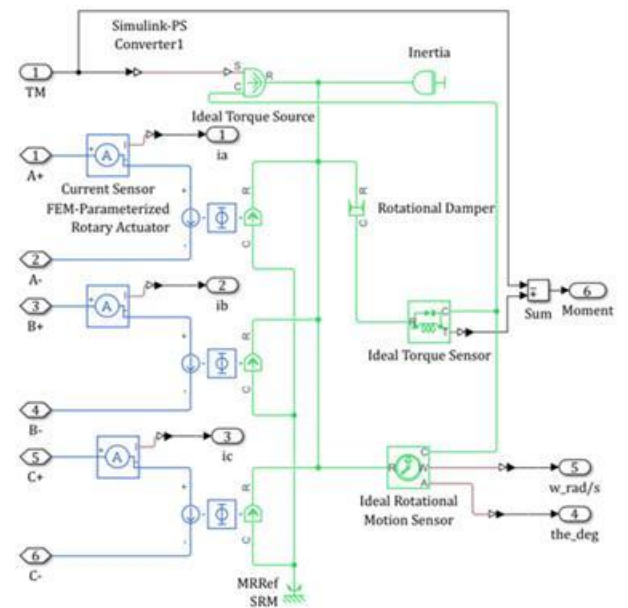
(a)



(b)

Şekil 7. Simscape SEA parametreli dönen aktuatör

Üç fazlı dış rotorlu ARM'nin Matlab Simscape modeli Şekil 8'de verilmiştir.

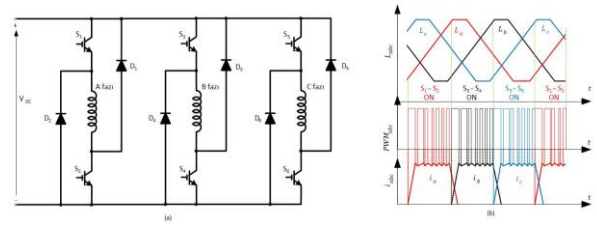


Şekil 8. ARM'nin Matlab Simscape modeli

Verilen makina modelinde, motor modda giriş olarak yük momenti, elektrik terminallerden uygulanan gerilim iken, model çıkışı makinanın çektiği faz akımları, rotor hızı, rotor konumu olmaktadır. Generatör modda makina çalışırken model girişi moment iken, çıkışı elektriksel portlardan gerilim, rotor hızı ve konumu olmaktadır. Makinaya *Ideal Torque Source* yerine *Ideal Speed Angular Velocity Source* bağlayarak makinaya giriş olarak moment yerine açısal hız da verilebilir.

3. Bulgular

Matlab Simscape'de modellenen 18 stator, 12 rotor kutbuna sahip üç fazlı dış rotorlu ARM, hem motor modda hem de generatör modda çalıştırılması için, mutlaka bir sürücüyü ihtiyaç duyar. ARM'nin kontrolünde yaygın olarak kullanılan sürücü, Şekil 9.a'da gösterilen H köprü asimetrik konverter devresidir. ARM motor modunda pozitif yönde döndüğü durum için endüktans değeri yükselen sargı enerjilendirilir. Bu durum Şekil 9.b'de gösterilmiştir. ARM'nin devir yönü sargılardan geçen akımın yönünden bağımsız olup, sargıların uyarım sırasına göre değiştirilir. ARM generatör modda pozitif yönde dönerken endüktans değeri düşen sargı uyarılır. Hem motor modunda üretilen moment hem de generatör modunda üretilen güç, sargılara uygulanan PWM'in görev periyodu ile ayarlanır.

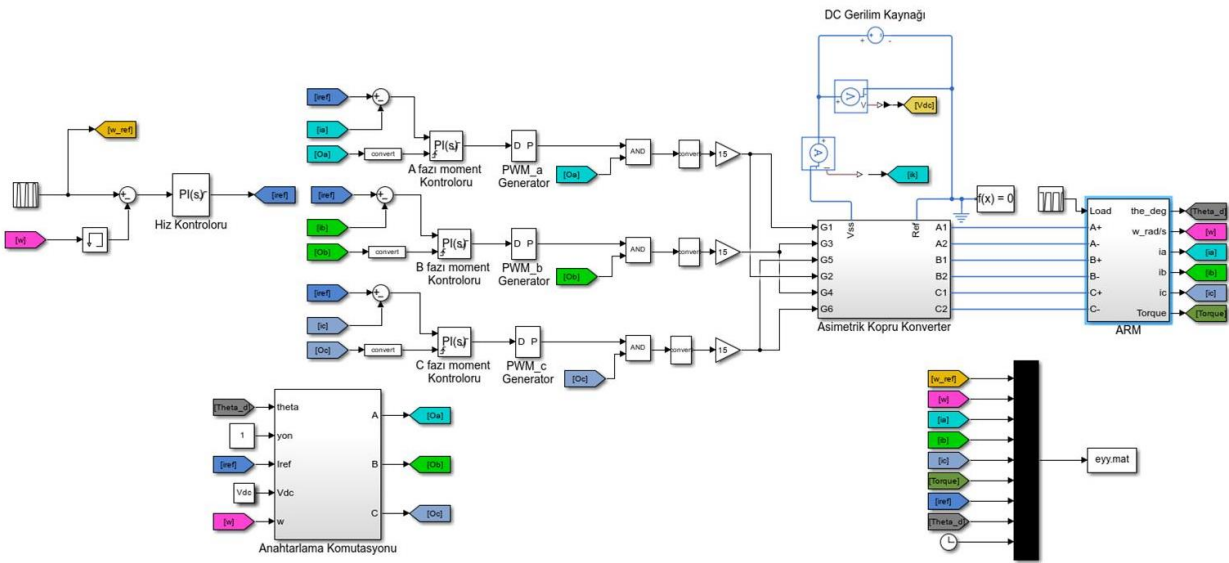


Şekil 9. ARM'nin sürücü devresi ve akım kontrolü

Bu çalışmada modellenen ARM'nin performans analizi motor mod ve generatör mod için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

3.1. ARM'nin motor olarak performans sonuçları

ARM'nin motor modunda çalıştığı Matlab Simscape modeli Şekil 10'da verilmiştir. Verilen referans hız rotor hızı ile karşılaştırılarak hata sinyaline karşılık gelen referans akım değeri, PI kontrolöründen oluşmuş hız kontrolcüsü tarafından elde edilir. Referans akım ile rotor konumu, rotor hızı ve referans akıma göre komütasyon bloğunun aktif ettiği faza ait gerçek akım karşılaştırılır. Elde edilen akım hatası P'dan oluşan moment kontrolcüsü tarafından PWM üretimi için görev periyoduna dönüştürülür. PWM üretici, verilen görev periyoduna göre ilgili faz sargılarını enerjilendiren IGBT geyt sinyallerini oluşturur. ARM'nin her bir sargısı birbirinden bağımsız kontrol edildiğinden dolayı, komütasyon bloğu tarafından aktif edilen faza ait moment kontrolörünün integralinin sıfırlanması gerekir.

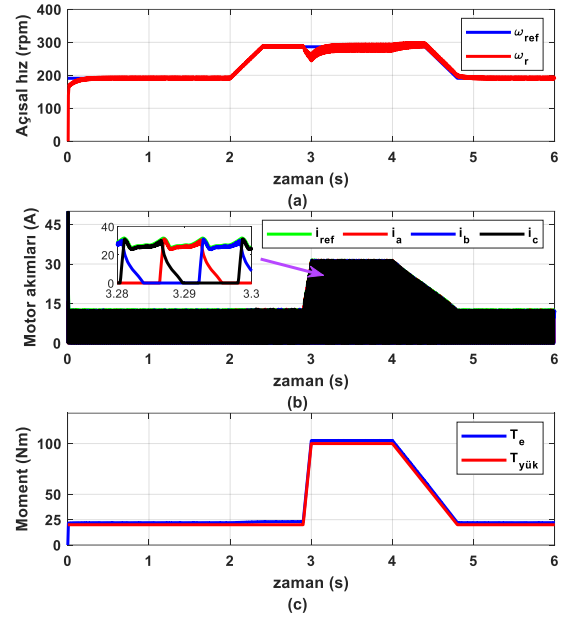


Şekil 10. ARM'nin motor olarak çalıştırıldığı Matlab Simscape benzetimi

ARM'nin besleme gerilimi 270V DC, PWM anahtarlama frekansı 10 khz, benzetim örnekleme zamanı *fixed time* 1e-6 s olarak seçilmiştir. ARM'nin motor çalışma modunda belirli hız ve yük momenti için elde edilen Matlab Simscape sonuçları Şekil 11'de verilmiştir. Şekil 11.a'da 0-2 s aralığında 200 rpm, 2-2.4s aralığında 200 rpm'den 300 rpm'e hız artışı, 2.4-4.4 s aralığında 300 rpm sabit hız, 4.4-4.8 s aralığında 300 rpm'den 200rpm hız azalması, 4.8-6 s aralığında ise 200 rpm sabit referans hız değişimi verilmiştir. ARM'nin rotor hızının bu referans hızı takip ettiği Şekil 11.a'dan görülmektedir. Bu hız senaryosu için referans akım ve faz akımları Şekil 11.b'de verilmiş ve faz akımlarının referans akımı takip ettiği görülmektedir. ARM'nin 6s süren bu motor çalışmasında değişken hızla birlikte Şekil 11.c'de verilen değişken yük momenti de ARM'ye uygulanmıştır. ARM'ye başlangıçta 25 Nm sabit yük uygulanırken, yük momenti 2.9-3 s aralığında 25 Nm'den 100 Nm'ye çıkarılmış, yük momenti 4-4.8 s aralığında tekrar 25 Nm'ye düşürülmüştür. ARM yük momentini karşılamak ve referans hızı takip etmek için DC gerilim kaynağından çektiği faz akımlarının yüksek yük momentlerinde arttığı, yük momentinin azaltıldığında ise faz akımlarının da azaldığı Şekil 11.b'de görülmektedir. Değişken yük momentlerinde ARM'nin referans hızı takip ettiği Şekil 11.a'dan görülmektedir. ARM'nin özellikle yüksek yük momentlerinde moment dalgalanmalarının daha fazla olduğu, Şekil 11.a'da motora uygulanan 100 Nm yük momentindeki hız dalgalanmalarından anlaşılmaktadır. ARM'nin yüzde olarak moment dalgalılığı denklem 11 ile hesaplanabilir.

$$T_d = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{ort}} * 100 \quad (11)$$

Burada T_d moment dalgalılığı, T_{max} maksimum moment, T_{min} minimum moment, T_{ort} ise ortalama momenttir. Yapılan simülasyonda 3.2s ile 4s arasında moment dalgalılığı %0.26 hesaplanmıştır. Bu moment dalgalılığı hızda %8.87 hız dalgalanmasına neden olmaktadır. Bu aralıkta makinanın verimi %90.83 hesaplanmıştır.

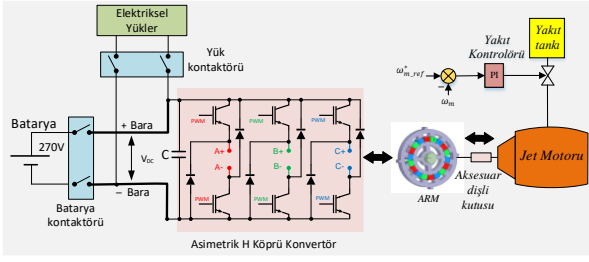


Şekil 11. ARM'nin motor çalışma benzetim sonuçları

Moment dalgalanmaları ARM'nin dezavantajı olarak bilinir ve iki yaklaşımla giderilmeye çalışılır. Birinci yaklaşımda, özel tasarım optimizasyonları kullanılarak ARM'nin boyutlarının optimize edilmesi sonucu moment dalgalanmalarının azaltılmasıdır (Ye et al. 2015). İkinci yaklaşımda ise farklı kontrol yöntemleri ile anahtarlama stratejilerinin uygulandığı ARM'nin moment dalgalanmalarının azaltılması yaklaşımıdır. (Sun et al. 2021).

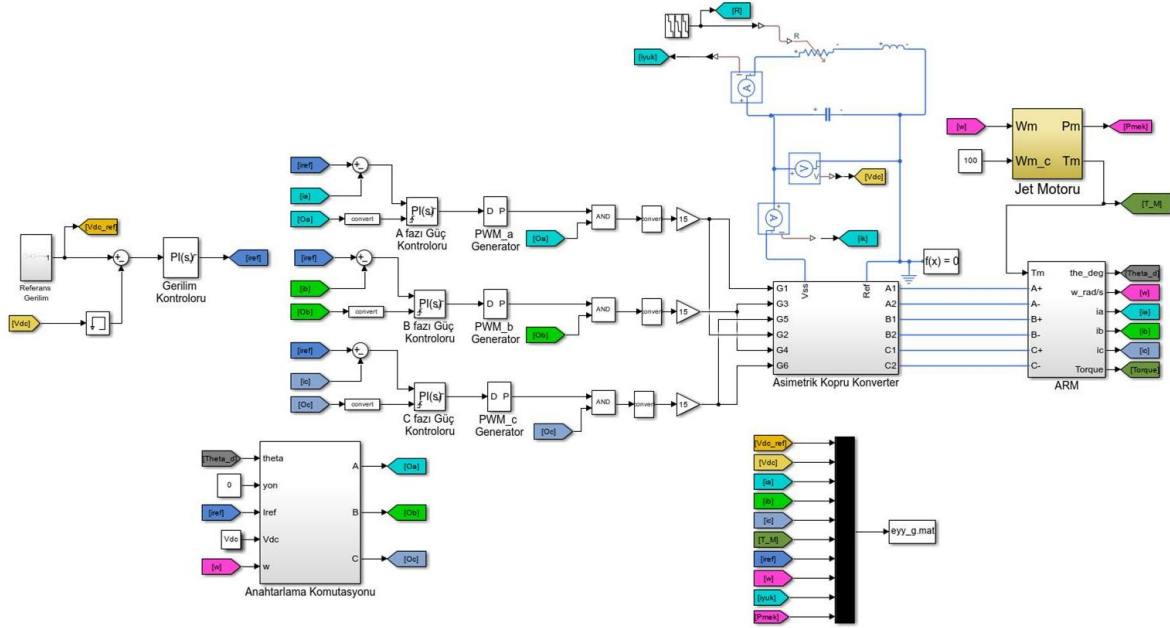
3.2. ARM'nin generatör olarak performans sonuçları

ARM'nin generatör modda çalışması için mekanik enerji girişine ihtiyaç duyulur. Bu mekanik enerji bir uçakta jet motoru, otomobilde içten yanmalı motor olacağı gibi araç kütlelerinin kinetik enerjisi ile de sağlanabilir. Bu çalışmada, bir jet motorunun mekanik enerjisi sağladığı düşünülmüş ve ARM'nin istenen hızı yakalaması için gerekli momenti üretecek bir kontrolör vasıtasıyla elde edilen moment, ARM'nin mekanik moment girişine uygulanmıştır. ARM'nin generatör mod çalışmasının açıklandığı blok diyagramı Şekil 12'de verilmiştir.



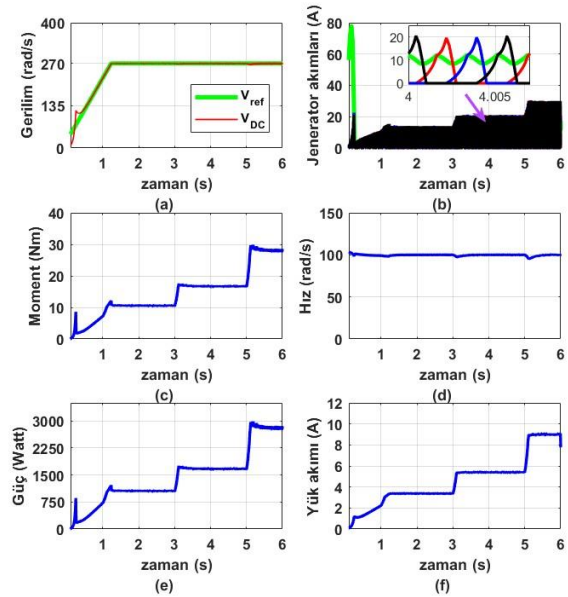
Şekil 12. ARM'nin generatör mod çalışma blok şeması

ARM generatör olarak çalışabilmesi için başlangıçta DC linke bağlı bir kondansatörün en az 24V'da şarjlı olması gereklidir. ARM sargılarının bu kondansatör gerilimi ile uyartılması sonucu, giriş olarak verilen mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülerek istenen referans geriliminin elde edilmesi sağlanır. ARM'nin generatör olarak kontrol edildiği Matlab Simscape benzetim modeli Şekil 13'de verilmiştir.



Şekil 13. ARM'nin generatör olarak çalıştırıldığı Matlab Simscape benzetimi

Generatör olarak çalışan ARM'nin benzetim modelinde referans gerilimi ile gerilim sensörü ile ölçülen DC link gerilimi karşılaştırılarak gerilim hatası elde edilir. Bu hata PI'dan oluşan gerilim kontrolcüsü tarafından, istenen gücü oluşturacak referans akım değeri belirlenir. Referans akım değeri ile makinadan ölçülen akım değeri arasındaki hataya göre PWM için görev periyodu güç kontrolcüsü tarafından sağlanır. Jet motoru tarafından pozitif yönde döndürülen ARM'nin hangi faz sargılarının aktif edileceği motor modda olduğu gibi komütasyon bloğu tarafından belirlenir. Pozitif yönde döndürülen rotorun konumuna göre komütasyon bloğu sargılarının endüktans değişiminin negatif olduğu konumlardaki fazi aktif eder. ARM'nin generatör olarak çalıştığı ve farklı yük akımlarının olduğu benzetim sonuçları Şekil 14'de verilmiştir.



Şekil 14. ARM'nin generatör çalışma benzetim sonuçları

Benzetimde ARM'nin dönüş hızı, jet motorunun ürettiği moment ile kontrol edilmekte olup, 100 rad/s olarak düşünülmüştür. ARM'den üretilen gerilim, uçak sistemlerinde yaygın kullanılan 270 V yüksek DC gerilim olarak seçilmiştir. ARM'nin hızı 100 rad/s'ye ulaştıktan sonra generatör olarak kontrol edilmiş, daha öncesinde PWM görev periyodu sıfır verilerek geçici yüksek akımlardan korunmuş olur. Yapılan benzetimde 270 V gerilim elde edildikten sonra, DC linke bağlanan ve Şekil 14.f'de verilen farklı yük akımlarına sahip, elektrik yükleriyle ARM yüklenmiştir. Bu senaryoya göre ARM'nin performans analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 14.a'da referans akım kondansatörün şarj gerilimi olan 24 V'dan 270 V'a çıkarıldığı ve ARM'nin çıkış geriliminin referans gerilimi yakaladığı görülmektedir. Generatör tarafından beslenen elektrik yüklerin çektiği akıma göre çıkış geriliminin 270 V'da sabit tutulduğu gerilim kontrolünün başarılı bir kontrol gerçekleştirdiği anlamına gelmektedir. Şekil 14.b generatör sargılarından geçen akımı göstermektedir. Bu şekilden generatör yüklendikçe sargılardan geçen akımın arttığı görülebilir. Aynı zamanda jet motorunun ARM'nin hızını şekil 14.d'de görüldüğü gibi 100 rad/s'de tutmak için daha fazla moment ürettiği şekil 14.c'den görülmektedir. Jet motorunun daha fazla momenti elde etmesi için daha fazla yakıt sarf edeceği unutulmamalıdır. Mekanik açısal hız ile momentin çarpımı mekanik güç olup, Şekil 14.e'de verilmiştir. Alınan sonuçlardan makinanın verimi, 2s ile 3s aralığında %86.30, 3s ile 5s aralığında %86,93, 5s ile 6s aralığında %86.74 olarak hesaplanmıştır. Şekil 14.f'de bir direnç ve endüktanstan oluşan elektriksel yük değişimlerinde yükün generatörden çektiği akım verilmiştir. Farklı yük akımlarında generatör çıkış geriliminin 270 V'da sabit tutulduğu, yük akımı arttıkça jet motorunun daha fazla güç ürettiği bu benzetimde ispatlanmış ve yapılan benzetimin doğru olduğu doğrulanmıştır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada dış rotorlu, 18 stator, 12 rotor kutbuna sahip bir ARM'nin Matlab Simscape Toolbox'da fiziksel sinyal benzetim modeli

gerçekleştirilmiştir. Yapılan makina modeli kullanılarak hem motor hem de generatör olarak ARM kontrol edilmiştir. Yapılan benzetimin doğruluğu sonuçlarla gösterilmiştir. ARM'nin yüksek yük akımlarında veya yüksek yük momentlerinde oluşan moment dalgalanmaları, anahtarlama açılarının yük akımına veya yük momentine ve hıza göre uyarlamalı olarak değiştirilmesi ile giderilebilir. Böylece daha düzgün momentin ve hızın alındığı sonuçlar elde edilebilir. Modellenen ARM'de kullanılan çekirdeğin manyetik özellikleri ve doyma, yapılan SEA'dan elde edilen verilerin kullanılması ile dikkate alınmıştır. Ancak makinanın veriminin hesaplanması için kullanılan manyetik malzemenin demir kayıpları doğrudan hesaba katılmamıştır. Bu çalışmada jet motoru tarafından sabit hız sistemleri ile jet motorunun hızından daha düşük bir hızda tahrik edildiğinden, demir kayıplarının çok düşük olduğu ve bu nedenle hesaba katılmadığı söylenebilir. Daha sonraki çalışmalarda, demir kayıplarının hesaba katıldığı, jet motorunun yakıt sarfiyatının tasarlanan makina ile nasıl değiştiği bilgisayar ortamında görülebilir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 113M090 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

5. Kaynaklar

- Akar, M. , Eker, M. & Akın, F., 2021. BLDC motor design and application for light electric vehicle. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **21 (2)**, 326-336.
- Büyükbıçakçı, E. & Boz, A. F., 2021. Yeni tip 5 – fazlı segmental rotorlu anahtarlamalı relüktans motora ait durum denklemlerinin ve dinamik simülasyon sonuçlarının incelenmesi. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, **7 (2)**, 232-256.
- Elmas, E. E. & Alkan, M., 2023. Bir insansız hava aracı sisteminin tasarımı, benzetimi ve gerçekleştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, **1-1**.
- Kocabey, S., 2018. Elektrikli otomobillerin dünü, bugünü ve geleceği. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, **1(1)**, 16-23.

- Omaç, Z., Polat, M., Öksüztepe, E., Yıldırım, M., Yakut, O., Eren, H., Kaya, M., and Kürüm, H., 2018. Design, analysis, and control of in-wheel switched reluctance motor for electric vehicles. *Electrical Engineering*, **100**, 865–876.
- Öksüztepe, E., 2017. In-wheel switched reluctance motor design for electric vehicles by using a pareto-based multiobjective differential evolution algorithm. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **66(6)**, 4706 – 4715.
- Önder, M. , Doğan, M. U. & Arslan, M., 2019. Anahtarlama frekansının anahtarlamalı relüktans motorda tork dalgalanmasına etkisinin incelenmesi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, **11 (1)**, 13-23.
- Özupak, Y., 2022. Sonlu elemanlar yöntemi tabanlı Ansys-Maxwell kullanılarak elektrikli araç uygulamaları için yüksek-hızlı motorların tasarımı ve performanslarının karşılaştırılması. *Rahva Teknik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, **2(2)**, 137-149.
- Sun, X., Wu, J., Lei, G., Guo, Y. and Zhu, J., 2021. Torque ripple reduction of SRM drive using improved direct torque control with sliding mode controller and observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **68, 10**, 9334-9345.
- Şahin, C., 2022. Eksenel akılı tam adım sargılı anahtarlamalı relüktans makinasının stator/rotor kutup şekillerinin motor performansına etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, **13(2)**, 181-189.
- Ye, J., Bilgin, B. and Emadi ,A., 2015. An offline torque sharing function for torque ripple reduction in switched reluctance motor drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **30, 2**, 726-735.
- Yetgin, A. G., 2021. Maxwell gerilme tensör yöntemini kullanarak anahtarlamalı relüktans motorun hava aralığı uzunluğunun radyal ve teğetsel kuvvetler üzerindeki etkisinin belirlenmesi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **12(1)**, 491-499.