

750 WATT BLDC MOTOR TASARIMI

Nelson Luis Manuel

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ

Güç Sistem Planlama Dersi
(Final Sınavı-Kısım 1)

4 Eylül 2022

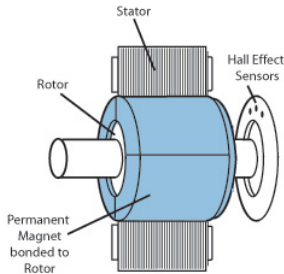
- 1 Fırçasız DC Motor
- 2 BLDC Motor Tasarımı
 - Tasarım Yaklaşımları
 - Tasarım Parametreleri
- 3 750 W BLDC Motor Tasarımı: Analitik Yaklaşım
 - Tasarım Gereksinimleri
 - Elde Edilen Sonuçlar
- 4 750 W BLDC Motor Tasarımı: Sonlu Elemanlar Yöntemi
 - Infolytica MagNet v7.5 Yazılımı
 - Elde Edilen Sonuçlar
- 5 Genel Sonuçlar
- 6 Kaynakça



Fırçasız DC Motor

BLDC Motor, yamuk arka elektromotor kuvvet dalga formu ve dikdörtgen uyarma akımı ile bir tür fırçasız kalıcı mıknatıslı motordur.

BLDC Motorda sargılar stator içine yerleştirilirken rotor kalıcı manyetik kutuplarla çevrelenmiştir. Aşağıdaki şekil 1, bir BLDC motorun ana bileşenlerini, yani stator, rotor ve rotor konum sensörlerini göstermektedir.



Şekil 1: BLDC Motor.



BLDC Motor Tasarımı

Tasarım Yaklaşımları

Genel olarak elektromekanik makinelerin tasarımı söz konusu olduğunda, temel olarak iki yaklaşım kullanılır:

- Analitik çözüm
- Sayısal Yaklaşım (Sonlu Elemanlar Yöntemi)

Analitik yaklaşım temel olarak, birikmiş parametreleri göz önünde bulundurarak motorun manyetik devresinin modellenmesinden oluşur. Gerçekle bağdaşmamakla birlikte zamandan tasarruf sağlaması ve basit olması nedeniyle yaygın olarak uygulanan bir tekniktir.

Sayısal yaklaşım, makine yapısını birkaç parçaya bölmekten ve makinenin her bir parçasını analiz etmekten oluşur. Bu yaklaşım analitik modellemekten daha doğrudur, ancak analiz için geçen süre bölümler küçüldükçe artar.

Bu çalışmada, 750 W fırçasız DC motorun tasarımı için hem analitik yaklaşım hem de sayısal yaklaşım kullanılacak ve sonuçlar karşılaştırılacaktır.



BLDC Motor Tasarımı

Tasarım Parametreleri

Elektrik motorlarının tasarımı için kullanılan parametreler veya değişkenler üç kısma ayrılabilir:

- Geometrik parametreler
- Manyetik parametreler
- Elektriksel parametreler

Hemen hemen her zaman, elektrik motorunun kullanılacağı uygulama tipine bağlı olarak, bu parametrelerin bir kısmı sabittir ve diğer parametreler sabit parametrelere göre bulunur.

Sabit parametrelere bağımsız değişkenler veya uygulama gereksinimleri denir. Uygulama gereksinimlerine göre bulunması gereken parametrelere **bağımlı parametreler** denir.

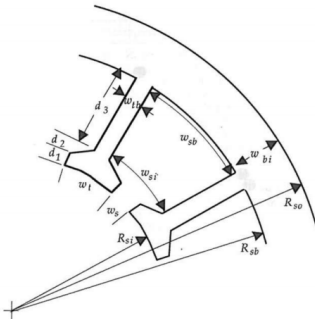
Elektrik motoru tasarım süreci, tam olarak uygulama gereksinimlerini karşılayan bağımlı değişkenlerin bulunmasından oluşur.



BLDC Motor Tasarımı

Tasarım Parametreleri: Geometrik Parametreler

Elektrik motorunun sahip olması gereken geometrik boyutların çoğu uygulama tarafından belirlenir. Bu nedenle normalde literatürde elektrik motorunun bazı geometrik parametreleri uygulama tarafından yapılan dayatma nedeniyle sabittir. Aşağıdaki şekil, elektrik motoru tasarlanırken dikkate alınan statorun ana boyutlarını göstermektedir.



Şekil 2: Radyal akıllı motor topolojisi için geometri.



BLDC Motor Tasarımı

Tasarım Parametreleri: Manyetik Parametreler

Elektrik motorunun ürettiği tork, motorda oluşan elektromanyetik alandan doğrudan etkilendir.

Stator yapısının yapıldığı malzeme, motorun çalışması sırasında ortaya çıkan manyetik akıya dayanmalıdır. Aşağıdaki denklem, statorun iç duvarlarındaki manyetik akı ile hava aralığı akısı arasındaki ilişkiyi gösterir.

$$\phi_{bi} = \frac{\phi_g}{2} \quad (1)$$

Not: Bu denklem, konsantre sargılı ve oluklu statorlu radyal akılı kalıcı manyetik motorlar için geçerlidir. Burada ϕ_g , hava boşluğundaki ve ϕ_{bi} , statorun iç parça duvarına ulaşan akıdır.

Genellikle ekonomik kısıtlamalar nedeniyle elektrik motoru yapılarının malzemeleri sabittir. Sonuç olarak, akı yoğunlukları, geçirgenlik gibi manyetik parametreler sabitlenir.



BLDC Motor Tasarımı

Tasarım Parametreleri: Elektriksel Parametreler

Elektrik motorunun elektriksel parametreleri direnç, endüktans, emf voltajı ve akımı içerir.

Uygulamaya bağlı olarak normalde elektrik motorunun gücü belirlenir ve tasarım sürecinde sabit bir parametre olarak alınır. Normalde sabit olan diğer elektrik parametreleri voltaj, frekans ve rotor hızıdır.

Güç (P) hp ve mekanik hız (ω_m) rad/s olarak alındığında, motorun torku (T) aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilebilir:

$$T = \frac{746P_{hp}}{\omega_m} \quad (2)$$



Bu bölümden itibaren 750 W BLDC motorun tasarımında izlenen yaklaşımlar anlatılacaktır. Sunulacak çözümler, (*Carunaiselvane ve Jeevananthan, 2012*) tarafından yayınlanan makaleye ve (*Hanselman, 1994*) kitabına dayanmaktadır.

Bu iki kaynak aynı analizi uygular. Kitap analiz hakkında ayrıntılar ekler.

Alıntılanan kaynaklara göre atılması gereken ilk adım, motorun kullanılacağı uygulamaya göre önceden bilinen bazı motor parametrelerinin olmasıdır. Söz konusu kitapta, örneğin, sabit parametrelerin bir listesi sunulmaktadır.

Bu çalışmada öncelikle analitik bir yaklaşım sergilenecektir. Daha sonra MagNet v7.5 kullanılarak sayısal analiz yapılacaktır.

ANSYS, MATLAB, DIANA FEA vb. gibi sonlu elemanlar analizi yapmak için kullanılan birçok yazılım vardır. Bu çalışmada da kaynak makalede kullanıldığı ve kullanımı kolay olduğu için MagNet v7.5 yazılımı kullanılacaktır.



Aşağıdaki tablo, oluklu stator ve iç rotor yapısına sahip bir radyal akılı motor için sabit parametreler listesinin ekran görüntüsüdür.

Parameter	Description
P_{hp} , or T	Power, hp, or rated torque, $N \cdot m$
S_r	Rated speed, rpm
E_{max}	Maximum back emf, V
J_{max}	Maximum slot current density, A/m^2
N_{ph}	Number of phases
N_m	Number of magnet poles
N_{sp}	Number of slots per phase, $N_{sp} \geq N_m$
g	Air gap length, m
l_m	Magnet length, m
R_{so}	Outside stator radius, m
R_{ro}	Outside rotor radius, m
L	Motor axial length, m
$\Gamma(B, f)$	Steel core loss density vs. flux density and frequency
k_{st}, ρ_{st}	Lamination stacking factor and steel mass density
ρ, β	Conductor resistivity and temperature coefficient
k_{cp}	Conductor packing factor
α_m	Magnet fraction, τ_m/τ_p
B_r	Magnet remanence, T
μ_R	Magnet recoil permeability
B_{max}	Maximum steel flux density, T
w_s	Slot opening, m
α_{td}	Shoe depth fraction $(d_1 + d_2)/w_{tb}$
Winding approach	Lap or wave, single- or double-layer, or other



Şekil 3: Radyal akı topolojisi için sabit parametreler tablosu.

750 W BLDC Motor Tasarımı: Analitik Yaklaşım

Tasarım Gereksinimleri

Bir önceki slaytta sunulan parametreler ve (*Carunaiselvane ve Jeevananthan, 2012*) tarafından yayınlanan makalede kullanılan motor verileri dikkate alınarak bağımlı değişkenlerin tasarımı yapılmıştır. Bu parametreleri tasarım sürecine girdi olarak kullanarak ve (*Hanselman, 1994*) kitapta sunulan **tasarım denklemlerini** uygulayarak bağımlı parametreler hesaplanacaktır.

Zaman yetersizliğinden dolayı tasarım denklemleri bu sunumda sunulmayacak, ancak alıntılanan kaynaklarda bulunabilirler.

Tasarım denklemlerini kullanarak analitik çözümü elde etmek için bir Matlab dosyası oluşturulmuştur. Dosya 3 bölümden oluşmaktadır:

- Sabit parametreler
- Tasarım denklemlerinin hesaplanması
- Sonuç gösterimi



750 W BLDC Motor Tasarımı: Analitik Yaklaşım

Elde Edilen Sonuçlar

Aşağıdaki tablo, tasarım denklemleri kullanılarak analitik yöntemle elde edilen sonuçların ekran görüntüsünü göstermektedir. Bu sonuçların kodu matlab'da yazılmıştır.

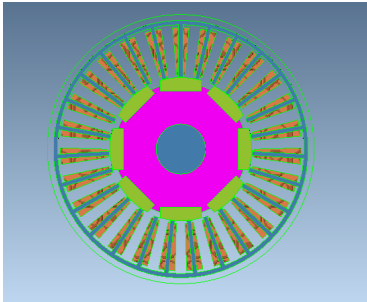
	Değerler [SI]
Sargıların dönüş sayısı/faz	117
Sargıların kesit alanı	5.0558e-05
Açısal kutup aralığı [rad]	0.7854
Açısal yuva aralığı [rad]	0.23271
Faz direnci	0.05981
Faz endüktansı	0.00015467
Faz akımı	11.9675
Ohmik kayıp	25.6982
Çekirdek kaybı	3.0713e-12
Yuva akı yoğunluğu	1.6
Tepe geri emf	38.5
Verimlilik	96.6073

Şekil 4: Analitik yöntemle elde edilen sonuçlar.

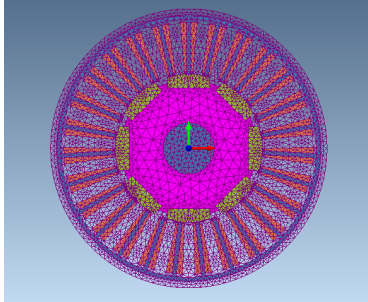
Bu sonuçların sadece bir kısmı. Manyetik parametreler ve geometrik parametreler gibi diğer parametrelerin daha fazla değeri matlab dosyasında bulunabilir.



Önceki slaytlarda bahsedildiği gibi, tasarımın sayısal analizini yapmak için MagNet yazılımı kullanıldı. Aşağıdaki şekil, yapılan projenin ekran görüntülerini göstermektedir.



(a) Yapıya doldurulmuş malzeme.



(b) FEM Analizi için 2B Mesh.

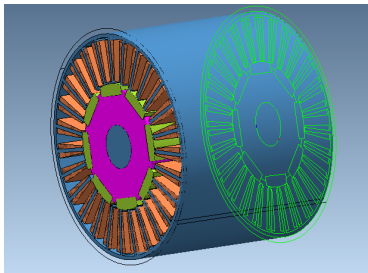
Şekil 5: MagNet yazılımında sayısal analiz için kullanılan malzeme ve Mesh.



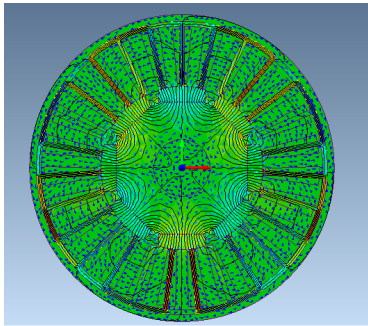
750 W BLDC Motor Tasarımı: Sonlu Elemanlar Yöntemi

Infolytica MagNet v7.5 Yazılımı

Aşağıdaki şekil 3D motor yapısını ve motordaki akıyı göstermektedir.



(a) MagNet'te yapılan motorun 3 boyutlu modeli.



(b) MagNet'te yapılan motorun akısı.

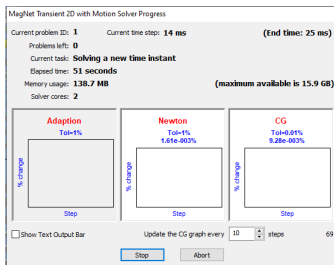
Şekil 6: MagNet'te yapılan motorun 3D modeli ve akısı.



750 W BLDC Motor Tasarımı: Sonlu Elemanlar Yöntemi

Elde Edilen Sonuçlar

Ne yazık ki, bu iş için ayrılan **süre kısa**! Literatürde bildirildiği ve bu çalışma sırasında da teyit edildiği gibi, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak istenen bir çözüme yakınsamak uzun zaman alır (örneğin, Core i3 dizüstü bilgisayarda statik 3D çözüm için 24 saat alınabilir). Zaman yetersizliğinden dolayı sonuçlar burada sunulmayacaktır. Ancak, yazılımda yapılan model daha fazla analiz için gönderilecektir.



Şekil 7: Analiz için geçen süreyi gösteren panel.



Genel Sonuçlar

Bu çalışmada 750 W BLDC motor tasarlanmıştır. Tasarımı yapmak için iki yöntem kullanıldı: analitik yöntem ve sayısal yöntem. Analitik yöntem, motorun manyetik devresini eşdeğer bir elektrik devresi üzerinden yapar. Bu yaklaşıma dayalı olarak analitik analiz için tasarım denklemleri elde edilir. Tasarım denklemleri kullanılarak motor parametreleri bulundu. Analitik sonuçları elde etmek için bir matlab dosyası oluşturulmuştur.

Daha sonra bu sonuçları doğrulamak için sayısal yöntem (sonlu elemanlar yöntemi) kullanılmıştır. Bu analiz için MagNet yazılımı kullanıldı. Bu yazılım, bu çalışma için referans olarak kullanılan makalede de uygulandığı için seçilmiştir.

Bu slaytta, analitik olarak elde edilen sonuçlar ile MagNet yazılımında elde edilen sonuçlar arasında daha detaylı karşılaştırmalar yapılması gerekiyordu.

Ancak bir önceki slaytta açıklandığı gibi simülasyonlar uzun zaman alır, bu durum literatürde de bildirilmektedir. Bu işin öngörülen sürede teslimini garanti altına almak için sayısal sonuçları beklemenin uygun olmadığı görüldü.



- [1] C. Carunaiselvane and S. Jeevananthan, "Generalized procedure for BLDC motor design and substantiation in MagNet 7.1.1 software," 2012 Int. Conf. Comput. Electron. Electr. Technol. ICCEET 2012, pp. 18–25, 2012, doi: 10.1109/ICCEET.2012.6203783.
- [2] D. C. Hanselman, Brushless Motor Design. 1994.
- [3] A. Rahideh, T. Korakianitis, P. Ruiz, T. Keeble, and M. T. Rothman, "Optimal brushless DC motor design using genetic algorithms," J. Magn. Magn. Mater., vol. 322, no. 22, pp. 3680–3687, 2010, doi: 10.1016/j.jmmm.2010.07.025.
- [4] I. Alphonse, S. HosiminThilagar, and F. Bright Singh, "Design of solar powered BLDC motor driven electric vehicle," Int. J. Renew. Energy Res., vol. 2, no. 3, pp. 456–462, 2012, doi: 10.20508/ijrer.56017.
- [5] M. Markovic, P. Ragot, and Y. Perriard, "Design optimization of a BLDC motor: A comparative analysis," Proc. IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2007, vol. 2, no. December 2014, pp. 1520–1523, 2007, doi: 10.1109/IEMDC.2007.383653.
- [6] Y. C. Wu and B. W. Lin, "Computer-aided design of a brushless DC motor with exterior-rotor configuration," Comput. Aided. Des. Appl., vol. 9, no. 4, pp. 457–469, 2012, doi: 10.3722/cadaps.2012.457-469.
- [7] Y. B. A. Apatya, A. Subiantoro, and F. Yusivar, "Design and prototyping of 3-phase BLDC motor," QiR 2017 - 2017 15th Int. Conf. Qual. Res. Int. Symp. Electr. Comput. Eng., vol. 2017-December, pp. 209–214, 2017, doi: 10.1109/QIR.2017.8168483.
- [8] M. AKAR, M. EKER, and F. AKIN, "BLDC Motor Design and Application for Light Electric Vehicle," Afyon Kocatepe Univ. J. Sci. Eng., vol. 21, pp. 326–336, 2021, doi: 10.35414/akufemubid.889877.
- [9] M. Markovic and Y. Perriard, "Simplified design methodology for a slotless brushless DC motor," IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 12, pp. 3842–3846, 2006, doi: 10.1109/TMAG.2006.884108.
- [10] P. K. Shahri, V. Izadi, and A. H. Ghaseini, "Design a High Efficiency and Low Ripple BLDC Motor Based on Multi-Objective Optimization Methods," Proc. Am. Control Conf., vol. 2020-July, no. July, pp. 156–161, 2020, doi: 10.23919/ACC45564.2020.9147907.
- [11] M. Azim, N. Zulkifli, and E. Sulaiman, "Optimization of 12S-14P Brushless DC Motor for Drone Application," vol. 2, no. 1, pp. 96–105, 2021.
- [12] A. Shukla and S. Payami, "Design and thermal network modeling of BLDC motor for submersible pump application," 9th IEEE Int. Conf. Power Electron. Drives Energy Syst. PEDES 2020, 2020, doi: 10.1109/PEDES49360.2020.9379473.
- [13] Vipin Kumar Singh, Prof. Sanjay Marwaha, and Ashish Kumar Singh, "Design and Analysis of Permanent Magnet Brushless DC Motor for Solar Vehicle using Ansys Software," Int. J. Eng. Res., vol. V6, no. 04, pp. 79–84, 2017, doi: 10.17577/ijertv6is040795.
- [14] V. Gholase and B. G. Fernandes, "Design of efficient BLDC motor for DC operated mixer-grinder," Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol., vol. 2015-June, no. June, pp. 696–701, 2015, doi: 10.1109/ICIT.2015.7125179.
- [15] M. Markovic, V. Muller, A. Hodder, and Y. Perriard, "Optimal design of an in-wheel BLDC motor for a kick scooter," 2010 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2010 - Proc., pp. 292–296, 2010, doi: 10.1109/ECCE.2010.5618023.
- [16] E. Engineering and T. Supervisor, "Design of a Sensorless Bldc Motor Driver Using Field Oriented Driver Using Field Oriented," 2019.
- [17] F. Mahmouditabar, M. G. Gorji, and A. Vahedi, "Robust Design of BLDC Motor for Jetboard Application," 2021 12th Power Electron. Drive Syst. Technol. Conf. PEDSTC 2021, pp. 15–18, 2021, doi: 10.1109/PEDSTC52094.2021.9405939.



Teşekkür ederim

Nelson Luis Manuel

E-posta: 198804001@kku.edu.tr/nelsonluismanuel@gmail.com