

Serbest Pistonlu Dıştan Yanmalı Motorlar için Tüp Tipi Doğrusal Jeneratör Analizi

Serdal Arslan¹

Özet

Son yıllarda güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etmeye yönelik Stirling Çanağı tasarımları ve uygulamaları dikkat çekmektedir. Bu sistemde ek bir mekaniksel dönüşüme gerek duymadan doğrudan elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Serbest piston mekanizmasına doğrusal jeneratör yerleştirilerek sağlanabilmektedir. Güç yoğunluğu açısından sürekli mıknatıslı tüp tipi jeneratörler bu uygulamalar için tercih edilmektedir. Literatürde bu çalışma alanı üzerine gerçekleştirilen çalışmalar genel hatlarıyla incelenmiştir. Analitik tasarımı gerçekleştirilmiş olan tüp tipi doğrusal jeneratörün sayısal analizi ele alınmıştır. Sayısal analizler Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Jeneratöre ait çıkış verilerinin elde edilmesinin yanı sıra maliyet analizi de gerçekleştirilmiştir. Farklı çalışma frekans değerliliklerindeki analiz sonuçları da incelenmiştir.

1. Giriş

Fosil kaynakların giderek tükenmesi enerji üretimi üzerine gerçekleştirilen çalışmaları yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı üzerine yöneltmiştir. Özellikle güneş enerjisi üzerine gerçekleştirilen çalışmalar güneş paneli üzerine elektrik üretimini oluşturmasına karşın odaklamalı güç sistemlerinden de elektrik üretimi giderek artmaktadır. Ayrıca fotovoltaik panellerin verimini arttırıcı malzeme materyaldeki gelişmelere nazaran; kirlenme, panel sıcaklığı gibi verim düşüren faktörler bulunmaktadır. Sınırlı verimliliklerinden dolayı fotovoltaik panellere nazaran yoğunlaştırılmış güneş enerjilerinden elektrik üretimi son yıllarda ilgi çekici hale gelmiştir. Güneş enerjisi odaklama sistemleri sırasıyla Parabolik oluk (Parabolic through), güç kulesi (Power tower), doğrusal fresnel (Linear fresnel), Stirling Çanağı (Dish Stirling)

1 Doç.Dr., Harran Üniversitesi Organize Sanayi Bölgesi M.Y.O. Elektrik Programı, serdalarlan@harran.edu.tr, 0000-0002-1187-5633

olarak verilebilir [1]. Ayna, fresnel lens ve odaklayıcı sistem ile güneş enerjisi yoğunlaştırılabilmektedir ancak güneş ışınlarının gün içindeki geliş açısındaki değişim önemli sorun olarak görülmesine rağmen güneş takip mekanizması ile bu sorun çözülebilir [2]. Bu sistem özelinde gerçekleştirilen çalışmalar dıştan yanmalı motordan hareket enerjisi eldesine kadar dayanmaktadır. Dıştan yanmalı motor olarak çalışan Stirling motoru adını 1816 yılında Robert Stirling'ten almaktadır [3]. Isı enerjisinden elde edilen dairesel hareket kimi zaman bir aracı, gemiyi vb. tahrik etmesine rağmen içten yanmalı motorun icadı ile dıştan yanmalı motorlar üzerine çalışmalar sınırlı kalmıştır. Stirling motorun harici ısı kaynakları kullanımı, tasarımları, gerçekleştirilen çalışmalarla zaman içerisinde değişiklik göstermiştir. Ancak son yıllarda Parabolik çanak- Stirling motor kullanan sistemden elektrik enerjisi üretimi dikkat çekici hale gelmiştir. Bu sistemde güneş ışınlarını yansıtılıp odak noktasında toplanmaktadır, alıcı tarafından ısı soğurulur. Stirling motorları alfa (α), beta (β) ve gama (γ) olmak üzere üç mekanik düzen sınıfında değerlendirilirler [3].

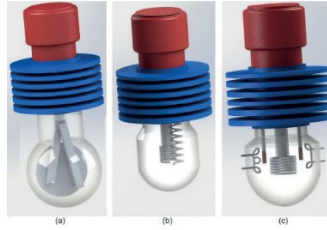
Tablo 1. Bazı Stirling Motor Çalışmaları: Basınç, sıcaklık değerlerine göre güç değerlikleri

Referanslar	Stirling Motor Tipi	Sıcaklık (°C)	Şarj Basıncı (bar)	Güç (W)
[3,4]	V tipi bir Stirling motoru	1100	2,5	65
[3,5,6]	Gama tipi bir Stirling motoru	1000	2	21,46
[3,7,6]	Çift yer değiştirme pistonuna sahip bir Stirling motoru	1000	1,5	65
[3,8,6]	Beta tipi bir Stirling motoru	1000	3,5	83,12
[3,9]	Gama tipi bir Stirling motoru	1000	4	128,3
[3,10]	Beta tipi bir Stirling motoru	1000	-	5,98
[3,11,12]	Beta tipi bir Stirling motoru	200	2,8	51,93
[3,13]	Beta tipi bir Stirling motoru	185 ±5	4,7	22,01
[3,14]	Scotch yoke hareket iletim mekanizmalı Beta tipi bir Stirling motoru	500	7	95,4
[3, 6,15]	Rhombic hareket mekanizmalı beta tipi bir Stirling motoru	450	2	95,77
[3,16]	Beta tipi bir Stirling motoru	850	8	390
[3,17]	Gama tipi bir Stirling motoru	500	10	570
[3,6,18]	Beta tipi bir Stirling motoru	600	15	288
[19,20]	Rhombic hareket mekanizmalı bir Stirling motoru	700 ±5	3	244
[21-23]	Scotch Yoke hareket mekanizmalı bir Stirling motoru	700	8	74
[6,24,25]	Krank biyel hareket iletim mekanizmalı Beta tipi bir Stirling motoru	1000	2,5	14

[24,26]	Rhombic hareket iletim mekanizmalı bir Stirling Motor	850	9	1358
[6,27]	Beta tipi rhombic hareket mekanizmalı bir Stirling motoru	-	3	221,77

Stirling motorun hareket mekanizması doğrusal veya dairesel olabilir (Şekil 1). Yer değiştirme pistonu ile güç pistonu arasındaki mekanik bağlantı çıkartılarak düzenlendiğinde serbest pistonlu Stirling motorlarına dönüştürülebilir. Bu motorlar serbestçe ileri-geri hareket edebilme kabiliyeti, daha az mekanik aşınma, düşük maliyet, nispeten yüksek verim sunması gibi avantajları dikkat çekicidir [3].

Şekil 1a'da görüldüğü üzere Stirling motorun ısı aktarma organı üzerinden mekanik enerji üretilmektedir. Elde edilen bu dönme hareketi doğrudan jeneratörü tahrik edebilmektedir. Dairesel hareketten elektrik enerjisi üreten sistemler, dönme hareketini elektromanyetik indüksiyon yoluyla elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Şekil 1b'de görüldüğü üzere ek mekanik bileşenlerin (krank-biyel) kaldırılarak serbest pistonlu modeli verilmiştir. Stirling motor çevrimi serbest pistonlu hareket çevrimi birbirine benzer hareket profili sergilemektedir [34]. Böylece Şekil 1c'de görüldüğü üzere serbest piston mekanizması üzerine yerleştirilecek doğrusal jeneratörden elektrik enerjisi elde edilebilir.

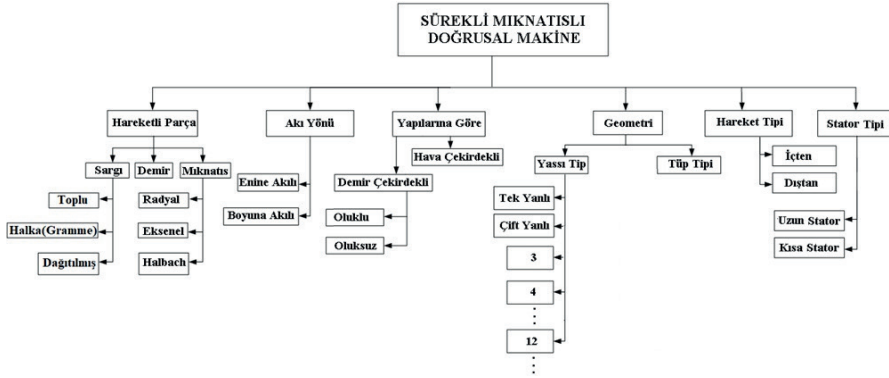


Şekil 1. (a) Krank ve biyel kol mekanizmalı, (b) Serbest piston mekanizması, (c) Serbest pistonlu doğrusal jeneratör [34].

2. Doğrusal Jeneratörler ve Tasarım Modeli

Doğrusal hareketli mekanizma üzerine yerleştirilen jeneratörden elektrik üretimi sağlanır. Bu jeneratörler asenkron [28] veya senkron [29] tipte olabilir. Ancak sürekli mıknatıslı modelin yüksek verim ve güç yoğunluğu sayesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu jeneratörlerin modelleri sargı yapısı, hareketli yapısı, mıknatıslı yapısı vb. çeşitlerde farklılaşmaktadır

ve farklı uygulama alanları için kullanılmaktadır [30-34]. Tüp tipi oyuksuz doğrusal jeneratör tasarımı ve uygulaması gerçekleştirmiştir [35-38]. Dört yanlı [39-41], iki yanlı oluksuz [42,43], iki yanlı oluklu [44], tek yanlı dış [45] ve sekizgen şeklindeki çok yanlı doğrusal jeneratör tasarımı gerçekleştirilmiştir [46,47]. Ayrıca iki primer bir sekonder tüp tipi [48,49], tüp tipi eksenel akılı mıknatıslı hava nüveli [50,51], yüzey yerleştirmeli oyuklu tip iç hareketli [52-54], yüzey yerleştirmeli oyuklu tip dış hareketli [55-57] çalışmaları da dikkat çekicidir. Mıknatıs dizimi açısından radyal, eksenel ve Halbach olan tüp tipi jeneratör karşılaştırmıştır [58,59]. Sürekli mıknatıslı doğrusal jeneratör çeşitlerine ait ağaç grafiği Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Doğrusal jeneratör çeşitlerine yönelik sınıflandırma [30]

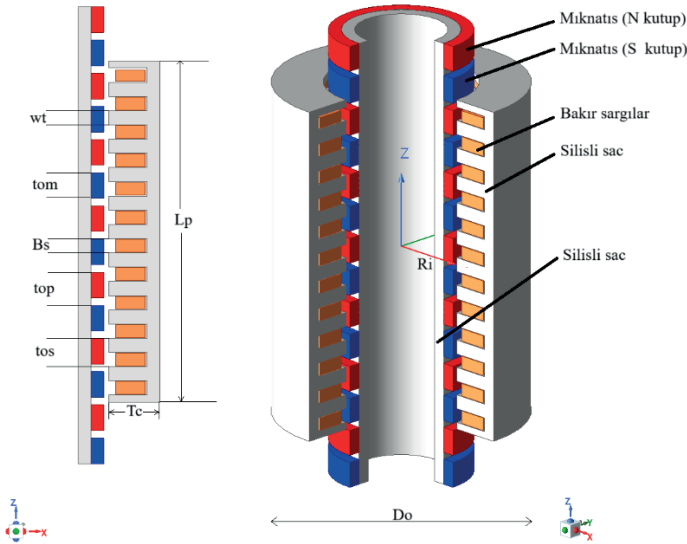
Farklı sabit mıknatıslı makineler incelendiğinde çift primerli akı anahtarlamalı, tek akı anahtarlamalı ve radyal mıknatıs dizilimli jeneratörleri karşılaştırmıştır [60]. Enine akılı tüp tipi jeneratör tasarım ve optimizasyonunu gerçekleştirmiştir [61]. Sargılar açısından süper iletkenli doğrusal jeneratör çalışması dikkat çekmektedir [62]. Ayrıca ele alınan elektrik makinesinin akı yolu dikkate de alınmalıdır. Burada ele alınan jeneratör boyuna akılıdır. Boyuna akılı makineler için hem iki boyutlu hem de üç boyutlu analiz tercih edilebilir. Enine akılı makineler için üç boyutlu analiz dikkate alınırken Eksenel akılı makineler için üç boyutlu tercih edilir ancak iki boyutta ele alınacak yöntemlerle de (quasi static, 2,5D) analiz yapılabilir.

Daha önceki çalışmamızda benzer topolojideki [30-34], 3 fazlı bu modelin tasarım, analiz ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmadaki deney seti üzerinden üç fazlı modelin deneyleri gerçekleştirilerek nümerik analizde elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Elde edilen deneysel verilerin analiz verileri ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Bu çalışmada ise

13mm strok boyu için farklı oluk-kutup oranlı jeneratör incelenmiştir. Parabolik çanak veya Stirling Çanağı olarak adlandırılan sistem için daha yüksek güçlü jeneratör analizini içermektedir.

2.1. Tasarım Modeli

Ansys Maxwell; literatürde yaygın tercih edilen elektromanyetik problemlerin çözümü için kullanılan yazılımdır. Elektrik makinelerinin modellenmesinde kullanılan bu yazılım; modele ait elektriksel parametreleri (indüktans değeri, akım yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, manyetik akı yoğunluğu vb.) elde edilebilir [34,63]. Yazılım; elektrik makinasının 3 boyutlu modelini 2 boyutlu xy veya rz düzlemlerinde modellenmesine imkân tanır. Ancak asimetrik modellerin çözülmesi için 3 boyutlu çözücü modülleri seçilmesi gerekir. Doğrusal jeneratör modeli 3 boyutlu simetrik yapıda olduğundan dolayı 2 boyutlu rz geçici hal analiz ve sürekli hal analiz çözücülerini tercih edilmiştir. Modelin anlaşılabilmesi için 3 boyutlu modelden $\frac{1}{4}$ 'lük kısmı çıkartılarak modelin parçaları ve iç yapısı Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Tasarlanan tüp tipi doğrusal jeneratör

Şekil 3'te verilen boyutlandırma parametrelerin büyüklükleri Tablo 2'de verilmiştir. Modelin içteki hareketli (çelik ve mıknatısları içeren) kısmının tamamına sekonder, dışta sargıların bulunduğu duran kısma ise primer olarak adlandırılmaktadır. Primer, daha iyi performans sağlayan silisli sacın paketlenmesinden ya da üretim kolaylığı sağlayan yumuşak manyetik

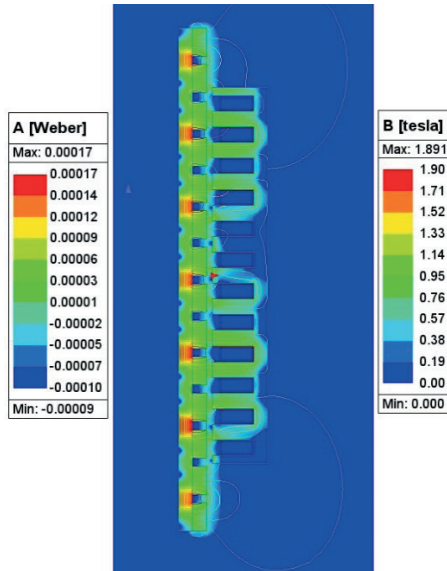
malzemeden meydana gelebilir [64]. Sekonder (Hareketli kısım) ise primer çelik malzemesi kullanılabilir. Oluk-Kutup değişimine bağlı olarak özellikle vuruntu kuvveti olmak üzere; demir, bakır kaybı, verim ve güç yoğunluğu değerleri değişiklik göstermektedir [65].

Tablo 2. Tüp tipi jeneratörün boyutlandırma büyüklükleri

Tasarım Parametreleri ve birimleri	Değerler	Tasarım Parametreleri	Değerler
Do (mm)	100	Alfa (tom/top)	0,775
Di (mm)	60	Beta (Bs/Tos)	0,5
Lp (mm)	133,87	Gama (Di/Do)	0,6
Top (mm)	13	Çelik malzeme	M19_24G
Tc (mm)	20	Mıknatis	NdFe 35
Tos (mm)	11,15	Hava aralığı (mm)	2

2.2. Sürekli Hal Analizi

2 boyutlu analiz 12th Gen Intel(R) Çekirdekli (TM) i7-12700H 2.30 GHz işlemcili ve 16GB RAM özellikli bilgisayar ile çözüm gerçekleştirilmiştir. 0,5 hata enerji hata değerine karşılık ağ sayısı 17942 olarak atandığı görülmüştür. Manyetik akı dağılımı Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Manyetik akı yoğunluğu değişimi

Hava aralığı imalat nedenlerinden dolayı 2 mm alınarak gerçekleştirilmiştir. Hava aralığının artışı toplam akı miktarını azaltacaktır. Ancak Şekil 4'te sekonder üzerindeki manyetik akı yoğunluğu da yüksektir. Özellikle mıknatıs-mıknatıs arası kaçak akılar olmasına karşın akının büyük bölümü primer üzerinden devresini tamamlamaktadır.

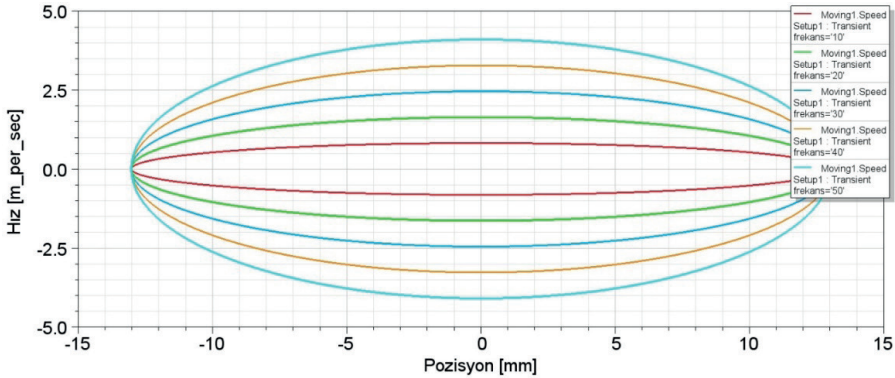
2.3. Geçici Hal Analizi

Geçici hal analizi modelin sürekli hal durumuna geçinceye kadar ya da anlık belirlenen zaman aralıklarında elektromanyetik problemi incelemek için kullanılabilir. Hem 2 hem de 3 boyutlu analize imkân vermektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi Stirling motor çevrimi serbest pistonlu hareket çevrimi birbirine benzer hareket profili sergilediğinden dolayı hız değişimi sinusoidal biçimde tanımlanmıştır. Eşitlik 1'de maksimum hız değerinin Lstr (Strok boyu) ve f (Frekans) ilişkisi verilmiştir. Hız zamana bağlı değişiminden dolayı Eşitlik 2'de hız sinüs fonksiyonu olarak verilmiştir [34].

$$v_m = 2\pi L_{str} f \quad (1)$$

$$v(t) = v_m \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

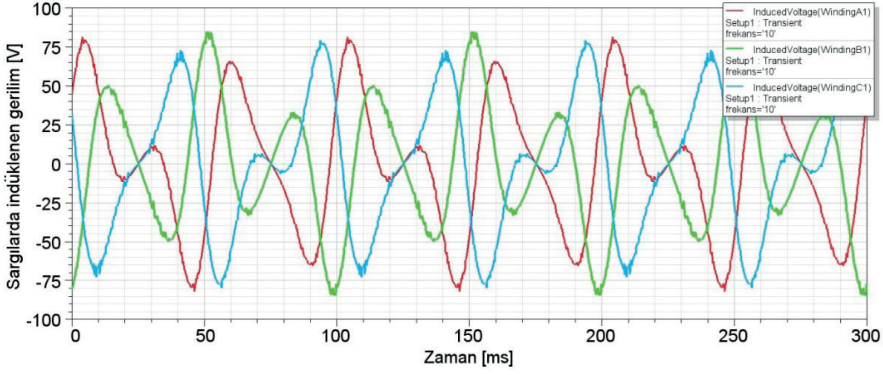
Vuruş boyu (strok mesafesi) sabit kalma koşuluyla frekans değeri 10 Hz'den başlayarak 50 Hz değerine kadar arttırılmıştır (Şekil 5).



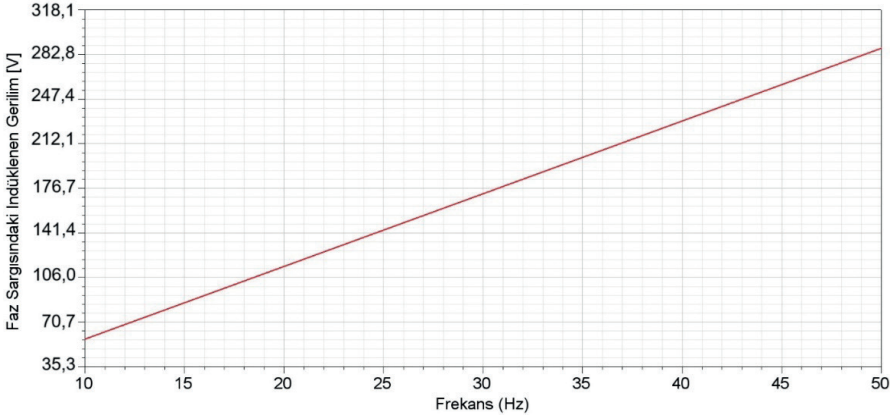
Şekil 5. Doğrusal hareketli pozisyonu-hız profili

Boş çalışma durumunda 3 faz sargılardan elde edilen gerilimin frekansa bağlı olarak değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Burada çalışma frekansı arttıkça

gerilim doğrusal olarak artmıştır. Çünkü çalışma frekansı ile hız orantılıdır (bakınız Eşitlik 1).



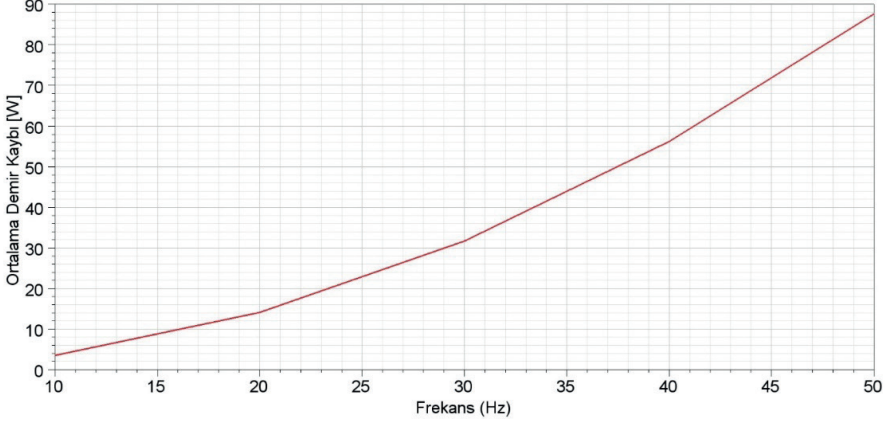
(a)



(b)

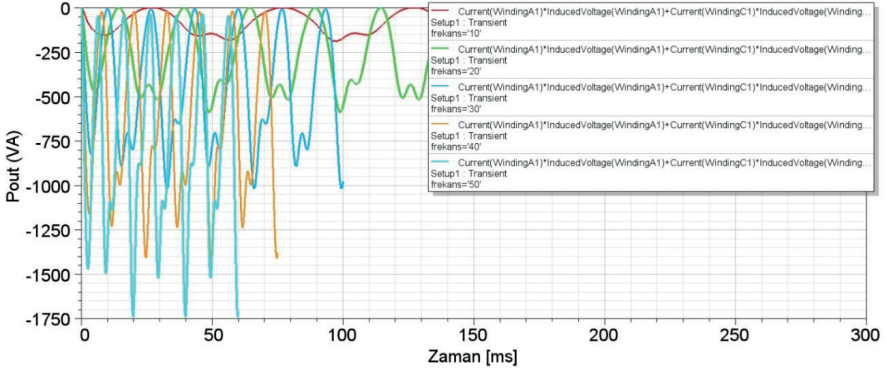
Şekil 6. 10Hz'deki sargılarda indüklenen üç faz gerilim değişimi (a), Frekans değişimine göre bir faz sargısında indüklenen gerilim değeri (b)

Demir kaybının hesaplanabilmesi için hem primer hem de sekonder çelik malzemesi M19-24G seçilmiştir.

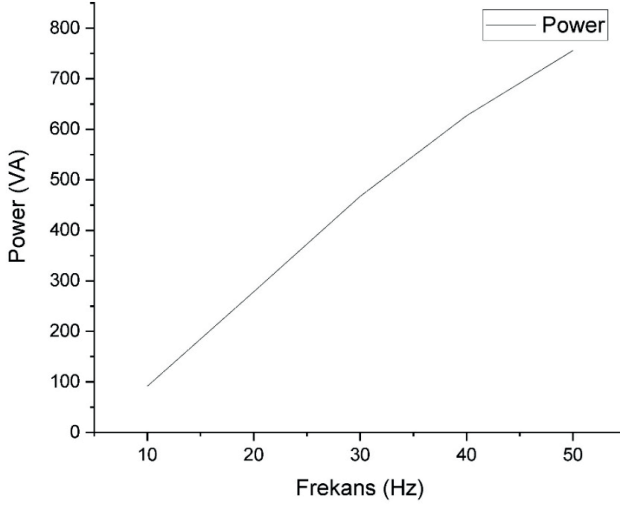


Şekil 7. Frekans değişimine göre demir kaybı değişimi

Çalışma frekansı arttıkça jeneratörün demir kaybı artmaktadır. Bu artışın doğrusal olmadığı Şekil 7'den anlaşılmaktadır. 10Hz değerindeki kayıp değeri 3,5W iken 50Hz değerindeki kayıp değeri 87,5W'tır. Şekil 8'de farklı frekans değerlikleri için çıkış gücü değişimi verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 8. Farklı frekans değerliklerine göre çıkış gücü (a), Frekans değişimine göre çıkış gücü değişimi (b)

Şekil 8'den anlaşılacağı üzere frekans arttıkça çıkış gücü artmaktadır. 10Hz'de ortalama 91,71 VA, 50Hz'de ise yaklaşık 756VA güç alınmaktadır.

2.4. Maliyet Analizi

Çelik, bakır ve mıknatıs malzemelerinin kg başına fiyatı 2.12 USD/kg, 14.85 USD/kg, 84.87 USD/kg olarak sıralanabilir [66]. Torna, CNC vb. işçilik giderleri ihmal edilerek Tablo 3'te yaklaşık maliyet hesaplanmıştır. Hesaplamalar için çelik, bakır ve mıknatıs malzemelerinin özkütleleri sırasıyla 7650 kg/m³, 8933 kg/m³, 7400 kg/m³ olarak alınmıştır.

Tablo 3. Toplam kütle ve maliyet

Toplam Mıknatıs Kütle (Kg)	Toplam Bakır Kütle (Kg)	Primer Çelik Kütle (Kg)	Sekonder Toplam Kütle (Kg)	Toplam Kütle (Kg)	Toplam Maliyet (\$)
0,837	1,523	3,33	1,72	6,57	102,57

3. Sonuç

Ülkemizde incelenen lisansüstü çalışmalar daha çok Stirling motoru tasarımı, analizi üzerine yapılmıştır. Ancak doğrusal jeneratör üzerine gerçekleştirilen çalışmalar oldukça sınırlı kalmıştır. Bu çalışmada Stirling

Çanağı'ndan elektrik enerjisi üretmeye yönelik tasarlanan jeneratörün sayısal analizi yapılmıştır. Strok mesafesinin kısa olması güç değerini sınırlandırmıştır. Ancak çıkış gücü bu uygulamalar için yeterlidir. Özellikle sabit vuruş mesafesinde çalışma frekansındaki artış gücü arttırmaktadır. Hareketlinin sabit hız değeri için gerilimin sinüzoidal değişmesi beklenir. Ancak hareketli parçanın hız profili sinüzoidal olduğundan dolayı indüklenen gerilim değişimi Şekil 6a'daki gibi olur. Hızlanma ve yavaşlama kısımlarında gerilimde artış ve azalış şeklinde görülür. Toplam hareketli kütlelerini azaltmaya yönelik optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilebilir. İlerleyen çalışmalarda vuruş kuvveti analizi prototip imalat gerçekleştirilecektir.

4. Kaynakça

1. Azanpa, M., “Stirling Motoru Hacim Optimizasyonu ve Kontrolü”, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekanik Mühendisliği, 2020.
2. Alahmad, A., “Güneş Takip Sistemi ve Stirling Motor Kullanarak Elektrik Üretimi”, Yüksek lisans tezi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 2018.
3. Arslan T. A., “Rhombic Mekanizmalı Beta Tipi Bir Stirling Motorunda Sıkıştırma Oranının Motor Performansına Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği, 2021
4. Karabulut, H., Yücesu, H. S. and Koca, A. (2000). Manufacturing and testing of a Vtype stirling engine Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 24(2), 71-76.
5. Demiralp, M. (2000). Gama Tipi Bir Stirling Motorunun Tasarımı ve İmalatı. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 6-60.
6. Eroğlu H. İ., “Rhombic Hareket Mekanizmalı Stirling Motorunun Halojen Lamba ile Performans Testleri”, Yüksek lisans tezi Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, 2018
7. Üstün, S. (2000). Çift Yer Değiştirme Pistonlu V Tipi Küçük Güçlü Bir Stirling Motorunun Tasarım ve İmalı. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-37.
8. Özgören, Y.Ö. (2005). Stirling Motorunda Termal Bariyer Kaplamanın Motor Performansına Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergisi, 4: 122-133.
9. Çınar, C. and Karabulut, H. (2005). Manufacturing and testing of a gamma type Stirling engine. Renewable Energy, 30(1), 57-66.
10. Çınar, C., Yücesu, S., Topgül, T. and Okur, M. (2005). Beta-type Stirling engine operating at atmospheric pressure. Applied Energy, 81, 351-357.
11. Karabulut, H., Yücesu, H. S., Çınar, C. and Aksoy, F. (2009). An experimental study on the development of a b-type Stirling engine for low and moderate temperature heat sources. Applied Energy, 86, 68-73.
12. Önder, M. (2012). Stirling Motoru İçin Borulu Tüp Isı Değiştiricisi Tasarımı ve CFD Analizi (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara).
13. Karabulut, H. ve Aksoy, F. (2011). Güneş Enerjisi ile Çalışan Bir Stirling Motorunun Performans Testleri. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 8, 55-62.

14. Sripakagorn, A. and Srikam, C. (2011). Design and Performance of a Moderate Temperature Difference Stirling Engine. *Renewable Energy*, 36, 1728-1733
15. Çınar, C., Aksoy, F. ve Okur, M. (2013). Design, manufacturing and performance tests of a stirling engine with rhombic drive mechanism. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28, 795-801.
16. Cheng, C. H., Yang, H. S. and Keong, L. (2013). Theoretical and experimental study of a 300-W beta-type Stirling engine. *Energy*, 59, 590-599.
17. Hachem, H., Gheith, R., Aloui, F. and Nasrallah, S. B. (2015). Numerical characterization of a γ -Stirling engine considering losses and interaction between functioning parameters. *Energy Conversion and Management*, 96, 532-543.
18. Duan, C., Sun, C., Shu, S., Ding, G., Jing, C. and Chang, J. (2015). Similarity design and experimental investigation of a beta-type Stirling engine with a rhombic drive mechanism. *International Journal of Energy Research*, 39, 191-201.
19. Zencirkıran, M. (2021). Stirling motorlarında ısı transfer yüzey alanının artırılmasının motor performansına etkisi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
20. Akyel E, "Rhombic Hareket Mekanizmalı Bir Stirling Motorunun Tasarımı ve Performans Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 90s, Afyonkarahisar, 2015.
21. Eroğlu, S. B. (2020). Beta tipi stirling motorları için hareket mekanizması optimizasyonu (Master's thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
22. Hirata, K., Iwamoto, S., Toda, F. and Hamaguchi K., "Performance Evaluation for a 100W Stirling Engine" Proceeding of 8th International Stirling Engine, Conference, 19-28, (1997).
23. Hirata, K., (1999). Development of a small 50W class Stirling engine. Sixth International Symposium on Marine Engineering, p. 235-240.
24. Erol, Derviş. (2020). Beta tipi bir Stirling motorunun tasarımı imalatı ve performans analizleri. (Yayınlanmamış Doktora Tezi). Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
25. Çınar, C., Topgöl, T., Yücesu, H. S., (2007). Stirling çevrimi ile çalışan beta tipi bir motorun imali ve performans testleri. *Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2), p. 411-415.
26. Yang, H. S., Cheng, C. H., Huang, S. T. (2018). A complete model for dynamic simulation of a 1-kW class beta-type Stirling engine with rhombicdrive mechanism. *Energy*, 161, p. 892-906.

27. Karabulut, H., Çınar, C., Aksoy, F., Solmaz, H., Özgören Y.Ö., Arslan, M., Aysal, F.E. (2015). Beta Tipi Rhombic Hareket Mekanizmalı Bir Stirling Motorunun İmalatı ve Testleri. *International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES)*, 2129-2136.
28. Dang, T. T., Ruellan, M., Ahmed, H. B., Prevond, L., & Multon, B. (2014, June). Sizing optimization of tubular linear induction generator for a new stirling micro-cogenerator system. In *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2014 International Symposium on (pp. 1362-1367). IEEE.
29. Sui, Y., Liu, Y., Cheng, L., Liu, J., & Zheng, P. (2017). A tubular hybrid Halbach/axially-magnetized permanent-magnet linear machine. *AIP Advances*, 7(5), 056629.
30. Arslan, S., Gurdal, O. (2022). Polygonal tubular linear permanent magnet generator analysis and experimental test. *Scientia Iranica*, 29(1), 168-182. doi: 10.24200/sci.2019.50094.2739
31. Arslan, S., & Oy, S. A. (2017). Design and Optimization of Tube Type Interior Permanent Magnets Generator for Free Piston Applications.
32. Arslan, S., & Mellah, H. (2023). Analysis and testing of internal combustion engine driven linear alternator. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (1), 3-9. doi:10.20998/2074-272X.2023.1.01
33. Arslan, S., Gurdal, O., Akkaya Oy, S. (2020). Design and optimization of tubular linear permanent-magnet generator with performance improvement using response surface methodology and multi-objective genetic algorithm. *Scientia Iranica*, 27(6), 3053-3065. doi: 10.24200/sci.2018.50093.1506
34. Arslan, S., Akkaya Oy, S.: Linear generator design for concentrating solar power technologies: Optimization and prototype development. *IET Renew. Power Gener.* 1-12 (2023). <https://doi.org/10.1049/rpg2.12881>
35. Rhinefrank, K., Agamloh, E. B., von Jouanne, A., Wallace, A. K., Prudell, J., Kimble, K., ... & Schacher, A. (2006). Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy. *Renewable Energy*, 31(9), 1279-1298.
36. Ribeiro, J., & Martins, I., Development of a low speed linear generator for use in a wave energy converter. In *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Granada (Spain)*, 23th to 25th March, 2010. pp. 252-257.
37. Parel, Thomas, Rotaru, Mihai, Sykulski, Jan and Hearn, Grant, Design study of a tubular linear machine with permanent magnets for wave power generation. *Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits EPNC2010*, Dortmund and Essen, Germany. 29 Jun - 02 Jul 2010. pp. 143-144.

38. Bracco, G., Giorcelli, E., Mattiazzo, G., Marignetti, F., Carbone, S., & Attaianese, C. (2011, September). Design and experiments of linear tubular generators for the Inertial Sea Wave Energy Converter. In *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE* (pp. 3864-3871). IEEE.
39. Kimoulakis, N. M., Kladas, A. G., & Tegopoulos, J. A. (2009). Cogging force minimization in a coupled permanent magnet linear generator for sea wave energy extraction applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(3), 1246-1249.
40. Parthasarathy, R. (2012). *Linear PM Generator for wave energy conversion* (Doctoral dissertation, Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Electrical Engineering in The Department of Electrical and Computer Engineering by Rajkumar Parthasarathy Bachelor of Engineering, Anna University).
41. Bai, B., Lu, J., & Xu, B. (2011, August). The research of external buoy wave permanent magnet linear generator's design. In *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on* (pp. 1-5). IEEE
42. Mueller, M., McDonald, A., Ochije, K., & Jeffrey, J. (2007, September). A novel lightweight permanent magnet generator for direct drive power take off in marine renewable energy converters. In *Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference*.
43. Nilsson, K., Danielsson, O., & Leijon, M. (2006). Electromagnetic forces in the air gap of a permanent magnet linear generator at no load. *Journal of Applied Physics*, 99(3), 034505.
44. Crozier, R., & Mueller, M. (2012). Integrated structural and electromagnetic design of direct-drive linear machines for wave energy. *IET Renewable Power Generation*, 6(3), 137-148.
45. Gargov, N., & Zobaa, A. F. (2011, September). Multiphase tubular permanent magnet linear generator for wave energy converters. In *Renewable Power Generation (RPG 2011), IET Conference On* (pp. 1-5). IET.
46. Ivanova, I. A., Agren, O., Bernhoff, H., & Leijon, M. (2005). Simulation of wave-energy converter with octagonal linear generator. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(3), 619-629.
47. Ivanova, I. A., Agren, O., Bernhoff, H., & Leijon, M. (2004, April). Simulation of cogging in a 100 kW permanent magnet octagonal linear generator for ocean wave conversion. In *Underwater Technology, 2004. UT'04. 2004 International Symposium on* (pp. 345-348). IEEE.

48. Schmulian, R. (2013). Reduction of cogging forces in a double sided tubular linear permanent magnet generator used for ocean wave energy conversion (Doctoral dissertation).
49. Joseph, D. M. (2010). A double-sided tubular linear synchronous generator for wave-energy conversion (Doctoral dissertation, Faculty of Engineering and the Built Environment, University of the Witwatersrand, Johannesburg).
50. Baker, N. J., Mueller, M. A., Ran, L., Tavner, P. J., & McDonald, S. (2007). Development of a linear test rig for electrical power take off from waves. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 6(2), 3-15.
51. Vermaak, R. (2013). Development of a novel air-cored permanent magnet linear generator for direct drive ocean wave energy converters (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University).
52. Szabo, L., Oprea, C., Viorel, I. A., & Biró, K. Á. (2007, May). Novel permanent magnet tubular linear generator for wave energy converters. In *Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC'07. IEEE International (Vol. 2, pp. 983-987)*. IEEE.
53. Danielsson, O., Eriksson, M., & Leijon, M. (2006). Study of a longitudinal flux permanent magnet linear generator for wave energy converters. *International Journal of Energy Research*, 30(14), 1130-1145.
54. Li, W., Chau, K. T., & Jiang, J. Z. (2011). Application of linear magnetic gears for pseudo-direct-drive oceanic wave energy harvesting. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(10), 2624-2627.
55. Prudell, J., Stoddard, M., Amon, E., Brekken, T. K., & von Jouanne, A. (2010). A permanent-magnet tubular linear generator for ocean wave energy conversion. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(6), 2392-2400.
56. Prudell, J., Stoddard, M., Brekken, T. K., & von Jouanne, A. (2009, September). A novel permanent magnet tubular linear generator for ocean wave energy. In *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE (pp. 3641-3646)*. IEEE.
57. Si, J., Feng, H., Su, P., & Zhang, L. (2014). Design and analysis of tubular permanent magnet linear wave generator. *The Scientific World Journal*, 2014.
58. Sui, Y., Zheng, P., Cheng, L., Wang, W., & Liu, J. (2017). A single-phase axially-magnetized permanent-magnet oscillating machine for miniature aerospace power sources. *AIP Advances*, 7(5), 056659.
59. Zheng, P., Sui, Y., Tong, C., Bai, J., Yu, B., & Lin, F. (2014). A novel single-phase flux-switching permanent magnet linear generator used for free-piston Stirling engine. *Journal of Applied Physics*, 115(17), 17E711.

60. Sui, Y., Zheng, P., Tong, C., Yu, B., Zhu, S., & Zhu, J. (2015). Investigation of a tubular dual-stator flux-switching permanent-magnet linear generator for free-piston energy converter. *Journal of Applied Physics*, 117(17), 17B519.
61. Joubert, L. H., Schutte, J., Strauss, J. M., & Dobson, R. T. (2012, September). Design optimisation of a transverse flux, short stroke, linear generator. In *Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on* (pp. 640-646). IEEE.
62. Wu, Z. H., & Jin, J. X. (2014). Novel concept of dish Stirling solar power generation designed with a HTS linear generator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24(5), 1-5.
63. Fenercioğlu, A., and Tarimer, I., Solution Processes of a Magnetic System's Magnetostatic Analysis with Maxwell 3D Field Simulator. *Selçuk Teknik Dergisi*, 2007. 6(3): p. 221-240.
64. Wang, J., and Howe, D. (2005). Influence of soft magnetic materials on the design and performance of tubular permanent magnet machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(10), 4057-4059.
65. Chen, A., Arshad, W. M., Thelin, P., and Zheng, P. (2004). Analysis and optimization of a longitudinal flux linear actuator for hybrid electric vehicle applications. *IEEE Symp. Vehicle Power and Propulsion*
66. G. Du, et al., "Comprehensive Comparative Study on Permanent-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motors and Other Types of Motor" *Applied Sciences*, vol.13, 14, 2023.

