

Yüksek Güçlü Mikrodalga Sistemlerinde Kullanılan Bir Virkatörün Parametrik Analizi ve Tasarım Çalışması

Büşra Timur, İbrahim Semih Küçük, Şimşek Demir
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Ankara

busra.timur@metu.edu.tr, semih.kucuk@metu.edu.tr, simsek@metu.edu.tr

Özet: Bu bildiride, Yüksek Güçlü Mikrodalga üretmek için tasarlanan virkatör yapısının benzetim çalışmaları sunulmuştur. Bu çalışma kapsamında çeşitli virkatör değişkenlerinin güç dönüşüm verimi üzerine etkisi incelenmiş ve verim iyileştirilmesi yapılmıştır. Yaklaşık %1 seviyelerinde olan verim, %6 seviyesine yaklaştırılmıştır. Ayrıca parametrelerin virkatörden çıkan mikrodalga frekansıyla bağlantısı üzerinde durulmuştur.

Abstract: In this paper, vircator which is designed to generate High Power Microwave (HPM) is simulated. In the scope of this study, effects of parameters of vircator on power conversion efficiency is examined and efficiency optimization is performed. Efficiency which is initially about 1% is approached to 6%. Besides, relation between parameters of vircator and frequency of radiated microwave is considered.

1. Giriş

Yüksek Güçlü Mikrodalga (YGM) son zamanlarda uluslararası araştırmalarda oldukça dikkat çeken bir konu haline gelmiştir. YGM, parçacık hızlandırıcılarından elektronik harp sistemlerine birçok sistemde kendine giderek daha çok yer bulmaya başlamıştır[1].

Yaygın olarak yüksek güçlü mikrodalga kaynaklarının başlıcaları magnetron, relativistic magnetron, BWO(Geriye Yürüyen Dalgı Osilatörü) ve virkatördür. Yürütölen proje kapsamında mikrodalga kaynağı olarak virkatör seçilmiştir. Bu seçimin nedeni virkatörün diğer mikrodalga kaynaklarına nazaran daha basit, boyut olarak küçük, üretimi kolay ve dayanıklı olmasıdır[2][3]. Ayrıca virkatöre dışarıdan manyetik alan uygulamaya gerek yoktur[4]. Frekans ayarlaması kolayca yapılabilir[1]. Bu artılarının yanında, virkatör oldukça düşük bir verime sahiptir; %1 ile %10 arasında değişmektedir[5]. Ayrıca, virkatör sistem değişkenlerine bağılı olarak stabil olmayan salınımlarda yapabilmektedir[2][6]. Virkatörün bütün bu olumlu ve olumsuz özellikleri düşünöldüğünde, YGM sistemlere başlangıç için virkatör oldukça iyi ve yeterli bir tercihtir. Literatürde çok çeşitli virkatör yapıları bulunmaktadır. Ancak bu yapılar analitik çözümleri kullanmak için her zaman uygun olmamaktadır. Bu noktada çalışmanın benzetim ortamında yapılması kaçınılmaz bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Parçacıklar üzerinde benzetim çalışması yapabilen sınırlı sayıda yazılım bulunmaktadır. Bu çalışmadan kullanılan MAGIC PIC(Particle-in-Cell) yazılımı endüstride standartlaşmış olmakla birlikte bu alanda yaygınlıkla kullanılmaktadır.

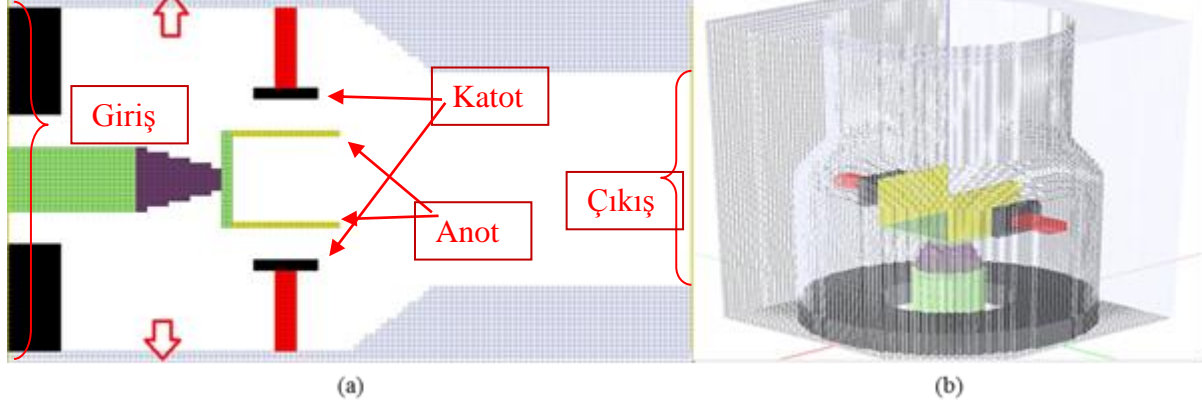
Sunulan bu bildiride, virkatör performans ve çalışma prensiplerinin anlaşılması için benzetim ortamında deneysel çalışmalar yapılmış ve elde edilen güç, verimlilik ve frekans sonuçları fiziksel gerekçelere dayandırılarak yorumlanmıştır.

2. Virkatör Tasarımı ve Benzetim Çalışması

Virkatör prensipte katodu ile anodu arasına yüksek voltaj farkı uygulanması ile çalışır. Uygulanan bu yüksek voltaj farkından dolayı katottan kopan elektronlar potansiyel olarak daha düşük potansiyele sahip elektron geçirgenliği yüksek anota doğru hızlanıp anotun içinden diğer tarafa geçerler. Eğer bu elektron bulutunun sahip olduğu potansiyel enerjisi, kinetik enerjisinden yüksek olursa, anotun diğer tarafında sanal katot oluştururlar[2][7]. Sanal katot oluşumundan sonra hem oluşan bu sanal katot hemde sanal katot ile gerçek katot arasında kalan elektronlar salınım yaparak mikrodalga üretir. Bu iki farklı salınım sonucunda iki farklı frekansta mikrodalga üretilmiş olur[2][7][8]. İki frekansın birbirlerine eşit olduğu durumda virkatörden maximum verim alınabileceğı birkaç araştırmada bahsedilmiştir[2][9].

Yapılan proje kapsamında tasarlanan virkatör, koaksiyal virkatör yapısına oldukça benzemektedir. Bu seçimin amacı bu tip virkatörün diğer aksiyal yapıli virkatörlerden daha verimli olmasıdır[7]. Bu yapı [1]'de sunulan virkatör yapısından temel alınarak tasarlanmıştır. Ancak bahsi geçen makalede verilen virkatör yapısında çıkış

verimini arttırmak için, oluşan sanal katot, kovuk içine yerleştirilmiş ve %10 güç verimi elde edilmiştir. Ancak bu yapı virkatörün çalışma prensibini anlamak için oldukça karmaşıktır. Bu yüzden, başlangıç olarak Şekil 2'deki virkatör yapısı çalışılmış ve verimlilik artırmak için benzetim çalışmaları Magic yazılımı ile yapılmıştır. Ayrıca Şekil2a'da bu çalışmada sunulan yapının girişi, çıkışı, anodu ve katotu gösterilmiştir. Bu benzetimlerde, çeşitli değişkenlerin verimlilik ve frekans ayarlanabilirliği üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 2. (a) 2B Magic Görünüm (b) 3B Magic Görünüm

3. Virkatör Değişkenleri

Elde edilen virkatör yapısının değişkenlerinin çözümlenebilmesi için değişkenler kontrollü bir şekilde değiştirildi. Değişkenlerin virkatör güç verimi üzerindeki etkisinin yanı sıra, giriş gücü, çıkış gücü ve çıkıştaki elektrik alanın Hızlı Fourier Dönüşümü(HFD) üzerine etkisi de değerlendirildi. Virkatör güç verimi, çıkış ve girişteki güç zaman eğrilerinin tepe değerlerinin yüzde oranı ile bulundu. Giriş gücü virkatör girişinden verilen voltaj ve akım değerleri ile alakalı iken çıkış gücü virkatör çıkışından alınan elektromanyetik dalganın gücü ile alakalıdır. Çıkıştaki elektrik alanın HFD'si ise çıkıştaki elektromanyetik dalganın salınım frekansını göstermektedir.

i. Anot İletim Oranı (AİO)

Virkatör yapısında kullanılan anot saydam olduğu için benzetim çalışmalarında anot için elektronları geçirme yüzdesi bir değişken olarak girilmektedir. Bu değişken saydam anottan sapmaya uğramadan geçen elektronların oranını ifade etmektedir. Benzetim çalışmalarında ilk olarak 0.5 değerinden başlayarak 0.9 değerine kadar 0.1'er basamaklarla bu değerin giriş gücü, çıkış gücü, frekans ve verim üzerindeki etkisine bakıldı. AİO katottan koparılan elektronları etkilemediği için giriş gücünde bir değişim gözlenmedi. [2]'de belirtildiği üzere frekans değeri esas olarak Anot Katot(AK) Açıklığına bağlı olduğu için çıkan dalganın frekans değerinde de herhangi bir değişim oluşmadı. Çizelge 1'de açıkça görüldüğü üzere verim değeri belli bir değere kadar (AİO=0.8) artış gözlenmiş; bu değerden sonra bir düşüş yaşanmıştır. Burada AİO'daki artış ile birlikte saydam anottan geçen elektron sayısı da artmış ve bu artış anotlar arasındaki bölgede fazla sayıda bulunan elektronun birbirleri üzerindeki etkisi ile sanal katot oluşumunu geciktirmiştir. Bu gecikmenin ise faz uzayı incelendiğinde verimi düşüren ana etmen olduğu görülmüştür. Çıkış gücü ise giriş gücü aynı olduğu için Çizelge 1'le benzer bir değişim göstermiştir.

Çizelge 1. AİO Verim Çizelgesi

AİO	Verim(%)
0.5	0.17
0.6	0.78
0.7	2.24
0.8	3.45
0.9	1.32

ii. Voltaj Tepe Değeri (VTD)

Virkatör girişinden uygulanan voltaj; 10 ns yükselme zamanlı, 40 ns yarı doruk genişliği ve 10 ns düşme süreli bir dalga formudur. Bu dalga formunun tepe değerini değiştirerek katottan koparılan elektron miktarını etkilemek mümkündür. Daha fazla elektron koparmayla birlikte çıkış gücünde bir miktar iyileşme sağlanabilir. Bu kısımda benzetim çalışmasında Voltaj Tepe Değeri(VTD) Çizelge 2'deki gibi değiştirilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Şekil 3.(a)'daki üst grafikte görüldüğü üzere giriş voltajlarındaki artış ile birlikte katottan çekilen akımın artmasıyla giriş gücünde artış meydana gelmiştir. Katottan koparılan elektronlarla daha fazla elektronun salınım yapması sağlanmış; sonuç olarak çıkış gücünde kademeli bir artış gözlenmiştir. Fakat 732kV'dan sonra çıkış gücündeki artış giriş gücündeki artışın gerisinde kalarak verimde bir düşüşe neden olmuştur. Bu düşüşün nedeni olarak VTD'nin artmasıyla katottan koparılan elektronların belli bir eşikten sonra sanal katot oluşumuna daha fazla katkı sağlayamayıp doyuma ulaşması gösterilebilir[10]. Frekans VTD'nin karekökü orantılı olacak şekilde değişme göstermektedir[2]. Şekil 3.(a)'daki HFD grafiği de bu sonucu onaylamaktadır.

Çizelge 2. AİO Verim Çizelgesi

VTD	Verim(%)
394kV	0.03
509kV	0.78
622kV	3.03
732kV	3.01
840kV	2.75

iii. Toplam Hacim (TH)

Bu çalışmada virkatörün dış çeperleri genişletilmiş ve böylece dış çeperlerinin sanal katot oluşumuna ve mikrodalga salınımına etkisi değerlendirilmiştir. Virkatörü bir kare prizma gibi düşünecek olursak, bu çalışmada tabandaki karenin boyutları 28 cm, 32 cm, 34 cm ve 36 cm olacak şekilde değiştirildi. Bu değişim sırasında çeper kalınlığı ve çıkıştaki dairesel dalga kılavuzunun boyutları sabit tutuldu. Böylece sadece salınım olan bölge ile dış çeper arasındaki mesafe açılmış oldu. Bu değişkenin katot salınımına bir etkisi olmadığı için giriş gücünde herhangi bir değişime neden olmadığı görüldü. Çıkış güçleri incelendiğinde, çıkış gücünün 28 cm'ye göre 32 cm için arttığı fakat 32'den 34 cm'ye geçişte bir düşüş olduğu görüldü. 36cm'e geçişte ise bu düşüşün devam ettiği gözlemlendi. Şekil 2.(a)'da kırmızı ok ile gösterilen bölgenin genişlemesinden dolayı oluşan yansıma nedeniyle elektrik ve manyetik alanların çıkıştaki dairesel dalga kılavuzuna tam anlamıyla aktarılamadığı benzetim çalışmasındaki elektrik alan analizi ile görülmüştür. Çizelge 3'deki verim değerlerine göre uygun değer olan 32×32 cm²'lik taban alanı değeri bu aşamada virkatör değişkeni olarak sabitlenmiştir.

iv. Anot Katot Açıklığı

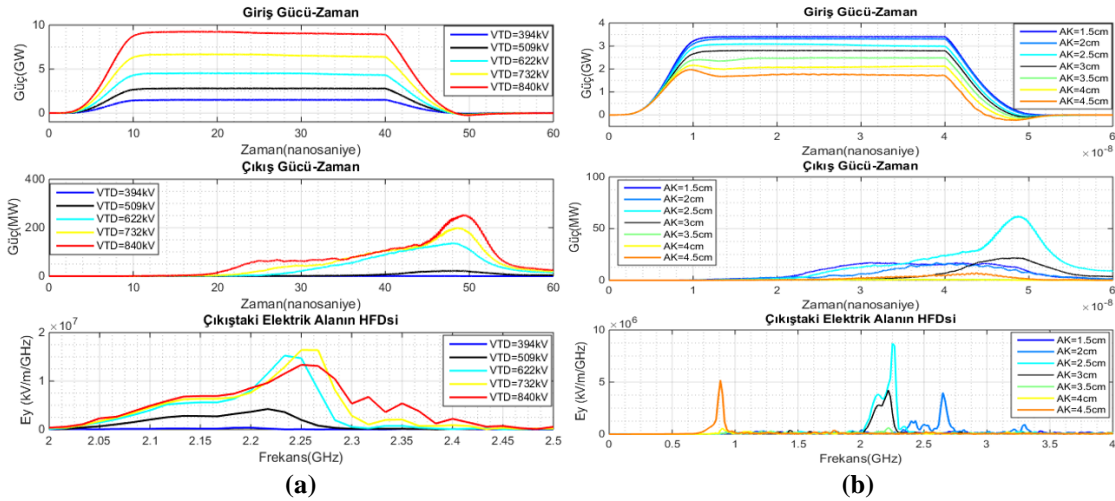
Anot Katot(AK) açıklığı virkatör çalışmasını etkileyen temel unsurların başında gelmektedir. [2]'de belirtildiği üzere bu açıklığın virkatör çalışma frekansına doğrudan bir etkisi olduğu yaptığımız çalışmalarda da gözlemlenmiştir. AK açıklığının aynı zaman virkatör verimi üzerinde de ciddi bir etkisinin olduğunun bu çalışmadan çıkan sonuçlarda görmek mümkündür. Bu aşamada Çizelge 1, 2 ve 3'teki en iyi değerler alınmış ve AK açıklığı parametrik olarak değiştirilmiştir. Sonuçlarda ilk olarak giriş gücü üzerindeki etkisine bakıldığında AK açıklığının azalması ile birlikte anot ile katot arasındaki elektrik alan artmış ve bu sayede katottan daha fazla sayıda elektron koparmak mümkün olmuştur. Bu durumu Şekil 3(b)'nin ilk grafiğinde AK açıklığının azalması ile artan giriş gücü olarak görmek mümkündür. Literatürde, frekans ile AK açıklığının ters orantılı bir ilişki içinde olduğu birçok kaynak tarafından belirtilmiştir[2][7][8]. Elde edilen HFD sonuçları da bu yönde bir bulguyu işaret etmektedir. Çizelge 4'de ve Şekil 3.(b)'deki çıkış gücü-zaman eğrisinde görüldüğü üzere, AK açıklığının 3 cm olduğu durumda çıkış gücü ve verim en yüksek değerini almıştır. Ayrıca, Şekil 3.(b)'nin HFD eğrisinde görüldüğü üzere AK açıklığının 1.5 cm ve 2.5 cm olduğu durumlarda, virkatörden iki farklı frekans bileşeni elde edilmiştir. FOI tarafından yapılan bir çalışmada, bu durum virkatörün düşük frekanslarda daha kararlı sonuçlar vermesiyle açıklanmıştır[7].

Çizelge 3. TH Verim Çizelgesi

TH	Verim(%)
28×28cm ²	0.78
32×32cm ²	3.06
34×34cm ²	2.40
36×36cm ²	0.02

Çizelge 4. AK Açıklığı Verim Çizelgesi

AK Açıklığı	Verim(%)
1.5 cm	0.87
2 cm	0.53
2.5 cm	1.30
3 cm	5.42
3.5 cm	1.10
4 cm	0.03
4.5 cm	0.09
5 cm	1.12



Şekil 3.(a) VTD'ye göre Giriş Gücü-Zaman, Çıkış Gücü-Zaman Grafikleri ve Çıkıştaki Elektrik Alanın HFD'si (b) AK Açıklığına göre Giriş Gücü-Zaman, Çıkış Gücü-Zaman Grafikleri ve Çıkıştaki Elektrik Alanın HFD'si

4. Sonuç

Bu makalede sunulan çalışmada parametrelerin virkatör yapısının güç, verimlilik ve frekans üzerine etkisi gözlenmiş, temel fiziksel çalışma prensipleri anlaşılmış ve yorumlanmıştır. Bu şekilde belirli bir amaca yönelik tasarım sistematığı oluşturulmuştur. Böylelikle başka bir virkatör geliştirmek için temel hazırlanmıştır. Sunulan bu yapının üretim çalışmaları hâlihazırda devam etmektedir. Yetiştigi takdirde sonuçlar paylaşılacaktır.

Kaynaklar

- [1]. W. Jiang et al., “Experimental and simulation studies of new configuration of virtual cathode oscillator,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, cilt. 32, no. 1, s. 54–59, Feb. 2004.
- [2]. J. Benford, J. Swegle ve E. Schamiloglu, *High Power Microwaves Second Edition*, Taylor & Francis, 2007.
- [3]. L. Liu, L. M. Li, X. P. Zhang, J. C. Wen, H. Wan, ve Y. Z. Zhang, “Efficiency enhancement of reflex triode virtual cathode oscillator using the carbon fiber cathode,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, cilt. 35, no. 2 III, s. 361–368, 2007.
- [4]. J. Walter, J. Dickens, ve M. Kristiansen, “An ‘energy efficient’ vircator-based HPM system,” *Dig. Tech. Pap. Int. Pulsed Power Conf.*, s. 658–661, 2011.
- [5]. J. Krile ve M. Kristiansen, “Energy efficiency of High Power Microwave systems,” *2011 IEEE Pulsed Power Conf.*, s. 679–683, 2011.
- [6]. P. Appelgren, M. Akyuz, M. Elfsberg, T. Hurtig, A. Larsson, S. E. Nyholm, ve C. Möller, “Study of a compact HPM system with a reflex triode and a Marx generator,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, cilt. 34, no. 5 I, s. 1796–1805, 2006.
- [7]. Möller C., *Design and Experiments with High Power Microwave Sources*. Doktora tezi, KTH Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden 2012.
- [8]. M. Elsayed, A. Neuber, J. Walter, C. Anderson, A. Young, S. Holt, J. Dickens, M. Kristiansen, L. Altgilbers, “COMSED 2 – Recent advances to an explosively driven high power microwave pulsed power system,” 2011 International Pulsed Power Conference, Chicago, IL, June 19-23, 2011.
- [9]. C. Möller, M. Elfsberg, A. Larsson, ve S. E. Nyholm, “Experimental studies of the influence of a resonance cavity in an axial vircator,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, cilt. 38, no. 6 PART 1, s. 1318–1324, 2010.
- [10]. S. Humphries, “Charged Particle Beams,” *Comput. Eng.*, 2002.