

Çok Düşük Frekanslı Yüksek Gerilim Üretilmesi ve Kontrolü Generation and Control of Very Low Frequency High Voltage

Uğur Aktepe, Mehmet Aykut Solak, Emel Önal, Özcan Kalenderli

Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi

aktepeugr@gmail.com, solakmehmetaykut@gmail.com, eonal@itu.edu.tr, kalenderli@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, 0,1-1 Hz frekans aralığında yüksek gerilim elde edebilmek için bir devre tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Yüksek çıkış gerilimine ulaşmak ve daha düzgün bir alternatif gerilim elde etmek için köprü evirici devresi kullanılmıştır. Evirici devresinin girişine doğru gerilim uygulayarak anahtarlama işlemleri ile alternatif gerilim çıkışı elde edilmektedir. Gerçeklenen devrede anahtarlama elemanı olarak yüksek gerilim mosfetleri kullanılmıştır. Güç kısmının gerçekleşmesinde trafolu ve trafosuz olmak üzere çeşitli yöntemler denenmiştir. Bunların hepsinde amaç evirici devresinin düzgün bir şekilde çalışması için dalgası en az düzeyde olan yüksek bir doğru gerilim değeri üretmektir. Giriş gerilimi ayarı bir oto-transformatör yardımıyla yapılmıştır.

Abstract

In this study, it is aimed to design a circuit and its application to generate high voltage which able to change frequency between 0.1–1 Hz. Full bridge inverter was used to reach aimed voltage and getting a smooth alternative voltage. When direct voltage and switching points are satisfied to input of full bridge inverter, an alternative voltage can be taken from out. In full bridge inverter high voltage MOSFETs were used as a switching element. Many ways were attempted to create a power part such as with transformer and without. In all ways the main idea was getting a smooth direct voltage for the input of the full bridge inverter in high voltage degree. A variable transformer was used to change the input voltage of the system.

1. Giriş

Yüksek gerilimde kullanılan eleman ve devrelerin çalıştığı koşullara uygunluğu ve işletme koşullarına hazırlığı, yapılan yüksek gerilim deneyleriyle belirlenir ve doğrulanır. Yüksek gerilim uygulamaları genelde şebeke frekanslı alternatif gerilimli uygulamalardır. Yüksek doğru gerilim uygulamaları da vardır. Bunun yanında özellikle açık alan elektrik şebekeleri doğrudan veya dolaylı yıldırım aşırı gerilim veya akımlarına maruz kalır. Ayrıca şebekelerdeki işletme, bakım-onarım veya arıza nedeniyle anahtarlama olayları, anahtarlama darbesi oluşumuna; elemanların ve şebekenin anahtarlama darbe gerilimiyle zorlanmasına neden olur. Bu etkilerden her biri yapılan araştırma ve doğrulama deneyleriyle gözlenir, incelenir. Bu nedenle yüksek alternatif gerilim, yüksek doğru

gerilim, yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimleri üreteçlerine ve ölçme düzenlerine gereksinim vardır.

Yüksek alternatif gerilim deneyleri 50/60 Hz şebeke frekanslı gerilimlerle yapılır. Bu deney sırasında denenen nesnenin kapasitesi C'ye, uygulanan gerilim U'ya ve çalışılan frekans f'ye bağlı olarak deney nesnesi gerilim üreticinden

$$I = \omega C U = 2 \pi f C U \quad (1)$$

kadar akım çeker. Bu demektir ki deney nesnesinin kapasitesi arttıkça veya uygulanan gerilim yükseldikçe üreteçten daha fazla akım çeker. Bu da kaynak gücünün bu akımı verebilecek güçte olmasını gerektirir. Böyle olunca, örneğin, kablolar gibi artan uzunlukla kapasitesi artan veya genel olarak kapasiteleri yüksek elemanlar üreteçten daha fazla akım çekerler. Bu duruma çare olarak çok düşük frekanslı yüksek gerilim kaynakları ile deney yapmak düşünülmüştür. Örneğin 1 Hz frekansla çalışmak (1) denklemine göre 50 Hz frekansla çalışmaktan 50 kat daha az akım çekilmesi veya 0,1 Hz frekansla çalışmak 500 kat daha az akım çekilmesi anlamına gelir. Bu da daha küçük güçlü üreteçlerle trafolar, kablolar, kondansatörler gibi büyük kapasiteli nesnelere ayrı olarak veya şebeke içinde denemesini kolaylaştırır.

Bu amaçla çeşitli çok düşük frekanslı (very low frequency (VLF)) yüksek gerilim üreteçleri tasarlanmış ve kullanılmaktadır. Çok düşük frekans teknolojisinin başlangıcı 60'lı yıllara kadar uzanmaktadır. İlk olarak GE (General Electric) ve ASEA (Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget) gibi büyük enerji firmaları tarafından elektrik makinası olarak kullanılan motor ve generatörlerin deneylerinde kullanılmıştır. Makinalar üzerinde yapılan deneylerin bir kısmı ise çok düşük frekans teknolojisi kullanılarak yapılmaktadır.

Bir kabloya yüksek doğru gerilim (YDG) uygulandığında kablo yalıtımı içerisinde elektrik yükleri oluşmaktadır. Bu yükler, kablo alternatif gerilimli işletmeye alındığında kablo yalıtımında bölgesel zorlanmalara ve zayıflamalara neden olacaktır [1]. Genellikle, doğru gerilimdeki delinme gerilimi, alternatif gerilimdeki delinme geriliminin 1,5-2 katı kadardır. Bu nedenle bu yükseklikteki yüksek doğru gerilim (DG) XLPE kablo yalıtımının doğrulanması için gereklidir. Ancak bu kadar yüksek DG uygulaması bölgesel zorlanmalara yol açacak ve yalıtımın ömrünü kısaltacaktır [2]. Ayrıca, eski kablolar alternatif işletme için yeterli bir yalıtıma sahip olduğu halde DG deneyinden sonra delinebilmektedir [3].

Laboratuvar deneylerinden elde edilen gözlemlere göre yüksek gerilim kablolarına DG uygulandığında kablolarda meydana gelen elektriksel ağaçlanmalar, gerilimin uygulandığı ilk anda önemsiz boyutlarda iken, gerilim uygulanmaya devam ettikçe, Şekil 1’de görüldüğü gibi hızla büyümektedir [4].



Şekil 1: 50 Hz 20 kV deney geriliminde ağaçlanma.

Diğer taraftan 0,1 Hz frekans ile gerçekleştirilen deneyde kabloda oluşan elektriksel ağaçlar ilk anda ciddi boyutlarda gözükseler de deneyin ilerleyen zamanlarında bu ağaçlarda bir gelişme meydana gelmemektedir (Şekil 2) [4].



Şekil 2: 0,1 Hz 20 kV deney geriliminde ağaçlanma.

50 Hz yerine çok düşük frekanslı gerilim kullanıldığında kablo yalıtımında uzay yükleri oluşmayacaktır. DG deneyi ile kıyaslandığında daha düşük gerilimlerle yalıtım problemleri tespit edilebilecektir. Çok düşük frekanslı gerilim deney düzenlerinin boyutları doğru gerilim deney düzenleri ile kıyaslandığında saha deneylerinde kullanıma daha uygundur. Ayrıca çok düşük frekanslı gerilim deneyi esnasında kablo yalıtımında meydana gelebilecek sorunlardan ötürü geçici gerilim yükselmeleri ortaya çıkmayacaktır [5].

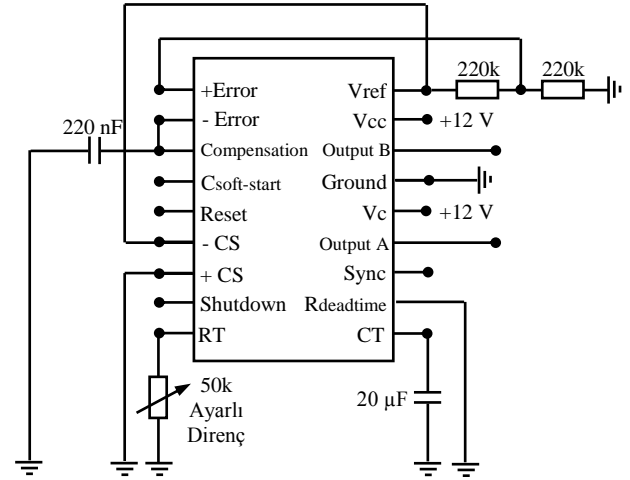
Bu çalışmada, hem yüksek kapasiteli deney cisimlerinin deneylerini yapabilmek hem de çok düşük frekanslı yüksek gerilimde yalıtkanların ve aygıtların davranışını inceleyebilmek amacıyla 0,1 Hz-1 Hz aralığında frekans ayarlanabilen bir yüksek gerilim üretici tasarlanıp gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Çalışma tasarımının aşamalarını, karşılaşılan zorlukları ve bulunan çözümleri içermektedir.

2. Çok Düşük Frekanslı Gerilim Üretimi ve Kontrolü

2.1. Ayarlı Çok Düşük Frekans Elde Edilmesi

Gerçeklenmesi planlanan üreticinin üreteceği gerilimin frekans aralığı 0,1 Hz - 1 Hz olarak düşünülmüştür. Bu aralıktaki frekansları elde edilebilmek için en uygun tümleşik devre olarak SG3526 entegresi seçilmiştir. Bu entegre devre

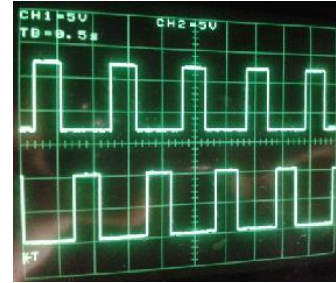
SG3524-SG3525 entegre devrelerine göre daha düşük frekans seviyelerine inilebilmektedir. Şekil 3’te, 18 bacaklı SG3526 entegre devresinin bacaklarının devre bağlantı şeması gösterilmiştir.



Şekil 3: SG3526 devre bağlantı şeması.

$$frekans = 1.1 / (RT \cdot CT) \quad (2)$$

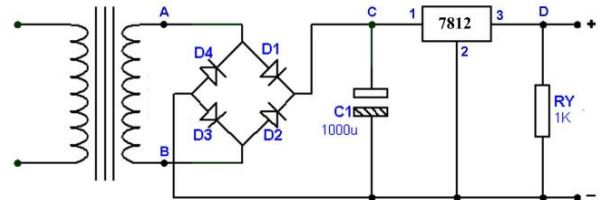
Denklem (2) kullanılarak SG3526 entegresinin dokuzuncu bacağı olan RT çıkışına bağlanacak olan 50 kΩ’luk ayarlı direnç ve CT çıkışına bağlanacak olan 20 µF’lık sabit kondansatör ile zaman sabiti ve RT direnci değiştirilerek istenen frekans değerlerine ayar olanağı elde edilmiştir. Şekil 4’te, bir örnek olarak 1 Hz frekanslı işaret üretecek şekilde ayarlanmış SG3526 entegresinin çıkış dalga şekli verilmiştir.



Şekil 4: SG3526 osiloskop görüntüsü, frekans 1 Hz.

2.2. Doğrultucu Devresi Uygulaması

Devrenin doğru gerilim beslemesi, Şekil 5’te görülen tam dalga doğrultucu devresiyle elde edilmiştir.

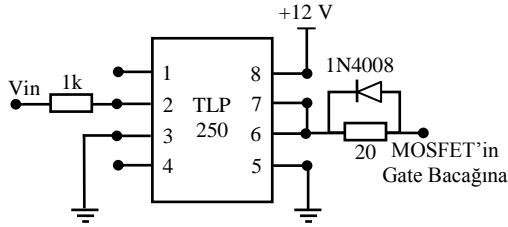


Şekil 5: Tam dalga doğrultucu devresi [6].

Devredeki 7812 elemanı, 12 V sabit güç regülatörüdür. Bu devre sayesinde sabit 12 V doğru gerilim elde edilmiştir.

2.3. TLP250 Entegrasyonu (Opto-İzolatör)

Bu entegre devre, iki katın birbirinden ayrılmasını ve sinyal iletişiminin devam etmesini sağlamaktadır. Ayrılma fiziksel olarak gerçekleşir ve iletişim manyetik ve optik olarak devam eder. Bu durumun yararı, katlardan birinde meydana gelecek olumsuz bir durumun sisteme zarar vermesini engellemektedir.



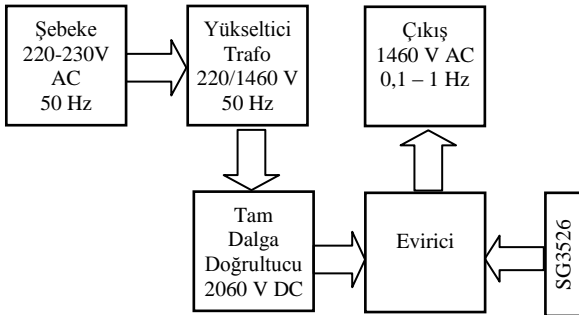
- | | |
|------------|--------|
| 1: NC1 | 5: VCC |
| 2: Anode | 6: VO2 |
| 3: Cathode | 7: VO1 |
| 4: NC2 | 8: GND |

Şekil 6: TLP250 devre bağlantı şeması.

3. Yüksek Gerilim Üretimi ve Kontrolü

3.1. Yükseltici Trafo Kullanarak Tasarım

Çok düşük frekanslı yüksek gerilim üretmek için iki farklı yol izlenmiştir. Önce, Şekil 7'deki devrede gösterildiği gibi, şebeke gerilimi bir yükseltici trafo yardımıyla yükseltilmiş, yükseltilebilir gerilim doğrultma devresiyle doğrultup sonra bunu alternatif gerilime çevirerek düşük akımlı yüksek gerilim elde edilmeye çalışılmıştır. Burada karşılaşılan sorunlar, gerilim değeri yükseldiğinde bu değerlerde düzgün çalışacak malzemelerin piyasada kolaylıkla bulunamaması, malzemelerin yurt dışından getirilmesi gerekmesi ve çok pahalı olmasıdır.



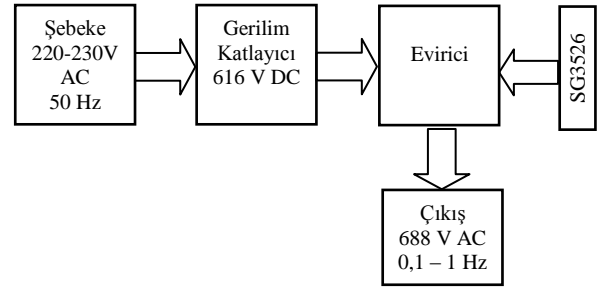
Şekil 7: İlk tasarlanan güç devresi blok diyagramı.

3.2. Gerilim Katlayıcı Kullanarak Tasarım

İkinci seçenek olarak şebeke gerilimi, gerilimi iki katına çıkaran bir doğrultma devresi ile yükseltilmiş, elde edilen doğru gerilim evirici ile alternatif gerilime çevrilmiştir. Şekil 8'de bu durum için üreticinin blok diyagramı gösterilmiştir.

Devrenin girişinde bir varyak kullanılarak devrenin girişinden uygulanan gerilimin 0-230 V arasında ayarlanabilir olması sağlanmıştır (AC-AC). Daha sonra gerilimi katlayan, Greinacher devresi adı da verilen bir doğrultucu devresi kullanılarak, varyak çıkışındaki alternatif gerilim hem

doğrultulmuş hem de ikiye katlanmıştır (AC-DC). Bu yükseltilmiş doğru gerilim, kontrol kısmı yardımıyla üretilen ayarlanabilir frekans işaretinin gönderildiği evircinin girişine uygulanmıştır. Böylece evirici çıkışında ayarlanabilir frekanslı yükseltilmiş alternatif gerilim elde edilmiştir (DC-AC).

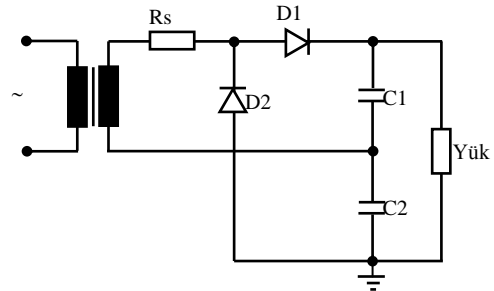


Şekil 8: Gerçekleştirilen güç kısmı blok diyagramı.

3.2.1. Gerilim Katlayıcı

Gerilim katlayıcılar devrede bobin kullanılmadan doğru gerilimin tepe değerinin katlanması görevini görmektedir. Şebeke geriliminin kolayca doğrultulması ve yükseltilmesi işlemi gerilim katlayıcılar yardımıyla gerçekleştirilebilir. Çeşitli gerilim katlayıcı devreleri vardır [7]. Bu çalışmada gerilimi iki katına çıkaran (ikileyici) tam dalga doğrultucu kullanılmıştır. Gerilim katlayıcılar, yüksek gerilim düşük akım uygulamalarında çokça kullanılır [8, 9].

Çalışmada kullanılan tam dalga gerilim ikileyicide dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, girişin toprağıyla çıkışın toprağının farklı olması zorunluluğudur. Yarım dalga katlayıcılarda böyle bir dezavantaj yoktur [10]. Bu nedenle girişe bir varyak ya da izolasyon trafosu konulması, iki kısmın toprağını birbirinden ayrılması için zorunludur [11].



Şekil 9: Tam dalga gerilim ikileyici devresi.

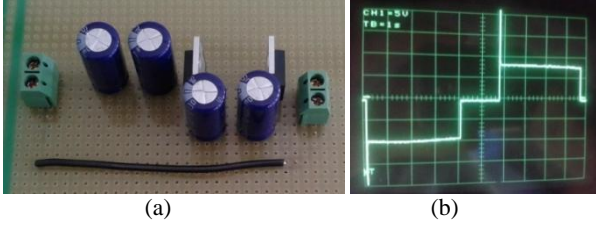
Gerilim ikileyiciler, Şekil 9'da görüldüğü gibi iki diyot ve iki kondansatörden oluşmaktadır. Kondansatörler birbirine seri ve yük direncine paralel bağlı olduğundan, şarj gerilimleri toplamı AC gerilimin tepe değerinin iki katı olmaktadır. Kapasite büyüdükçe daha kararlı bir çalışma sağlanmaktadır.

3.2.2. Gerilim İkileyici Gerçeklenmesi

1. Tasarım

Bu devreyi gerçekleştirmek için 2 adet yüksek hızlı DSEI 12-12 A, 1200 V diyot ve 4 adet 10 µF, 400 V kondansatör kullanılmıştır (Şekil 10a). Şekil 10b'deki osiloskop görüntüsünde ani gerilim yükselmesi görülmektedir. Bunun nedeni seçilen kondansatörlerin kapasite değerinin düşük

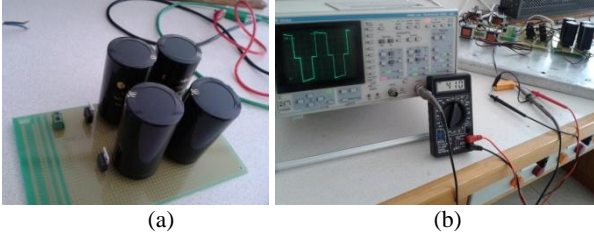
olmasıdır. Bunun düzeltilmesi için yeni bir kondansatör değeri belirlenmiştir.



Şekil 10: Birinci tasarım devresi ve çıkış dalga şekli.

2. Tasarım

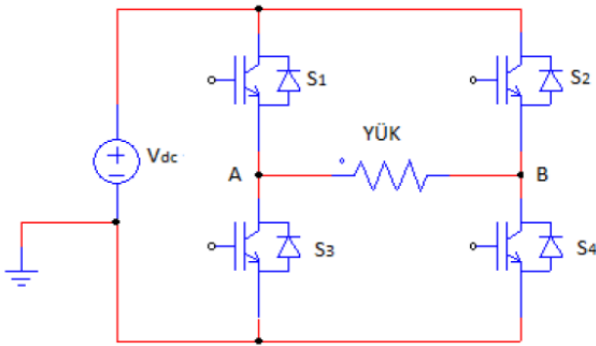
Gerilim ikileyicideki ani gerilim yükselmelerinin ve düşüşlerinin giderilmesi ve daha yüksek değerde çıkış gerilimi elde etmek için, daha önce kullanılan 10 μF , 400 V'luk kondansatörlerin yerine 1000 μF ve 400 V'luk kondansatörler kullanılmıştır (Şekil 11). Bu kondansatörlerin boyutları oldukça büyüktür ve yüksek kapasiteleri sayesinde daha fazla yük depolayabilmektedirler.



Şekil 11: İkinci tasarım devresi ve çıkış dalga şekli.

3.2.3. Tam Dalga Köprü Evirici

Eviriciler doğru akımı alternatif akıma çeviren güç elektroniği devreleridir. Çalışmada tam dalga köprü evirici kullanılmıştır.



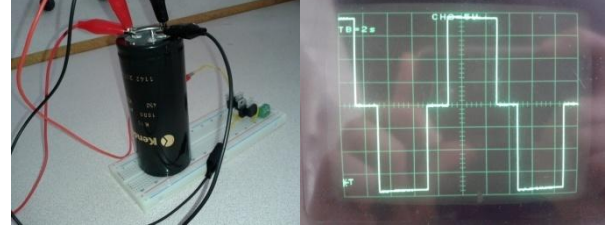
Şekil 12: Tam dalga köprü evirici devre şeması.

Tam dalga köprüde 4 adet anahtarlama elemanı ve 4 adet diyot bulunmaktadır. Burada yük üzerindeki gerilim V_{AB} 'yi elde etmek için anahtarların çapraz çiftler halinde iletme geçmesi ve kesime gitmesi gerekmektedir. S_1 ve S_4 anahtarları iletimde, S_2 ve S_3 kesimde iken A-B noktaları arasındaki gerilim $V_{AB} = V_{DC}$. S_1 ve S_4 anahtarları kesimde, S_2 ve S_3 iletimde iken $V_{AB} = -V_{DC}$ olur. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta aynı grupların aynı anda iletme

geçmemeleri gereğidir, çünkü bu durum kısa devre ile sonuçlanır.

3.3. Şebeke Doğrultulması Üzerinden Tasarım

Gerilim katlayıcı dışında, kullanılan şebekenin 220-230 V AC geriliminin doğrultulması ile DC gerilim elde edilmiştir.



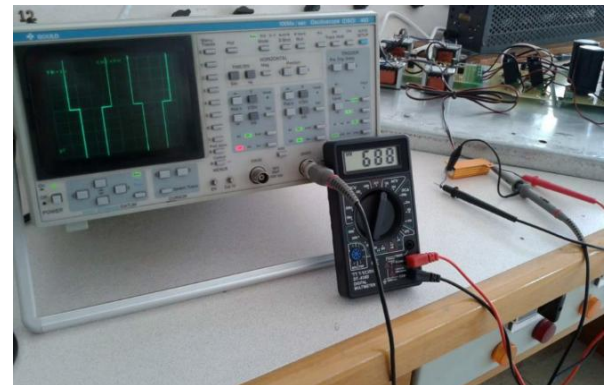
Şekil 13: Şebeke gerilimi doğrultma devresi ve dalga şekli.

Şebeke gerilimi 220-230 V AC olduğu için doğrultucuda kullanılması gereken kondansatörün gerilimi buna göre hesaplanmıştır. Bu AC gerilimin DC karşılığı yaklaşık 311-325 V olduğu için kullanılacak kondansatörün gerilimi en düşük 400 V olması gerekmektedir. Ayrıca dalgahılgı az bir DC gerilim elde etmek için kondansatörün kapasitesinin olabildiğince yüksek olması gerekir. Bu koşullara uygun olarak 1800 μF , 450 V'luk özel bir kondansatör kullanılmıştır.

Şekil 13'te osiloskop ekranında görülen dalga şekli, bu doğrultucuya girişten 150 V AC uygulandığında, eviriciden alınan çıkış gerilimidir ve genliği 416 V'tur. Burada gerilim değerinde ani yükselme veya düşme yoktur.

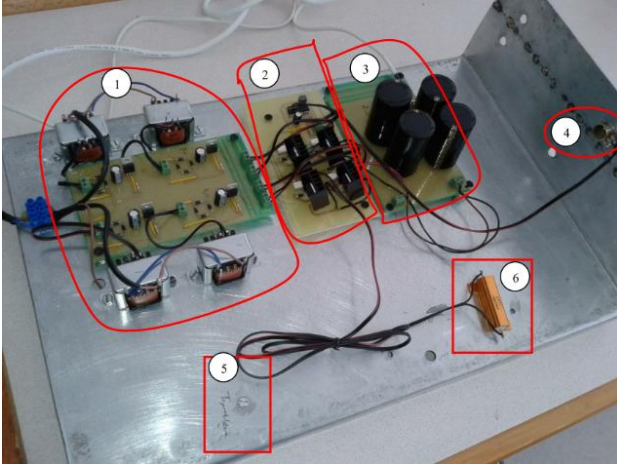
4. Deney

Düşük frekanslı YG kontrol ve kumanda bölümü güç kısmı ile birleştirildiğinde sistem, yük yerine kullanılan 22 k Ω , 50 W taş direnç ile test edilmiştir. Gerilim değeri varyak yardımıyla adım adım artırılarak dalga şekli ve gerilim genliği osiloskop üzerinden ölçülmüştür. Şekil 14'teki osiloskop görüntüsünden ve multimetreden görüldüğü gibi maksimum 688 V AC çıkış gerilimi elde edilmiştir. Devre daha yüksek giriş gerilimi ile beslendiğinde çıkış geriliminde bozulmalar meydana gelmektedir.



Şekil 14: Elde edilen çıkış gerilimi dalga şekli ve genliği.

Gerçeklenen düşük frekanslı gerilim üretici Şekil 15'te görülmektedir.



Şekil 15: Gerçeklenen devrenin genel görünüşü.

1. TLP250 ve SG3526 beslemeleri için gerekli 12 V DC üreten doğrultucu devresi,
2. SG3526 devresi ve tam dalga köprü evirici,
3. Gerilim ikileyici,
4. Frekans ayarı (0,1 – 1 Hz),
5. Topraklama,
6. Üretimin çıkış kablosu ve kablonun ucuna bağlanan bir yük.

5. Sonuç ve Öneriler

Sonuç olarak devre çıkışında frekansı 0,1-1 Hz arasında ayarlanabilen maksimum 688 V alternatif gerilim elde edildi ve bu gerilim bir ohmik yük üzerine uygulandı.

Devrede anahtarlama elemanı olarak MOSFETler tekli olarak kullanılmıştır. MOSFETlerin çoklu kullanılmasıyla (seri bağlanması ile) ilgili özel bir çalışma yapıp 688 V olan çıkış değeri daha da artırılabilir. 0,1 Hz ile 1 Hz arasında değiştirilebilir bir frekans elde edebilmek için SG3526 tümleşik devresi kullanılmıştır. Mikrokontrolör kullanılarak bu işlem daha verimli gerçekleştirilebilir. Devre ile anahtarlama elemanları arasında ise TLP250 entegre devresi optik izolatör olarak kullanılmıştır. TLP 250 ve SG3526 devrelerinin beslenmesi için tam dalga doğrultucu kullanılmıştır. DC-AC çevirimi için tam dalga köprü evirici kullanılmıştır. Evirici girişine uygulamak için elde edilen doğru gerilim, gerilim ikileyici ile gerçekleştirildi. Bunun yerine bir yükseltici trafo kullanılıp bunun doğrultulmasıyla daha yüksek bir doğru gerilim elde edilebilir. Gerilim ikileyicide kullanılan kondansatörlerin kapasiteleri 1000 μ F, 400 V'tur. Daha yüksek kapasiteli kondansatörler kullanılarak çıkış gerilimi dalga şekli daha da düzeltilebilir.

Sonuç olarak gerçekleştirilen düşük frekanslı gerilim üretici ile dayanma gerilimi doğrulama deneyleri yapılabileceği gibi, bu tür gerilimlerde yalıtkan malzemelerin ve devre elemanlarının davranışları incelenebilir.

6. Kaynaklar

- [1] Bahder, G., Katz, C., Lawson, J. H., and Vahlstrom, W. Jr., "Electrical and Electrochemical Treeing Effects in Polyethylene and Crosslinked Polyethylene Cables", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems PAS-93, pp. 977-990, May/June 1974.
- [2] Peschel, M. T., "Needed Changes in Medium Voltage Testing. Were you in on it? Welcome to the World of VLF", 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), San Diego, CA, pp. 1-5, June 2010.
- [3] Eager, G. S., Katz, C., Fryszczyn, B., Densley, J., Bernstein, B. S., "High Voltage VLF Testing of Power Cable", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, April 1997.
- [4] Werelius, P., "Development and Application of High Voltage Dielectric Spectroscopy for Diagnosis of Medium Voltage XLPE Cables", Department of Electrical Engineering Division of Electrotechnical Design Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, Sweden, December 2001.
- [5] Oetjen, H., "Principals and Field Experience with the 0.1 Hz VLF Method regarding the Test of Medium Voltage Distribution Cables", IEEE International Symposium on Electrical Insulation Conference, pp. 376-379, September 2004.
- [6] Bodur, H., "Güç Elektroniği", Birsen Yayınevi, İstanbul, 2010.
- [7] Bakshi, U. A., & Godse, A. P., Diode Applications. *Electronic Circuits and Applications* (3rd ed.), pp. 56. Pune, India: Technical, 2008.
- [8] Deshpande, N. P., Diodes and Their Applications. *Electronic Devices & Circuits* (pp. 141). New Delhi, India: Tata McGraw-Hill, 2008.
- [9] Rida, A., Yang, L., & Tentzeris, M., Design of RFID - Enabled Sensors. *RFID-Enabled Sensor Design and Applications* (pp. 95). Norwood, USA: Artech House, 2010.
- [10] Paul, B., Power Supplies. *Industrial Electronics and Control* (2nd ed.), pp. 23. New Delhi, India: PHI Learning Private, 2009.
- [11] Rao, B. V., Rajeswari, K. R., Pantulu, P. C., & Murty, K. B., Rectifiers, Filters and Voltage Regulators. *Electronic Circuit Analysis* (pp. 3.65). New Delhi, India: Dorling Kindersley, 2012.