

# Yüksek DA Gerilim Uygulamaları için Empedans Kaynaklı Yükseltici Çevirici Tasarımı

## Design of Impedance Source Step-up Converter for High DC Voltage Applications

DAĞ Bülent<sup>a</sup>, ÖZDEMİR Mehmet Akif<sup>a</sup>, TAMYÜREK Bünyamin<sup>a</sup>, AYDIN Emrullah<sup>b</sup>, AYDEMİR M. Timur<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara  
e-mail: [mehmetakif@gazi.edu.tr](mailto:mehmetakif@gazi.edu.tr), [bulentdag@gazi.edu.tr](mailto:bulentdag@gazi.edu.tr), [btamyurek@gazi.edu.tr](mailto:btamyurek@gazi.edu.tr)

<sup>b</sup>Turgut Özal Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Malatya  
e-mail: [emrullah.aydin@ozal.edu.tr](mailto:emrullah.aydin@ozal.edu.tr)

<sup>c</sup>Kadir Has Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
e-mail: [timur.aydemir@khas.edu.tr](mailto:timur.aydemir@khas.edu.tr)

### Özet

Bu çalışmada yüksek DA gerilimli bir güç kaynağında kullanılmak üzere yüksek kazançlı yeni nesil bir empedans kaynaklı yükseltici çeviricinin güç katı tasarımı yapılmıştır. Ele alınan empedans kaynaklı çevirici yeni geliştirilmiş bir topoloji olup, çeviricinin temel çalışma prensibi daha önceki bir çalışmada detaylı şekilde incelenmiştir. Bu çalışmada çeviricinin hedeflenen uygulamaya yönelik tasarımı için gereken gerilim-denge ve akım-denge eşitlikleri çıkarılmıştır ve bu eşitlikler kullanılarak uygun devre elemanları değerleri belirlenmiştir. Tasarlanan çeviricinin kararlı durum performansı Matlab-Simulink benzetim modeli ile doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Empedans kaynaklı çevirici, Yüksek DA gerilimi, Güç katı tasarımı.

### Abstract

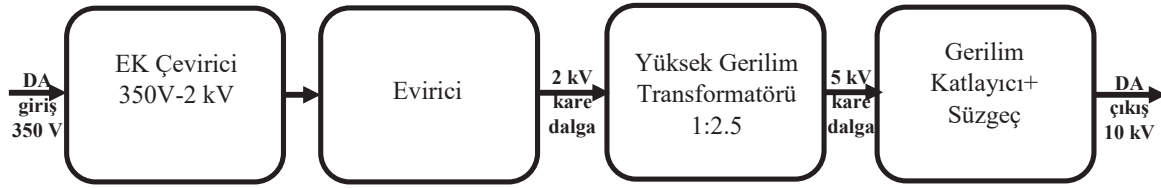
In this study, design of power stage of a new generation impedance source step-up converter, to be used in a high DC voltage power supply, is performed. The used impedance source converter is a newly developed topology and its basic operation principles have been investigated in detail in a recent study. In this study, the required volt-balance and current-balance equations of the converter are obtained for the design of the converter in accordance with the targeted application and the corresponding circuit component values are determined. Steady-state performance of the designed converter is validated with Matlab-Simulink simulation model.

**Keywords:** Impedance source converter, High DC voltage, Power stage design

### 1. Giriş

Yüksek DA Gerilim (YDAG) güç kaynakları tıp endüstrileri, askeri radar teknolojisi, telekomünikasyon ve havacılık gibi farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür YDAG

güç kaynaklarının tipik uygulamaları, X-ışını sistemleri, yürüyen dalga tüpleri (TWT), yalıtım testi cihazları, magnetron ve gyrotron gibi yüksek güçlü vakum cihazları, darbeli güç uygulaması vb. olarak sıralanabilir. Yarıiletken teknolojisinin gelişkin olmadığı dönemlerde yüksek gerilim seviyelerine ulaşmak için şebeke gerilimini diyotlarla doğrultup kondansatörlerle katlayan, yarım dalga veya tam dalga gerilim katlayıcı devreler kullanılmıştır. Greinacher gerilim çiftleyici, geliştirilmiş Greinacher gerilim çiftleyici, iki katlı Greinacher gerilim çiftleyici (dörtleyici), Cockroft-Walton (CW) gerilim çiftleyici ve CW gerilim katlayıcı devreler bunlara örnek olarak gösterilebilir [1-3]. Ancak, şebeke gerilimini doğrultup ardından kondansatör tabanlı gerilim katlayıcılarla hedeflenen yüksek gerilimi elde etmek şebeke frekansında bir transformatör kullanımı gerektirmektedir. Bu, ağırlık ve hacim demek olduğundan, özellikle havacılık uygulamaları için bu yapı yerine yüksek frekanslı Darbe Genişlik Modülasyonlu (DGM) dönüştürücü sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Geleneksel düşük frekanslı yüksek gerilim üreteçlerinin yerini alan anahtarlamalı modda çalışan yüksek gerilim, yüksek frekanslı (YGYF) güç dönüştürücüler sayesinde yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verim yanında daha iyi kalıcı durum davranışı ve dinamik davranış elde edilebilmektedir [2-4]. Ancak, bu yapı basit olmakla beraber bazı temel sorunlar içermektedir. Öncelikle, yüksek çıkış geriliminden dolayı birincil-ikincil arası ve ikincil sargı katmanları arasındaki yalıtım mesafesi yüksek (<5 kV/mm) olmalıdır. Bu durum ise kaçak kapasitansın ve kaçak endüktansın büyük olmasına yol açmaktadır (>0.4 uF ve >0.01 mH) [5,6]. Ayrıca, istenilen gerilim düzeylerine çıkabilmek için transformatörlerin sarım oranlarının yüksek olması gerekir (>100) ve yüksek sarım oranları da kaçak kapasitansı artıran diğer bir etkidir. Bu yapıda görülen yüksek kaçak endüktans değerleri, ikincil taraftan birincil tarafa (sarım oranının karesiyle çarpılarak) yansıyan transformatör kapasitansı ve yine ikincilden birincile yansıyan yarıiletken eklem kapasitansları devrenin çalışmasında ciddi sorunlar doğurmaktadır. Kaçak endüktanslar nedeniyle gerilim



Şekil 1 Önerilen yüksek DA gerilim güç kaynağı yapısı

sıçramaları, kaçak kapasitanslar nedeniyle de akım sıçramaları ve yavaş tepki ortaya çıkmakta, akımın şekli bozulmakta ve toplam verim düşmektedir [7,8].

Yüksek DA gerilim güç kaynaklarında kullanılan transformatörlerin ikincilden birincile yansıyan kaçak eleman değerlerini küçültmenin en etkili yolunun transformatörün sarım oranının mümkün olduğunca küçük tutulması olduğu anlaşılmaktadır. Sarım sayısını düşürmenin yollarından birisi modüler yapılar kullanmaktır [4, 9, 10]. Bu yöntemdeki amaç, bir modüldeki transformatörün sarım oranını düşük tutmak için modül bazında çıkış gerilimini düşük tutup istenilen gerilimi sağlamak için modül çıkışlarının seri bağlanarak toplam gerilimin yükseltilmesidir. Ancak bu yöntem, birden fazla modül kullanımından dolayı, sistemin boyutlarını, kütlelerini ve maliyetini artırmaktadır. Diğer yandan son zamanlarda, diyotlar ile doğrultulan giriş AA geriliminin evirici ve transformatörlü yapı ile yükseltilmeden önce bir DA-DA çevirici ile yükseltip eviriciye uygulanması gündeme gelmiştir. Bu yapı özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye bağlanmasında sıklıkla tercih edilmeye başlanmıştır. Bu yapıda giriş gerilimini yükseltmek için klasik yükseltici (boost) devreleri hem verim, hem de güvenilirlik açısından tercih edilmemektedir. Özellikle bu çalışmadaki uygulamanın gerektirdiği kV'lar seviyesine klasik yükseltici çeviriciler ile çıkmak pratikte uygulanabilir değildir. Bu kapsamda, özellikle yenilenebilir kaynakların şebekeye bağlanmasında, empedans kaynaklı (Z-Kaynak, Yarı-Z-Kaynak, Y-Kaynak) DA-DA çeviricilerin tercih edildiği görülmektedir [11-17]. Empedans kaynaklı (EK) çeviriciler, gerilim kaynaklı ve akım kaynaklı çeviricilerin iyi yanlarını bir araya getirirken artı üstünlükler de sunarlar. Bu yeni nesil çeviricilerin avantajları; aynı devre ile hem yükseltme hem de alçaltma sağlayabilme, geniş giriş akımı aralığı, yüksek gerilim kazancı ve düşük anahtar gerilim stresi olarak sıralanabilir [18,19]. Özellikle yarı-Z-kaynak yapısı, sürekli ve düşük dalgacıklı giriş akımı, yüksek verimlilik ve güvenilirlik gibi klasik Z-kaynak yapısına göre sunduğu artı avantajlardan dolayı daha sıklıkla tercih edilmektedir [11-15, 18,19]. Bu sebeple, yürütülmekte olan proje kapsamında da genel yapısı [11-17]'de sunulmuş olan yapılar ile aynı olan, ancak giriş katında yeni nesil bir izoleli yarı-Z-kaynak çeviricinin kullanıldığı, bir yüksek DA gerilim kaynağı yapısı tercih edilmiştir. Giriş katında empedans kaynaklı bir DA-DA çevirici kullanımı ile güç kaynağının trafo girişine olabildiğince yüksek bir DA giriş gerilimi sağlanarak trafonun sarım sayısının ve kaçak elemanlarının asgari düzeyde tutulması projenin temel amacıdır. Ayrıca, empedans kaynaklı çeviricilerin yüksek verimlilik ve düşük anahtar gerilim stresi ile yüksek gerilim kazancı sunmaları sayesinde verimli, kompakt ve sorunsuz bir yüksek gerilim DA güç kaynağı tasarımı hedeflenmektedir. Kullanılan yeni nesil yarı-Z-kaynak çevirici topolojisinin avantajları ve tercih sebebi 2. Bölüm'de açıklanmıştır.

Bu çalışmada, yürütülen proje kapsamında tasarlanan yüksek güçlü DA güç kaynağının giriş katında kullanılan Z-

kaynak çeviricinin gereksinimlere uygun güç katı tasarımı sunulmuştur. Çalışmanın 2. Bölümü'nde önerilen güç kaynağı yapısı ve giriş katında kullanılan empedans kaynaklı çevirici topolojisi verilmiştir. 3. Bölüm'de empedans kaynaklı çeviricinin kararlı durum özelliklerini belirleyen gerilim-denge ve akım-denge eşitlikleri elde edilmiştir. 4. Bölüm'de güç kaynağı gereksinimlerine göre DA-DA çeviricinin devre elemanları ile güç katı tasarımı sunulmuştur. Belirlenen devre elemanlarına göre çeviricinin performansı Matlab-Simulink modeli ile doğrulanarak sonuçlar 5. Bölüm'de verilmiştir. 6. Bölüm'de ise sonuçların değerlendirilmesi verilmiştir.

## 2. Yüksek Gerilim DA Güç Kaynağı Yapısı ve Empedans Kaynaklı Çevirici

Önerilen yüksek DA gerilim güç kaynağının yapısı Şekil 1' de gösterilmiştir. Güç kaynağı, 350 V giriş gerilimi ile 10 kV çıkış gerilimi sağlayacak ve 2 kW güç kapasitesinde olacaktır. Şekil 1'deki yapıya göre, doğrultulmuş 350 V gerilim öncelikle bir EK çevirici ile 2 kV'a çıkarılacaktır. Daha sonra, 2 kV DC gerilim bir evirici ile AA gerilime dönüştürülüp 2.5 sarım oranlı bir trafo ve trafonun çıkışındaki gerilim katlayıcı (2 kat)+süzgeç yapısı ile 10 kV'a çıkarılacaktır. Bu yapıdan anlaşılacağı üzere giriş katında 350 - 2000 V, 2 kW anma değerlerinde bir EK çevirici gerekmektedir. Bu noktada, kullanılacak olan EK çeviricinin topolojisi önem arz etmektedir. Literatürde son zamanlarda geliştirilmiş quasi-Z-source tabanlı yeni nesil çeviriciler göze çarpmaktadır. Bu çeviriciler izolesiz [20,21] ve izoleli [22,23] olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılabilirler. İzoleli çeviriciler izolasyonun gerekli olduğu uygulamalarda tercih edilebilirken, izolasyonun gerekmediği durumlarda da yüksek gerilim kazancı sağlamalarından dolayı tercih edilebilirler. Ancak izoleli yapılarda çıkış diyot gerilimi genelde bağlantı endüktörünün sarım oranı kadar artabildiğinden, bu durum tasarım aşamasında eleman seçiminde dikkate alınmalıdır. Diğer yandan izolesiz yapılar gereken yüksek gerilim kazancını sağlayabilmek için çok fazla miktarda gerilim katlayıcı kullanmakta olup, giriş akımı sürekli yapıdadır ve anahtar ve diyot gerilimleri açısından [22]'deki topolojiye göre fazladan bir avantaj sağlamamaktadır. Bu değerlendirmeler doğrultusunda, güç kaynağının girişinde kullanılmak üzere tercih edilen EK çeviricinin devre şeması Şekil 2' de gösterilmiştir. Kullanılacak olan giriş EK çeviricisinin detaylı analizi ve çalışma modları [22]'de anlatılmıştır. Ancak, çeviricinin güç katı tasarımında devre elemanları seçimi için gereken tüm gerilim-denge ve akım-denge eşitliklerine ihtiyaç vardır. Bu eşitliklerin bir kısmı [22]'de sadece çıkış gerilim

kazancını belirlemek amacıyla kısmen çıkarılmış olup, gereken eşitliklerin tamamı bir sonraki bölümde çıkarılacaktır.

### 3. EK Çeviricinin Statik Analizi

Yüksek gerilim DA güç kaynağında, giriş DA gerilimini yükseltmek için kullanılacak olan EK çeviricinin devre şeması Şekil 2.a'da gösterilmiştir. [22]'de detaylıca açıklandığı gibi, çevirici her zaman sürekli iletim modunda (Continuous Conduction Mode) çalışmakta olup, çeviricinin ikisi  $S$  anahtarının AÇIK ve KAPALI durumlarına karşılık gelen iki ana mod olmak üzere, toplam yedi alt çalışma modu bulunmaktadır. Ana modlar haricindeki diğer modlar  $S$  anahtarının ve diyotların kaçak bileşenlerinden kaynaklı çok kısa süreli modlar olup, bu sebeple ihmal edilmeleri mümkündür. Çeviricinin ana AÇIK modunda,  $S$  anahtarı ve  $D_0$  diyotu iletimdeyken,  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  diyotları kapalı durumdadır. Ana KAPALI modunda ise  $S$  anahtarı ve  $D_0$  diyotu kapalı,  $D_1$ ,  $D_2$  ve  $D_3$  diyotları açık durumdadır. Çeviricinin statik analizi için gereken, ikincil tarafa transfer edilmiş AÇIK ve KAPALI mod eşdeğer devreleri Şekil 2.b ve c'de gösterilmiştir. Şekil 2'deki devrelerde,  $L_{in}$  çeviricinin giriş endüktörünün endüktansı,  $L_m$  ise bağlantı endüktörünün manyetikleme endüktansıdır. Şekil 2.b ve c'deki  $L_{lke}$  bağlantı endüktörünün toplam kaçak endüktansına karşılık gelmektedir. İkincil kapasitörleri  $C_3$  ve  $C_4$  eşdeğer kapasitörler olup AÇIK modda birbirlerine seri, KAPALI modda ise paralel durumdadırlar. Bu kapasitörler eşdeğer oldukları için, bu kapasitörlerin ortak parametreleri alt simgesi '34' olan ortak bir parametre ile gösterilecektir. Şekil 2.b ve c'deki üst tire " " işaretli semboller ilgili parametre değerinin ikincil tarafa yansıtılmış değerini ifade etmektedir. İlgili kapasitans ve endüktans değerleri  $C'_1 = C_1/n^2$ ,  $C'_2 = C_2/n^2$ ,  $L'_m = n^2 L_m$ ,  $L'_{in} = n^2 L_{in}$ ,  $L'_{lke} = n^2 L_{lke}$  eşitlikleri ile ve devredeki ilgili tüm gerilim ve akımlar sırasıyla  $v' = nv$  ve  $i' = i/n$  eşitlikleri ile ikincil tarafa yansıtılırlar. Burada,  $n = n_2/n_1$  bağlantı endüktörünün sarım oranıdır.

Şekil 2.b ve c'den, giriş endüktansı,  $L'_{in}$ , manyetikleme endüktansı  $L'_m$  ve kaçak endüktans  $L'_{lke}$  için gerilim-denge eşitlikleri aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\langle V'_{Lin} \rangle = D(nV_{in} + V'_{C2}) + (1-D)(nV_{in} - V'_{C1}) \quad (1)$$

$$\langle V'_{Lm} \rangle = DkV'_{C1} - (1-D)kV'_{C2} \quad (2.a)$$

$$\langle V'_{Lm} \rangle = D(V_{C0} - 2V_{C34}) - (1-D)V_{C34} \quad (2.b)$$

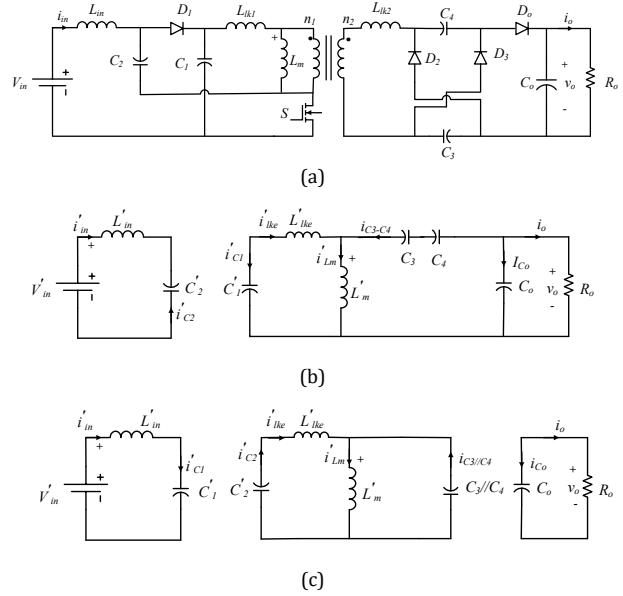
$$\langle V'_{lke} \rangle = D(V'_{C1} + 2V_{C34} - V_{C0}) + (1-D)(-V'_{C2} + V_{C34}) \quad (3)$$

Bu eşitliklerde  $D$ , çeviricinin görev periyodunu, üçgen parantez içerisinde gösterilen gerilimler de endüktörlerin ortalama gerilim değerlerini belirtmektedir.  $k = L_m/(L_m+L_{lke})$  bağlantı endüktörünün bağlantı katsayısıdır. Kararlı durumda endüktör gerilimlerinin ortalama değerleri sıfır olacağı için, (1)-(3) eşitlikleri sıfıra eşitlenerek kararlı durum ortalama kapasitör gerilim değerleri aşağıdaki gibi elde edilir;

$$V'_{C1} = \frac{(1-D)nV_{in}}{(1-2D)} \quad (4)$$

$$V'_{C2} = \frac{DnV_{in}}{(1-2D)} \quad (5)$$

$$V_{C34} = V_{C3} = V_{C4} = kV'_{C2} \quad (6)$$



Şekil 2. EK çevirici devre şemaları (a) asıl devre (b) AÇIK mod eşdeğer devresi (c) KAPALI mod eşdeğer devresi.

$$V_{C0} = nkV_{in} \frac{(1+D)}{(1-2D)} \quad (7)$$

Diğer yandan, Şekil 2.b ve c kullanılarak,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_{34}$  ve  $C_o$  kapasitörlerinin akım-denge eşitlikleri aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\langle I'_{C1} \rangle = -DI'_{lke-on} + (1-D)I'_{in} \quad (8)$$

$$\langle I'_{C2} \rangle = -DI'_{in} + (1-D)I'_{lke-off} \quad (9)$$

$$\langle I_{C34} \rangle = D(I'_{Lm} - I'_{lke-on}) + (1-D) \frac{(I'_{Lm} - I'_{lke-off})}{2} \quad (10)$$

$$\langle I_{C0} \rangle = D(I'_{lke-on} - I'_{Lm} - \frac{V_{C0}}{R_o}) - (1-D) \frac{V_{C0}}{R_o} \quad (11)$$

Bu eşitliklerde,  $I'_{lke-on}$  ve  $I'_{lke-off}$  sırasıyla, eşdeğer kaçak endüktansın ( $L'_{lke}$ ) AÇIK ve KAPALI modlardaki ortalama akım değerleridir. Kararlı durumda ortalama kapasitör akımları sıfır olacağı için, (8)-(11) eşitlikleri sıfıra eşitlenerek ortalama endüktör akımları aşağıdaki gibi elde edilir;

$$I'_{lke-on} = \frac{(1-D)}{D} I'_{in} \quad (12)$$

$$I'_{lke-off} = \frac{D}{(1-D)} I'_{in} \quad (13)$$

$$I'_{Lm} = \frac{(2-D)}{(1+D)} I'_{in} \quad (14)$$

burada,

$$I'_{in} = \frac{V_{C0} I_o}{nV_{in}} \quad (15)$$

$$I_o = \frac{V_{C0}}{R_o} \quad (16)$$

Anahtar ve diyotların kapalı durum gerilim stresleri de eleman seçiminde gereken diğer parametrelerdir. Şekil 2'nin analizinden,  $S$  anahtarının ve  $D_{0-3}$  diyotlarının kapalı durum

gerilimleri  $V_{DS}$  ve  $V_{D0-3}$  aşağıdaki gibi elde edilir,

$$V_{DS} = V_{C1} + V_{C2} = \frac{V_{in}}{1-2D} \quad (17)$$

$$V_{D0} = V_{D2} = V_{D3} = \frac{nV_{in}}{1-2D} \quad (18)$$

$$V_{D1} = \frac{V_{in}}{1-2D} \quad (19)$$

Eşitlik (4)-(7), (12)-(15) ve (17)-(19) ile sırasıyla ortalama kapasitör gerilimleri, ortalama endüktör akımları ve anahtar gerilimleri elde edilmiştir. Bir sonraki bölümde, bu eşitlikler kullanılarak hedeflenen tasarım gereksinimlerini karşılayacak şekilde endüktans, kapasitans, ve anahtar gerilim değerleri belirlenecektir.

#### 4. EK Çevirici Güç Katı Tasarımı

EK çeviricinin, hedeflenen yüksek gerilim DA güç kaynağı ile uyumlu olacak şekilde belirlenmiş tasarım gereksinimleri Tablo 1'de verilmiştir. Verilen giriş-çıkış gerilimleri ve (7) kullanılarak, bağlantı endüktörünün sarım oranı,  $n = 1.8$  olarak elde edilir. Sarım oranı belirlendikten sonra, (4)-(6) eşitlikleri kullanılarak, yansıtılmamış ortalama kapasitör gerilimleri,  $V_{C1} = 612.5$  V,  $V_{C2} = 262.5$  V,  $V_{C3} = V_{C4} = 463$  V olarak elde edilirler. Anahtar ve diyot gerilimleri de (17)-(19) dan,  $V_{DS} = V_{D1} = 875$  V,  $V_{D0} = V_{D2} = V_{D3} = 1575$  V olarak elde edilirler.

Endüktör tasarımında, endüktans değeri yanında ortalama endüktör akımı da gereken diğer parametrelerdendir.  $L_{in}$  ve  $L_m$  endüktör akımlarının yansıtılmamış ortalama değerleri (14) ve (15)'den,  $I_{Lin} = 5.71$  A,  $I_{Lm} = 7.47$  A olarak elde edilirler. Diğer yandan, anahtar seçiminde de kapalı durum gerilim stresi yanında ortalama ve tepe anahtar akımları da anahtar seçimi için gerekmektedir. Şekil 2.a ve b'nin analizinden, AÇIK durumdaki ortalama anahtar akımı,  $I_{DS}$ , aşağıdaki gibi elde edilir,

$$I_{DS} = I_{in} + I_{Ike-on} \quad (20)$$

Eşitlik (12) ve (15) deki yansıtılmamış akım eşitlikleri (20) de yerine koyulursa, ortalama anahtar akımı aşağıdaki gibi elde edilir,

$$I_{DS} = \frac{(1-D)}{D} I_{in} + I_{in} = 19.03 \text{ A} \quad (21)$$

Azami anahtar akımı ( $I_{DS-max}$ ), azami endüktör akımı dalgacığı gereksinimine göre (%20 tepe-tepe, %10 tepe),  $I_{DS-max} = 1.1 \times I_{DS} = 21$  A olarak elde edilir.

Endüktans değeri belirlemek için AÇIK veya KAPALI mod endüktör gerilimlerine ihtiyaç vardır. AÇIK mod için hesaplama yapılırsa,  $L_{in}$  ve  $L_m$  endüktörlerinin açık mod gerilimleri, Şekil 2.b'den aşağıdaki gibi elde edilir,

$$V_{Lin-on} = V_{in} + V_{C2} = 350 + 262.5 = 612.5 \text{ V} \quad (22)$$

$$V_{Lm-on} = (V_{Co} - 2V_{C34})/n = (2000 - 2 \times 463)/1.8 = 597 \text{ V} \quad (23)$$

Endüktans hesabında aşağıda verilen tipik endüktör eşitliği kullanılır,

$$L = \frac{V \Delta T}{\Delta I} \quad (24)$$

Eşitlik (24)'de,  $\Delta I$  tepeden-tepeye akım değişimi,  $\Delta T$  ise değişimin süresidir. AÇIK mod seçildiği için  $\Delta T = DT_s$  olacaktır. Burada  $T_s$  anahtarlama periyodudur. Eşitlik (22)-(24) ve Tablo

Tablo 1 EK çeviricinin tasarım gereksinimleri

Parametre	Değeri (birimi)
Çıkış gerilimi ( $V_o$ )	2 (kV)
Giriş gerilimi ( $V_{in}$ )	350 V
Çıkış gücü ( $P_o$ )	2 (kW)
Anahtarlama frekansı ( $f_s$ )	50 (kHz)
Görev periyodu ( $D$ )	0.3
Bağlantı endüktörü bağlantı katsayısı ( $k$ )	0.98
Endüktörlerin akım dalgalanması (tepe-tepe)	%20
Kapasitörlerin gerilim dalgalanması (tepe-tepe)	%4

1'de verilen endüktör akımı dalgalanma miktarı gereksiniminden, giriş ve manyetikleme endüktans değerleri aşağıdaki gibi elde edilir,

$$L_{in} = \frac{V_{Lin-on} DT_s}{\Delta I_{in}} = \frac{612.5 \times 0.3 \times 1 / (50 \times 10^3)}{0.2 \times 5.71} = 3.22 \text{ mH} \quad (25)$$

$$L_m = \frac{V_{Lm-on} DT_s}{\Delta I_{Lm}} = \frac{597 \times 0.3 \times 1 / (50 \times 10^3)}{0.2 \times 7.47} = 2.4 \text{ mH} \quad (26)$$

Son olarak, kapasitans değeri belirlemek için AÇIK veya KAPALI mod ortalama kapasitör akımlarına ihtiyaç vardır. AÇIK mod seçildiğinde, Şekil 2.b'den,  $C_{0-4}$  kapasitörlerinin ortalama AÇIK mod akımları aşağıdaki gibi elde edilir,

$$I_{C1-on} = I_{Ike-on} = \frac{1-D}{D} I_{in} = 13.3 \text{ A} \quad (27)$$

$$I_{C2-on} = I_{in} = 5.71 \text{ A} \quad (28)$$

$$I_{C3,C4-on} = I'_{Lm} - I'_{Ike-on} = \left( \frac{2-D}{1+D} - \frac{1-D}{D} \right) I'_{in} = -3.25 \text{ A} \quad (29)$$

$$I_{C0-on} = -I_{C3,C4-on} - I_o = 2.25 \text{ A} \quad (30)$$

Kapasitans hesabında ise aşağıda verilen tipik kapasitör eşitliği kullanılır,

$$C = \frac{I \Delta T}{\Delta V} \quad (31)$$

Eşitlik (27)-(30)'dan elde edilen akım değerleri ve Tablo 1 de verilen gerilim dalgalanma gereksiniminden  $C_{0-4}$  kapasitörlerinin değerleri aşağıdaki gibi elde edilir,

$$C_1 = \frac{I_{C1-on} DT_s}{\Delta V_{C1}} = \frac{13.3 \times 0.3 \times 1 / (50 \times 10^3)}{0.04 \times 612.5} = 3.26 \text{ } \mu\text{F} \quad (32)$$

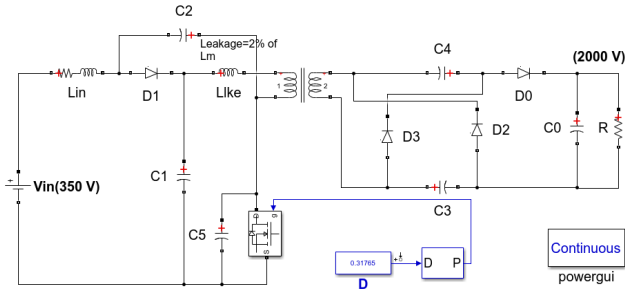
$$C_2 = \frac{I_{C2-on} DT_s}{\Delta V_{C2}} = \frac{5.71 \times 0.3 \times 1 / (50 \times 10^3)}{0.04 \times 262.5} = 3.26 \text{ } \mu\text{F} \quad (33)$$

$$C_3 = C_4 = \frac{I_{C3,C4-on} DT_s}{\Delta V_{C3,C4}} = \frac{3.25 \times 0.3 \times 1 / (50 \times 10^3)}{0.04 \times 463} = 1.05 \text{ } \mu\text{F} \quad (34)$$

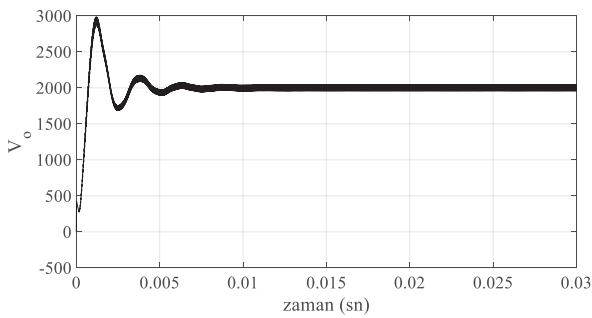
$$C_0 = \frac{I_{C0-on} DT_s}{\Delta V_{C0}} = \frac{2.25 \times 0.3 \times 1 / (50 \times 10^3)}{0.04 \times 2000} = 169 \text{ nF} \quad (35)$$

#### 5. EK Çeviricinin Benzetimi

Bir önceki bölümde tasarlanan EK çeviricinin, hesaplanan devre elemanlarının değerleri kullanılarak benzetimi Matlab-Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'de EK çeviricinin benzetim modeli görülmektedir. Modeldeki anahtara paralel  $C_5$  kapasitörü anahtarın çıkış kapasitörünü ( $C_{DS}$ ) modellemek için eklenmiş olup, değeri 1 nF'dir. Ayrıca,



Şekil 3. EK çeviricinin Matlab-Simulink benzetim modeli.



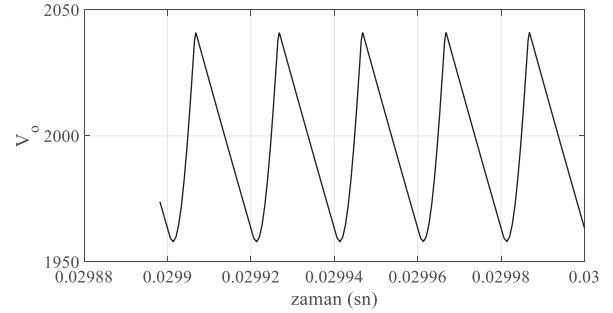
Şekil 4. Çıkış geriliminin tam yük altında kalkışının benzetim sonucu.

bağlantı endüktörünün kaçak endüktansının oranı olarak, endüktörün tasarım hedeflerinden birisi olan %2 seçilmiştir. Bağlantı endüktörünün tasarımı proje kapsamında yürütülmekte olan çalışmalardan bir diğeridir ve bu çalışmanın konusu değildir. Bu çalışma kapsamında belirlenen devre elemanlarına göre oluşturulmuş EK çeviricinin nominal yük altında ilk kalkış gerilim eğrisinin benzetim sonucu Şekil 4'de gösterilmiştir. Gerilim eğrisindeki salınımlar EK çeviricinin küçük sinyal dinamik modeli ile ilişkilidir. Çeviricinin dinamik analizi, kapalı döngü denetleyici tasarımı başlığı altında, gelecek çalışmalar kapsamında detaylıca ele alınacaktır ve bu çalışmanın konusu değildir. Diğer yandan, bu çalışmadaki sonuçların irdelenmesi amacıyla, Şekil 5'de sırasıyla giriş gerilimi, giriş akımı ve manyetikleme endüktansı akımının yakın gösterim benzetim sonuçları kararlı durum için gösterilmiştir. Giriş geriliminin tepeden-tepeye değişiminin tasarım hedefi olan %4 dalgalanma kriterini ( $2000 \cdot 0.04 = 80$  V) karşıladığı görülmektedir. Benzer şekilde endüktör akımlarının ortalama değerleri ve dalgalanma yüzdeleri de tasarım hedefleri ile uyumludur.

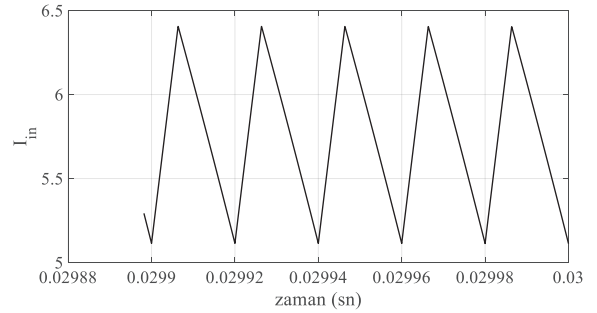
Şekil 6'da S anahtarları ve çıkış diyot gerilimlerinin benzetim sonuçları görülmektedir. Anahtar ve diyot gerilimleri de tasarım hedefleri ile uyumludur. Anahtarların KAPALI mod gerilim değerlerindeki beklenen değerlere göre bir miktar fazlalık, 2000 V çıkış gerilimi için gereken görev periyodunun, ideal olmayan model elemanlarından dolayı bir miktar fazla (0.317) set edilmesinden dolayıdır. Çeviricinin kapalı döngü denetiminde set edilen çıkış gerilimi için gereken görev periyodunu denetleyici ayarlayacaktır.

## 6. Sonuç

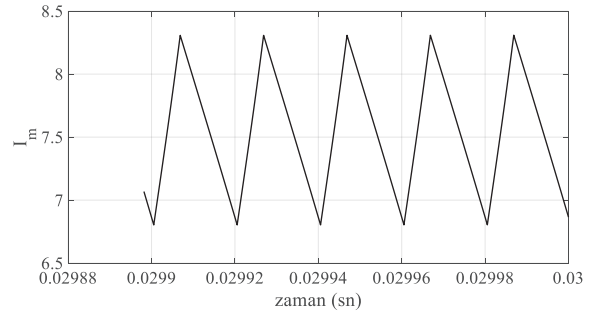
Bu çalışmada yüksek DA gerilim bir güç kaynağının giriş katında, ilk kademe yükseltici olarak kullanılacak olan yeni nesil bir EK çeviricinin, hedeflenen gereksinimler doğrultusunda tasarımı ve benzetimi yapılmıştır. Yüksek gerilim trafosundan önce bu şekilde yüksek kazançlı bir EK



a) Çıkış gerilimi,  $V_o$



b) Giriş akımı,  $I_{in}$



c) Manyetikleme endüktansı akımı,  $I_m$

Şekil 5. EK çeviricinin Matlab-Simulink benzetim sonuçları.

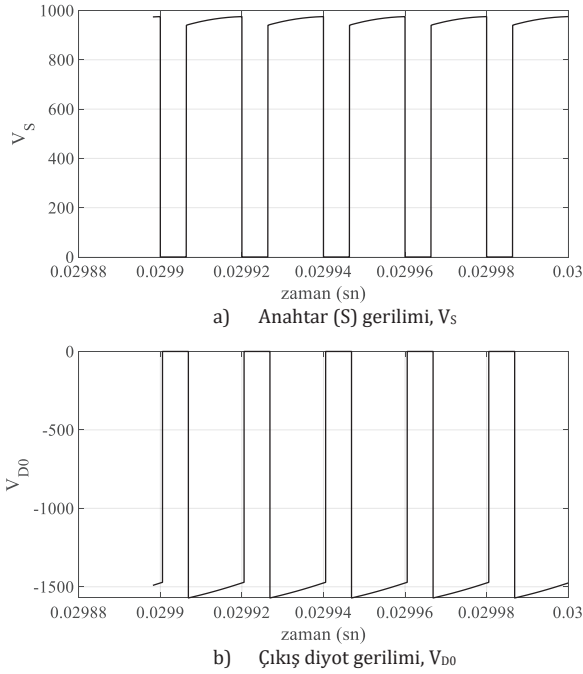
çeviricinin kullanımı ile trafonun sarım oranının ve dolayısı ile kaçak elemanlarının değerlerinin düşürülmesi hedeflenmektedir. Tasarım için gereken ortalama kapasitör akımları ve endüktör gerilimleri, EK çeviricinin kararlı durum (statik) analizi ile elde edilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre, EK çevirici tasarımının gereksinimler ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bundan sonraki aşamada, çeviricinin kapalı döngü performansı ve verimlilik analizleri için, tasarlanacak olan bir denetleyici ile beraber ilk modeli üretilip deneysel çalışmalar gerçekleştirilecektir.

## Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 121E377 kodlu Empedans Kaynaklı DA-DA Dönüştürücülü Yüksek Gerilim DA Güç Kaynağı Tasarımı başlıklı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Destek için TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

## Kaynaklar

- [1] V. Garcia, M. Rico, J. Sebastian, M. M. Hernando and J. Uceda, "An optimized DC-to-DC converter topology for high-voltage pulse-load applications", Proceedings of 1994 Power Electronics Specialist Conference - PESC'94, Taipei, Taiwan, vol. 2, pp. 1413-1421, 1994.



Şekil 6. EK çeviricinin Matlab-Simulink benzetim sonuçları.

- [2] S. Mao, T. Wu, X. Lu, J. Popovic and J. A. Ferreira, "High frequency high voltage power conversion with silicon carbide power semiconductor devices", 6th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC), Grenoble, pp. 1-5, 2016.
- [3] M. Forouzesh, et al., "Step-up DC-DC converters: a comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies and applications", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 12, pp. 9143-9178, 2017.
- [4] S. Mao, C. Li, W. Li, J. Popovic and J. A. Ferreira, "Review of high frequency high voltage generation architectures", IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017 - ECCE Asia), Kaohsiung, pp. 2260-2266, 2017.
- [5] Y. A. Wang, D. M. Xiao, "Design of an electrostatic precipitator power supply based on transformer stray capacitance effects", Electric Power Components and Systems, vol. 38, no. 9, pp. 1005-1029, 2010.
- [6] J. Liu, L. Sheng, J. Shi, Z. Zhang and X. He, "Design of high voltage, high power and high frequency transformer in LCC resonant converter", Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Washington DC, pp. 1034-1038, 2009.
- [7] M. Borage, K. V. Nagesh, M. S. Bhatia and S. Tiwari, "Design of LCL-T resonant converter including the effect of transformer winding capacitance", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 5, pp. 1420-1427, 2009.
- [8] L. Deng, P. Wang, X. Li, H. Xiao and T. Peng, "Investigation on the parasitic capacitance of high frequency and high voltage transformers of multi-section windings", IEEE Access, vol. 8, pp. 14065-14073, 2020.
- [9] S. Mao, Z. Yao, D. Zhu, J. Popovic and J. A. Ferreira, "A 300kHz 4kW 140kVDC output voltage power supply with modular high voltage generation architecture and planar transformer", 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe), Genova, Italy, pp. 1-5, 2019.
- [10] K. An, G. Ning, H. Wang, M. Su and Y. Fu, "A novel DCX based on ZVZCS full-bridge cells with voltage-doubler rectifier for DC grids", IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), pp. 1-6, 2021.
- [11] D. Vinnikov, I. Roasto, "Quasi-Z-Source-Based isolated DC/DC converters for distributed power generation", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no.1, pp. 192-201, 2011.
- [12] Y. P. Siwakoti, F. Blaaberg, P. C. Loh, G. E. Town, "High-voltage boost quasi-Z-source isolated DA/DA converter", IET Power Electronics, vol. 7, no. 9, pp. 2387-2395, 2014.
- [13] O. Husev, et al., "Galvanically isolated quasi-Z-source DC-DC converter with a novel ZVS and ZCS technique", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 12, pp. 7547-7556, 2015.
- [14] M. Heidari, et al., "A high voltage gain ZVT quasi-Z-source converter with reduced voltage stress", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 11, pp. 13696-13710, 2022.
- [15] E. S. Oluwasogo, H. Cha, and T-T. Nguyen, "Beta-quasi-Z-source ( $\beta$ -qZS) DC-DC converter without duty cycle constraint for wide input voltage applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 12, pp. 12784-12794, 2022.
- [16] Y. Siwakoti, et al., "Magnetically coupled high-gain Y-source isolated DC/DC converter", IET Power Electronics, doi: 10.1049/iet-pel.2013.0957, pp. 1-8, 2014.
- [17] X. Fang, X. Ding, S. Zhong, Y. Tian, "Improved quasi-Y-source DC-DC converter for renewable energy", CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, vol. 4, no. 2, pp. 163-170, 2019.
- [18] K. Hada, A. K. Sharma, P. S. Tomar, J. Gupta, "Modern Z-source power conversion technologies: A review", International Research Journal of Engineering and Technology, vol. 4, no. 6, pp. 3207-3211, 2017.
- [19] Y. P. Siwakoti, et al., "Impedance-source networks for electric power conversion part I: A topological review",

IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 2, pp. 699-716, 2015.

[20] M. M. Haji-Esmaili, E. Babaei, M. Sabahi, "High step-up quasi-Z-source DC-DC converter," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 12, pp. 10563-10571, 2018.

[21] M. Veerachary, P. Kumar, "Analysis and design of quasi-Z-source equivalent DC-DC boost converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 6, pp. 6642-6656, 2020.

[22] F. Evran, M.T. Aydemir, "Z-source-based isolated high step-up converter," IET Power Electronics, vol. 6, no. 1, pp. 117-124, 2012.

[23] F. Evran, M.T. Aydemir, "Isolated high step-up Dc-DC converter with low voltage stress," IEEE Power Electronics, vol. 29, no. 7, pp. 3591-3603, 2014.

## Özgeçmişler



**Bülent Dağ**, lisans ve yüksek lisans derecelerini 1998 ve 2002 yıllarında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, doktora derecesini 2015 yılında Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'ndan almıştır. 2020 yılından beri Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Çalışma alanları arasında mıknatıslı elektrik makineleri ve anahtarlamalı güç kaynakları yer almaktadır.



**Mehmet Akif Özdemir**, 1988 Bayburt doğumludur. Lisans eğitimini 2011 yılında Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. Yüksek lisans derecesini 2021 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden almıştır. Doktora eğitimine TÜBİTAK bursiyeri olarak Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde devam etmektedir. Güç elektroniği alanında çalışmalar yapmaktadır.

## Özgeçmişler



**Dr. Bünyamin Tamyürek**, 1970 Artvin-Yusufeli doğumludur. Lisans derecesini 1991 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden, yüksek lisans ve doktora derecelerini 1996 ve 2001 yıllarında New York eyaletinin Troy şehrinde yer alan Rensselaer Polytechnic Institute mühendislik okulunun Elektrik Güç Mühendisliği Bölümü'nden almıştır. Dr. Tamyürek, Amerika Birleşik Devletleri'nin Ohio eyaletine bağlı Columbus şehrinde, enerji üretim, iletim ve dağıtımını yapan American Electric Power (AEP) isimli kuruluşta iki yıl süreyle yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemleri konusunda araştırma ve geliştirme mühendisi olarak görev almıştır. Türkiye dönüşünden sonra 2004-2019 yılları arasında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde çalışmış. 2019 yılından itibaren de Gazi Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Güç elektroniği, kesintisiz güç kaynakları, elektrikli araçlarda elektrikli tahrik ve batarya şarj sistemleri, raylı sistemler, enerji depolama sistemleri, akıllı şebekeler ve askeri ve endüstriyel uygulama alanlarında enerji verimliliği yüksek güç dönüştürücü tasarımı konularında çalışmalar yapmaktadır.



**Emrullah Aydın**, 1986 yılında Elazığ'da doğdu. Lisans eğitimini 2009 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2014 ve 2020 yıllarında Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde sırasıyla Yüksek Lisans ve Doktora eğitimlerini tamamlamıştır. Doktora eğitimini tamamladıktan sonra Malatya Turgut Özal Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Dr. Öğretim Üyesi olarak çalışmaya başlamış ve halen burada çalışmaya devam etmektedir. İlgi duyduğu araştırma alanları arasında Kablosuz Güç Aktarımı, Elektrik Makinaları, Güç Elektroniği ve İndüksiyon Isıtma Sistemleri yer almaktadır.



**Prof. Dr. M. Timur Aydemir**, Lisans ve Yüksek Lisans derecelerini Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden, doktora derecesini University of Wisconsin - Madison Üniversitesi'nden aldı. 2001-2002 yıllarında Fulbright bursiyeri olarak ABD'de University of Wisconsin - Madison Üniversitesi'nde misafir araştırmacı olarak görev yaptı. Güç Elektroniği, Elektrik Makineleri ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları alanında çalışmaları bulunmaktadır. 2012-14 yılları arasında EMO Ankara Şubesi Eğitim Komisyonu Başkanlığı yapmıştır. Halen Kadir Has Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır.