

Yüksek Hızlı AC Sürücülerde Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri ile Topoloji ve Anahtar Seçimi Uygulanması

Semiconductor Switch Selection in the High Speed Drives Using Multi-Criteria Decision Making Methods

Gülsüm Yıldırım

 0000-0001-6075-7310

Düzce Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü

Düzce Üniversitesi

gulsumyildirim@duzce.edu.tr

Özet

Güç elektroniği sektöründe uygun topoloji ve anahtarlama elemanının seçimi; soğutucu ve filtre tasarımını, sistem performansını, verimi ve maliyeti etkiler. Uygulamanın gerilim, güç, çalışma frekansı gibi genel kısıtların yanında; maliyet, çalışma şartları ve hacim gibi endüstriyel seri üretim kısıtları da seçimi etkiler. Endüstriyel çalışmalarda güç elektroniği topolojisi-yarı iletken anahtar seçimi için maliyet veya termal performans öne çıkarken, akademik araştırmalarda anahtarlama kayıpları ve verim önemlidir. Birden fazla kriter ve bu kriterlerinin ağırlıklarına göre işletilecek bir karar verme süreci, daha gerçekçi ve doğru sonuçlar verecektir. Bu noktada Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) yöntemleri kullanılmaktadır. Çalışmada 5 kW, 1200V, 30-60 kHz frekans aralığındaki yüksek hızlı AC motor sürücü topolojisi için; güç kaybı, anahtarlama hızı, hacim ve fiyat seçim ölçütleri dikkate alınarak TOPSIS ve AHP yöntemleriyle seçim yapılmıştır. Üç seviyeli IGBT tabanlı T-NPC ve iki seviyeli SiC-MOSFET tabanlı sürücü arasında yapılan seçimde, her iki yöntemin sonucunda da, iki seviyeli SiC-MOSFET tabanlı sürücü seçimi uygun bulunmuştur. Anahtar kelimeler: Si-IGBT, SiC-MOSFET, Anahtar seçimi, AHP, TOPSIS.

Abstract

The selection of the appropriate topology and switching element affects the cooler and filter design, system performance, efficiency and cost in the power electronics applications. In addition to general constraints such as voltage, power and operating frequency of the application, industrial mass-production constraints such as cost, operating conditions and volume also affect the selection. While the cost or thermal performance is prominent for the selection of power electronics topology-switch pair in industrial works, the switching losses and the efficiency are important in academic research. A decision-making process that is operated according to more than one criteria, and the weights of these criteria will give more realistic and accurate results. At this point, Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods are used. In this paper, the configuration selections have been examined with TOPSIS and AHP methods by considering the selection criteria of power loss, switching

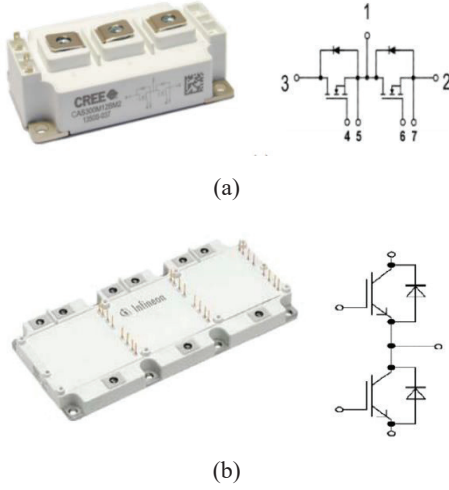
speed, volume and price for the high-speed AC motor drive topology in the frequency range of 5 kW, 1200V, 30-60 kHz. According to the results of both methods, the two-level SiC-MOSFET based driver has been found more suitable than three-level IGBT based T-NPC.

Key words: Si-IGBT, SiC-MOSFET, Motor driver, AHP, TOPSIS.

1. Giriş

Yenilebilir enerji kaynakları, elektrikli araçlar, akıllı şebekeler vb. teknoloji alanındaki gelişmelerle birlikte son yıllarda güç elektroniği teknolojisi ivme kazanmıştır. Güç elektroniği devrelerinin yaygınlaşması ile sistemler daha etkin, esnek, güvenli, verimli ve daha küçük hacimlere sahip hale gelmiştir. Aynı sistem isterleri, farklı topolojilerin uygulanması ile gerçekleştirilebilir. Örneğin bir DC/DC dönüştürücüde; geleneksel yükseltici (boost) topolojisi kullanılabileceği gibi, iç içe geçmiş çok anahtarlı yükseltici topolojisi veya CUK dönüştürücü de tercih edilebilir. Güç elektroniği teknolojisi temelde yarı iletken anahtarlama devre elemanlarına dayanmaktadır. Anahtarlama devre elemanları devre tasarım kriterine bağlı olarak farklı kategorilere ayrılabilir. Bunlardan bazıları; tristörler, transistörler, tiryaklar, GTO'lar, IGBT'ler ve MOSFET'ler vs. sayılabilir. Sağladıkları teknik üstünlükler sebebiyle IGBT ve MOSFET'lerin kullanımı zamanla daha yaygın hale gelmiştir. Son teknolojik gelişmelerle birlikte IGBT ve MOSFET'lerin geniş bant aralığına sahip daha üstün performans gösteren üst sürümleri olan Si-IGBT, SiC-MOSFET ve GaN-MOSFET modelleri geliştirilmiştir (Şekil 1).

Yarıiletken anahtarların performansı ve çalışma aralıkları geliştikçe kullanım alanları da artmıştır. Kesintisiz güç kaynakları [1], maksimum güç noktası takibi [2], rejeneratif frenleme [3], motor sürücüleri [4, 5] gibi pek çok farklı sistemde yaygın olarak kullanılır hale gelmişlerdir. Çalışma parametrelerine göre, çok düşük frekanslardan çok yüksek frekans değerlerine (MHz) kadar veya çok düşük gerilim ve akım seviyelerinden çok yüksek gerilim ve akım seviyelerine (kV, kA) kadar oldukça geniş bir yelpazeye yayılmış çalışma aralıklarına sahiptirler.



Şekil 1. (a) 1200V 300A SiC MOSFET (b) Si IGBT [6]

Bu sebeplerle hangi topoloji ve yarı iletken anahtarın seçileceğine karar verirken, öncelikle kontrol edilecek sistemle uyumlu çalışma parametrelerine sahip yarıiletken anahtarlama eleman alternatifleri ve topoloji kısıtları belirlenmelidir. Sonrasında belirlenen seçenekler arasında aranan ölçütler için en uygun konfigürasyon seçilebilir.

Anahtar seçimine, literatürde farklı güç elektroniği uygulamalarında rastlanmaktadır. Örneğin, elektrikli araç tahrik inverter topolojisi için anahtarlama gereksinimlerine dair yarıiletken anahtar çeşitleri karşılaştırmalı incelenmiş ve ihtiyaç görülen alanlar için termal tasarım yöntemleri önerilmiştir [7]. Güç elektroniği teknolojisi gelişerek daha üstün performans sağlayan yarıiletken anahtarlar yaygınlaştıkça, akademik çalışmaların yönü yeni nesil sürümlere dönmeye başlamıştır. Çalışma gerilim ve akım benzerliği dolayısıyla, emsal topolojilerde tercih edilen yarı iletken anahtarlardan olan SiC-MOSFET ve Si-IGBT'lerle ilgili de pek çok performans karşılaştırmalı çalışması bulunmaktadır [6, 8-11]. Silisyum Karbür ile Silisyum tabanlı aygıtların performansları kıyaslanarak SiC-MOSFET'in muadili anahtarlardan daha iyi anahtarlama performansı gösterdiği ortaya konmuş, bu bilgiler ışığında indüksiyonlu ocaklarda Silisyum Karbür aygıtlarının kullanımı önerilmiştir [12]. Yüksek hızlı trenlerde kullanılan katı hal transformatör tabanlı çekiş sistemlerinde sistemi daha verimli ve küçük hale getirmek için geniş bant aralığına sahip yarı iletken anahtarların kullanılması önerilmiştir [13]. Yine Silisyum Tabanlı bipolar transistörler, IGBT'ler, tristörler ile SiC tabanlı MOSFET'ler vb. yeni nesil yarıiletken anahtarlar kıyaslanmış ve her ne kadar 4,5kV üzeri gerilimlerde Silisyum tabanlı yarı iletken anahtarlar mevcutta vazgeçilmez olsa da 650V ve altındaki gerilim seviyelerinde SiC-MOSFET vb. yeni nesil yarı iletken anahtarların eski nesil anahtarların hakimiyetini devirmeye aday olduğu öne sürülmüştür [14]. Kelepçeli inverter beslemeli indüksiyon motor sürücüsü için Si-IGBT, SiC-MOSFET ve GaN tabanlı diyotlarla anahtarlama testleri yapılarak güç kayıpları karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmadan GaN tabanlı diyotun alternatiflerine göre daha az güç kaybına sahip olduğu belirlenmiştir. Güç kaybının azaltılması durumunda soğutucu boyutlarının küçültülebileceği öngörülmüştür [15]. Bir rüzgâr enerji santralinde, farklı rüzgâr hızları için Si tabanlı ve SiC tabanlı yarı iletken anahtarlar arasında verimlilik maliyet ve hacim

karşılaştırması yapılmış ve daha yüksek maliyete sahip olmasına rağmen verimlilik ve daha minimal soğutma ihtiyacı nedeniyle hacim konusunda SiC-MOSFET'in üstünlüğü kabul edilmiştir [16]. SiC-MOSFET, Si-IGBT'e karşı önemli üstünlükler göstermektedir. Ancak değişken frekanslı sürücü gibi yüksek anahtarlama hızı gerektiren uygulamalarda yüksek dv/dt sorunları ortaya çıkabilir. Bu nedenle sistem performans beklentilerine göre tasarım yapılırken yarı iletken anahtar ve topoloji seçimi birlikte değerlendirilir. [17]'de 2L SiC-MOSFET tabanlı inverter ile Si-IGBT tabanlı T-NPC inverter karşılaştırılmıştır. Güç kaybı ve verimlilik bakımından SiC-MOSFET tabanlı 2 seviyeli inverter ön plana çıkarken, fiyat ve hacim avantajı açısından Si-IGBT tabanlı T-NPC inverter üstünlük göstermektedir. Yani doğal seçim ölçütleri; güç kaybı, verimlilik, fiyat ve hacimdir. Ancak her bir ölçüt için ayrı sonuç elde edilmiştir. Sayısal sonuçların bütünü göz önünde bulundurularak bir seçim önceliği belirlenmemiştir.

Bir devre ya da sistem tasarımı yaparken tek kriteri dikkate almak yanıltıcı olabilir. Seri üretime konu olması amaçlanan tasarımlarda gerilim, akım, güç gibi deneysel parametrelerin yanı sıra hacim, fiyat gibi kriterler de göz önünde bulundurulmalıdır. Birden fazla kriter göz önünde bulundurulduğunda; kullanılacak seçim yöntemi, tüm kriterleri önemi nispetinde değerlendirebilme kabiliyetinde olmalıdır. Bunun için ÇÖKV yöntemleri geliştirilmiştir. En bilinen ve yaygın kullanılan ÇÖKV yöntemleri; TOPSIS, AHP, MOORA, COPRAS vs. olarak sayılabilir. ÇÖKV'de, seçenekleri her bir kriter için ayrı ayrı kıyaslamak yerine, tüm kriterler göz önünde bulundurularak karar seçenekleri için öncelik değerlendirmesi yapılır [18]. Literatürde ÇÖKV yöntemleri ile elektrikli batarya seçimi vb. karar verme çalışmaları önerilmiştir [19-21]. Güç elektroniği uygulamalarından düşük güç seviyeli AC/DC topolojilerinin seçiminde TOPSIS yönteminin kullanımı [22]'de incelenmiştir. Yakıt pili uygulamaları için DC-DC dönüştürücü seçiminde ÇÖKV yöntemlerinden TOPSIS kullanılırken [23], bir başka çalışmada iki seviyeli Z-kaynak evirici topolojileri çoklu karar sıralamasına tabii tutulmuştur [24]. Tüm bu güncel çalışmalar, özdeş performanslı güç elektroniği topolojilerinin çoklu kriterler dikkate alınarak seçimi veya sıralamasının önemini göstermektedir. Her ne kadar son yıllarda farklı güç elektroniği devre uygulamalarında ÇÖKV yöntemleri uygulansa da; yüksek hızlı AC motor sürücü devrelerinin seçimi, bu çalışmada ilk kez ele alınmıştır.

Bu çalışmada anahtarlama seçiminin kritik olduğu yüksek hızlı bir motor sürücü uygulaması dikkate alınmıştır [17]. 5kW anma güç ve 48000 rpm anma hıza sahip bir AC motor için tasarlanmış yüksek hızlı sürücüler için, 30kHz-60kHz frekans bandında kullanılacak en uygun anahtarlama devre elemanı – topoloji konfigürasyonunun seçimi amaçlanmıştır. Bu referans çalışmada; seçenekler olarak benzer çıkış gerilim ve akım THD'sine sahip, iki seviyeli (2L) SiC-MOSFET tabanlı sürücü ile üç seviyeli (3L) Si-IGBT tabanlı T-NPC sürücü belirlenmiştir. Her ne kadar güç kaybı ve verim açısından 2L SiC-MOSFET sürücünün, fiyat ve hacim açısından ise 3L Si-IGBT T-NPC'nin önüne çıktığı vurgulansa da yazarlar anahtarlama kayıplarının kendileri için daha önemli olduğunu vurgulayarak bir karar vermişlerdir. Diğer bir ifade ile hacim, soğutucu, maliyet vb. kriterler konfigürasyon seçiminde göz önüne alınmamıştır. Bu makalede, karar önceliklerini belirlemek için literatürdeki uygulamalardan farklı olarak ÇÖKV yöntemlerinden TOPSIS ve AHP yöntemleri uygulanmıştır. Böylece verilen kararın doğruluğu iki ayrı

ÇÖKV yöntemi ile de sınanmıştır. Karar verme için endüstriyel uygulamalarda da önemli kriterler olan güç kaybı, anahtarlama hızı, hacim ve fiyat ölçütleri kullanılmıştır. Elde edilen bulguların farklı güç elektroniği uygulamalarındaki topoloji ve anahtar seçimlerinde de uygulanabileceği düşünülmektedir.

2. Metot

Güç elektroniği devrelerinde farklı tip topolojiler ve devre elemanları arasında en uygunu seçmek önemlidir. Literatür çalışmalarında araştırmacılar, ağırlıklı olarak önerdikleri sistemin performansını ön plana çıkaracak şekilde anahtar seçimi yapmaktadırlar. Seri üretim, maliyet, hacim, üretim kolaylığı gibi endüstriyel beklentiler ise göz ardı edilebilmektedir. Bu noktada anahtar seçimi için, ÇÖKV yöntemlerine başvurulabilir. ÇÖKV yöntemleri, belirlenen seçeneklerin arasında somut veya soyut delillere dayandırılarak en iyi seçimi yapmayı hedeflemektedir. Yöntemin güçlü yanları sade ve anlaşılır olmasıdır. Yöntem uygulama sürecinde problemin doğru tanımlanması ve seçim ölçütlerinin doğru belirlenmesi, yöntemin başarımını artırmaktadır. Bu çalışmada çoklu karar verme yöntemlerinin sonuçlarını ve tutarlılığını gözlemleyebilmek için iki ayrı yöntem, TOPSİS ve AHP yöntemi ayrı ayrı incelenmiş ve sonuçları birlikte değerlendirilmiştir.

2.1. TOPSİS Yöntemi

TOPSİS yöntemi; çok ölçütlü seçimlerde, benzerliğe göre sıralayarak karar verme tekniğidir. Seçenekler arasında yapılacak değerlendirme sonucunda, pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm olarak iki temel sonuç elde edilir. Bu iki temel sonuçtan yola çıkarak; pozitif ideal çözüme minimum, negatif ideal çözüme maksimum uzaklıktaki karar seçeneğine ulaşmaya çalışılır.

TOPSİS yöntemi uygulaması için öncelikle karar matrisi oluşturulur. Karar matrisi, karar verme sürecinde elde edilen seçenekler ve seçimi belirleyen ölçütlerden oluşur. Mevcut seçenek sayısı n ve belirleyici ölçüt sayısı m olarak belirlendiği durum için; $n \times m$ boyutlu bir karar matrisi, D elde edilir. D matrisinde satırlar karar verme sürecindeki seçenekleri, sütunlar ise kararı belirleyecek ölçütleri ifade etmektedir.

Sonraki aşamada karar verme sürecinde belirlenen seçenekler ve ölçütlerle oluşturulan karar matrisi normalize edilerek standart karar matrisi oluşturulur. D matrisindeki her bir eleman, içinde bulunduğu sütundaki her bir elemanın kareleri toplamının kareköküne bölünerek yeni bir değer kazanır (2). Yeni elde edilen değerler kullanılarak, R standart karar matrisi hesaplanır (3). Daha sonra SWARA yöntemi yada ölçütlerin önem derecesine göre öznel değerlendirme ile belirlenmiş ağırlık değerleri ($w_i, i = 1, 2, \dots, m$) kullanılarak V olarak tanımlanan ağırlıklı standart karar matrisi oluşturulur (4).

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \dots & d_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$r_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n d_{kj}^2}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$V = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & \dots & w_m r_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{n1} & \dots & w_m r_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & \dots & v_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n1} & \dots & v_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Oluşturulan ağırlıklı standart karar matrisinde her bir sütun üzerindeki en büyük ve en küçük değerler belirlenir. Belirlenen en büyük değerler pozitif ideal çözüm kümesini $V^+ = \{V_1^+, V_2^+, \dots, V_m^+\}$, en küçük değerler negatif ideal çözüm kümesini $V^- = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_m^-\}$ oluşturur. Elde edilen pozitif ve negatif ideal çözüm kümelerindeki değerler, Öklid uzaklık yaklaşımına tabi tutularak uzaklık değerleri belirlenir (5, 6). Uzaklık değerleri kullanılarak, ideal çözüme göreli yakınlık katsayıları hesaplanır (7). Burada $0 \leq C_i^* \leq 1$, $i = 1, 2, \dots, n$ 'dir. Bulunan C_i^* değerlerinden 1'e yakın olanı tercih edilir.

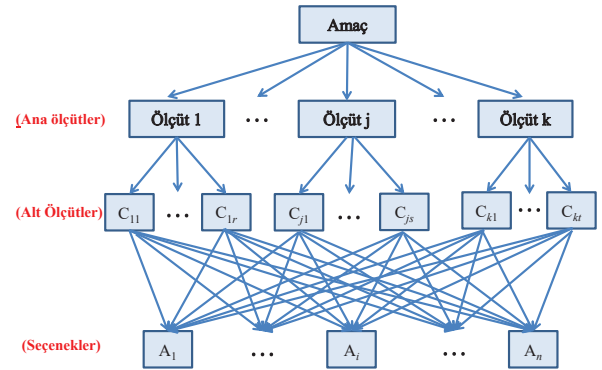
$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

2.2. AHP Yöntemi

AHP, sezgisel veya deneyime dayalı öznel ya da nesnel yargıları aynı problem çözümünde ele alan bir yöntemdir. Çözüm için bir veya daha fazla görüş dikkate alınır. Bu görüşler deneysel sayısal verilere dayandırılmış olabileceği gibi, tamamen kişisel tercihlerle belirlenmiş de olabilir. Yani bu yöntemde karar verici, vereceği kararda özgür bırakılmıştır.



Şekil 2. AHP hiyerarşik yapı [25]

Yöntem, en üst seviyede amaç olmak üzere devamında sırasıyla ana ölçütler ve alt ölçütlerden oluşan asgari üç seviyeli hiyerarşik bir yapıya dayandırılmıştır (Şekil 2). En alt seviye karar seçeneklerine aittir. Yöntemin başarımının artırılması için, ölçütlerin sayısı ve tanımları doğru tayin edilmelidir. Yöntem; subjektif verilere ve karşılaştırmalara dayandırıldığından, ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulurken alanında uzman görüşlerine başvurulmalıdır.

Yöntem uygulamasında öncelikle problem tanımlanarak, problem çözümü için ölçütler ve ölçütlerin birbirleriyle kıyaslanarak önem dereceleri belirlenir. Ardından, hiyerarşik yapı inşa edilir. Hiyerarşik yapı, en üstten alta sıra ile temel hedefler, temel ölçütler, alt ölçütler ve en alt basamakta karar

seçeneklerinden oluşur. Her bir basamaktaki seçenekler birbirinden bağımsızdırlar.

Hiyerarşik yapı oluşturulduktan sonra tüm ölçütlerin ve bu ölçütler dikkate alınarak karar seçeneklerinin kendi aralarında karşılaştırıldığı karşılaştırma matrisleri oluşturulur. (8)'de temsili olarak verilmiş, köşegen elemanları 1 olan, bir kare karşılaştırma matrisi görülmektedir. Matriste a_{ij} değerleri i değerinin j değerine oranla tercih derecesini gösteren karşılaştırma değeridir. Aynı bakış açısıyla a_{ji} değeri j değerinin i değerine oranla tercih derecesini göstereceği için matris üzerinde $a_{ij} = 1/a_{ji}$ olarak değerlendirilir. Tercih değerleri belirlenirken Tablo 1'de gösterilen Saaty tarafından önerilmiş karşılaştırma ölççekleri kullanılır.

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Tablo 1. Saaty karşılaştırma ölçeği

Önem Derecesi	Tanım
1	Eşit önemli
2	Zayıf ya da hafif
3	Biraz önemli
4	Makul artı
5	Fazla önemli
6	Güçlü artı
7	Çok fazla önemli
8	Çok çok güçlü
9	Son derece önemli

Karşılaştırma ölçeği kullanılarak bulunan a_{ij} değerleri, öncelik vektörü w_i 'i hesaplamak için normalize edilirler (9, 10). w_i , ölçütlerin önem yüzdesini göstermektedir.

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$w_i = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n a'_{ij} \quad (10)$$

İkili karşılaştırma ve önceliklerin belirlenmesi sonrası, karşılaştırma matrisinin tutarlı olup olmadığını belirlemek amacı ile tutarlılık indeksi (CI-Consistency Index) hesaplanır (11). Burada λ_{max} , karşılaştırma değerleri ve öncelik vektörlerine bağlıdır (12). Daha sonra Tablo 2'de verilmiş olan RI (Rassal Index) değerleri kullanılarak, Tutarlılık Oranı, CR hesaplanır (13). CR değeri; 0,10'dan küçükse karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğu anlamına gelir. Son olarak, öncelik vektörleriyle elde edilmiş öncelik matrisi ile karar seçeneklerin öncelik matrisi çarpılarak sonuç vektörü oluşturulur. Sonuç vektöründe seçeneklerin ağırlıkları tercih sırasını belirler.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (11)$$

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \right) \quad (12)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (13)$$

Tablo 2. Karşılaştırma matrislerinin boyutuna bağlı RI değer tablosu

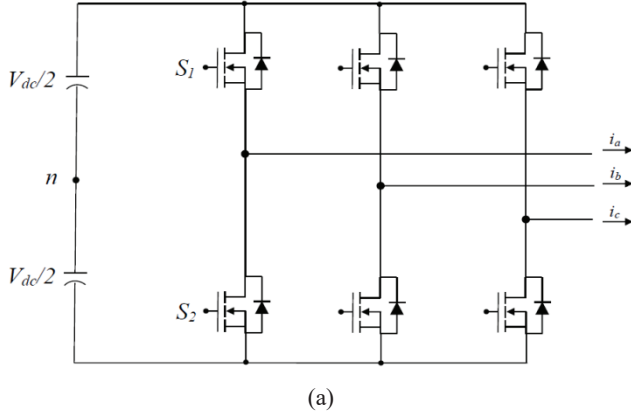
n	1	2	3
RI	0	0	0,58
n	4	5	6
RI	0,90	1,12	1,24
n	7	8	9
RI	1,32	1,41	1,45
n	10	11	12
RI	1,49	1,51	1,59

3. ÇÖKV'nin Güç Elektroniği Devrelerine Uygulanması

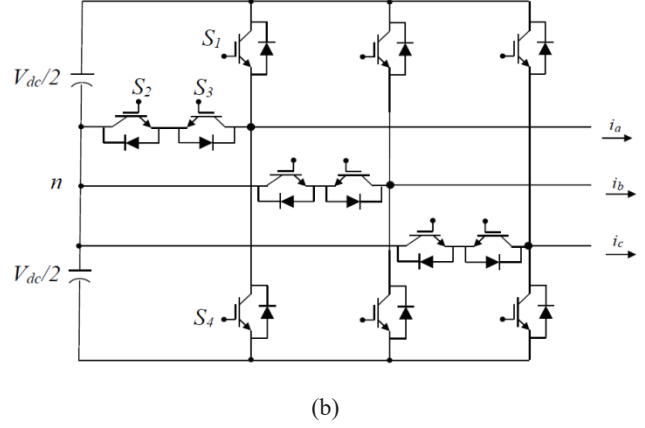
Yarı iletken anahtarlar, güç elektroniği devrelerinin vazgeçilmez devre elemanlarıdır. Yarı iletken teknolojinin gelişimiyle anahtarlama devre elemanları hacimsel olarak küçülmekte ve verimlilikleri artmaktadır. Aynı sistem çalışma performansları için farklı yarı-iletken anahtarların ve/veya devre topolojilerinin kullanılması mümkündür. Örneğin [26]'de 3,7 kW'lık bir asenkron motorun değişken frekanslı sürücüsü için geleneksel iki seviyeli inverter, üç seviyeli NPC ve üç seviyeli TNPC inverterler önerilmiş ve performansları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma kriterleri; yüksek dv/dt gerilim artışları, sistem verimi ve çıkış akımı THD'i olabilir. Anahtar seçimlerinde de anahtarlama frekansı, termal performans ve düşük anahtarlama kaybı dikkate alınır. Son yıllarda SiC-MOSFET; geniş bant aralıklarında kullanımı, yüksek anahtarlama hızı, yüksek sıcaklık kapasitesi ve düşük anahtarlama kayıpları ile dikkati çekmektedir. [27]'de üç fazlı bir T-NPC'de IGBT ve SiC-MOSFET kullanımı incelenmiştir. SiC-MOSFET kullanımı ile sistem verimliliği arttırılabilir. Ayrıca tam SiC-MOSFET kullanımı yerine, ana anahtarlama elemanı olarak SiC-MOSFET ve nötr nokta kelepçeli anahtar olarak Si-IGBT kullanımı ile de yüksek verimlilik sağlanabilir. SiC-MOSFET, Si-IGBT'e karşı önemli bir alternatiftir. Buna karşın değişken frekanslı bir sürücüde yüksek anahtarlama hızı, motor tahrik sisteminde yüksek dv/dt sorunlarına neden olabilir [26]. Bu nedenle sistem performans beklentilerine göre anahtar ve topoloji seçimi gerekebilir. [22]'de üç fazlı 3-10 kW güç seviyesinde ve çift yönlü çalışan dönüştürücü topolojileri arasında seçim yapmak için; maliyet, kararlılık, verim ve güç yoğunluğu kriterleri dikkate alınarak TOPSİS yöntemi ile ÇÖKV yapılmıştır. Farkı bir güç elektroniği uygulaması olarak, yakıt pilleri ile kullanılmak üzere beş adet izolesiz DC-DC dönüştürücü topolojisinin seçiminde de TOPSİS yönteminden faydalandığı görülmektedir [23].

Bu çalışmada 5kW nominal güç ve 48000 rpm nominal hıza sahip bir AC motorun yüksek hızlı sürücüsü için (1200V çalışma gerilimi) 30kHz-60kHz frekans bandında kullanılacak en uygun inverter topolojisi ve yarı-iletken anahtar kullanımının seçimi amaçlanmıştır. Adil bir karşılaştırma için aynı çıkış akımı THD'si (%2,5) ve aşırı gerilim seviyelerine (dv/dt) sahip iki inverter topolojisi belirlenmiştir. [28]'de; 2L SiC-MOSFET sürücü ile 3L IGBT T-NPC sürücü RL yükte güç kayıplarını karşılaştırmak için statik durum analizi, anahtarlama ve güç kayıplarını karşılaştırmak için de dinamik analizi LPspice programında yapılmış ve seçilen topolojilerin özdeş anahtarlama kayıplarına ve dv/dt oranına sahip oldukları gösterilmiştir. Seçilen sürücü topolojileri Şekil 3'te

gösterilmiştir. 3L T-NPC sürücünde S_1 , S_4 anahtarları RGS50TSX2DHR IGBT, S_2 , S_3 anahtarları RGCL80TK60D IGBT olarak kullanılmıştır. [29-31]. 3L Si-IGBT T-NPC



(a)



(b)

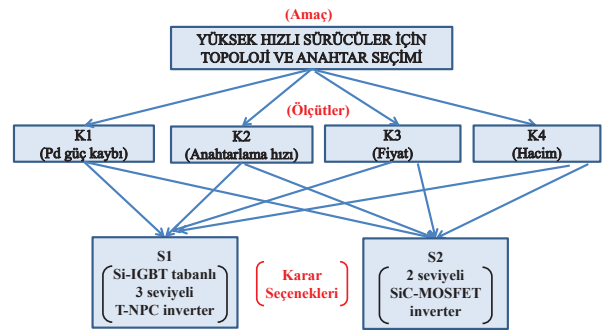
Şekil 3. (a) 2L SiC-MOSFET sürücü (b) 3L Si-IGBT T-NPC sürücü [17]

Tablo 3. Si-IGBT ve SiC-MOSFET çalışma parametreleri [17]

Parametreler	SiC-MOSFET (SCT3080KLHR)	IGBT (RGS50TSX2DHR)	IGBT (RGCL80TK60D)
V_{DSS} / V_{CES}	1200V	1200V	600V
$I_D / I_C (25^\circ\text{C})$	31A	50A	35A
$I_D / I_C (100^\circ\text{C})$	22A	25A	21A
P_D (Güç kaybı)	165W	395W	57W
$R_{DS(on)}$	80mΩ	-	-
$V_{CE(sat)}$	-	1,7V	1,4V
Anahtarlama Hızı	Hızlı	Normal	Normal
Fiyat	Yüksek	Düşük	Düşük

V_d ve I_d değerleri, çalışılmak istenilen gerilim ve akım değerleriyle uyumlu ve yeterli olması bakımından oldukça önemlidir. Çünkü uygun V_d ve I_d çalışma aralığı koşulunu sağlamayan malzemelerle çalışmak zaten mümkün değildir. Ancak çalışma aralığı koşulu sağlandığı sürece V_d ve I_d değerleri malzeme seçiminde ayırt edici veya tercih nedeni değildir. $R_{DS(on)}$ veya V_{CE} değerlerinin sistem çıkışına etkileri halihazırda P_D değerinde karşılık bulmaktadır. Bu sebeple $R_{DS(on)}$ veya V_{CE} değerlerinin de seçim ölçütleri olarak değerlendirilmeleri anlamlı değildir. Diğer taraftan “anahtarlama güç kaybı” (P_D), “anahtarlama hızı”, “fiyat” ve “fiziki hacim” devre tasarımında ayırt edici nitelikte avantaj veya dezavantaj ortaya koymaktadır. Bu nedenle seçim ölçütleri olarak bu dört parametre seçilmiştir.

Çalışma için belirlenmiş olan seçenekler ve karar verme ölçütleri ile ilgili olarak, Elektrik Elektronik Mühendisliği (1 Profesör, 3 Doç. Dr. ve 2 Dr. Öğr. Üyesi) öğretim üyelerinin ve sektörde güç elektronigi alanında çalışan iki ARGE, bir ÜRGE ve bir tasarım mühendisinin uzman görüşleri doğrultusunda ölçütlerin önem ve öncelik dereceleri belirlenmiştir. Çalışmada ölçütler sırasıyla K1 (P_d güç kaybı), K2 (Anahtarlama hızı), K3 (Fiyat), K4 (Hacim) olarak kodlanmıştır. Çok ölçütlü karar vermede hem TOPSİS hem de AHP yöntemi uygulanmıştır. “3L Si-IGBT T-NPC sürücü” için “S1” ve “2L SiC-MOSFET sürücü” için “S2” kısaltması kullanılmıştır. Çalışmanın hiyerarşik yapısı ve tanımlamalar Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 4. ÇÖKV Hiyerarşik Yapısı

3.1. TOPSİS Yönteminin Uygulanması

Uzman görüşleri alınırken sistem çalışma gereksinimleri, karar seçeneklerinin performans bilgileri ve yarı iletken anahtarların özellikleri açıkça belirtilmiştir. Akademik ve sektörel uzmanların görüşleri ile oluşturulan D karar matrisi Tablo 4’te görülmektedir. Karar matrisi normalize edilip, denklem (2) kullanılarak R standart karar matrisi oluşturulur (Tablo 5). SWARA yöntemi ile uzman görüşlerinden faydalanılarak Tablo 6’da verilen ağırlık değerleri w_i belirlenmiştir [20]. Oluşturulan standart karar matrisi elemanları ile ölçütlerin

ağırlık değerleri çarpılarak Tablo 7’de verilmiş olan ağırlıklı standart karar matrisi V oluşturulmuştur.

Tablo 4. TOPSİS Karar Matrisi (D)

	Seçim Ölçütleri			
Seçenekler	K1	K2	K3	K4
S1	36	32	30	18
S2	36	41	25	19

Tablo 5. TOPSİS Standart Matrisi (R)

	Seçim Ölçütleri			
Seçenekler	K1	K2	K3	K4
S1	0,7071	0,6173	0,7682	0,6832
S2	0,7071	0,7867	0,6402	0,7303

Tablo 6. Ölçütlerin ağırlık değerleri (w_i)

w_1	w_2	w_3	w_4
0,3238	0,3238	0,2513	0,1113

Tablo 7. TOPSİS ağırlıklı standart karar matrisi (V_i)

	Seçim Ölçütleri			
Seçenekler	K1	K2	K3	K4
S1	0,2289	0,1998	0,1930	0,0760
S2	0,2289	0,2547	0,1608	0,0812

Tablo 8. TOPSİS pozitif ideal V^+ ve negatif ideal V^- çözüm değerleri

Çözüm Değerleri	V_1	V_2	V_3	V_4
Pozitif ideal çözüm değerleri V^+	0,2289	0,2547	0,1930	0,0812
Negatif ideal çözüm değerleri V^-	0,2289	0,1998	0,1608	0,0760

Ağırlıklı standart karar matrisinde bulunan değerler kullanılarak, her bir sütundaki maksimum değerler pozitif ideal çözüm değerlerini V^+ , ve minimum değerler negatif ideal çözüm değerlerini V^- oluşturur. Pozitif ve negatif ideal çözüm değerleri Tablo 8’de verilmiştir. Denklem (5) ve (6) kullanılarak, pozitif ideal çözüm değerlerine uzaklık (S_i^+) ve negatif ideal çözüm değerlerine uzaklık (S_i^-) değerleri bulunur. Hesaplanan uzaklık değerleri denklem (7)’de yerine

konularak, ideal çözüme göreli yakınlık katsayıları (C_i^*) hesaplanır. Elde edilen sonuçlar Tablo 9’da verilmiştir. C_1^* ve C_2^* arasında **0,6314** değerle 1’e en yakın seçenek C_1^* olduğu için, TOPSİS yöntemi sonucu **2L SiC-MOSFET sürücü** seçeneğinin tercih edilmesi uygun görülmüştür.

Tablo 9. TOPSİS S_i^+ , S_i^- ve C_i^* değerleri

(i) Seçenekler	S_i^+	S_i^-	C_i^*
(1) S1	0,0551	0,0322	0,3686
(2) S2	0,0322	0,0551	0,6314*

3.2. AHP Yönteminin Uygulanması

AHP yöntemine hiyerarşik yapı oluşturulması ile başlanır. Bu çalışmada “amaç”; Şekil 4’te verilen hiyerarşik yapıda görüldüğü gibi, anma çalışma aralıkları belirlenmiş bir yüksek hızlı motor AC motor için sürücü topolojisi ve anahtarlama devre elemanı seçme olarak belirlenmiştir. Hiyerarşik yapının ikinci basamağında amaç için belirlenmiş ayırt edici ölçütler; K1 (P_d güç kaybı), K2 (Anahtarlama hızı), K3 (Fiyat), K4 (Hacim) olarak kodlanmıştır. Son basamakta amaç için belirlenmiş karar seçenekleri; S1 (3L Si-IGBT T-NPC sürücü), S2 (2L SiC-MOSFET sürücü) olarak belirlenmiştir. Belirlenen ölçütler ve bu ölçütler dikkate alınarak belirlenen karar seçenekleri için ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmalıdır. Tablo 10’da ölçütler için uygulanmış ikili karşılaştırma matrisi verilmiştir. Ölçütler için oluşturulan ikili karşılaştırma matrisinin normalize edilmesiyle Tablo 11 elde edilmiştir.

Tablo 10. Ölçütler için ikili karşılaştırma matrisi

Ölçütler	K1	K2	K3	K4
K1	1	1	3	5
K2	1	1	3	5
K3	1/3	1/3	1	3
K4	1/5	1/5	1/3	1

Tablo 11. Ölçütler için normalize edilmiş ikili karşılaştırma matrisi

Ölçütler	K1	K2	K3	K4
K1	0,3947	0,3947	0,4091	0,3571
K2	0,3947	0,3947	0,4091	0,3571
K3	0,1316	0,1316	0,1364	0,2143
K4	0,0789	0,0789	0,0455	0,0687

Normalize edilmiş ikili karşılaştırma matrisinde; her bir satır değerinin ortalaması, o satırın belirleyici ölçütünün özvektörünü verir. Tablo 12’de ölçütlerin özvektörleri

görülmektedir. Karar seçenekleri de ayrı ayrı dört değerlendirme ölçütü üzerinden karşılaştırılarak önem seviyeleri belirlenir. Tablo 13'te karar seçeneklerinin ölçüt bazında özvektörleri verilmiştir.

Tablo 12. Ölçütlerin Özvektör matrisi

Ölçütler	w_i
K1	0,3889
K2	0,3889
K3	0,1535
K4	0,0687

İkili karşılaştırma kararı sonuçlarının tutarlı olup olmadığını anlamak amacı ile denklem (11), (12) ve (13) kullanılarak $\lambda_{max}=4,0439$, $CI=0,0146$, $CR=0,0163$ olarak hesaplanmıştır. Burada $CR<0,1$ 'den küçük olduğu için karşılaştırma matrisi tutarlıdır.

Tablo 13. Karar seçeneklerinin özvektör matrisi

Ölçütler	K1	K2	K3	K4
S1	0,5	0,25	0,75	0,33
S2	0,5	0,75	0,25	0,67

Son aşamada karar seçenekleri özvektör matrisi ile ölçütlerin özvektör matrisleri çarpıldığında, karar seçeneklerinin önem ağırlıkları bulunmuş olur (Tablo 14). Tablo 14'ten anlaşılacağı üzere hesaplama sonunda, S1'in önem ağırlığı %42,97 ve S2'nin önem ağırlığı %57,03 olarak bulunmuştur. Önem ağırlığı daha büyük bir değere sahip bulunduğu için, AHP yöntemi sonucunda da **"2L SiC-MOSFET sürücü"** seçeneğinin tercih edilmesi uygun görülmüştür.

Tablo 14. Karar seçeneklerinin önem ağırlığı

Seçenekler	Önem aralığı	Sıralama
S2	0,5703*	1
S1	0,4297	2

4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada yüksek hızlı bir AC motor için en uygun sürücü topolojisi ve anahtarlama devre elemanının seçimi amaçlanmıştır. Seçim için, çalışılmak istenen gerilim ve akım seviyelerinde sıklıkla tercih edildiği bilinen iki alternatif topoloji belirlenmiştir. Bunlar benzer çıkış gerilim ve akım THD'sine sahip 2L SiC-MOSFET sürücü ile 3L Si-IGBT T-NPC sürücüdür. Referans alınan çalışmada; 5 kW'lık 1200V ve 30-60 kHz aralığında çalışacak AC motoru sürmek için, sadece anahtarlama kayıpları dikkate alınarak, 2L SiC-MOSFET sürücü seçilmiştir. Buna karşın maliyetin yüksek

olduğu da kabul edilmiştir. Bu gerçekler, çok ölçütlü karar vermenin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Karar verme önceliklerini belirlemek için literatürden farklı olarak yalnızca performans kriterleri değil; Güç kaybı, Anahtarlama hızı, Hacim ve Fiyat kriterleri birlikte ele alınmıştır. Hem akademiden hem de sektörden uzman görüşleri dikkate alınmıştır. Çok ölçütlü karar verme yöntemlerinin sonuçlarının daha anlamlı olması için, iki ayrı ÇÖKV yöntemi, TOPSİS ve AHP yöntemleri ayrı ayrı uygulanmıştır. TOPSİS yöntemi için kullanılan ölçüt ağırlık değerlerinin belirlenmesinde, SWARA yönteminden faydalanılmıştır. Bu çalışmada dikkate alınan ölçütler ve ölçütlerin uzman görüşleri doğrultusunda belirlenmiş önem derecelerine göre; her iki ÇÖKV yönteminde de (TOPSİS ve AHP) 2L SiC-MOSFET sürücü topolojisinin, 3L Si-IGBT tabanlı T-NPC'den daha uygun bir alternatif olduğu görülmüştür. Böylece ÇÖKV'nin sonuçları, iki ayrı yöntemle birlikte doğrulanmıştır.

Özellikle son yıllarda güç elektroniği uygulamalarında ÇÖKV yöntemlerinin uygulanması ile topoloji ve konfigürasyon seçimleri yapılmaktadır. Sonraki çalışmalarda; deneysel ve/veya benzetim çalışmalar ile elde edilen bulguların kullanıldığı MOORA gibi karar verme yöntemleri incelenebilir. Subjektif ve sayısal verilere dayalı elde edilen bulgular ışığında yöntemlerin başarımı, deneysel sonuçlar ile ortaya konulabilir.

Kaynaklar

- [1] T. Halder, "Selection of switching skills of the power MOSFET in the static converter", In 2017 14th IEEE India Council International Conference (INDICON), 2017, 1-6.
- [2] A. Durusu, ve A. Erduman, "PV Panellerin Farklı Koşullar Altında IV Eğrisini Çıkartan ve Maksimum Güç Noktası Takibi Yapan Deney Sisteminin Tasarımı", Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(3), 1242-1250, 2020.
- [3] G. Ferreira da Silva, "Improved regenerative braking in electric vehicles through switch selection optimization", University of British Columbia, Yüksek Lisans Tezi, 2021.
- [4] F. Chang, O. Ilina, M. Lienkamp, ve L. Voss, "Improving the overall efficiency of automotive inverters using a multilevel converter composed of low voltage si mosfet", IEEE Transactions on Power Electronics, 34(4), 3586-3602, 2018.
- [5] E. Macrae, R. Pollock, N. McNeill, D. Holliday, K. Ahmed, ve B.W. Williams, "Experimental efficiency comparison of a superjunction MOSFET, IGBT and SiC MOSFET for switched reluctance machine drives", IET Conference Proceedings, Cilt 4, 2022, pp. 583-587.
- [6] A. Albanna, A. Malburg, M. Anwar, A. Guta, ve N. Tiwari, "Performance comparison and device analysis between Si IGBT and SiC MOSFET", In 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2016, 1-6.
- [7] J. Gallagher, ve D. Seals, "Design considerations for the power electronics of an electric vehicle propulsion inverter", In Proceedings of WESCON'94, 34-40, 1994.
- [8] J. Loncarski, M. Ricco, V. Monteiro, ve V.G. Monopoli, "Efficiency comparison of a DC-DC interleaved converter based on SiC-MOSFET and Si-IGBT devices for EV chargers", In 2020 IEEE 14th International

- Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Vol. 1, 2020, pp. 517-522.
- [9] W. Zhou, ve X. Yuan, "Experimental Evaluation of SiC MOSFETs in Comparison to Si IGBTs in a Soft-Switching Converter", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(5), 5108-5118, 2020.
- [10] C.D. Fuentes, M. Müller, S. Bernet, ve S. Kouro, "SiC-MOSFET or Si-IGBT: Comparison of design and key characteristics of a 690 V grid-tied industrial two-level voltage source converter", *Energies*, 14(11), 3054, 2021.
- [11] J. Srijeeth, S.R. Mohanrajan, ve A. Vijayakumari, "Performance comparison of Si-IGBT and SiC-MOSFET in an inverter application using DPT", In 2021 IEEE 2nd International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC), 2021, pp. 1-5.
- [12] S. Aslan, M. Ozturk, ve N. Altintas, "A comparative study of SiC and Si power devices in induction cookers", 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), 2018, pp. 297-301.
- [13] D. Ronanki, ve S.S. Williamson, "Topological overview on solid-state transformer traction technology in high-speed trains", *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2018, pp. 32-37.
- [14] J.O. Gonzalez, R. Wu, S. Jahdi, ve O. Alatise, "Performance and reliability review of 650 V and 900 V silicon and SiC devices: MOSFETs, cascode JFETs and IGBTs", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(9), 7375-7385, 2019.
- [15] S. Dutta, ve A.K. Yadav, "Power Loss Comparison of Si-IGBT SiC-MOSFET And GaN Based 3-level Diode Clamped Inverter fed Induction Motor Drive", *IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE)*, 2023 pp. 1-6.
- [16] J. Loncarski, H.A. Hussain, ve A. Bellini, "Efficiency, Cost, and Volume Comparison of SiC-Based and IGBT-Based Full-Scale Converter in PMSG Wind Turbine. *Electronics*, 12(2), 385, 2023.
- [17] J. Loncarski, V.G. Monopoli, R. Leuzzi, P. Zanchetta, ve F. Cupertino, "Efficiency, cost and volume comparison of Si-IGBT based T-NPC and 2-level SiC-MOSFET based topology with dv/dt filter for high speed drives", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 3718-3724, 2020.
- [18] M. Hamurcu, E. Çakır, ve T. Eren, "Kullanıcı perspektifli çok kriterli karar verme ile elektrikli araçlarda batarya seçimi", *International Journal of Engineering Research and Development*, 13(2), 733-749, 2021.
- [19] M.K. Loganathan, B. Mishra, C.M. Tan, T. Kongsvik, ve R.N. Rai, "Multi-Criteria decision making (MCDM) for the selection of Li-Ion batteries used in electric vehicles (EVs), *Materials Today: Proceedings*, 41, 1073-1077, 2021.
- [20] A. Abdulvahitoğlu, A. Abdulvahitoğlu, ve M. Kılıç" Elektrikli Araç Bataryalarının Bütünleşik Swara-Topsis Metodu ile Değerlendirilmesi", *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(4), 1061-1076, 2022.
- [21] D. Barić, S. Grabušić, M. Jakara, ve M. Emanović, "Reviewing the Cost-Benefit Analysis and Multi-Criteria Decision-Making Methods for Evaluating the Effectiveness of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles", *Sustainability*, 16(1), 233, 2023.
- [22] L. Tuimala, "Choosing a three-phase converter topology for low-power applications based on subjective selection criteria." *Yüksek Lisans Tezi Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT*, 2023.
- [23] O. Alavi, T. Rajabloo, W. De Ceuninck, M. Daenen, "Non-isolated DC-DC converters in fuel cell applications: Thermal analysis and reliability comparison.", *Applied Sciences*, 12(10), 5026, 2022.
- [24] T.V. Do, M. Kandidayeni, J. P. F. Trovão, L. Boulon, "Multi-criteria ranking of Z-source inverter topologies for a three-wheel fuel cell hybrid electric vehicle." *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023.
- [25] V.V. Shimin, V.A. Shah, M.M. Lokhande, "An advanced semiconductor material selection for switching devices in electric vehicles using three multiple attribute decision making methods." *AIMS Electronics and Electrical Engineering*, 4(4), 369-388, 2020.
- [26] S. Baek, Y. Cho, B.G. Cho, C. Hong, "Performance comparison between two-level and three-level SiC-based VFD applications with output filters." *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(5), 4770-4779, 2019.
- [27] X. Li, L. Ma, "Comprehensive comparison of efficiency in the three-phase active rectifier and TNPC with SiC MOSFET for the electric vehicle charger." In 2023 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe), IEEE, September 2023, pp. 1-8.
- [28] J. Loncarski, V.G. Monopoli, R. Leuzzi, L. Ristic, F. Cupertino, "Analytical and simulation fair comparison of three level Si IGBT based NPC topologies and two level SiC MOSFET based topology for high speed drives.", *Energies*, 12(23), 4571, 2019.
- [29] ROHM Semiconductor, URL: <https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/sic/mosfet/sct3080klhr-e.pdf> (Erişim tarihi: 01.10.2025)
- [30] ROHM Semiconductor, URL: <https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/igbt/rgs50tsx2dhr-e.pdf> (Erişim tarihi: 01.10.2025)
- [31] ROHM Semiconductor, URL: <https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/igbt/rgcl80tk60d-e.pdf> (Erişim tarihi: 01.10.2025)

Özgeçmişler



Gülsüm Yıldız, Lisans eğitimini 2007 yılında Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği'nde, Yüksek Lisans eğitimini 2012 yılında Cumhuriyet Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği'nde ve Doktora eğitimini 2022 yılında Düzce Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği'nde tamamlamıştır. 2008-2010 yılları arasında Türk Telekom'da, 2010-2017 yılları arasında Sağlık Bakanlığı'nda Elektrik Elektronik Mühendisi olarak görev almıştır. 2017 yılında Düzce Üniversitesi Düzce Meslek Yüksekokulu Elektrik Programında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başlamış ve halen görevine devam etmektedir. Araştırma alanları arasında; güç sistemlerinde matematiksel modelleme ve tahmin yöntemleri, güç elektroniği uygulamaları, haberleşme modülasyon yöntemleri yer almaktadır.