

Elektrikli Araçlarda Tahrik İnverteri için Yarı-İletken Seçim Optimizasyonu

Gülsüm Yıldırım¹

Özet

Elektrikli araçlar, temiz enerji kullanımı ve çevre dostu yönü dikkate alındığında günümüz dünyası için içten yanmalı motorlara göre çok daha iyi bir ulaşım seçeneğidir. Teknolojik gelişmeler ışığında elektrikli araçların maliyetleri düşerken menzili artmakta ve bunlarla beraber çevreye verdiği zararlar azalmaktadır. Elektrikli araçların yaygınlaşması için hükümetlerin verdikleri destekler artarken, şarj istasyon sayısı gün be gün çoğalmaktadır. Özellikle iklim değişikliği üzerine yapılan çalışmalar neticesinde karbon salınımında ciddi azalma sağlayacak bu araçlara destek büyüktür. Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlara göre daha verimli enerji kullanımı sağlamaktadır. Ancak, batarya enerji yoğunluğunun düşük olması ve kapasitesinin sınırlılığı nedeniyle düşük menzil problemleri kullanıcı için hala büyük bir sorundur. Bu noktada elektrikli araçlarda enerji verimliliği çok daha önemli hale gelmektedir. Enerji verimliliğini etkileyen sistem faktörlerinden biri de motorla batarya arasında elektrik iletimini sağlayan tahrik inverterinde kullanılacak yarı-iletkenin göstereceği anahtarlama performansdır. Yarı-iletken kontrol anahtarları teknolojik gelişmeler ışığında sürekli gelişme ve iyileşme halindedir. Güç Elektronik sistemlerinde son zamanlarda en yaygın kullanılmakta olan yarı-iletkenler arasında Si-MOSFET, Si-IGBT ve SiC-MOSFET’ler sayılabilir. Özellikle SiC-MOSFET’ler düşük anahtarlama kayıpları, yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmaları ve hızlı anahtarlama özellikleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Bu çalışmada, elektrikli araç tahrik inverterlerinde kullanılacak en uygun yarı-iletken anahtarın belirlenmesi amacıyla MOORA (Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon) yöntemi kullanılmıştır. Alternatifler olarak IGBT, SiC-MOSFET-2G, SiC-MOSFET-3G ve SiC-MOSFET-4G; kriterler olarak ise tahrik enerjisi, motor kayıpları ve inverter kayıpları değerlendirilmiştir. Bu çalışma, inverter performansını artırarak araç menzilinın gelişmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

1 Öğr. Gör. Dr., Düzce Üniversitesi, gulsuymyildirim@duzce.edu.tr, Orcid: 0000-0001-6075-7310

1. Giriş

Fosil yakıtların kaynaklarının sınırlılığı ve neden olduğu çevre kirliliği sebebiyle, elektrikli araçlar ulaşım için önemli bir seçenek haline gelmiştir. Çağın teknolojik gelişmelerinin getirileri sayesinde elektrikli araçların menzili artarken maliyetleri azalmakta ve çevresel etkileri daha iyi hale gelmektedir. Böylece elektrikli araçların uluslararası pazardaki yeri git gide büyümektedir [1]. Dönemsel hükümet politikaları, üretim ve edinim destekleri, şarj destek ünitelerinin gelişimi ve ulaşılabilir hale gelmesi gibi etmenler elektrikli araçların yaygınlaşması üzerinde etkilidir. Bilhassa Avrupa Birliği ülkeler olmak üzere dünya genelinde kara taşımacılığında kaynaklı hava kirliliği nedenlerinin azaltılması amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda elektrikli araçlar iyi bir çözüm öneri haline gelmiştir. Yenilenemez enerji kaynaklarının tükenmekte olması ve çevreye verdiği olumsuz etkileri elektrikli araçlara yapılacak yatırımlar için olumlu bir motivasyondur [2]. Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlara göre enerjiyi daha verimli kullanabilir. Ancak bataryanın enerji yoğunluğu, içten yanmalı motor yakıtlarına oranla daha düşük olduğu için elektrikli araçların menzili daha düşüktür [3]. Bu nedenle elektrikli araç menzilini artırmak için bataryadaki enerjiyi motora aktaracak sistemin verimliliğini artırmak gerekir. Yani elektrikli araçlar için geliştirilmiş inverter ve kontrol sistemlerinin daha verimli hale gelmesi, enerji dönüşümünü doğrudan etkiler [4].

Elektrikli araçların güç aktarım sistemi bir motor, bir çekiş inverteri, bir DC-DC dönüştürücü ve pil şarj cihazından oluşmaktadır [5]. Elektrikli araçlarda kullanılan güç dönüştürme devrelerinde en yaygın kullanılan yarı-iletkenler Si-MOSFET'ler, Si-IGBT'ler ve SiC-MOSFET'lerdir [6]. Yüksek gerilime dayanıklılığı, düşük anahtarlama kaybı ve günden güne performansını iyileştirmesi sayesinde elektrikli araçların tahrik inverterlerinde sıklıkla Si-IGBT'ler tercih edilmektedir [7]. Ancak son yıllarda SiC-MOSFET'ler performans açısından Si-IGBT'ler ile yarışır hale geldikçe elektrikli araçların tahrik inverterlerinde de yaygın hale gelmeye başlamıştır. SiC-MOSFET'ler düşük anahtarlama ve iletim kayıpları, yüksek hızlı çalışma performansı ve yüksek çalışma sıcaklıkları gibi özellikleriyle öne çıkmaktadır. Bu özellikleri, sistem tasarımlarında boyut ve ağırlık açısından avantaj sağladığı gibi enerji tasarrufu da sağlar [8]. Elektrikli araçların tahrik inverterlerinde kullanılacak yarı-iletken anahtarın özellikleri tahrik inverterin performansını etkilemekte doğrudan ilgilidir. Bu nedenle elektrikli araçlar tahrik inverteri için en uygun anahtar seçimi elektrikli araç performansını artıracaktır [9].

Bu çalışmada elektrikli araçların tahrik inverterleri için çok kriterli karar verme yöntemlerinden MOORA (Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı

Optimizasyon) yöntemi ile yarı-iletken anahtar seçimi yapılmıştır. MOORA yöntemi birden fazla kriteri dikkate alarak en uygun seçeneği belirlemek amacı ile kullanılır. Yarı-iletken anahtar seçenekleri “IGBT”, “SiC-MOSFET-2G”, “SiC-MOSFET-3G” ve “SiC-MOSFET-4G”, seçim kriterleri olarak “Enerji Tüketimi”, Motor Kayıpları” ve “İnverter Kayıpları” olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışma elektrikli araçların inverter performansına sağlayacağı katkı dolayısı ile elektrikli araç menzilin artmasına imkân sağlayacaktır.

2. MOORA Metodu

Brauers ve Zavadskas tarafından geliştirilmiş MOORA yöntemi “Çok Ölçütlü Karar Verme” yöntemlerinden biridir [10]. Yöntem nesnel değerlendirmeye dayalıdır. Karar seçenekleri için tüm ölçütler dikkate alınır ve bir bütün olarak değerlendirme yapılır. Bu sayede seçenekler arasındaki optimum seçenek ve seçeneklerin uygunluk sırası belirlenmiş olur. Yöntemde kullanılacak ölçütler tamamen sayısal değerlerden oluşur.

MOORA uygulaması için başlangıçta Denklem (1)’de verilen karar matrisi oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \dots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

Denklem (1)’deki x_{ij} , değerinde satırlar karar seçeneklerini sütunlar ölçütleri göstermektedir. Oluşturulan karar matrisine elemanları Denklem (2) normalize edilerek normalize edilmiş karar matrisi oluşturulur.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n x_{kj}^2}} \quad (2)$$

Normalize edilmiş karar matrisinde ölçütlerin minimize ya da maksimize edilmek istenmesine göre tasniflenir. Denklem 3’te gösterildiği gibi maksimize edilecek ölçüt değerleri toplanıp minimize edilecek ölçüt değerleri çıkarılarak her bir karar seçeneği için tüm ölçütlerin dikkate alınmış olduğu birer uygunluk değeri bulunur.

$$y_i^* = \sum_{j=1}^k x_{ij}^* - \sum_{j=k+1}^n x_{ij}^*, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

Böylece y_i^* , $i=1,2,\dots,n$ uygunluk değeri büyükten küçüğe sıralamaya sokulur. En büyük y_i^* değeri karar seçenekleri arasındaki optimum seçenektir.

3. Uygulama

Elektrikli araçlarda tahrik inverteri performansı araç performansı ile doğrudan ilişkilidir. Tahrik inverter performansını artırmak için kullanılacak anahtarın doğru seçilmesi önemlidir. Çalışmada 4 farklı araç modeli tahrik inverterinde kullanılmak üzere değerlendirilmiş 4 farklı yarı-iletken için yapılmış deneysel sonuçlar kullanılmıştır. Deneysel sonuç değerleri Tablo 1'de verilmiştir [11].

Tablo 1. Deneysel sonuçlarla belirlenmiş Enerji Kayıpları (kWh/100km) [11]

Araç modeli	IPMSM Nissan			IM Nissan		
Ölçütler / Seçenekler	Tahrik Enerjisi	Motor Kayıpları	İnverter Kayıpları	Tahrik Enerjisi	Motor Kayıpları	İnverter Kayıpları
IGBT	11,72	2,15	1,25	11,25	4,22	2,42
SiC-2G	11,51	2,24	0,6	11,63	3,38	0,93
SiC-3G	11,84	2,13	0,96	11,25	4,01	1,52
SiC-4G	11,62	2,11	0,5	11,34	4,13	0,91

Araç modeli	IPMSM BMW			IM BMW		
Ölçütler / Seçenekler	Tahrik Enerjisi	Motor Kayıpları	İnverter Kayıpları	Tahrik Enerjisi	Motor Kayıpları	İnverter Kayıpları
IGBT	14,52	2,21	1,49	14,19	4,23	2,6
SiC-2G	14,46	2,37	0,67	14,31	3,62	1,01
SiC-3G	14,74	2,27	1,04	13,99	4,18	1,62
SiC-4G	14,42	2,41	0,56	14,21	4,19	0,98

Öncelikle MOORA metodu için Tablo 1'de verilmiş olan değerler kullanılarak Tablo 2'de verilen karar matrisi oluşturulur. Tablo 2'de Ö1, Ö2,... sırasıyla her bir araç için ölçümlenmiş kriterlerin, K1, K2, K3 ve K4 değerleri sırasıyla karar seçeneklerinin yerine kullanılmıştır.

Tablo 2. Karar Matrisi

	Ö1	Ö2	Ö3	Ö4	Ö5	Ö6	Ö7	Ö8	Ö9	Ö10	Ö11	Ö12
K1	11,72	2,15	1,25	11,25	4,22	2,42	14,52	2,21	1,49	14,19	4,23	2,6
K2	11,51	2,24	0,6	11,63	3,38	0,93	14,46	2,37	0,67	14,31	3,62	1,01
K3	11,84	2,13	0,96	11,25	4,01	1,52	14,74	2,27	1,04	13,99	4,18	1,62
K4	11,62	2,11	0,5	11,34	4,13	0,91	14,42	2,41	0,56	14,21	4,19	0,98

Tablo 2’de oluşturulmuş karar matrisi değerlerine Denklem (2) uygulanarak Tablo 3’te verilen Normalize karar matrisi oluşturulur.

Tablo 3. Normalize Karar Matrisi

	Ö1	Ö2	Ö3	Ö4	Ö5	Ö6	Ö7	Ö8	Ö9	Ö10	Ö11	Ö12
K1	0,50	0,50	0,71	0,49	0,53	0,77	0,50	0,48	0,74	0,50	0,52	0,77
K2	0,49	0,52	0,34	0,51	0,43	0,30	0,50	0,51	0,33	0,50	0,45	0,30
K3	0,51	0,49	0,55	0,49	0,51	0,48	0,51	0,49	0,52	0,49	0,51	0,48
K4	0,50	0,49	0,28	0,50	0,52	0,29	0,50	0,52	0,28	0,50	0,52	0,29

Son olarak Denklem (3) uygulanarak her seçeneğin tüm kriterlere göre normalize değerleri hesaplanır. Çalışmada değerlendirilen ölçütlerin hepsi farklı ölçeklerde enerji tüketim değerlerinden tuğu için, tüm ölçütler minimize edilmek istenmektedir. Bu nedenle Denklem 4’te tüm ölçüt değerleri çıkartma işlemine tabi tutularak y_i^* değeri bulunur.

$$y_i^* = -x_{i_{Tahrik_enerjisi}} - x_{i_{motor_kayıpları}} - x_{i_{inverter_kayıpları}} \quad (4)$$

Son olarak bulunan değerler Tablo 4’te verilen uygunluk sırasına konur. Yöntem sonucunda bulunan uygunluk sırasına göre en iyi performansı toplamda en düşük enerji tüketim değerine sahip olan SiC-2G anahtarı göstermiştir. SiC-4G anahtarı 2. Sıradaki en uygun anahtar olma performansı gösterirken en düşük performansı IGBT anahtarı vermiştir.

Tablo 4. Karar Seçeneklerinin Uygunluk Sırası

Karar Seçenekleri	y_i^*	Uygunluk Sırası
IGBT	-7,0185	4
SiC-2G	-5,1799	1
SiC-3G	-6,0343	3
SiC-4G	-5,1839	2

4. Sonuç

Bu çalışmada, elektrikli araçlarda tahrik inverterlerinde kullanılacak en uygun yarı-iletken anahtarın belirlenmesi amacıyla MOORA (Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon) yöntemi kullanılmıştır. Elektrikli araçların menzil performansı, enerji verimliliği yüksek güç elektroniği bileşenlerinin seçimi ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda inverter sisteminde kullanılan yarı-iletken anahtarların enerji tüketimi, motor kayıpları ve inverter kayıpları açısından performansları değerlendirilmiştir.

Çalışmada IGBT, SiC-MOSFET-2G, SiC-MOSFET-3G ve SiC-MOSFET-4G olmak üzere dört farklı yarı-iletken seçeneği analiz edilmiştir. Uygulanan MOORA yöntemi sonucunda, tüm araç modellerinde elde edilen ölçümler doğrultusunda en düşük toplam enerji tüketim değerini SiC-MOSFET-2G vermiştir ve en uygun seçenek olarak belirlenmiştir. SiC-MOSFET-4G ikinci sırada yer alırken, geleneksel bir teknoloji olan IGBT en düşük performansı göstermiştir.

Bu sonuçlar, SiC tabanlı yarı-iletkenlerin tahrik inverter uygulamalarında sağladığı düşük kayıplar ve yüksek verimlilik ile elektrikli araçların menzilin artırılmasında önemli katkılar sunduğunu göstermektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalar ile farklı sürüş koşulları ve sıcaklık aralıklarında bu elemanların performans analizleri gerçekleştirilerek seçim sürecine daha fazla kriter dahil edilebilir. Böylece elektrikli araçlarda hem enerji tasarrufu sağlanabilir hem de daha sürdürülebilir bir ulaşım altyapısı oluşturulabilir.

Kaynakça

- [1] Ari, Y. O. (2020). *Küresel Elektrikli Otomobil Piyasasına Genel Bakış. Kırklareli Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 4 (2), 193-203.
- [2] Kocabey, S. (2018). Elektrikli otomobillerin dünü, bugünü ve geleceği. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 1(1), 16-23.
- [3] Vijayagopal, R., Gallagher, K., Lee, D., & Rousseau, A. (2016). *Comparing the powertrain energy densities of electric and gasoline vehicles (SAE Technical Paper 2016-01-0903)*.
- [4] Chandran, D., & Joshi, M. (2016). Electric vehicles and driving range extension-a literature review. *Advances in Automobile Engineering*, 2(5), 1-10.
- [5] Kavi, A. (2022). A Review on Electric Vehicle Powertrain System Components and the Challenges Involved in their Large-Scale Introduction.
- [6] Odion, N., & Jimu, H. Comparative Analysis of Silicon Carbide (SiC) MOSFETs and Silicon IGBTs in Electric Vehicles.
- [7] Cai, W., Wu, X., Zhou, M., Liang, Y., & Wang, Y. (2021). *Review and development of electric motor systems and electric powertrains for new energy vehicles. Automot Innov* 4 (1): 3–22.
- [8] Alam, M., Kumar, K., & Dutta, V. (2019). Comparative efficiency analysis for silicon, silicon carbide MOSFETs and IGBT device for DC–DC boost converter. *SN Applied Sciences*, 1, 1-11.
- [9] Sambhavi, Y. V., & Ramachandran, V. (2023). A technical review of modern traction inverter systems used in electric vehicle application. *Energy Reports*, 10, 3882-3907.
- [10] Brauers, W. K., & Zavadskas, E. K. (2006). The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. *Control and cybernetics*, 35(2), 445-469.
- [11] Umegami, H., Harada, T., & Nakahara, K. (2023). Performance Comparison of Si IGBT and SiC MOSFET Power Module Driving IPMSM or IM under WLTC. *World Electric Vehicle Journal*, 14(4), 112.

