

REVIEW ARTICLE / DERLEME MAKALESİ

Elektrik Makinelerinde Hairpin Sargı Teknolojileri ve Uygulamaları

Hairpin Winding Technologies and Applications in Electrical Machines

Mustafa Caner AKÜNER 

Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, elektrik makinelerinde son yıllarda yaygınlaşan hairpin (dik-dörtgen iletkenli) sargı teknolojisi çok boyutlu olarak ele alınmıştır. Çalışma; hairpin sargının temel prensiplerini, geleneksel yuvarlak kesitli tel sargılarla farklarını, elektromanyetik ve termal davranışını, üretim süreçlerini, yalıtım ve güvenilirlik konularını ve başlıca uygulama alanlarını kapsamaktadır. Özellikle elektrikli araç tahrik motorlarında önemli bir parametre olan oluk doluluk oranı, güç yoğunluğu, AC kayıpları, NVH (gürültü-titreşim-sertlik) etkileri, maliyet ve seri üretime yakınlığı arasındaki tasarım kısımları ele alınmıştır. Ayrıca literatürdeki güncel yaklaşımlar doğrultusunda çok fizikli modelleme, gelişmiş malzemeler, bağlantı (kaynak/brazing) kalitesi değerlendirilmiştir [1-4,9,10].

Anahtar Kelimeler: Hairpin sargı, elektrik makinesi, AC bakır kayıpları, doluluk oranı, elektrikli araç, üretim teknolojisi.

Abstract

This study comprehensively examines hairpin (rectangular conductor) winding technology, which has become widespread in electrical machines in recent years. The study covers the basic principles of hairpin winding, its differences from traditional round wire windings, its electromagnetic and thermal behavior, manufacturing processes, insulation and reliability issues, and its main application areas. In particular, the design aspects concerning slot filling ratio, power density, AC losses, NVH (noise-vibration-harshness) effects, cost, and suitability for mass production—all important parameters in electric vehicle drive motors—are addressed. Furthermore, in line with current approaches in the literature, multi-physics modeling, advanced materials, and connection (welding/brazing) quality are evaluated [1-4,9,10].

Keywords: Hairpin winding, electrical machinery, AC copper losses, filling level, electric vehicle, manufacturing technology.

I. GİRİŞ

Elektrifikasyon, enerji verimliliği ve yüksek güç yoğunluğu gereksinimleri, elektrik makinelerinde sargı teknolojilerinin yeniden değerlendirilmesine neden olmuştur. Bu dönüşümde hairpin sargı yapıları, özellikle orta ve yüksek güçlü senkron makinelerde öne çıkmaktadır. Hairpin sargı yaklaşımında, yuvaya yerleştirilen iletkenler çoğunlukla dikdörtgen kesitli bakır çubuklardan oluşmaktadır.

Geleneksel sarımlı yuvarlak tel sargılara kıyasla hairpin sargılar daha yüksek slot doluluk oranı, daha iyi üretim tekrarlanabilirliği ve otomasyona uygunluk gibi avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte yüksek frekans etkilerinden kaynaklanan artan AC kayıpları, uç bağlantı geometrilerinin karmaşıklığı ve birleşim noktalarındaki güvenilirlik sorunları önemli tasarım zorlukları olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada, hairpin sargı teknolojilerinin temel ilkelerini sistematik biçimde özetlemek ve uygulama perspektifinden kritik mühendislik yaklaşımları ele alınmıştır [1,2,7].

II. HAİRPİN SARGILARIN TEMEL YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Hairpin sargı, önceden şekillendirilmiş dikdörtgen iletkenlerin stator oluklarına yerleştirilmesi, uç bölgede geometrik olarak şekillendirilmesi ve faz bağlantılarının kaynak ile tamamlanması esasına dayanır. Bu yaklaşım, klasik yuvarlak tel sargılara göre daha kontrollü bir geometri sunduğu için özellikle elektrikli araç motorlarında yaygınlaşmıştır [1,3,4].

Geometrik ve elektriksel yapı olarak ele alındığında; Hairpin sargıda tek bir iletken parçası genellikle “U” formunda hazırlanır ve oluk içine iki aktif iletken kenarı gelecek şekilde yerleştirilir. Birden fazla hairpin eleman, uç bölgede faz dizilimine göre birleştirilerek seri/paralel kol yapısı oluşturmaktadır. Bu tasarımda kritik tasarım değişkenleri şunlardır:

- İletken kesiti (genişlik–yükseklik): DC direnç, AC kayıp eğilimi ve bükülebilirlik üzerinde doğrudan etkilidir.
- Oluk içi katman sayısı: Manyetik alan dağılımı ve yakınlık etkisinin iletkenler arasında nasıl paylaşıldığını belirler.
- Slot doluluk oranı: Bakır kullanımını artırırken yalıtım ve montaj toleransı penceresini daraltabilir.
- Uç sargı uzunluğu: Hem bakır kayıpları hem de uç bölge mekanik rijitliği açısından kritik bir parametredir.



Şekil 1 Hair Pin iletken detayı

Elektriksel açıdan hairpin topolojisinde faz direnci yalnızca iletken uzunluğuna değil, eklem noktalarındaki kaynak kalitesine de bağlıdır. Bu nedenle tasarım ve üretim birlikte değerlendirilmelidir.

Akım dağılımı ve frekans etkileri. Hairpin sargıda dikdörtgen iletken kalınlığı arttıkça cilt ve yakınlık etkileri daha belirgin hale gelir. Temel frekansta kabul edilebilir olan bir tasarım, PWM harmonikleri altında ek AC kayıplar üretebilir [5,6]. Bu nedenle pratikte:

- İletken kalınlığı ve katman yerleşimi,
- İnverter anahtarlama frekansı,
- Slot harmonikleri ve alan zayıflatma çalışma noktaları

Burada yukarıda verilen temel parametreler birlikte değerlendirildiğinde; yüksek tork yoğunluğunu korurken etkin AC direnç artışını sınırlandırmaktır. Çalışma prensibinin sistem seviyesinde yorumu: Sistem perspektifinden hairpin sargı, “yüksek doluluk oranı + yüksek üretim tekrarlanabilirliği” avantajı sunarken, “harmonik kaynaklı AC kayıplar + uç bağlantı karmaşıklığı” maliyetini beraberinde getirir. Bu nedenle en başarılı tasarımlar;

elektromanyetik, termal, mekanik ve üretim kısıtlarını aynı optimizasyon döngüsünde ele alan, çok fiziksel yaklaşımla geliştirilen tasarımlardır [1,3,7].

III. GELENEKSEL SARGILARLA KARŞILAŞTIRMA

Hairpin ve geleneksel yuvarlak tel sargı yaklaşımları arasındaki fark yalnızca iletken geometrisi değildir; elektromanyetik performans, üretim zinciri, kalite güvence stratejisi ve yaşam döngüsü maliyeti birlikte değişir [2,3,7]. Bu nedenle karşılaştırma tek bir metrikle değil, çok boyutlu yapılmalıdır.

Elektromanyetik performans karşılaştırması: Hairpin yapıda slot doluluk oranının artması genellikle DC dirençte düşüşe ve aynı hacimde daha yüksek tork yoğunluğuna olanak verir. Buna karşılık dikdörtgen iletkenlerin kalınlığı nedeniyle AC direnç değişimi, özellikle yüksek hız ve yüksek anahtarlama frekansı bölgelerinde daha belirgin olabilir [5,6].

Geleneksel çok telli yapılarda akım dağılımı çoğu durumda daha homojen kalırken, hairpin topolojisinde katmanlar arası alan maruziyeti farklılaştığı için kayıp dağılımı düzgün değildir. Dolayısıyla düşük frekans odaklı uygulamalarda hairpin avantajı daha belirgin, geniş frekans aralıklı sürüşlerde ise optimizasyon ihtiyacı daha yüksektir. Termal davranış ve soğutma etkisi: Hairpin sargılar yüksek bakır doluluğu sayesinde ohmik kayıpları azaltabilir; ancak ısı üretimi uç bağlantılar ve iç katmanlarda yerel sıcak nokta oluşturabilir. Yuvarlak tel tabanlı sargılarda termal yayılım bazı durumlarda daha dengeli olabilir. Bu nedenle karşılaştırmada yalnızca ortalama sargı sıcaklığı değil, maksimum lokal sıcaklık da izlenmelidir.

Pratikte hairpin tasarımlar, gelişmiş yağ püskürtme ve stator gövde soğutma tasarımları ile birlikte kullanıldığında termal açıdan güçlü sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte ortaya çıkan durum sistem düzeyi soğutma karmaşıklığını artırabilir.

Genel olarak, hairpin ve geleneksel sargı birlikte değerlendirildiğinde; doğru tercih; performans hedefleri, üretim ölçeği, güvenilirlik beklentisi ve maliyet sınırlarının birlikte optimize edilmesiyle belirlenebilir [1,2,4].

IV. ELEKTROMANYETİK TASARIM BOYUTU

Hairpin sargılı makinelerde elektromanyetik tasarımın temel amacı; yüksek tork yoğunluğu, yüksek verim ve geniş çalışma zarfında kontrol edilebilir kayıp üretimi arasında dengeli bir çözüm elde etmektir.

Temel tasarım hedefleri ve kısıtlar: Elektromanyetik tasarım sürecinde aşağıdaki hedefler eşzamanlı değerlendirilir:

- Yüksek sürekli ve tepe tork: Aktif bakır oranı ve hava aralığı akı yoğunluğu birlikte optimize edilir.
- Yüksek verim haritası: Sadece nominal noktada değil, sürüş çevrimindeki geniş hız-tork alanında kayıplar minimize edilir.
- Harmonik yönetimi: Slot, uzay ve zaman harmoniklerinin bakır ve nüve kayıplarına etkisi sınırlandırılır.
- NVH uyumu: Elektromanyetik kuvvet harmonikleri kabul edilebilir akustik seviyede tutulur.



Şekil 2 Geleneksel sargı yapısı

Bu hedefler çoğu zaman birbiriyle çelişir. Örneğin iletken kesitini büyütmek DC kaybı azaltırken AC kaybı artırabilir; dolayısıyla tek noktaya değil tüm sürüş zarfına göre optimizasyon gereklidir.

AC bakır kayıpları ve frekans bağımlı direnç: Yüksek elektriksel frekanslarda cilt derinliği azalır ve akım iletken kesitinde homojen dağılmaz. Hairpin iletkenlerde dikdörtgen kesitin kalın eksen boyuncu bu etki daha keskin görülebilir [5,6]. Bu parametreler sonucunda etkin faz direnci frekansla artar ve özellikle yüksek hız bölgelerinde bakır kaybı beklenenden daha fazla yükselir.

Tasarım pratiğinde AC kayıpları yalnızca temel frekans için değil, inverter kaynaklı harmonik spektrumla birlikte hesaplanmalıdır. Bu kapsamda: Katman bazlı iletken konumlandırma, iletken kalınlığının sınırlandırılması, saçılmış alanın yüksek olduğu slot bölgelerinde geometri iyileştirmesi yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir. PWM harmonikleri ve inverter-motor etkileşimi: Hairpin sargılı tahrik sistemlerinde kayıpların önemli bir kısmı motor tek başına değil, inverter ile birlikte çalışan sistem davranışı tarafından belirlenir. PWM anahtarlama frekansı, modülasyon stratejisi ve akım dalga şekli; faz akımındaki harmonik bileşenleri değiştirerek AC kayıpları ve lokal ısınmayı etkiler.

Bu nedenle yalnızca makine modeline dayalı analiz yeterli değildir. Doğru yaklaşım olarak; elektromanyetik modelin sürücü modeliyle birlikte çözüldüğü ortak simülasyon akışlarıdır. Literatürde bu yaklaşımın özellikle EV çekiş çevrimlerinde daha doğru kayıp tahmini sağladığı gösterilmektedir [1,3,6].

Oluk/kutup kombinasyonu ve sargı yerleşimi: Hairpin sargıda oluk/kutup seçimi, oluk başına iletken sayısı ve faz dağılımı; tork üretimi kadar harmonik üzerinde de önemli bir belirleyicidir. Uygun olmayan kombinasyonlar moment dalgalanmasını artırabilir. Bu durum ek demir ve bakır kayıpları oluşturabilir.

Tasarımcı açısından kritik nokta, yüksek doluluk oranı hedeflenirken elektromanyetik simetrisinin bozulmamasıdır. Bu nedenle pratikte: Sargı adımı, slot açılış geometrisi, katmanlar arası faz sıralaması birlikte değerlendirilebilir.

Tork dalgalanması, kuvvet harmonikleri ve NVH: Sargı dağılımı ve harmonik akım bileşenleri, radyal elektromanyetik kuvvet dalgalarını doğrudan etkiler. Bu kuvvetler stator dişleri ve gövde üzerinden yapısal olarak etki yaparak iletilebilir gürültüye dönüşebilir. Hairpin tasarımlarda uç bölge asimetrisi de faz dengesini etkileyerek bu probleme artırabilir.

Bu nedenle NVH performansı için yalnızca ortalama tork değil, tork ripple seviyesi ve baskın kuvvet harmonikleri de tasarım dikkate alınmalıdır. Özellikle otomotiv uygulamalarında bu konu, sürüş konforu açısından kritik kabul edilir [3,4,10].

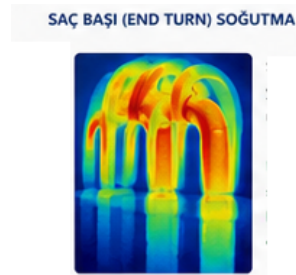
V. TERMAL YÖNETİM VE SOĞUTMA

Hairpin sargılı makinelerde yüksek güç yoğunluğu, termal tasarımı elektromanyetik tasarım kadar kritik bir mühendislik problemi haline getirmektedir. Özellikle EV çekiş motorlarında verim, ömür ve güvenilirlik performansı çoğu zaman maksimum sıcaklık tarafından sınırlandırıldığı için ısı üretimi ve ısı tahliyesi birlikte optimize edilmelidir [1,3,4].

Isı kaynakları ve termal ağ perspektifi. Hairpin yapıda ısı kaynakları temel olarak üç grupta toplanır:

- İletkenlerde DC+AC bakır kayıpları,
 - Stator/rotor çekirdek kayıpları,
 - Birleşim bölgelerindeki lokal kaynak kayıpları.
- Termal analizde bu kaynaklar eşdeğer bir termal direnç ağı üzerinden şu yol ile değerlendirilir:

Sargı → yalıtım katmanı → stator dişi/gövde → soğutucu akışkan.



Şekil 3

Bu yol üzerindeki en yüksek ısı direnç çoğu durumda yalıtım ile temas arayüzlerinde oluşur.

Dolayısıyla yalnızca soğutma debisini artırmak yerine, arayüz ısıl temas kalitesini iyileştirmek daha etkili olabilir.

Sargı-nüve arayüzü ve emdirmе kalitesi: Hairpin sargıda slot doluluk oranı yüksek olsa da mikro hava boşlukları ve yetersiz emdirmе reçinesi nedeniyle etkin ısıl iletim düşebilir. Bu nedenle üretim aşamasında; reçine viskozitesi ve vakum-basınç emdirmе parametreleri, slot liner kalınlığı ve yüzey teması, montaj sonrası boşluk oranı termal performans üzerinde doğrudan belirleyicidir. İyi bir emdirmе kalitesi, sıcak nokta oluşumunu azaltarak özellikle iç katman iletkenlerinin çalışma sıcaklığını düşürür.

Uç sargı termal yönetimi: Hairpin tasarımıda uç bölge, elektromanyetik olarak aktif olmasa da ciddi bakır kaybı ve kaynak kaybı içerebildiğinden termal açıdan kritik bir bölgedir. Uç sargıların yoğun şekilde paketlenmesi doğal konveksiyonla soğutmayı zorlaştırabilir. Bu nedenle uygulamada aşağıdaki yaklaşımlar öne çıkar:

- Yağ püskürtmeli soğutma: Uç bölgeye doğrudan ısı çekişi sağlar.
- Kanal yönlendirmeli soğutma: Akışın sıcak noktalara odaklanmasını mümkün kılar.
- Kaynak bölgesi optimizasyonu: Hem elektriksel kaybı hem lokal ısınmayı azaltır.

Bu çözümler, sistem düzeyinde pompa gücü ve akışkan yönetimi maliyetini artırabileceğinden termal kazanç ile yardımcı güç tüketimi birlikte değerlendirilmelidir.

Sıcak nokta mekanizmaları ve ömür etkisi. Hairpin makinelerde maksimum sıcaklık çoğu zaman ortalama sargı sıcaklığından anlamlı düzeyde daha yüksektir. Kritik sıcak nokta bölgeleri genellikle: iç katman iletkenleri, uç bölge kaynak bağlantıları, yüksek harmonik akım yoğunlaşması görülen slot bölgeleri olarak gözlenir. Bu noktalarda tekrarlı termal çevrimler, yalıtım yaşlanmasını hızlandırarak ömür kısalmasına neden olur. Dolayısıyla termal tasarımıda hedef, yalnızca ortalama sıcaklığı düşürmek değil, maksimum sıcaklığı ve sıcaklık gradyentini sınırlandırmaktır.

VI. UYGULAMA ALANLARI

Elektrikli araç motorları: Hairpin sargının en yaygın kullanım alanı otomotiv çekiş uygulamalarıdır [3,4,8]. Bu alanda temel gereksinimler; geniş hız-tork zarfında yüksek verim, sınırlı paket hacminde yüksek güç/tork yoğunluğu ve yüksek adetli üretime uygunluk olarak özetlenebilir.

EV çekiş sistemlerinde hairpin kullanımını öne çıkaran başlıca nedenler şunlardır:

- Yüksek slot doluluk oranı: Aynı stator hacminde daha fazla aktif bakır ve yüksek sürekli tork kapasitesi.
- Otomasyon uyumu: Üretim tekrarlanabilirliğinin artması ve kalite dağılımının daralması.

- Paketleme avantajı: Kompakt e-aks mimarileri ile uyumlu stator tasarımı.

Buna karşın EV uygulamalarında yüksek anahtarlama frekansı ve harmonik içerik nedeniyle AC kayıp yönetimi, uç bölge sıcak nokta kontrolü ve kaynak güvenilirliği kritik risk alanlarıdır. Bu nedenle başarılı tasarımlar, inverter kontrol stratejisi ile makine tasarımının eşzamanlı optimize edildiği sistem yaklaşımına dayanır.

Hibrit araçlar ve entegre güç aktarma sistemleri: Hibrit güç aktarma mimarilerinde motorlar sık dur kalk, geniş yük geçişleri ve değişken görev döngülerinde çalışır. Hairpin sargı bu tür çevrimlerde yüksek tepe güç gereksinimini destekleyebilir; ancak tekrarlı termal çevrim nedeniyle bağlantı bölgelerinde yorulma davranışı özenle yönetilmelidir.

Endüstriyel sürücü sistemleri: Orta ve yüksek güç sınıfındaki endüstriyel sürücülerde hairpin yaklaşımı, enerji verimliliği ve yüksek güç yoğunluğu hedefleri açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu durum özellikle pompa, kompresör, fan ve proses sürücüler gibi sürekli çalışma profiline sahip uygulamalarda düşük ohmik kayıp ve kararlı termal işletim avantajı sağlar.

Bununla birlikte endüstriyel pazarda toplam sahip olma maliyeti (TCO), bakım kolaylığı ve saha servis edilebilirliği güçlü karar kriterleridir. Bu nedenle hairpin seçimi yapılırken ilk yatırım maliyeti ile yaşam döngüsü enerji tasarrufu birlikte analiz edilmelidir.

Ağır hizmet, ticari araç ve iş makinesi uygulamaları. Otobüs, kamyon, inşaat ve tarım makineleri gibi ağır hizmet uygulamalarında görev profili yüksek moment, uzun süreli yüklenme ve zorlu çevresel koşullar içerir. Hairpin sargı, yüksek sürekli tork gereksinimini karşılamada güçlü bir adaydır; ancak toz, titreşim ve geniş sıcaklık aralığı gibi etkenler güvenilirlik doğrulamasını zorlaştırır.

Havacılık ve özel mobilite platformları: Havacılık, eVTOL ve benzeri özel mobilite alanlarında özgül güç (kW/kg) ve emniyet gereksinimleri çok yüksektir. Hairpin yaklaşımı yüksek bakır doluluğu ile avantaj sağlayabilse de ağırlık ve yedeklilik gereksinimleri nedeniyle her zaman doğrudan tercih edilmez.

Bu uygulamalarda kritik belirleyiciler:

- Çok-fizikli optimizasyon ile kütle minimizasyonu,
- Arıza toleranslı mimari gereksinimler,
- Sertifikasyon odaklı doğrulama süreçleri olarak öne çıkabilmektedir [1,2,10].

VII. SONUÇLAR

Çalışmada, hairpin sargı teknolojisinin elektrik makinelerinde sunduğu potansiyeli elektromanyetik, termal, üretimsel ve güvenilirlik boyutlarını birlikte ele alarak değerlendirmiştir. Elde edilen genel çerçeve, hairpin yaklaşımının

özellikle yüksek güç yoğunluğu ve seri üretim tekrarlanabilirliği gerektiren uygulamalarda önemli olduğunu göstermektedir [1,3,4].

Bu çalışma kapsamında öne çıkan temel bulgular aşağıda verilmiştir:

- Motor performansına katkısı: Yüksek slot doluluk oranı sayesinde DC bakır kayıpları düşürülebilmekte ve kompakt hacimde yüksek tork yoğunluğu elde edilebilmektedir.
- Kritik teknik sınırlar: Yüksek frekans ve harmonik içerikli işletimde AC kayıpları, hairpin tasarımının en kritik kısıtlarından birini oluşturmaktadır.
- Termal-güvenilirlik bağı: Uç bağlantı bölgeleri ve iç katman iletkenlerde oluşan sıcak noktalar, yalıtım ömrü ve kaynak dayanımı ile doğrudan ilişkilidir.
- Motor seri üretim belirleyiciliği: Hairpin çözümlerde nihai performans yalnızca elektromanyetik tasarımıyla değil, proses toleransları ve kalite güvence altyapısıyla belirlenmektedir.

Bu bulgular, hairpin teknolojisinin “tek başına daha iyi” bir çözüm değil, uygulama bağlamında doğru şekilde optimize edildiğinde üstünlük sağlayan bir yaklaşım olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle; hairpin başarısı, makine tasarımı, inverter kontrolü, soğutma mimarisi ve üretim süreçlerinin entegre ele alınmasına bağlıdır.

Bununla birlikte literatürde halen geliştirilmeye açık alanlar bulunmaktadır. Özellikle farklı üreticiler arasında karşılaştırılabilirliği artıracak standart test protokollerinin sınırlı olması, güvenilirlik verilerinin çoğu zaman kurumsal sınırlar içinde kalması ve uzun dönem saha verilerinin açık erişimde az bulunması, bilgi birikiminin genellenmesini zorlaştırmaktadır.

Genel olarak hairpin sargı teknolojisi, elektrikli ulaşım ve yüksek verimli tahrik sistemlerinin geleceğinde merkezi bir rol oynama potansiyelinin yüksek olduğu görülmektedir. Ancak bu potansiyelin sürdürülebilir biçimde gerçekleştirilebilmesi; disiplinler arası tasarım yaklaşımı, güçlü proses kontrolü ve uzun dönem güvenilirlik odaklı mühendislik kültürü ile mümkündür. Bu nedenle akademi ve sanayi iş birliğinde geliştirilecek doğrulanabilir, karşılaştırılabilir ve ölçeklenebilir yöntemler, hairpin teknolojisinin bir sonraki gelişim aşamasını belirleyecektir.

KAYNAKLAR

- [1] S. Ghahfarokhi, A. Podgornov, C. Gerada ve M. Galea, “Analytical modelling and design optimisation of AC copper losses in high-performance hairpin-wound traction electric machines,” *Machines*, c. 10, sy. 7, s. 508, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/machines10070508>.
- [2] A. Hebala, C. Pastor, M. Hamiti ve C. Gerada, “A comprehensive review of electrical machine winding technology evolution and challenges,” *Machines*, c. 10, sy. 9, s. 731, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/machines10090731>.
- [3] A. Dianati, J. C. Widmer, B. Bilgin ve A. Emadi, “Hairpin winding in electric traction motors: A review,” *Energies*, c. 17, sy. 24, s. 6494, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/en17246494>.
- [4] J.Y. Hwang, S.-J. Kim, Y.-J. Kim ve J.-P. Hong, “A review of stator winding technologies of electric motors for electric vehicles,” *Journal of Electrical Engineering & Technology*, c. 20, sy. 2, s. 757–776, 2025, doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-024-02148-7>.
- [5] P. L. Dowell, “Effects of eddy currents in transformer windings,” *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, c. 113, sy. 8, s. 1387–1394, 1966, doi: <https://doi.org/10.1049/piee.1966.0236>.
- [6] J. A. Ferreira, “Improved analytical modeling of conductive losses in magnetic components,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 9, sy. 1, s. 127–131, 1994, doi: <https://doi.org/10.1109/63.285500>.
- [7] J. Pyrhönen, T. Jokinen ve V. Hrabovcová, *Design of Rotating Electrical Machines*, 2. bs. Chichester, U.K.: Wiley, 2014.
- [8] Y. Li ve L. Parsa, “Design and analysis considerations for EV traction motors with hairpin winding,” *SAE Technical Paper 2018-01-0438*, 2018, doi: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0438>.
- [9] J. Zhang, B. Bilgin ve A. Emadi, “Investigation of AC loss reduction techniques in hairpin winding traction machines,” *SAE Technical Paper 2020-01-1204*, 2020, doi: <https://doi.org/10.4271/2020-01-1204>.
- [10] A. M. El-Refaie, “Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machines: Opportunities and challenges,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 57, sy. 1, s. 107–121, 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2030210>.