

Üç Fazlı Sincap Kafesli Asenkron Motorda Verim Analizi

Efficiency Analysis in Three Phase Squirrel Cage Induction Motor

Osman Can SOYGENCİ, Alper TAP, Lale T. ERGENE

Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Elektronik Fakültesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
soygenc@itu.edu.tr, tap@itu.edu.tr, ergenel@itu.edu.tr

Özet

Asenkron motorlar endüstrinin birçok alanında yaygın kullanıma sahip ve üretilen elektrik enerjisinin büyük kısmını tüketen elektrik makineleridir. Bu sebeple bu makinelerin verimi büyük önem teşkil etmektedir. Sincap kafesli asenkron motorlar ise üretim kolaylığı ve düşük maliyeti ile birlikte az bakım gerektirdiğinden asenkron motorların sık rastlanılan bir tipidir. Bu çalışmada üç fazlı sincap kafesli asenkron motorlarda verime etki eden bazı tasarım faktörleri sunulmuş ve bu faktörlerden rotor iletkenlerinin yapısı ve kullanılan iletken malzeme, rotorda ve statorda kullanılan manyetik malzeme, rotor uzunluğu ve stator oluk doluluk oranı incelenmiş ve bu faktörler üzerinde yapılan değişikliklerin verim üzerindeki etkisi sonlu elemanlar analizi sonuçları ile sunulmuştur.

Abstract

Induction machines are widely used in many industrial applications and contribute hugely to the consumption of electrical energy. For this reason, efficiency of these machines is important. Along with this, the squirrel cage induction machine is preferred because of its ease of manufacture, low cost and low maintenance needs. A number of factors affecting the efficiency of the three phase squirrel cage induction machines such as structure and material of the rotor conductors, type of core material used in stator and rotor, stack length of the rotor and the fill factor of the stator slots are studied and analysis results are presented.

1. Giriş

Günümüzde artan tüketim ihtiyaçlarına bağlı olarak, insanoğlunun elektrik tüketimi günden güne katlanarak artmaktadır. Bu talebe cevap verebilmek adına enerji kullanımı artmakta bu durum ise kaynakların hızlıca tükenmesine sebep olmaktadır. Gelişen teknoloji ile beraber enerjiyi daha verimli kullanan sistemler elde edilebilmektedir ancak, sadece yeni çözümler değil mevcut sistemlerin revize edilmesi şeklinde kullanımda olan makinelerin daha verimli kullanılması sağlanmalıdır.

Dünya genelinde üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık üçte ikisini asenkron motorlar tüketmektedir. [1] Türkiye’de ise Enerji Piyasası verilerine göre endüstriyel elektrik tüketiminin yüzde yetmişini, toplam tüketimin ise yüzde otuz altısını üç fazlı asenkron motor sistemleri oluşturmaktadır. [2] Sonuç

olarak asenkron motor sistemlerinin verimliliği enerji tüketimi açısından büyük bir önem arz etmektedir.

Bu çalışmada 4 kW gücünde bir üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi, ardından tasarım, geometri, manyetik ve iletken malzemelerin özelliklerinin değiştirilmesiyle elde edilen yeni tasarımların, sonlu elemanlar yöntemiyle analizinden elde edilen verimlilik davranışları ve sonuçlar anlatılmıştır.

Verim hesaplamasında Denklem (1)’deki ifade kullanılmıştır.

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{çıkış}} + P_{\text{cu}} + P_{\text{fe}} + P_{\text{hister}} + P_{\text{yatak}}} \quad (1)$$

Bu ifadede $P_{\text{çıkış}}$ motorun mil gücü, P_{cu} stator ve rotorun beraber iletken direncinden kaynaklı kayıplar, P_{fe} stator ve rotorun beraber manyetik malzemesindeki girdap akımları ve histerezis kayıpları, P_{hister} ise motorun hava aralığından ve mil yataklamasından kaynaklı mekanik kayıpları temsil etmektedir.

2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), elektrikten makineye birçok mühendislik disiplininde kullanılan, malzeme ve tasarım analizlerinin daha karmaşık yapılara uygulanarak yapıların sayısal çözümlerini ortaya çıkaran bir analiz yöntemidir. Elektrik makinelerinin sahip olduğu parametreleri, manyetik ve elektriksel analizleri diferansiyel denklemlerle daha doğru çözmek adına Flux2D bilgisayar programı kullanılarak SEY analizleri yapılmıştır.

3. Tasarımlar

Gelişmiş tasarımlar elde edebilmek adına 4 kW üç fazlı sincap kafesli asenkron motor öncelikle Flux2D bilgisayar programında modellenerek sonlu elemanlar yöntemiyle motor nominal test değerlerinin sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla tutarlılığı gözlenmiştir. Tutarlılık sağlandıktan sonra referans motora girişte bahsedilen alanlarda değişiklikler yapılarak verimlilik incelenmiştir.

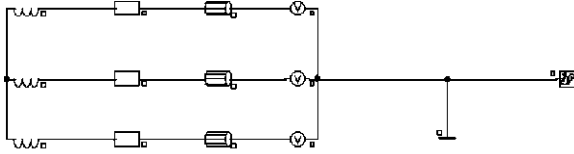
3.1. 4 kW Üç Faz Sincap Kafesli Asenkron Makinenin SEY Analizi

Motorun tasarımında analizler için Şekil 1’de gösterilen, sincap kafes, rotor barları ve stator sargıları ile gerilim kaynaklarını içeren elektrik devresi hazırlanmıştır.

Çizelge 1: Motor nominal değerleri

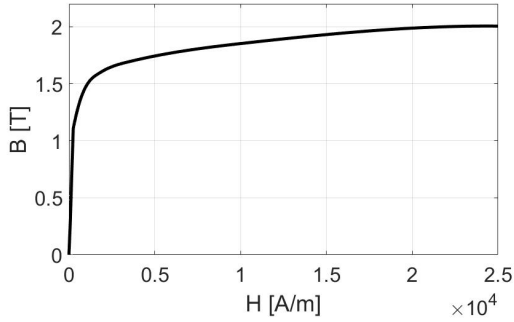
Motor Değeri	Değer	Birim
Anma Gücü	4	kW
Bağlantı Şekli	Yıldız	-
Anma Gerilimi	380	V
Anma Akımı	7,5	A
Anma Momenti	27	Nm
Anma Frekansı	50	Hz
Senkron Hız	1500	dev/dk
Anma Hızı	1450	dev/dk
Verim	85,6 %	-

Çizelge 1'de belirtilen motor değerlerine göre Flux2D'de motor modellenmiştir.



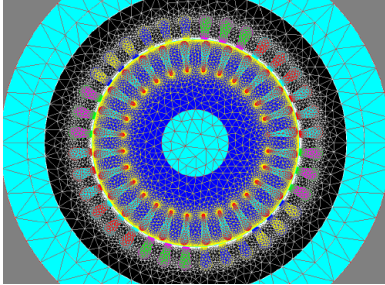
Şekil 1: Motor Elektrik Devresi

Motor malzemelerinde stator ve rotor iletken malzemesi olarak alüminyum ve manyetik malzeme için de Şekil 2'de manyetizasyon özellikleri verilen demir laminasyon sac malzemesi kullanılmıştır.



Şekil 2: Kullanılan manyetik malzemenin manyetizasyon eğrisi

Motor parametreleri ve motor malzemeleri, yukarıda verilen değerler ve özelliklere göre Flux 2D'de SEY analizi yapılmak üzere modellenmiştir.

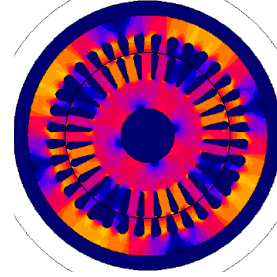


Şekil 3: Referans Motor SEY Tasarımı

Referans motor modeli Flux2D yazılımında motor parametrelerine uygun oluşturulduktan sonra, tasarıma SEY analizi uygulanarak referans motor sonuçları elde edilmiştir.

Çizelge 2: Referans Tasarım SEY Analiz Sonuçları

Parametre	Değer	Birim
Akım	6,8	A
Moment	27	Nm
Çıkış Gücü	4000	W
Kayma	0.026	-
Giriş Gücü	4650	W
Demir Kayıpları	130	W
Bakır Kayıpları	400	W



Şekil 4: Referans Motor Akı Yoğunluğu

Yapılan SEY analizine göre referans tasarım verim, akım, moment vb. sonuçlarının motorun anma değerleriyle örtüştüğü gösterilmiştir. Sonuçlara göre referans tasarımın verimi 86% olarak hesaplanmıştır. Referans tasarım sonuçları motor anma değerleriyle örtüştüğü için, farklı motor tasarımları hazırlanarak motorun verim analizi yapılmıştır.

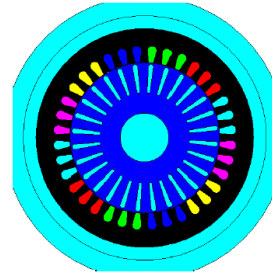
4. Verim Üzerine Etki Eden Faktörler

4.1. Rotor Tasarımının Verim Üzerine Etkisi

Asenkron motorlarda moment gerilimin karesine ve akım da gerilime direkt olarak bağlı olduğu için asenkron motorda gerilimi değiştirmek verimlilik kaybına sebep olabilir. Bu yüzden aynı gerilim altında farklı rotor tasarımları denenebilir. [3]

4.1.1. Derin Oluklu Tasarım

Önceki çalışmalara ve motor yapısı özelliklerine dayanarak motor oluk yapısının motor performans ve parametreleri üzerinde etkisi olduğu gösterilmiştir. Derin bir oluk yapısı kullanılarak, motor içindeki akı hareketinin yönü değişeceği için, oluk yapısının performans üzerindeki etkisi araştırılmıştır.



Şekil 5: Derin Oluklu Tasarım

Derin oluklu tasarım kullanılarak motorun SEY analizi aynı malzeme ve aynı elektrik devresi kullanılarak tamamlanmıştır.

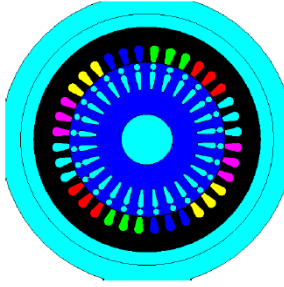
Oluk etkisinin gözlemlenebilmesi adına oluk hacmi aynı tutularak dirençlerin aynı kalması, dolayısıyla oluk şeklinin etkisinin ortaya çıkarılması sağlanmıştır. Bu tasarım sonuçları Çizelge 3'te görülebilir.

Çizelge 3: Derin Oluklu Tasarım SEY Analiz Sonuçları

Parametre	Değer	Birim
Akım	6,6	A
Moment	27	Nm
Çıkış Gücü	4000	W
Kayma	0.028	-
Giriş Gücü	4670	W
Demir Kayıpları	120	W
Bakır Kayıpları	400	W

4.1.2. Çift Oluklu Tasarım

Motor performansında motor oluk etkisinin ve deri etkisinin gözlemlenmesi adına rotor yüzeyinde daha yoğunluk yaratacak şekilde çift oluklu bir tasarım oluşturulmuştur. Çift oluklu tasarımda rotor oluk hacmi sabit tutularak oluk direncinin sabit kalması sağlanmış, ayrıca yüzeye daha yakın bir bölgede oluşturulan ikinci oluk sayesinde deri etkisinin ve akı yolu değişimlerinin motor performansına etkisi araştırılmıştır.



Şekil 6: Çift Oluklu Tasarım

Oluk değişiminin motor performansı üzerinde etkisinin gözlemlenebilmesi adına motor malzeme ve elektriksel devre parametreleri sabit tutularak çift oluklu tasarımın SEY analizi gerçekleştirilmiştir. Çift oluklu tasarıma ait sonuçlar Çizelge 4'te gösterilmiştir.

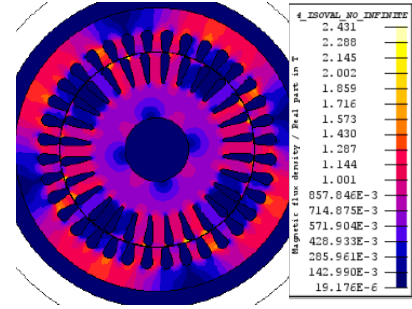
Çizelge 4: Çift Oluklu Tasarım SEY Analiz Sonuçları

Parametre	Değer	Birim
Akım	6,6	A
Moment	27	Nm
Çıkış Gücü	4000	W
Kayma	0.026	-
Giriş Gücü	4610	W
Demir Kayıpları	120	W
Bakır Kayıpları	410	W

4.1.3. Rotor Uzunluğu Artırılmış Tasarım

Rotor uzunluğu artırıldığında, rotordaki artışa bağlı olarak akı yoğunluğu ve hava aralığı akı yoğunluğu azalmaktadır. Bu azalmaya bağlı olarak motor performansındaki kayıplar azaltılabilmektedir. [4] Motor momenti paket boyuna, hava

aralığı akı yoğunluğuna ve akım yoğunluğuna bağlı olduğu için, rotor boyu değiştirilerek performans değişiklikleri elde edilebilir. Önceki çalışmalar referans alınarak rotor uzunluğunun artırılmasıyla farklı paket boyunda bir tasarım elde edilmiştir.



Şekil 7: Rotor Uzunluğu Artırılmış Tasarım Akı Yoğunluğu

Analiz sonucuna göre ortalama 1.5 T – 1.6 T olan referans motor akı yoğunluğunun 1.3 T - 1.4 T değerlerine gerilediği gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak elde edilen performans değerleri Çizelge 5'te belirtilmiştir.

Çizelge 5: Rotor Uzunluğu Artırılmış Tasarım SEY Analiz Sonuçları

Parametre	Değer	Birim
Akım	6,1	A
Moment	27	Nm
Çıkış Gücü	4000	W
Kayma	0.03	-
Giriş Gücü	4530	W
Demir Kayıpları	100	W
Bakır Kayıpları	340	W

4.2. İletken ve Manyetik Malzemenin Verim Üzerine Etkisi

Asenkron motor üretiminde genel olarak alüminyum doldurulmuş oluk ve stator sargılarında bakır tel kullanılmaktadır. Bu malzemeleri alternatifleri olan bakır dolgu, alüminyum iletken gibi malzemeler ile değiştirerek standartlara bağlı şekilde daha farklı performans çözümleri elde edilebilmektedir. [5]

4.2.1. Bakır Dolgulu Oluk Tasarımı

Literatürden de görülebileceği üzere rotor oluklarındaki iletken malzemeyi iletkenliği yüksek bir malzeme ile değiştirmek verim artışı elde edilmesini sağlar. [6] Bakır hammaddesi alüminyum ile kıyaslandığında daha az elektriksel direnç ve daha fazla iletkenlik sağlamaktadır. Rotorda kullanılan malzeme değişikliğinin performans üzerindeki etkilerini araştırmak adına rotor oluklarının bakırdan oluşturulduğu tasarım oluşturularak SEY analizi yapılmıştır.

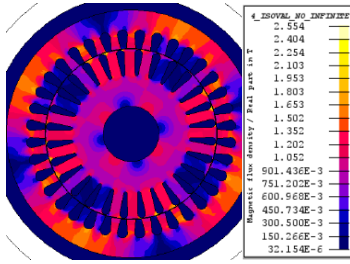
SEY analizi sonucunda bakır hammaddesinin sağladığı elektriksel iyileştirmelere bağlı olarak akı ve akım yoğunluğunda değişim elde edilmiştir. Bu değişimlerin motor performansına etkisi Çizelge 6'da gösterilmiştir.

Çizelge 6: Bakır Dolgulu Oluk Tasarımı SEY Analiz Sonuçları

Parametre	Değer	Birim
Akım	6,2	A
Moment	25.7	N.m
Çıkış Gücü	4000	W
Kayma	0.019	-
Giriş Gücü	4500	W
Demir Kayıpları	120	W
Bakır Kayıpları	350	W
Verim	%88.11	-

4.2.2. Laminasyon Malzemesi Değiştirilmiş Tasarım

Asenkron makinalarda, oluşan manyetik alanla beraber malzemedeki kayıpların azaltılabilmesi için stator ve rotor kısımlarında lamine çelik kullanılmaktadır. Kullanılan bu çekirdek malzemesinin makinenin manyetik davranışı üzerinde direkt etkisi olması sebebi ile malzeme değişikliği ile makinenin demir kayıplarında ve performansında iyileştirme yapılabilmektedir. Referans tasarımda kullanılan M600 çelik laminasyon malzemesi yeni tasarımda M270 malzemesiyle değiştirilerek, laminasyon malzemesinin etkisi araştırılmıştır.



Şekil 8: Laminasyon Malzemesi Değiştirilmiş Tasarım Akı Yoğunluğu

SEY analizi sonuçlarına göre daha verimli malzeme kullanılmasıyla makinenin akı yoğunluğunda azalma elde edilmiştir. SEY analiz sonuçları Çizelge 7'de gösterilmiştir.

Çizelge 7: Laminasyon Malzemesi Değiştirilmiş Tasarım SEY Analiz Sonuçları

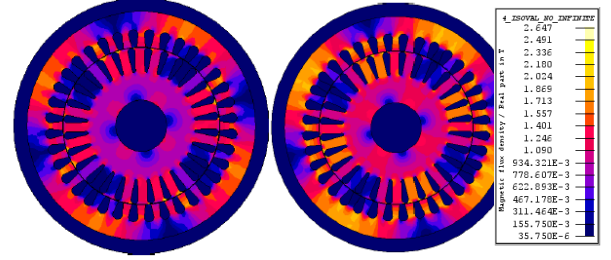
Parametre	Değer	Birim
Akım	6,8	A
Moment	27	N.m
Çıkış Gücü	4000	W
Kayma	0.024	-
Giriş Gücü	4610	W
Demir Kayıpları	90	W
Bakır Kayıpları	400	W

4.3. Stator Tasarımının Verim Üzerine Etkisi

4.3.1. Stator Doluluk Oranının Verime Etkisi

Asenkron motorda stator sargılarının sayısı ve stator oluk boşluğu arasındaki ilişki stator doluluk oranıyla açıklanabilir.

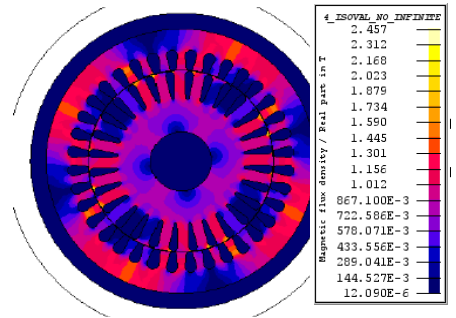
Bu oranın değişimine bağlı olarak stator laminasyonundaki farklı bölümlerde farklı manyetik akı miktarları ortaya çıkabilmekte, manyetik malzemede doymalar görülebilmektedir. Bu durumda makinede istenmeyen kayıplar ve performans düşüşleri gözlenebilmektedir. Yapılan SEY analizi sonucunda 0,45 ve 0,7 stator doluluk oranlı iki tasarım karşılaştırılmıştır, sonuçlara göre iki tasarımın manyetik akı yoğunluğu dağılımları Şekil 9'daki gibidir.



Şekil 9: Stator Doluluk Oranı 0.45(sol) ve 0.7(sağ) Olan Tasarımların Akı Yoğunluğu

4.4. Karma Tasarım

Önceki tasarımlardan elde edilen sonuçlar eşliğinde, verimi olabilecek en üst seviyeye çıkarmak için verime katkısı olan tasarımlar bir araya getirilerek karma bir tasarım elde edilmiştir. Karma tasarım, daha iyi laminasyon malzemesi, stator doluluk oranına ve rotoru uzunluğu artırılmış bir tasarıma sahiptir. Birçok değişiklik yapılarak daha az demir ve bakır kaybı ile daha düşük akım ve akı yoğunlukları ile aynı performans sonuçları elde edilmeye çalışılmıştır. SEY analizi sonuçlarına göre motor performans sonuçları Çizelge 8'de, motor akı yoğunluğu Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10: Karma Tasarım Akı Yoğunluğu

Çizelge 8: Karma Tasarım SEY Analiz Sonuçları

Parametre	Değer	Birim
Akım	6	A
Moment	26.5	N.m
Çıkış Gücü	4000	W
Kayma	0.021	-
Giriş Gücü	4460	W
Demir Kayıpları	90	W
Bakır Kayıpları	320	W

5. Sonuçlar

Referans tasarım ile yaratılan diğer tasarımların sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizleri motor verimliliği ve kayıplar yönünden karşılaştırılarak üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun verimlilik analizi yapılmıştır. SEY analizi sonuçlarına göre elde edilen veriler şu şekilde sıralanabilir;

- Rotor oluk yapısı üzerindeki değişiklikler direnç değerleri aynı kaldığı için aynı verimlilik aralığında sonuçlar ortaya çıkarmıştır ama deri etkisi vb. elektriksel olaylara müdahale edildiği için daha iyi başlangıç momenti ve başlangıç akımı elde edilmiştir.
- Rotorun uzunluğu artırılarak, akım yoğunluğu ve akı yoğunluğunda azalma elde edilmiş ve kayıpların azalması sebebiyle yaklaşık olarak 3% verim artışı elde edilmiştir.
- Bakır dolgulu rotor tasarımı daha iyi elektriksel özelliklere sahip olduğu için, verimlilik artışı elde edilmiştir. Ancak rotor oluk dolgu malzemesi seçilirken malzeme fiyatına ve malzemenin sıcaklık özelliklerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Çeşitli motor güçlerinde fiyat performans oranına dikkat edilerek verimliliği arttırmak için rotor oluk hammadde seçilebilir.
- Stator ve rotor laminasyon materyalini değiştirerek daha verimli tasarımlar elde edilmiştir. Daha iyi bir laminasyon malzemesinin kilogram başına enerji kaybı daha az olduğu için motor gücüne göre %1 oranında verim artışı elde edilmiştir.
- Karma tasarımda verimliliği artırıcı yönde bir çok değişiklik yapılarak %4.5 oranında verimlilik iyileşmesi sağlanmış ve motor verimi %90 seviyesine çıkarılmıştır. Bu sayede IE2 olan motor verimlilik seviyesinin IE3'ün sonlarına taşınabilir olduğu görülmüştür. [7]

Çizelge 9: Tüm Tasarımların SEY Analizi Verim Sonuçları

Tasarım	Verim
Referans Tasarım	85.63%
Derin Oluklu Tasarım	85.30%
Çift Oluklu Tasarım	86.15%
Rotor Uzunluğu Arttırılmış Tasarım	88.16%
Bakır Oluklu Tasarım	88.11%
Laminasyon Materyali Değiştirilmiş Tasarım	87.14%
Karma Tasarım	89.41%

6. Kaynaklar

- [1] I. Torac, "A few aspects concerning the squirrel cage induction motors efficiency improvement," Optimization of Electrical and Electronic

Equipment (OPTIM), 2012 13th International Conference on, Brasov, 2012, pp. 440-744.

- [2] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Enerji Verimliliği Eğitim-Etütü, *Url:* http://www.eie.gov.tr/verimlilik/document/Elektrik_Motorlari.pdf
- [3] Şal, S., Ergene L. T., (2010). *Analysis of the Rotor Bar Geometry's Effect on the Induction Motor Performance with Finite Element Method*, ELECO.
- [4] Alberti L., Bianchi N., Boglietti A., Cavagnino A., (2011). *Core Axial Lenghtening as Effective Solution to Improve the Induction Motor Efficiency Classes*, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.
- [5] Braun M., (1993). *Increasing the Efficiency of Induction Motors*, Chicago '93 EEIC/ICWA Exposition.
- [6] Kirtley J. L., Cowie J. G., Brush E. F., Peters D. T., Kimmich R., (2007). *Improving Induction Motor Efficiency with Die-cast Copper Rotor Cages*, Power Engineering Society General Meeting.
- [7] *Technical Note IEC 60034-30 standard on efficiency classes for low voltage AC motors*, (2009), www.abb.com/motors&generators